

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

NATÁLIA MARTINS BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS
PRODUZIDOS COM CIMENTOS À BASE DE CALCÁRIO E ARGILA
CALCINADA**

JOINVILLE
2026

NATÁLIA MARTINS BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS
PRODUZIDOS COM CIMENTOS À BASE DE CALCÁRIO E ARGILA
CALCINADA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas - CCT da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo de Matos.

**JOINVILLE
2026**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Bezerra, Natália Martins

Desenvolvimento de concretos para pavimentos rígidos produzidos com cimentos à base de calcário e argila calcinada. / Natália Martins Bezerra. -- 2026.

74 p.

Orientador: Paulo Ricardo de Matos

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2026.

1. LC3. 2. Concreto. 3. Pavimento rígido. I. Matos, Paulo Ricardo de. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

NATÁLIA MARTINS BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS
PRODUZIDOS COM CIMENTOS À BASE DE CALCÁRIO E ARGILA
CALCINADA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas - CCT da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo de Matos.

BANCA EXAMINADORA

Presidente/orientador

Dr. Paulo Ricardo de Matos
UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros

Dr^a. Laura Silvestro
UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rafael Dors Sakata
UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joinville, 27 de fevereiro de 2026.

AGRADECIMENTOS

Sou grata a Deus por ter chegado ao final de mais uma etapa acadêmica; mesmo que eu conhecesse todos os mistérios e ciências, sem fé e sem amor, eu nada seria.

Agradeço à minha mãe Francielle, e ao meu pai Edson, por incentivarem, apoiarem e financiarem minha trajetória acadêmica desde a infância. Cada conquista minha também é de vocês, minha herança mais preciosa é o conhecimento.

Sou grata ao meu companheiro Patrick, por todo o incentivo, amor e força ao longo da pós-graduação. Agradeço por me oferecer suporte nos momentos em que o caminho parecia árduo e por sempre acreditar no meu potencial.

Agradeço à Patrícia Becker, por ser a amiga que eu precisava durante este processo, por todas as conversas, risadas, estudos em dupla e conselhos. Levo você no coração. Agradeço a Samara Nazário, por todas as tardes no laboratório me auxiliando com paciência e dedicação, você é luz.

Sou grata ao meu orientador, Dr. Paulo Ricardo de Matos por toda a paciência dedicada a mim e a este estudo, também por todo conhecimento compartilhado e pelas orientações ao longo da pesquisa. Agradeço ao Núcleo de Inovação em Materiais e Manufatura Avançada - NIMMA por cada momento de trabalho e descontração, guardo todos com carinho. Não poderia deixar de agradecer a Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC por sua infraestrutura e corpo docente. Para sempre, serão lembrados.

Também gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina - FAPESC, por tornar possível minha dedicação ao mestrado por meio da bolsa de estudos; sem esse suporte, não teria chegado aqui. Agradeço ao CNPq por financiar o projeto “Desenvolvimento de pavimentos rígidos sustentáveis produzidos com cimentos à base de calcário e argila calcinada, visando o melhoramento da infraestrutura rodoviária brasileira” (405537/2022-0), na Chamada CNPq/FNDCT/MCTI 15/2022, e a empresa Circlua S.A. pelo fornecimento da argila calcinada.

Ao prof. Dr. Ronaldo Pilar, seu grupo de pesquisa e a Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, agradeço por toda dedicação e tempo empregados em auxílio a esta pesquisa, certamente impactaram positivamente o trabalho final.

Por fim, agradeço a todos que não foram citados e que colaboraram direta ou indiretamente. Cada um foi uma peça única para a realização deste estudo e para que eu chegasse até aqui, sozinha eu não conseguiria.

Muito obrigada!

“A sabedoria não vem do acerto, mas do
aprendizado com os erros.”

(Monja Coen)

RESUMO

O aumento da demanda por infraestrutura, impulsionado pelo crescimento populacional global, destaca o papel da construção civil na geração de empregos e renda, mas também evidencia os altos impactos ambientais da produção de cimento. O cimento gera altas emissões de poluentes no seu processo de fabricação, sendo necessária a minimização de impactos para a promoção da sustentabilidade. Devido a isso, o cimento LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*), feito à base de fíler calcário e argila calcinada, se mostra promissor, uma vez que consegue reduzir as emissões de poluentes durante o seu processo de produção em cerca de 30%. Este estudo investiga a adequação do cimento LC³ para a produção de pavimentos rígidos. Os pré-requisitos obrigatórios para concretos em pavimentação rígida, foram extraídos de normativas do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). Por meio de uma revisão sistemática da literatura confirmou-se o atendimento ao critério de resistência à compressão de concretos à base de LC³. Em um estudo preliminar em argamassas de LC³, a relação água/cimento de 0,42 atingiu 30 MPa aos 3 dias, atingindo esse valor aos 28 dias com relação a/c menor que 0,52. Para que a resistência à tração na flexão fosse superior a 4,5 MPa aos 28 dias, foi necessária a/c menor que 0,55 em argamassas LC³. Ensaio em concreto validaram esses resultados, a resistência à compressão do LC³ com a/c de 0,48 aos 28 dias atende à normativa, a resistência à tração na flexão mínima aos 28 dias é alcançada em concretos LC³ com a/c de 0,48 e a/c de 0,56. Os testes de durabilidade indicam maior penetração de CO₂ em concretos LC³, porém, melhor resistência à migração de cloretos. O LC³ demonstra potencial para pavimentos rígidos, satisfazendo normas de resistência mecânica e apresentando bom desempenho em durabilidade.

Palavras-chave: LC³. Concreto. Pavimento rígido.

ABSTRACT

The escalating demand for infrastructure, driven by global population growth, emphasizes the civil construction sector's pivotal role in job and income generation, whilst simultaneously underscoring the substantial environmental impacts of cement production. Cement production entails significant emissions of pollutants, thereby necessitating the minimization of such impacts to foster sustainability. In this context, LC³ - limestone calcined clay cement presents itself as a promising alternative, achieving a reduction of approximately 30% in pollutant emissions during its production process. Prolonging the service life of roadways enhances the quality of life for users and advances sustainability by diminishing resource consumption associated with repairs and renovations. Rigid pavements constitute a viable solution for this objective. The present study evaluates the suitability of LC³ cement for the production of rigid pavements. Mandatory prerequisites for concretes in rigid pavements were extracted from DNIT standards. A systematic literature review substantiated that LC³-based concretes satisfy the compressive strength criteria. In a preliminary investigation of LC³ mortars, a (w/b) of 0.42 attained 30 MPa at 3 days, achieving this value at 28 days with w/b < 0.52. To achieve flexural tensile strength exceeding 4.5 MPa at 28 days, a w/b < 0.55 was requisite in LC³ mortars. Assays on concrete corroborated these results: the compressive strength of LC³ concrete with w/b of 0.48 at 28 days conforms to the standards, whilst the minimum flexural tensile strength at 28 days is attained in LC³ concretes with w/b ratios of 0.48 and 0.56. Durability assessments indicated greater CO₂ penetration in LC³ concretes, yet superior resistance to chloride migration. LC³ thus demonstrates considerable potential for rigid pavements, fulfilling mechanical strength requirements and exhibiting favorable durability performance.

Keywords: LC³. Concrete. Rigid pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de pavimento.....	16
Figura 2 – Tensões de carregamento.....	16
Figura 3 – Pavimento de Concreto Simples (PCS).....	21
Figura 4 – Pavimento de Concreto Simples com Barra de Transferência (PCS/BT).....	21
Figura 5 – Barras de Transferência (BTs) preparadas para a locação.....	22
Figura 6 – Barras de Transferência (BTs) em espera.....	22
Figura 7 – Pavimento de Concreto com Armadura Contínua – PCAC.....	23
Figura 8 – Concretagem de um PCAC.....	23
Figura 9 – Pavimento de Concreto com Armadura Descontínua – PCAD.....	24
Figura 10 – Representação esquemática do WT.....	25
Figura 11 – Foto de uma obra de restauração de pavimento com WT	25
Figura 12 – Foto trecho da Serra de São Vicente, BR 163/MT.....	28
Figura 13 – Fluxograma da pesquisa.....	32
Figura 14 – Mapa de termos busca Web of Science.....	35
Figura 15 – Mapa de termos busca Scopus.....	36
Figura 16 – Mapa de Revistas.....	37
Figura 17 – Mapa de palavras-chave.....	37
Figura 18 – Mapa de palavras-chave com destaque.....	38
Figura 19 – Boxplot: valores de resistência à compressão de concretos LC ³	39
Figura 20 – Resistência à compressão VS relação a/c de concretos LC ³	39
Figura 21 – Relação a/c e VS resistência de tração na flexão de concretos com LC ³	41
Figura 22 - Fluxograma do programa experimental.....	43
Figura 23 - Resistência de tração na flexão VS relação a/c das argamassas CPV-ARI..	53
Figura 24 - Resistência de tração na flexão VS relação a/c das argamassas LC ³	54
Figura 25 - Resistência à compressão vs relação a/c das argamassas CPV - ARI.....	55
Figura 26 - Resistência à compressão VS relação a/c das argamassas LC ³	55
Figura 27– Resistência à compressão dos concretos ao decorrer do tempo.....	57
Figura 28 – Resistência à tração na flexão dos concretos aos 28 dias.....	59
Figura 29 – Ensaio de carbonatação.....	60
Figura 30 – Ensaio de migração de cloretos, carga passante (ASTM C1202).....	61
Figura 31 – Ensaio de resistividade elétrica superficial.....	63
Figura 32 – Ensaio de resistividade elétrica volumétrica.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Requisitos para pavimentos de concreto.....	18
Quadro 2 – Procedimento de busca.....	33
Quadro 3 – Sumário com média, média, mediana, quartis e desvio padrão dos dados...39	
Quadro 4 – Módulo de elasticidade encontrado nos artigos.....	42
Quadro 5 – Composição química e física dos materiais.....	45
Quadro 6 – Composição mineralógica dos materiais.....	45
Quadro 7 – Misturas de argamassas utilizadas.....	46
Quadro 8 – Misturas de concretos utilizadas na pesquisa.....	48
Quadro 9 – Comparação estatística entre as resistências à compressão de cada mistura de concreto por idade.....	57
Quadro 10 – Ensaio de carbonatação.....	60
Quadro 11– Ensaio de migração de cloretos, carga passante (ASTM C1202).....	61
Quadro 12 – Ensaio de resistividade elétrica superficial.....	63
Quadro 13 – Referência para resistividade elétrica.....	63
Quadro 14 – Ensaio de resistividade elétrica volumétrica.....	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo geral.....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 PAVIMENTO RÍGIDO – PAVIMENTO DE CONCRETO.....	16
2.1.1 Tipos de pavimento rígido.....	19
2.1.1.1 Pavimento de Concreto Simples - PCS.....	20
2.1.1.2 Pavimento de Concreto Simples com Barra de Transferência - PCS/BT.....	21
2.1.1.3 Pavimento de Concreto com Armadura Contínua - PCAC.....	22
2.1.1.4 Pavimento de Concreto com Armadura Descontínua - PCAD.....	23
2.1.1.5 Whitetopping - WT.....	24
2.1.2 Métodos de dimensionamento.....	25
2.1.2.1 Exemplo: BR-163/MT - contexto logístico brasileiro.....	27
2.2 CIMENTOS DE ARGILA CALCINADA E FÍLER CALCÁRIO – LC ³	28
2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA.....	32
2.3.1 Procedimento de busca.....	33
2.3.2 Resultados.....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	44
3.2 ESTUDO EM ARGAMASSA.....	46
3.3 ESTUDO EM CONCRETO.....	47
3.3.1 Ensaio mecânicos.....	48
3.3.2 Teste de significância estatística - Análise de variância (ANOVA).....	48
3.3.3 Durabilidade: Resistividade Elétrica Superficial.....	49
3.3.4 Durabilidade: Resistividade Elétrica Volumétrica.....	50
3.3.5 Durabilidade: Migração de Cloretos (Rapid Chloride Permeability Test).....	51
3.3.6 Durabilidade: Ensaio de Carbonatação.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1 RESULTADOS DO ESTUDO EM ARGAMASSA.....	53
4.2 RESULTADOS DO ESTUDO EM CONCRETO.....	56
4.2.1 Resultado dos ensaios mecânicos.....	56
4.2.2 Resultado dos ensaios de durabilidade.....	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
BIBLIOGRAFIA.....	67
APÊNDICE A - RESULTADOS DA DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	72
ANEXO A - RESULTADOS DA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA - TGA... 73	73
MATERIAL SUPLEMENTAR.....	74

1. INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial da população mundial e a urbanização acelerada que o acompanha têm impulsionado a demanda por infraestrutura, especialmente em países em desenvolvimento (Jesús *et al.*, 2023). De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2022), estima-se que a população mundial atingirá 9,7 bilhões de habitantes até 2050, com projeções apontando para 10,4 bilhões na década de 2080.

Por conseguinte, a expansão demográfica deve impulsionar aumento no desenvolvimento de infraestrutura, levando a maior demanda por materiais de construção (Sharma *et al.*, 2021). O cimento Portland recebe destaque por ser amplamente utilizado, ser o principal componente do concreto e o material de construção mais consumido globalmente (Barbalho; Silva; Rêgo, 2020).

Embora demande grandes quantidades de recursos naturais e cause impactos ambientais significativos, a construção civil continua sendo uma indústria vital para o desenvolvimento econômico e social, especialmente em economias emergentes que respondem pela maior parte da produção global de concreto (Jesús *et al.*, 2023).

O cimento é o segundo material mais consumido no mundo, superado apenas pela água (Yu *et al.*, 2025), com consumo médio global de próximo de 0,53 toneladas per capita por ano, sendo responsável por cerca de 8% das emissões antropogênicas de CO₂ (Sharma *et al.*, 2021). Esse elevado impacto ambiental deve-se ao processo de clínquerização, que envolve a calcinação do calcário a altas temperaturas e a combustão de combustíveis fósseis, durante a produção de cimento (Mañosa *et al.*, 2024).

Schneider (2019) afirma que o cimento é, e continuará sendo, indispensável como material de construção por muito tempo. Contudo, o setor enfrenta o desafio de reduzir as emissões de CO₂ enquanto aumenta a produção para atender à crescente demanda. Diante disso, o setor tem algumas opções de ‘plano de ação’, entre elas a utilização de materiais alternativos no processo de queima para aquecer o forno, ou a redução da quantidade de clínquer utilizada na produção do cimento (Gartner; Hirao, 2015; Scrivener, 2014).

Para Scrivener *et al.* (2017), a estratégia mais eficaz para reduzir as emissões de CO₂ na indústria do cimento é a substituição de uma parcela do clínquer por outros materiais. Durante a produção do clínquer, estima-se que 40% das emissões estejam relacionadas ao combustível e à energia elétrica, enquanto 60% resultam da decomposição do calcário (Scrivener, 2014).

A quantidade de clínquer utilizada pode ser reduzida através da incorporação de materiais cimentícios suplementares, que não só diminuem a pegada de carbono, mas também podem aprimorar as propriedades do concreto, contribuindo para uma construção mais sustentável (Py *et al.*, 2021). Entre os materiais alternativos, as argilas calcinadas têm se destacado como uma opção viável para a substituição de parte do clínquer, especialmente em formulações como o *Limestone Calcined Clay Cement - LC³* (Malacarne *et al.*, 2019).

O LC³ (cimento à base de filer calcário e argila calcinada) tem potencial para reduzir a utilização de clínquer em 50%, o que representa uma diminuição significativa na pegada de carbono do cimento em comparação com o cimento Portland (Liu *et al.*, 2023; Py *et al.*, 2021). Com a mesma quantidade de clínquer é possível produzir o dobro de cimento, mantendo resistência à compressão semelhante ao cimento Portland e índices de durabilidade satisfatórios (Sharma *et al.* 2021). Scrivener, John e Gartner (2018) mencionam a possibilidade de reduzir as emissões em até 400 milhões de toneladas de CO₂ anualmente, se o LC³ for utilizado em larga escala.

Outra fonte de emissões de CO₂ é o setor de transportes, de acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023), o modal rodoviário movimenta cerca de 65% das cargas e 95% dos passageiros no Brasil. Grande parte do fluxo de transporte no território nacional passa pelas rodovias em algum momento.

As rodovias desempenham um papel essencial na interligação regional e no desenvolvimento da economia. Portanto, aprimorar a infraestrutura rodoviária é necessário para fomentar o crescimento socioeconômico (CNT, 2023). Nesse contexto, o pavimento rígido se destaca por elevada durabilidade e menor necessidade de manutenção (Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 2019).

Apesar disso, em pesquisas publicadas anualmente pela CNT relatando as condições das vias nacionais, não há menção ao uso de pavimento de concreto ou pavimento rígido, uma vez que a pavimentação asfáltica (ou pavimento flexível) é predominante no país. E as pesquisas anuais da CNT tem por objetivo realizar um diagnóstico das condições gerais das rodovias brasileiras.

Segundo Silva e Carmo (2023) a vida útil estimada para pavimentos de concreto é superior a 30 anos, sendo consideravelmente superior à dos pavimentos flexíveis estimada em aproximadamente 10 anos de acordo com Carvalho e Júnior (2019). Essa maior durabilidade dos pavimentos rígidos, aliada à sua capacidade de suportar cargas

elevadas e à menor necessidade de manutenção, os torna uma opção mais resiliente para infraestruturas de tráfego intenso (Brito; Almeida; Oliveira, 2019).

Apesar da notável vida útil superior, os pavimentos de concreto historicamente eram vistos como um modelo construtivo de elevado custo implantação, implicando em inviabilidade econômica. No entanto, o estudo de Cavalet *et al.* (2019) concluiu que o pavimento rígido apresenta custos de implementação e manutenção inferiores em comparação com o pavimento asfáltico.

Nesse contexto é importante destacar a relação direta entre o custo do pavimento flexível com valor do petróleo, enquanto o pavimento rígido, tem um custo mais atrelado ao cimento e agregados (Kunz, 2020). As flutuações no preço do petróleo podem impactar significativamente projetos rodoviários flexíveis (Skrzypczak; Radwański; Pytlowany, 2018), enquanto a estabilidade dos custos do concreto podem oferecer uma vantagem econômica para pavimentos rígidos (Díaz; Hacar, 2018).

Ademais, a alta qualidade do revestimento de concreto e a baixa demanda por manutenção evitam intervenções que poderiam causar interrupções no tráfego e, conseqüentemente, emissões de CO₂ devido aos veículos parados. Além de causar baixo desgaste nos veículos, contribuindo para a segurança dos usuários (ABCP, 2019).

Em localidades de difícil manutenção o pavimento de concreto pode oferecer vantagens devido à sua durabilidade superior e à reduzida necessidade de intervenções (Santos *et al.*, 2024). Um exemplo é a sua aplicação em túneis, que, por sua vez, representam desafios logísticos consideráveis para reparos, tornando a longevidade do concreto um fator de grande importância (Brito; Almeida; Oliveira, 2019).

Ao realizar buscas nas bases de dados Scopus, Science Direct, Web of Science, e SciELO, não foram identificados estudos abordando o uso de cimentos a base de argila calcinada e filer calcário em vias de concreto. A busca foi por artigos que tivessem em seu título: “*limestone calcined clay cement*” ou “lc³” ou “lc3” e incluíssem “*pavement*” ou “*pavements*”.

A presente pesquisa contempla uma revisão sistemática e ensaios laboratoriais. Foram compilados dados da literatura recente sobre as características dos concretos à base de LC³, comparando-os aos valores exigidos pelas normas técnicas para pavimentos de concreto. Também, realizaram-se ensaios com argamassas de diferentes proporções água/cimento, visando desenvolver concretos de cimento Portland e LC³ adequados à pavimentação rígida. Foram avaliadas as propriedades mecânicas, o abatimento de cone e indicadores de durabilidade.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em buscas realizadas nas bases de dados, não foram identificados estudos sobre a utilização de LC³ na execução de pavimentos rígidos. Portanto, o trabalho apresentado explora uma área do conhecimento que ainda não foi devidamente investigada.

Ademais, é relevante pesquisar alternativas com potencial para melhorar a qualidade das vias brasileiras, em conformidade com os princípios do desenvolvimento sustentável, ao unir a baixa emissão de CO₂ do cimento LC³ à durabilidade do pavimento de concreto.

Em conformidade com a Agenda 2030, apresentada pela ONU em 2015, dentre os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável - ODS, este estudo se relaciona com os objetivos 09 – Indústria Inovação e Infraestrutura; 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis; e 12 Consumo e Produção Responsáveis (ONU, 2015).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Produzir concretos à base de cimento LC³ compatíveis com requisitos técnicos necessários para pavimento rígido.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Dosar argamassas de cimento Portland e cimento LC³, determinando a relação a/c necessária para que cada sistema atenda aos requisitos mecânicos desejados.
- b) Produzir concretos de cimento Portland e LC³ com as relações a/c definidas, verificando atendimento aos requisitos normativos de trabalhabilidade, resistência mecânica à compressão e tração na flexão.
- c) Avaliar indicadores de durabilidade frente à migração de cloretos e carbonatação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

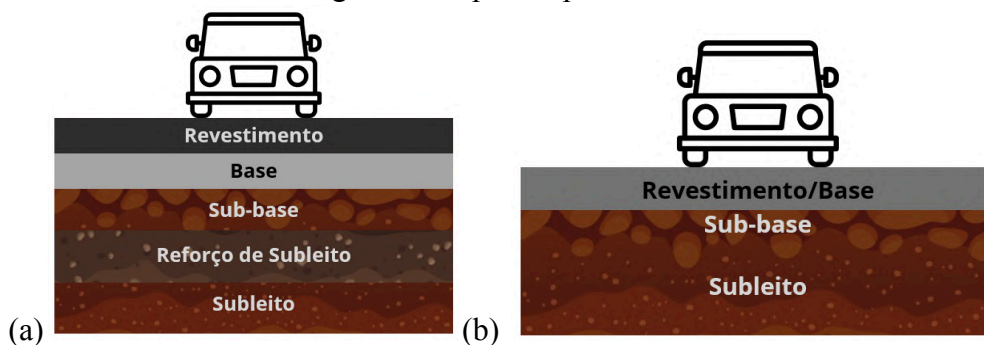
2.1 PAVIMENTO RÍGIDO – PAVIMENTO DE CONCRETO

Segundo Bernucci *et al.* (2008) o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras determinadas e variadas, projetada para suportar as tensões provocadas pelo tráfego veicular e condições climáticas, além de proporcionar aos usuários condições de rolamento aprimoradas, com conforto, economia e segurança.

O Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (DNIT, 2006) define pavimento rígido como aquele em que a camada de revestimento possui rigidez superior às camadas inferiores, absorvendo a maior parte das tensões provenientes do carregamento.

O exemplo clássico é o pavimento constituído por lajes de concreto à base de cimento Portland. O manual destaca que, nesse tipo de pavimento, o concreto atua tanto como revestimento quanto como base da via. Na Figura 1 há uma ilustração das camadas de um pavimento asfáltico (a) e de um pavimento rígido (b), enquanto na Figura 2 há uma ilustração das distribuições de tensões de carregamento.

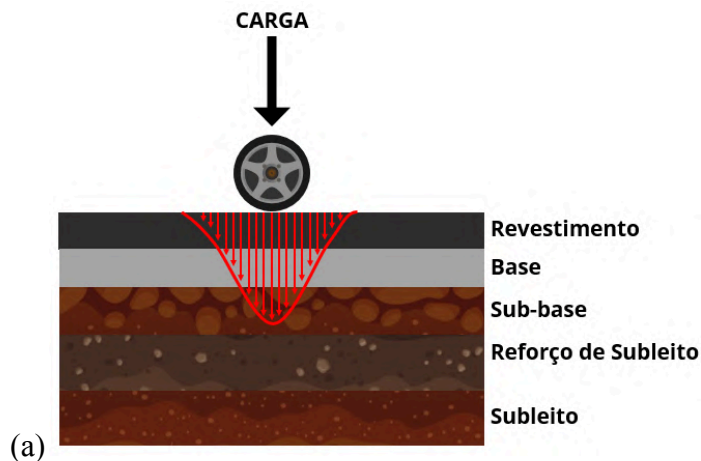
Figura 1 – Tipos de pavimento.



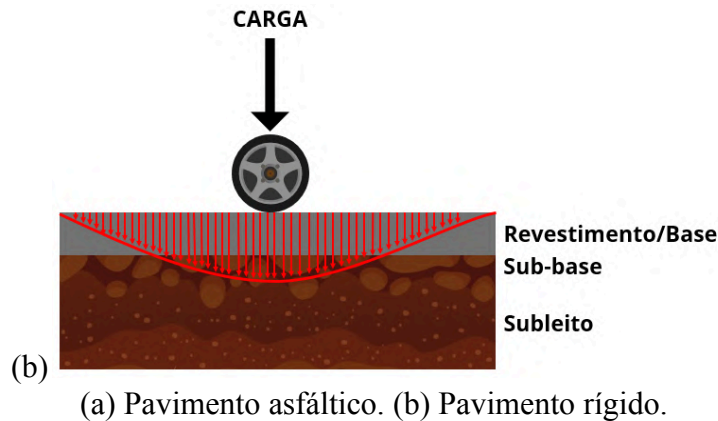
(a) Camadas de pavimento asfáltico. (b) Camadas de pavimento rígido.

Fonte: Elaborado pela autora, com base no manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006).

Figura 2 – Tensões de carregamento.



(a)



Fonte: Elaborado pela autora, com base no manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006).

No pavimento flexível, a capa asfáltica não possui capacidade de suporte suficiente para resistir aos carregamentos, cabendo às camadas inferiores absorver as tensões conforme Figura 2a (Silva *et al.*, 2021). Em virtude disso, as cargas do tráfego são dissipadas gradualmente até a base, sub-base e subleito, sendo as camadas de maior suporte estrutural. Essa característica ocasiona suscetibilidade a deformações permanentes, como afundamento de trilha de roda, e exige manutenção frequente (Karthikeyan *et al.*, 2023; Chung *et al.*, 2023; Fang *et al.*, 2023).

Em contraste, os pavimentos rígidos distribuem as tensões sobre uma área maior devido à rigidez das placas de concreto (ver Figura 2b), minimizando as tensões transmitidas às camadas inferiores (Soares *et al.*, 2020). Aspecto que confere aos pavimentos rígidos, maior resistência à fadiga e uma vida útil prolongada em comparação aos pavimentos flexíveis (Chung *et al.*, 2023; Fang *et al.*, 2023).

A CNT (2017) realizou uma comparação entre os principais tipos de pavimento utilizados no Brasil: o flexível e o rígido. O estudo aponta que pavimentos de concreto, quando submetidos a manutenção, apresentam uma vida útil estimada de 25 a 30 anos, enquanto pavimentos asfálticos, também sob manutenção, têm vida útil de 8 a 12 anos.

Balbo (2009) explica que os pavimentos de concreto são aqueles em que a camada de rolamento (também chamada de revestimento) é composta por concreto, que pode ser pré-moldado ou produzido *in loco*. As vias com pavimento rígido podem ser de concreto armado, não armado ou, de concreto protendido. Essas especificações variam conforme o projeto da obra.

O concreto utilizado em obras de pavimentação deve atender a requisitos mínimos devido às condições a que estará sujeito, como a ação de intempéries, as cargas decorrentes do tráfego e as peculiaridades do processo de execução (Pitta, 1998). A Norma DNIT 054/2004 estabelece o roteiro para o estudo das misturas a serem

empregadas em pavimentos de concreto, abordando os requisitos fundamentais que o material deve atender para ser considerado adequado a essas obras (DNIT, 2004).

Nesse sentido, a análise detalhada das propriedades físico-mecânicas e de durabilidade não deve ser subestimada, pois assegura a longevidade e a segurança das infraestruturas rodoviárias (Krishna; Tadi, 2022). O Quadro 1 apresenta algumas das determinações estabelecidas pela norma.

Quadro 1 – Requisitos para pavimentos de concreto.

Requisito	Valor
Consumo mínimo de cimento	320 Kg/m ³
Dimensão máxima do agregado graúdo	¼ da espessura da placa, nunca > 50 mm
Relação água/cimento	Entre 0,40 e 0,56
Abatimento no tronco de cone	Entre 20 e 50mm / Entre 70 e 100mm*
Ar incorporado	0,5 %
Exsudação	1,5%

* Para **dias secos**: de 70 a 100mm e para **dias úmidos**: de 20 a 50mm (DNIT, 2005).

Fonte: Elaborado pela autora, embasado em: DNIT 054 – PRO (DNIT, 2004) & IPR 714 (DNIT, 2005).

Além dos requisitos presentes no Quadro 1, ainda deve-se verificar as características mecânicas. O Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005) estabelece como parâmetro o valor de 30 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Embora esse ensaio contribua para o controle de qualidade do concreto, Balbo (2009) ressalta que este não é a melhor medida de controle para pavimentos. Nesse contexto, a resistência à tração na flexão é o parâmetro mais adequado.

Uma vez endurecido o concreto apresenta boa resistência à compressão, porém baixa resistência à flexão. Essa característica impõe a necessidade de um controle rigoroso sobre a resistência à tração na flexão, especialmente para garantir a integridade estrutural do pavimento diante das cargas de tráfego, evitando falhas prematuras (Cerqueira; Aisse; Bittencourt, 2020).

No que diz respeito à resistência à tração na flexão, o DNIT (2005) recomenda valores superiores a 4,5 MPa aos 28 dias. Esse parâmetro deve ser definido durante o dimensionamento do pavimento, e a partir dele, a mistura deve ser ajustada para atingir o valor especificado (DNIT, 2005; Balbo, 2009).

O manual (DNIT, 2005) salienta que concretos com resistência à tração na flexão inferior a 4 MPa, apresentam baixa impermeabilidade, demandam placas de maior espessura (elevando o custo da obra), além de apresentarem durabilidade inferior ao esperado para vias de concreto. Em contrapartida, os concretos com resistência à tração na flexão superior a 5 MPa, possuem maior impermeabilidade, são compatíveis

com menores espessuras de placa, têm durabilidade satisfatória, no entanto é necessário rigor no controle tecnológico (DNIT, 2006).

O Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005) afirma que “não são feitas exigências especiais quanto ao tipo de cimento e quanto aos índices físicos e químicos que estes tipos devem apresentar”. Além disso, destaca que cimentos com lento processo de endurecimento são mais adequados para vias de concreto. Ainda sobre essa característica, a literatura indica que o cimento LC³ possui processo de hidratação lento (Chung *et al.*, 2023), o que sugere sua potencial viabilidade para aplicações em pavimentação rígida.

Balbo (2009) ressalta que nenhum tipo de concreto deve ser descartado para uso em pavimentos rígidos de forma preliminar. O autor argumenta que é essencial caracterizar o concreto e avaliar as particularidades de cada obra, considerando restrições técnicas e econômicas. Essa abordagem é ainda mais relevante no atual contexto global, que prioriza soluções sustentáveis. O autor tece comentários sobre o comportamento de placas de concreto em pavimentos, enfatizando a importância da resistência à fadiga sob carregamentos repetitivos, o que é importante para evitar o surgimento de trincas e fissuras na estrutura (Balbo, 2009; Fang *et al.*, 2023).

2.1.1 Tipos de pavimento rígido

Os pavimentos de concreto, compostos por agregados e ligantes hidráulicos, podem ser executados por meio de diversas técnicas. No que tange à produção, por exemplo, esses pavimentos podem consistir em placas moldadas *in loco* ou pré-moldadas (Balbo, 2009). Ademais, os pavimentos de blocos intertravados, popularmente conhecidos como “paralelepípedos”, também são considerados uma modalidade de pavimento rígido (Medina; Motta, 2015).

Este estudo concentra-se no pavimento de concreto composto por placas, que representa o tipo mais comum na pavimentação de rodovias com esse material. Com base no Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), e nas contribuições de Balbo (2009) e Oliveira (2000), as modalidades de pavimentação rígida podem ser classificadas conforme a presença ou ausência de armadura, barras de transferência, entre outras características. A seguir uma lista das modalidades:

- a) Pavimento de Concreto Simples - PCS;
- b) Pavimento de Concreto Simples com Barra de Transferência - PCS/BT;
- c) Pavimento de Concreto com Armadura Contínua - PCAC;

- d) Pavimento de Concreto com Armadura Descontínua - PCAD;
- e) Pavimento de Concreto Protendido - PCPRO;
- f) Pavimento de Concreto Pré-moldado - PCPM;
- g) Whitetopping - WT;
- h) Whitetopping Ultradelgado - WTUD.

Além das modalidades citadas, são possíveis variadas composições de concreto e técnicas de execução. Por exemplo, é possível adicionar fibras à mistura do concreto, empregar concreto de alta resistência ou executar concreto compactado a rolo. Quanto aos apoios, as placas podem ser assentadas diretamente sobre o solo, sobre a sub-base ou sobre pavimentos preexistentes, sejam de concreto ou asfálticos (Oliveira, 2000).

O Manual (DNIT, 2005) apresenta algumas modalidades de pavimentação rígida, consideradas como as mais usuais e pertinentes aos procedimentos de dimensionamento. A seguir, delineiam-se suas definições.

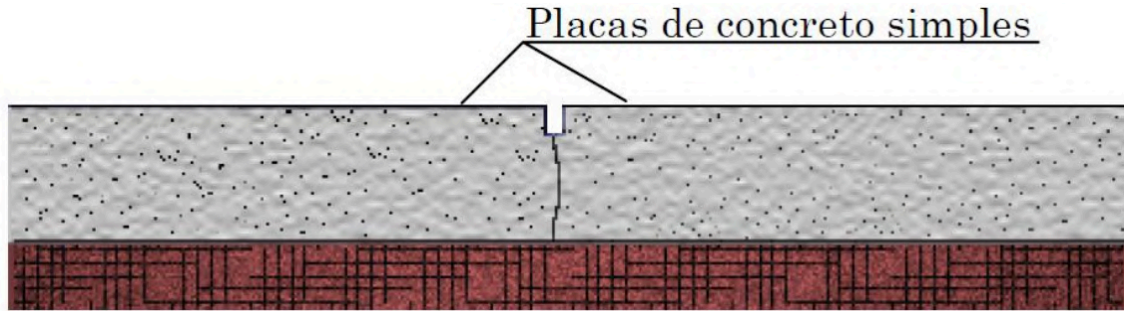
2.1.1.1 Pavimento de Concreto Simples - PCS

O Pavimento de Concreto Simples não incorpora armadura nem barras de transferência, portanto, não há utilização de aço em sua execução. Nesse sistema, o concreto é o único elemento responsável pela resistência aos esforços de tração à flexão incidentes na estrutura. Uma característica marcante é o comprimento reduzido das placas (devido à ausência de aço), que no Brasil varia tipicamente entre 5 e 6 metros. (Balbo, 2009; DNIT, 2005)

A separação entre as placas é feita por juntas transversais, serradas ou moldadas, destinadas a controlar as fissuras oriundas da retração, do empenamento e da dilatação térmica. A ausência de armadura e barras de transferência torna este tipo de pavimento mais suscetível a variações térmicas e à umidade, o que pode levar a um maior número de juntas para acomodar a movimentação das placas (Mateos *et al.*, 2020).

Habitualmente, o PCS é executado com placas de espessura entre 15 e 20 centímetros e largura de 3 a 4 metros. A Figura 3 ilustra um corte longitudinal de PCS com junta transversal serrada. Como pode ser visualizado na Figura 3, a junta transversal serve como guia para as fissuras de retração e como mecanismo para acomodar a movimentação térmica das placas (Oliveira, 2000; Salama *et al.*, 2023).

Figura 3 – Pavimento de Concreto Simples (PCS).



Fonte: Oliveira (2000).

2.1.1.2 Pavimento de Concreto Simples com Barra de Transferência - PCS/BT

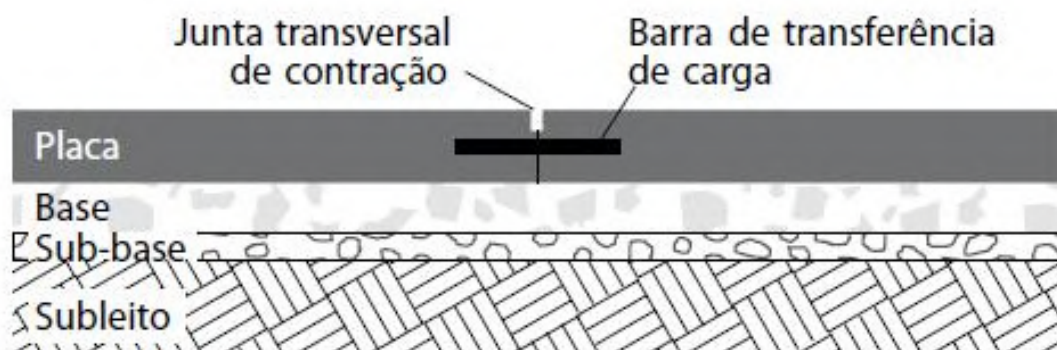
Possui barras curtas de aço posicionadas nas juntas transversais, o que configura um sistema artificial de transmissão de cargas. A inclusão das barras de transferência permite a execução de placas com maior comprimento, tipicamente entre 9 e 12 metros.

No banzo comprimido, o concreto opera em regime de compressão, sem sofrer esmagamento. Já no banzo tracionado, as barras de transferência são responsáveis pela resistência aos esforços de tração (Balbo, 2009). O PCS/BT é comumente executado com espessuras de 16 a 45 centímetros e largura de 7 metros (Oliveira, 2000).

Em algumas obras, aplica-se um produto asfáltico nas BTs para evitar a aderência do concreto às barras, permitindo a livre movimentação das placas e prevenindo tensões e fissuras indesejáveis (Carvalho; Júnior, 2019). Essa lubrificação minimiza as tensões cisalhantes, otimizando a transferência de cargas e a longevidade do pavimento (Roy, 2021; Viana *et al.*, 2021).

A Figura 4 ilustra um corte longitudinal de PCS/BT com junta transversal serrada. A Figuras 5 é a foto de um conjunto de BTs para uma junta, já com os apoios, o conjunto está pronto para ser locado e concretado, a Figura 6 é uma foto que mostra uma placa já concretada com as BTs em espera para a sequência do pavimento.

Figura 4 – Pavimento de Concreto Simples com Barra de Transferência (PCS/BT).



Fonte: Balbo (2009).

Figura 5 – Barras de Transferência (BTs) preparadas para a locação.



Fonte: risatec.com.br.¹

Figura 6 – Barras de Transferência (BTs) em espera.



Fonte: conexao.arcelormittal.com.br.²

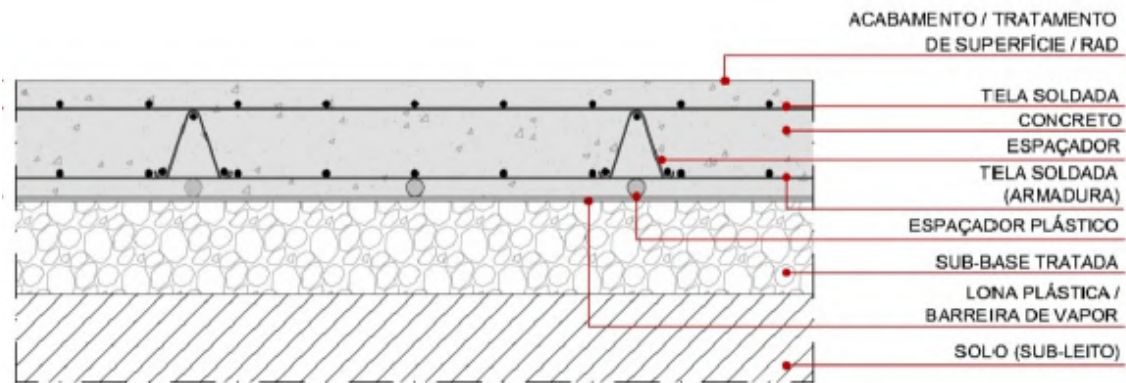
2.1.1.3 Pavimento de Concreto com Armadura Contínua - PCAC

Ao contrário dos tipos anteriormente descritos, o PCAC não apresenta juntas transversais, com exceção das juntas construtivas (Balbo, 2009). Como é ilustrado na Figura 7, a armadura contínua é posicionada acima da linha neutra, na seção transversal da placa, o que assegura eficiente transmissão de cargas e preserva sua coesão (Balbo, 2009; Oliveira, 2000). A Figura 8 é um registro de uma concretagem de PCAC, a produção deste dia é que irá determinar o comprimento da placa, gerando as juntas construtivas; a aplicação principal deste tipo de pavimento ocorre em pátios industriais (Oliveira, 2000).

¹ <https://risatec.com.br/barras-de-transferencia-para-construcao-civil/>

² <https://conexao.arcelormittal.com.br/produtos/barras-de-transferencia>

Figura 7 – Pavimento de Concreto com Armadura Contínua – PCAC.



Fonte: pisoscvr.com.br.³

Figura 8 – Concretagem de um PCAC.



Fonte: mixpisos.com.br.⁴

2.1.1.4 Pavimento de Concreto com Armadura Descontínua - PCAD

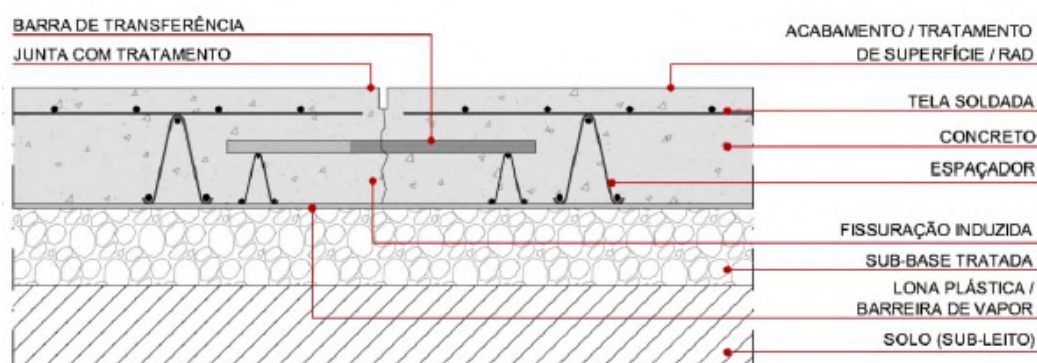
Caracteriza-se pela distribuição de barras de aço como armadura, que se interrompem previamente às juntas transversais, equipadas com barras de transferência. No banzo tracionado, essas armaduras resistem aos esforços de tração (Oliveira, 2000).

As juntas transversais são serradas, todavia com espaçamento superior ao do PCS. Tipicamente, as placas exibem comprimento entre 12 e 15 metros (DNIT, 2005; Oliveira, 2000). A Figura 9 apresenta um corte longitudinal de PCAD. A armadura descontínua é projetada para controlar a fissuração e aumentar a durabilidade do pavimento sob cargas repetidas, enquanto as barras de transferência garantem a transmissão do carregamento entre as placas adjacentes (Salama *et al.*, 2023).

³ http://www.pisoscvr.com.br/projeto_piso.asp

⁴ <https://www.mixpisos.com.br/concretagem-de-piso-industrial/>

Figura 9 – Pavimento de Concreto com Armadura Descontínua – PCAD.



Fonte: pisoscvr.com.br.⁵

2.1.1.5 Whitetopping - WT

Whitetopping, em tradução livre "cobertura branca", deve seu nome à aparência clara do concreto de cimento Portland. Segundo o DNIT (2005), trata-se de um pavimento de concreto simples para recapeamento de pavimentos flexíveis, empregado na manutenção para aumentar a capacidade de carga, melhorar a resistência ao rolamento e prolongar a vida útil da estrutura (Kunz, 2020; Viana *et al.*, 2021).

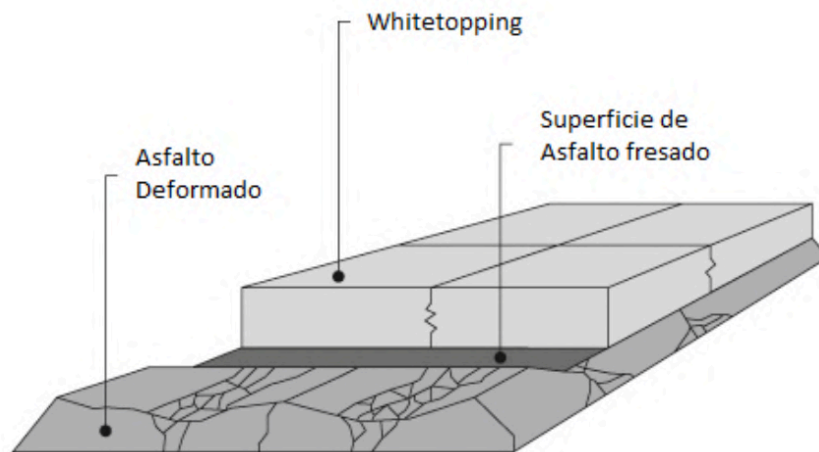
Conforme ilustrado na Figura 10, a técnica é caracterizada pela sobreposição de uma camada de concreto sobre pavimento asfáltico preexistente (Kunz, 2020). Ao aproveitar a base antiga, o WT otimiza custos e prazos de execução, com aplicação frequente em aeroportos, vias de tráfego intenso e pavimentos asfálticos deteriorados (Kunz, 2020; Viana *et al.*, 2021).

O *whitetopping* é categorizado como pavimento rígido, com espessuras típicas variando de 15 a 30 cm, podendo ou não incorporar armadura, conforme as condições do subleito e a intensidade do tráfego (Nasser, 2016). Trata-se de uma solução que tem se destacado no Brasil como alternativa para a reabilitação de pavimentos asfálticos (Kunz, 2020).

Como exemplo, a Figura 11 mostra uma foto de uma obra de restauração com WT, administrada pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná - DER/PR, no trecho da PR-151 entre Ponta Grossa e Palmeira.

⁵ http://www.pisoscvr.com.br/projeto_piso.asp

Figura 10 – Representação esquemática do WT.



Fonte: beton.org.⁶

Figura 11 – Foto de uma obra de restauração de pavimento com WT .



Fonte: der.pr.gov.br.⁷

2.1.2 Métodos de dimensionamento

Balbo, em seu livro “Pavimentos de Concreto” (Balbo, 2009), argumenta que o Brasil não deveria aguardar mais 15 anos para que alguma atualização de norma estrangeira surgisse, para que então, fosse adaptado um método para dimensionamento de pavimentos rígidos que não condiz com as condições brasileiras. O prazo considerado absurdo pelo autor já expirou; qual é o panorama atual no país?

⁶ <https://www.beton.org/betonbau/beton-und-bautechnik/infrastruktur/dba-whitetopping/>

⁷ <https://www.der.pr.gov.br/Noticia/Restauracao-em-concreto-da-PR-151-entre-Ponta-Grossa-e-Palmeira-chega-26>

O DNIT mantém a adoção oficial de métodos estrangeiros para o dimensionamento de pavimentos rígidos, com adaptações específicas ao contexto nacional. O Brasil ainda carece de um método mecanístico-empírico próprio e consolidado para pavimentos de concreto, além disso, a grande maioria das normas vigentes tem por volta de 20 anos de publicação e não sofreram atualizações.

O Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT descreve três métodos de dimensionamento, correspondentes a: (I) concreto simples sem barras de transferência, (II) concreto simples com barras de transferência e (III) concreto estruturalmente armado. São eles:

- I. Método da PCA (*Portland Cement Association*) de 1966, normativa norte americana; se fundamenta no Modelo de Fadiga de Concreto e no sistema de análise estrutural ligado ao caso das placas elásticas apoiadas em fundação contínua;
- II. Método da PCA (*Portland Cement Association*) de 1984, normativa norte americana; incorpora um modelo modificado de fadiga, o modelo de erosão, neste inseridas considerações sobre o escalonamento e que emprega análise estrutural por elementos finitos; é considerado como aperfeiçoamento do método PCA 66;
- III. Dimensionamento de pavimentos de concreto estruturalmente armados, baseado na determinação das tensões atuantes e dos momentos fletores, de acordo com o modelo proposto por Westergaard por meio de Cartas de Influência de Pickett e Ray.

Além dos métodos citados pelo DNIT, outros procedimentos podem ser adotados, a exemplo do modelo da *Federal Aviation Administration* de 2008, direcionado especificamente a pavimentos rígidos aeroportuários. Outro método consagrado é o da AASHTO de 1993, fundamentado nos dados do *AASHTO Road Test*, o que o caracteriza como um modelo empírico.

Seguindo o descrito por DNIT (2005), ao iniciar um dimensionamento o projetista propõe ‘valores tentativa’ de resistência à tração à flexão⁸ e de espessura da placa. Em seguida, inclui outros parâmetros como; as condições do solo local, o tráfego previsto e outros dados coletados em campo. Em seguida são feitos os procedimentos de cálculo e o uso de ábacos, resultando na obtenção do ‘valor final’ (Oliveira, 2000).

⁸ O valor deve ser para 28 dias de cura e superior à 4,5 MPa.

Se o valor resultante for próximo de 100, os parâmetros de espessura e resistência que foram estipulados para os cálculos, estão adequados às necessidades da obra em questão (DNIT, 2005).

No entanto, se o valor for consideravelmente superior a 100, o pavimento é considerado superdimensionado. Isso significa que a espessura da placa pode ser reduzida, sem prejuízo à segurança e durabilidade da estrutura (DNIT, 2005).

Em uma situação contrária, na qual o valor é significativamente abaixo de 100, a estrutura com esses parâmetros está subdimensionada, é necessário aumentar a ‘espessura tentativa’, e/ou a resistência à tração na flexão e repetir o processo, os valores de campo se mantêm (DNIT, 2005).

Dessa forma, o dimensionamento prossegue por meio de ‘tentativa e erro’, até a obtenção de valores viáveis de resistência mecânica e espessura, dando prioridade à viabilidade construtiva e econômica.

É relevante observar que, os ábacos e tabelas empregados nos métodos de dimensionamento, já abrangem o ganho de resistência do concreto ao longo do tempo, o que funciona como reserva de segurança (Oliveira, 2000). Contudo, o engenheiro responsável pelo projeto, não pode considerar essa reserva no procedimento de dimensionamento (DNIT, 2005).

Portanto, conhecer o desempenho mecânico do concreto, é um item indispensável para projetar pavimentos rígidos (Balbo, 2009). Conforme métodos de dimensionamento sugeridos pelo DNIT (2005), se os materiais utilizados proporcionarem um concreto com resistência à tração à flexão elevada, é possível reduzir a espessura da placa e reduzir a demanda de armadura (quando for o caso). Isso não só resultaria em economia de material e recursos financeiros, mas também simplificaria a execução, com a possibilidade de acelerar a obra (Oliveira, 2000).

2.1.2.1 Exemplo: BR-163/MT - contexto logístico brasileiro

Para ilustrar o uso de pavimentos rígidos, consideremos a BR-163 no Mato Grosso. Líder na produção brasileira de soja e milho, o estado exige infraestrutura rodoviária robusta para o escoamento eficiente da safra, destacando a importância de pavimentos duráveis e de alta capacidade de carga.

A BR-163/MT, principal via de escoamento de grãos, conecta o Centro-Oeste ao Norte e aos portos, sob intenso tráfego de veículos pesados. Nesse cenário, interdições para manutenção tornam-se inevitavelmente complexas. Para reduzir custos de

manutenção a longo prazo, a duplicação entre Cuiabá e Rondonópolis⁹ utilizou pavimento de concreto no sentido do tráfego mais intenso, Cuiabá → Rondonópolis.

Nesse trecho se encontra a Serra de São Vicente, segmento de topografia acidentada representando um obstáculo físico historicamente associado a acidentes e dificuldades de tráfego.

A Figura 12 mostra um trecho que o DNIT inaugurou, em março de 2018, 23 km de pista nova em concreto e aproximadamente 27 km da pista antiga restaurada com whitetopping de 24 - 25 cm de espessura. Essa solução atende caminhões carregados, priorizando durabilidade e baixa manutenção para evitar interrupções logísticas no escoamento mato-grossense. Mais informações sobre a obra no link¹⁰.

Figura 12 – Foto trecho da Serra de São Vicente, BR 163/MT.



Fonte: gov.br.¹¹

2.2 CIMENTOS DE ARGILA CALCINADA E FÍLER CALCÁRIO – LC³

Em 1824, o construtor Joseph Aspdin patenteou uma mistura em estado de pó que, ao ser adicionada à água, adquiria propriedades de dureza similares às das rochas. Essa mistura foi denominada Cimento Portland. Com o passar dos anos, diferentes misturas foram estudadas e normas foram estabelecidas para regulamentar a produção do cimento (Battagin; Munhoz; Battagin, 2014).

⁹ Em Rondonópolis-MT está situado o maior terminal de grãos da América Latina, o complexo multimodal é equipado com três tulas ferroviárias e pode armazenar 150 mil toneladas de grãos.

¹⁰<https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/08/apos-oito-anos-governo-federa-l-conclui-duplicacao-de-168-quilometros-da-rodovia-cuiaba-rondonopolis>.

¹¹<https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/08/apos-oito-anos-governo-federa-l-conclui-duplicacao-de-168-quilometros-da-rodovia-cuiaba-rondonopolis>

Utilizando o cimento Portland foi possível construir estruturas de engenharia mais resistentes e duráveis, proporcionando avanços significativos na infraestrutura global (Carvalho; Júnior, 2019; Salama *et al.*, 2023). Embora a produção de cimento Portland tenha revolucionado a construção civil, esta também é marcada por expressivos impactos ambientais, incluindo a degradação de recursos naturais e a emissão de gases poluentes (Ferreira; Abreu; Veloso, 2021).

Atualmente, o cimento é o material de construção mais consumido no mundo, sendo a indústria cimenteira responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂ (Sharma *et al.*, 2021). Essa realidade é agravada pela crescente demanda por esse material, impulsionada pelo aumento populacional e pela urbanização acelerada, sobretudo em países em desenvolvimento (Scrivener, 2014). O Brasil, embora apresente um consumo de cimento abaixo da média mundial, possui um déficit habitacional e de infraestrutura, o que projeta um aumento da demanda entre 60% e 120% até 2050 (Barbalho; Silva; Rêgo, 2020).

Em ordem de compreender os impactos ambientais negativos do cimento Portland, é preciso compreender seu processo de produção, que se inicia com a elevada demanda por matéria-prima calcária (Lima *et al.*, 2024). O calcário é moído juntamente com argila e outras matérias-primas, em seguida é submetido à calcinação em fornos rotativos a temperaturas de até 1.450 °C, o produto desse processo é chamado de clínquer. Posteriormente, o clínquer é moído e recebe aditivos, resultando no cimento Portland final (Ferreira; Abreu; Veloso, 2021; Mendes; Guerra; Morales, 2016).

O processo que produz o clínquer libera significativas quantidades de dióxido de carbono, oriundas da descarbonatação do calcário e da combustão de combustíveis fósseis necessários para manter o forno em operação, sendo a etapa mais intensiva em termos energéticos e emissões de CO₂ na produção de cimento. (Barbalho; Silva; Rêgo, 2020; Santos; Isaia, 2020). É válido ressaltar que o forno rotativo opera continuamente, sendo desligado apenas para manutenção ou reparos, o que contribui para a elevada demanda energética do processo (Oliveira *et al.*, 2019).

Segundo Schneider (2019), a redução do uso de clínquer é a medida mais eficiente para que a indústria cimenteira minimize seus impactos ambientais, uma vez que aborda tanto a questão energética quanto a redução das emissões de CO₂. Battagin, Munhoz e Battagin (2014) destacam que a realização de adições ao cimento pode trazer benefícios como a redução das emissões de CO₂ e a diminuição do consumo energético.

Nesse contexto, o *Limestone Calcined Clay Cement* (LC³) emerge como um material promissor para a produção de cimentos com baixa emissão de CO₂, mantendo propriedades similares às do Cimento Portland (Sun; Zunino; Scrivener, 2024). O cimento LC³, composto por argila calcinada e filer calcário, pode ser produzido com metade da quantidade de clínquer tradicionalmente utilizada (no cimento Portland). Além disso, os materiais necessários para sua produção estão disponíveis em quantidades que atendem à demanda global (Sun; Zunino; Scrivener, 2024).

Para a produção do cimento LC³ é necessário realizar a calcinação da argila, a faixa de temperaturas utilizada varia entre 650°C e 800°C (Balestra *et al.*, 2022), temperaturas consideravelmente menores em comparação com as temperaturas de 1.450°C exigidas para a produção de clínquer (Malacarne *et al.*, 2019). Essa redução térmica, aliada à menor proporção de clínquer (50%), contribuem significativamente para a mitigação das emissões de CO₂ e para a redução do consumo energético da indústria cimenteira (Balestra *et al.*, 2022).

Estudos da literatura avaliaram diversas proporções entre os constituintes do LC³ e identificaram como mais vantajosa a mistura contendo 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de filer calcário e 5% de gipsita (Barbalho; Silva; Rêgo, 2020; Yu *et al.*, 2025). Essa formulação atinge resistências comparáveis às dos cimentos convencionais em apenas sete dias, mesmo com substituições de até 50% do clínquer (Braga; Arruda; Barata, 2023).

Dhandapani *et al.* (2018) realizaram comparações entre concretos à base de cimento Portland (CP) e cimento LC³. Os resultados indicaram que ambos produzem concretos com características similares em termos de resistência e módulo de elasticidade. Entretanto, nos ensaios de permeabilidade a gás e água, o LC³ apresentou desempenho superior. O estudo concluiu que o LC³ é capaz de produzir concretos de alta performance, sendo particularmente adequado para ambientes com altas concentrações de cloreto.

Já Braga, Arruda e Barata (2023) afirmam que, o desempenho do cimento LC³ quanto à retração é considerado semelhante ao do cimento Portland, com a vantagem de exibir menor fissuração em condições de restrição de deformação. Aplicando essa informação ao contexto de pavimentos, tal característica pode representar uma vantagem no desenvolvimento de pavimentos de concreto.

Scrivener *et al.* (2018) destacam que a produção de LC³ pode ser facilmente adaptada às plantas cimenteiras já existentes, sendo os ajustes necessários viáveis em

larga escala. Em Cuba e na Índia, já foram realizados testes de produção de LC³ utilizando a mesma tecnologia empregada no cimento Portland, com resultados positivos. A viabilidade de produção em larga escala do LC³, aliada à sua capacidade de reduzir as emissões de CO₂, o posiciona como uma alternativa não apenas sustentável mas também economicamente atrativa (Boanada-Fuchs; Heierli; Scrivener, 2024).

Dado que as emissões de CO₂ têm sido frequentemente mencionadas, é pertinente abordar a precificação do carbono. Trata-se de um instrumento econômico que confere um custo monetário às emissões de dióxido de carbono, incentivando a redução das pegadas de carbono industriais (Malacarne *et al.*, 2019).

Essa precificação pode ser implementada por meio de impostos sobre o carbono ou sistemas de comércio de emissões, como o *cap-and-trade*, que estabelece um limite global às emissões e permite que as empresas negociem permissões de emissão. A precificação de carbono, enquanto mecanismo econômico, pode impulsionar a adoção do LC³ ao tornar os cimentos convencionais mais caros (Barbalho; Silva; Rêgo, 2020).

Apesar das vantagens do cimento LC³ e do apoio de diversos estudos à sua utilização, até o momento da redação desta pesquisa, não há normativas brasileiras que regulamentem sua produção e uso. Consequentemente, o LC³ ainda não pode ser comercializado no país. No entanto, esse cenário deve mudar em um futuro próximo, considerando as vantagens previamente descritas e o crescente número de pesquisas dedicadas a esse insumo.

Estudos, como o de Wali *et al.* (2018), indicam que o cimento à base de argila calcinada é adequado para pavimentação rígida, pois apresenta propriedades mecânicas comparáveis às do cimento Portland. Essa adequação resulta da maior reatividade conferida à caulinita pela calcinação, em que um teor de 40% é suficiente para resistência à compressão equivalente à do Portland aos 7 dias (Malacarne *et al.*, 2019)

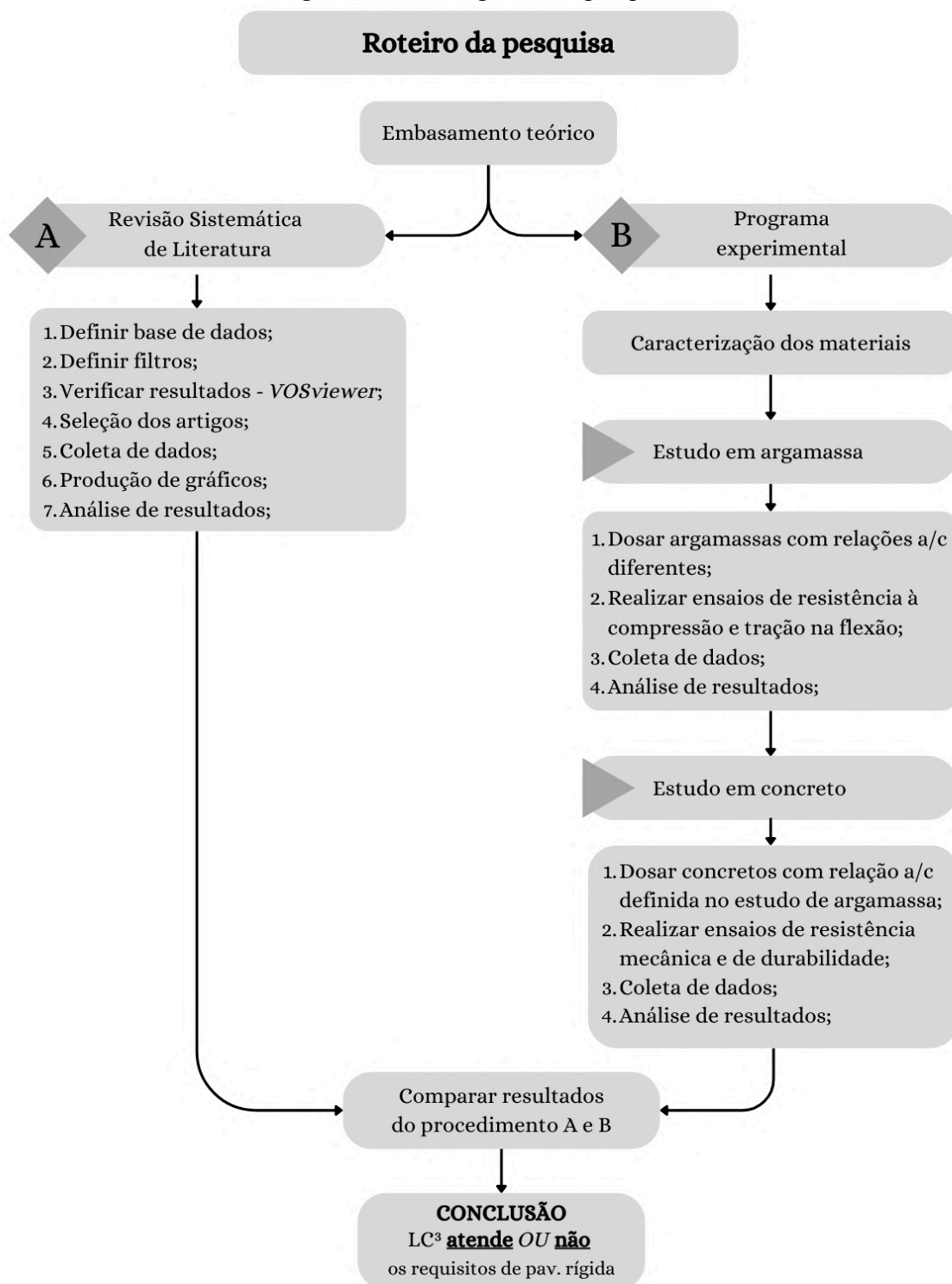
Além disso, a argila calcinada sinergiza com o carbonato de cálcio, formando fases carboaluminatos que refinam a matriz, aprimoram a durabilidade e conferem melhor desempenho em ambientes agressivos (Malacarne *et al.*, 2019).

No entanto, há uma carência de estudos que estabeleçam uma relação direta entre as características do concreto à base de LC³ e as exigências técnicas para pavimentos de concreto.

2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA

No presente capítulo, delinea-se dos procedimentos da revisão sistemática de literatura, no capítulo 3 estão expostos os métodos dos procedimentos de laboratório e os ensaios efetuados. A Figura 13 ilustra o fluxograma da pesquisa.

Figura 13 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

2.3.1 Procedimento de busca

Em buscas nas bases *Scopus*, *Science Direct*, *Web of Science*, e *SciELO* não foram observados estudos relacionando o uso de cimentos a base de argila calcinada e filer calcário na produção de pavimentos de concreto. Em virtude disso, o intuito da revisão sistemática de literatura empregada neste estudo, é basear-se na literatura disponível, para verificar se há potencial de utilização de cimento LC³ na produção de pavimentos rígidos.

Para tal, foi realizada uma busca por publicações sobre concretos produzidos com LC³ para servirem como fonte de dados de algumas características, entre elas a resistência à compressão. As plataformas utilizadas foram: *Web of Science* e *Scopus*, no Quadro 2 encontram-se os termos de busca, operadores e filtros aplicados.

Quadro 2 – Procedimento de busca.

Operador	Termo	Campo de busca
or	lc3	all fields
	lc ³	
	lc2	
and	limestone calcined clay cement	all fields
and	concrete	abstract
and	compressive strength	all fields

Fonte: Elaborado pela autora.

É relevante citar que, os procedimentos de busca são realizados em língua inglesa, portanto, a seguir está a tradução dos termos, operadores e campos utilizados. Os operadores servem para incluir ou excluir termos da pesquisa, neste caso foram utilizados: o operador “or” que significa “ou”, o operador “and” que significa “e”. No procedimento de busca o objetivo foi encontrar artigos que usassem o termo “lc3” ou “lc³” ou “lc2”, visto que as três formas são comuns.

O campo de busca se refere ao local que desejamos que o termo apareça nos artigos pesquisados, “all fields” significa “todos os campos” e busca o termo ao longo do documento. Neste estudo buscou-se por “lc3”, “lc³”, “lc2”, “compressive strength” que significa “resistência à compressão” e “Limestone Calcined Clay Cement” que significa “cimento à base de filer calcário e argila calcinada” em todos os campos.

Já “abstract” quer dizer “resumo”, ou seja, deseja-se encontrar o termo no resumo das publicações, excluindo artigos que não possuem o termo neste campo. O termo buscado no resumo foi “concrete” que significa “concreto”.

A inclusão da palavra concreto é muito importante, pois existe vasta bibliografia a respeito do cimento LC³ em pastas e argamassas. No entanto, nesta pesquisa o enfoque é a pavimentação rígida (pavimentos de concreto). Estudos efetuados com pastas e argamassas não permitem comparações diretas com aqueles efetuados em concreto, especialmente quanto às propriedades mecânicas.

A presença de agregado graúdo no concreto e ausência deste nas argamassas, é o principal motivo para que não seja possível comparar essa característica. Uma vez que, os agregados graúdos exercem influência sob os valores de resistência mecânica obtidos (Farias *et al.*, 2023; Mesquita *et al.*, 2020) Por esta razão, nesta revisão sistemática, optou-se por considerar unicamente dados provenientes de concretos, com o objetivo de evitar interpretações inadequadas e garantir maior precisão na análise de conformidade do cimento LC³ à pavimentos de concreto.

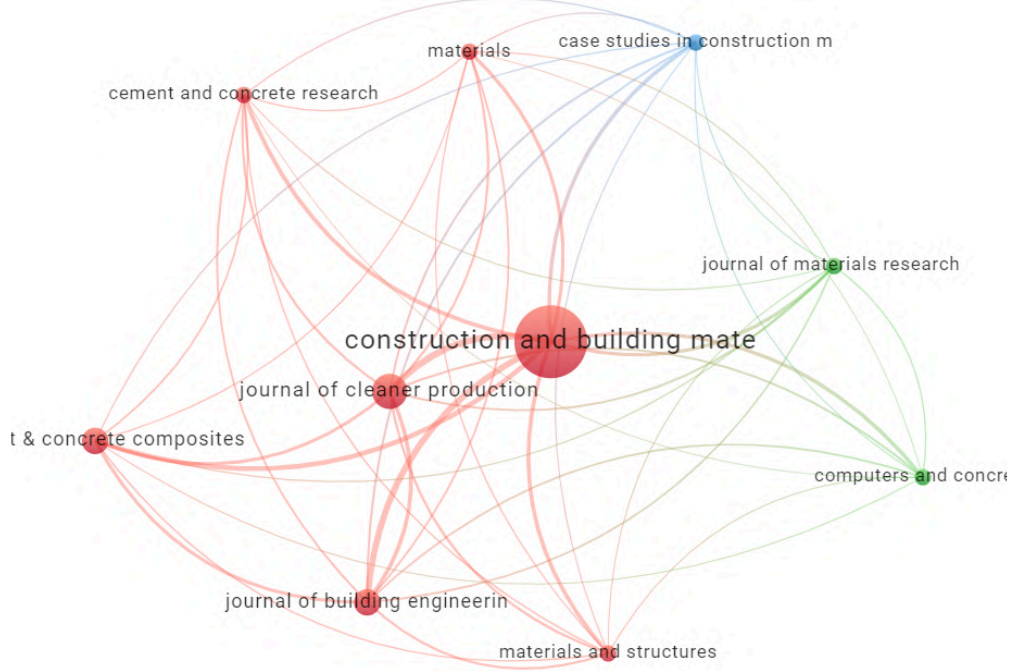
Para refinar mais a busca, foi adicionado um filtro para que as publicações resultantes da pesquisa fossem apenas artigos. Além disso, foi preciso excluir áreas do conhecimento que utilizam o acrônimo “LC³” ou “LC3” em outros contextos, tais como: biologia celular, parasitologia, doenças infecciosas, oncologia, neurociências, odontologia, farmacologia, agricultura, ciências veterinárias, oceanografia, engenharia oceânica, geologia, eletroquímica e ciências da computação, entre outras.

O período de publicação foi limitado de 2018 a 25 de junho de 2024 (dia da busca). É pertinente informar que, sem a limitação temporal, não houveram resultados anteriores a 2018, aplicando os operadores e termos descritos. Além disso, não houveram artigos correspondentes aos filtros para o ano de 2019.

2.3.2 Resultados

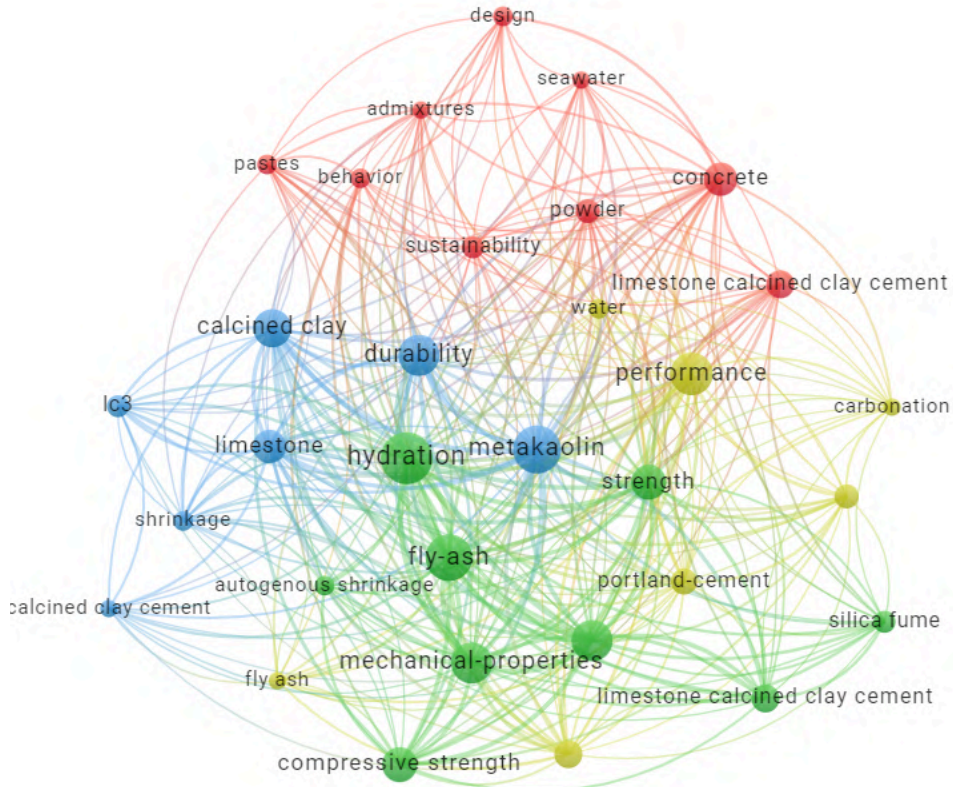
Aplicando o procedimento elucidado no tópico anterior, a plataforma *Web of Science* retornou 57 artigos, e a base de dados *Scopus* retornou 151 artigos, os dados foram exportados em formato .BibTeX e .xls (planilha *Excel*[®]). Para averiguar se os filtros estavam adequados, as buscas foram inseridas (formato .BibTeX) no *software VOSviewer*. Utilizando a ferramenta foi construído um mapa de termos, para cada um dos dois retornos. O objetivo é identificar se aparecem termos de outras áreas do conhecimento, e se os filtros estão afunilando os resultados adequadamente. Conforme a Figura 14 mostra, os termos resultantes na busca da base *Web of Science*, são de fato da área de pesquisa desejada.

Figura 16 – Mapa de Revistas.



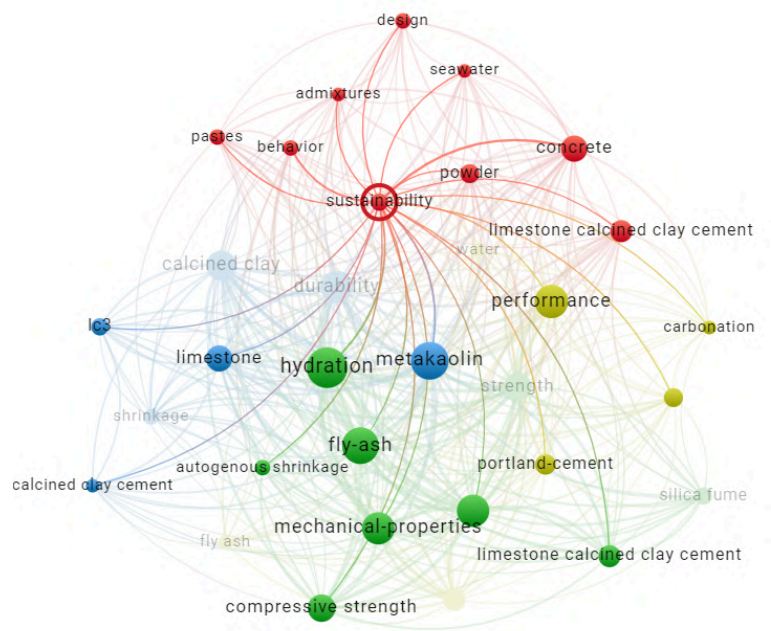
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 – Mapa de palavras-chave.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 – Mapa de palavras-chave com destaque.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados da busca na plataforma *Web of Science* (57 artigos) foram exportados em planilha para o *software Excel*[®]. Com base nos títulos e resumos foram excluídos 24 artigos, para refinar ainda mais os resultados. Dentre os excluídos estão artigos que tratam de impressão 3D (5 artigos), que o acesso requer pagamento (7 artigos), tratam de argamassa (10 artigos), de estabilização de solo (1 artigo) e não apresentou os dados necessários (1 artigo).

Restaram 33 artigos para coleta de dados, veja material suplementar. Dentre as publicações pesquisadas, 8 artigos indicam no título que os concretos pesquisados são de alta performance, sendo os artigos A7, A8, A15, A17, A21, A32, A47, A53. Por esta razão, estes se destacam por apresentarem resistência elevada. Dentre os artigos, foram identificados estudos com água e/ou areia do mar, artigos: A21, A31 A45 e A46. Os autores argumentam que o cimento LC³ tem propriedades que tornam possível executar concretos com água e areia salgada.

Os dados de resistência à compressão dos concretos a base de LC³ (coletados nos artigos), foram comparados com o valor mínimo para pavimentos de concreto, 30 MPa segundo o DNIT (2005). Dos 33 artigos 07 possuem pelo menos um valor que não atinge o mínimo, os artigos A16, A28, A34, A40, A51, A54, A56. No entanto, isso pode se dar ao fato do artigo pesquisar misturas diferentes. Apenas um artigo possui todas as medidas menores que 30 MPa, a publicação A28. Nos demais, pelo menos uma das 3 medidas atinge o mínimo normatizado.

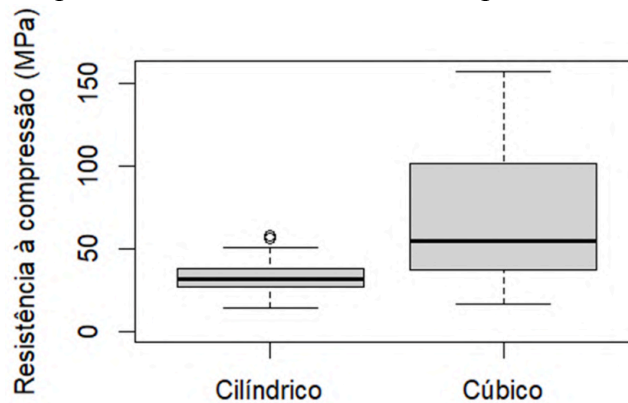
Os dados foram inseridos no *software* RStudio fazendo diferenciação entre os dados provenientes de corpos de prova cilíndricos e cúbicos, foram realizadas as estatísticas descritivas conforme o Quadro 3 e Figura 19. Já no gráfico da Figura 20 foi realizada uma relação entre a/c e a resistência à compressão dos dados coletados.

Quadro 3 – Sumário com média, média, mediana, quartis e desvio padrão dos dados.

Tipo de CP	Min	Q1	Mediana	Média	Q3	Max	Desvio padrão
Cilíndrico	14,34	27	32	34	38,4	58	10,87
Cúbico	17	38,25	55	68,62	100,95	157	38,20

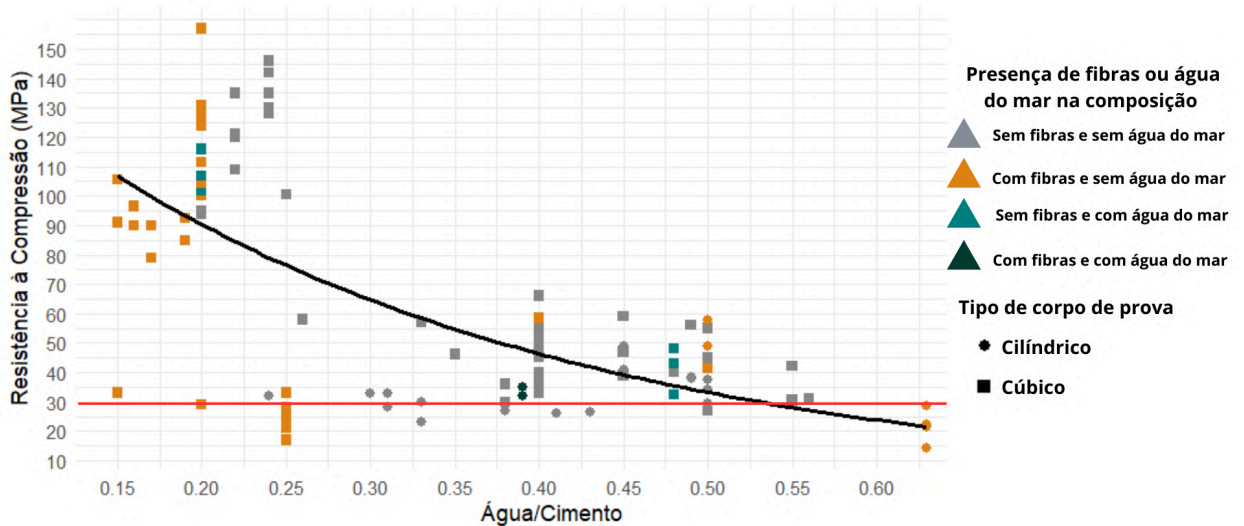
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Boxplot: valores de resistência à compressão de concretos LC³.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 – Resistência à compressão VS relação a/c de concretos LC³.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise do Quadro 3 e Figura 19 revela diferenças marcantes entre testes com cps cilíndricos e cúbicos. Nos cilíndricos, as resistências estão de 14,34 a 58 MPa, e desvio padrão de 10,87 MPa, indicando distribuição simétrica, baixa dispersão e concretos convencionais, alinhados às normas brasileiras. Os quartis concentram 50% dos dados entre 27 e 38 MPa, reforçando a homogeneidade.

O grupo cúbico apresentou faixa mais ampla, mediana de 55 MPa e desvio padrão de 38,20 MPa, com assimetria positiva devido a estudos que incluem concretos de alto desempenho. A variabilidade resulta de diferenças em dosagens, métodos, cura e efeitos geométricos, como confinamento lateral.

Assim, recomenda-se cautela em comparações diretas. Os ensaios de resistência à compressão no Brasil utilizam cps cilíndricos, conforme ABNT NBR 5739/23, diferente de algumas normativas estrangeiras, que determinam o uso de corpos de prova cúbicos ou prismáticos. Por este motivo, na Figura 20 foi utilizado o símbolo quadrado para representar os resultados provenientes de cps cúbicos e prismáticos, enquanto o símbolo circular representa os dados de cps cilíndricos.

Essa distinção é relevante devido às diferenças nos resultados que as duas metodologias podem apresentar. Mazepa e Rodrigues (2011) afirmam que "um mesmo concreto apresenta resistência cúbica maior do que a cilíndrica", sendo essa diferença da ordem de 5%. Sendo assim, o formato do corpo de prova é uma informação pertinente para a interpretação dos dados.

No eixo das abscissas na Figura 20 encontram-se os dados referentes à relação água/cimento, e no eixo das ordenadas os valores obtidos de resistência à compressão em MPa. Na Figura 20 foram feitas algumas diferenciações para facilitar a interpretação dos dados, dentre elas, está a indicação do formato do corpo de prova ensaiado. A faixa vermelha representa o marco de 30 MPa.

A diferenciação por cores identifica quais resultados provêm de formulações que utilizam fibras em sua composição ou água do mar. A cor cinza é utilizada para resultados que não possuem fibras e/ou água do mar na mistura; a cor laranja indica a presença de fibras, mas a ausência de água do mar; o azul escuro indica a presença apenas de água do mar; e o verde escuro, a presença de ambos.

Nos artigos desta pesquisa que utilizaram fibras, em sua grande maioria usam fibras de aço, mas houve também o uso de fibras orgânicas como de bagaço de cana e de açaí (A28). A indicação da presença de fibras é relevante para a interpretação do leitor, visto que as fibras na composição podem produzir um reforço à resistência mecânica. No gráfico da Figura 20, a linha em preto representa a curva de *Abrams* (ver Equação 1), que descreve a relação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento.

$$f_c = \frac{A}{(B)^{(a/c)}} \quad (1)$$

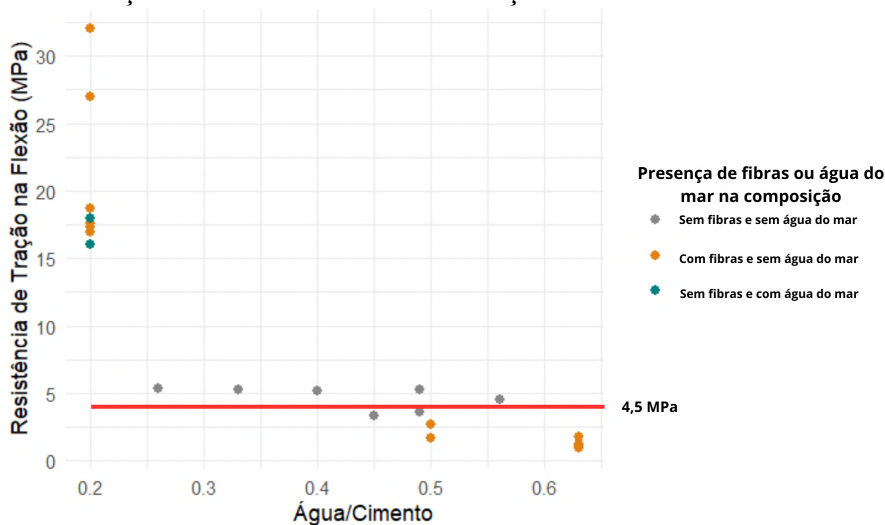
Na Equação 1 “ f_c ” representa a resistência à compressão; “ a/c ” representa o relação água/cimento; “A” é um valor constante que está relacionado com a resistência à compressão máxima teórica quando a/c se aproxima de 1; “B” é um valor constante que reflete a sensibilidade da resistência à compressão em relação ao valor de a/c .

Os dados coletados dos artigos foram inseridos no *software* RStudio, e então foi realizada uma regressão linear para encontrar os valores de A e B, ajustando a curva. A saída do *software* apresenta $A \approx 175.74$ e $B \approx 27.92$, após 800 iterações. Para ter acesso ao código completo consulte o material suplementar. Os dados de resistência à compressão coletados, indicam que os concretos à base de LC^3 atingem este requisito para serem usados em pavimentos de concreto.

No gráfico da Figura 21, são apresentados os dados coletados sobre a tração na flexão, uma característica relevante para pavimentação rígida, uma vez que o pavimento de concreto se comporta como uma placa (Balbo, 2009). Com base nas discussões feitas por Balbo (2009), os valores adequados para a resistência à tração na flexão em pavimentação rígida devem ser $> 4,5$ MPa. Os valores encontrados na bibliografia para concretos à base de LC^3 atingiram esse requisito.

Na Figura 21 observe que dos 33 artigos, apenas 07 apresentaram ensaios de tração na flexão, sendo eles: A1, A7, A21, A28, A47, A49 e A50. Isso se deve à menor disponibilidade de estudos sobre concreto a base de LC^3 , já que, os pesquisadores optam por trabalhar com pastas e argamassas, por questões práticas e financeiras. Estudos em concreto demandam muito mais material e o manejo dos cps não é prático. À vista disso, são necessários mais estudos sobre essa característica para discussão mais aprofundada e conclusões mais assertivas.

Figura 21 – Relação a/c e VS resistência de tração na flexão de concretos com LC^3 .



Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda sobre o gráfico da Figura 21, no eixo das abscissas estão dispostos os dados de relação a/c coletados e no eixo das ordenadas estão as respectivas resistências à tração na flexão. As cores seguem o mesmo padrão do gráfico da Figura 20, diferenciando a presença ou ausência de fibras e água do mar. Não há diferenciação de formato de rompimento dos corpos de prova neste caso.

A faixa vermelha na Figura 21 representa o marco de 4,5 MPa. Sendo assim, os resultados encontrados nesta revisão sistemática de literatura, são favoráveis ao uso do cimento LC³ na pavimentação.

Dos 33 artigos alvo deste estudo, em apenas 4 foram encontrados dados sobre o módulo de elasticidade do concreto, sendo eles A1; A31; A54 e A57. Os achados estão compilados no Quadro 4. Existe mais de um valor para cada artigo no Quadro 4, pois, nos artigos em questão os autores testaram mais de uma dosagem de concreto LC³.

Quadro 4 – Módulo de elasticidade encontrado nos artigos.

Artigo	Módulo de elasticidade (GPa)		
A1	37	38	*
A31	23	23,5	*
A54	29,1	28,8	28,3
A57	34,8	38,3	37,7

Fonte: Elaborado pela autora.

O módulo de elasticidade é uma propriedade que mede a facilidade com que um material pode ser deformado em resposta a uma carga, em seguida, retornar à sua forma original quando essa carga é removida. É um dado essencial para determinar como o material responderá às cargas aplicadas e como as tensões se distribuem na estrutura (Olita, Diomedi e Ciampa, 2020).

O Quadro 4 evidencia a escassez de dados sobre o módulo de elasticidade de concretos à base de cimento LC³. No contexto dos pavimentos de concreto, este é um parâmetro importante devido ao comportamento elástico assumido pela estrutura da via, ao receber o carregamento cíclico do tráfego (Balbo, 2009). Ainda cabe pontuar que, o módulo de elasticidade é um dado relevante no dimensionamento das armaduras do pavimento rígido.

É pertinente salientar que, não foi identificado na literatura um valor mínimo ou de referência para o módulo de elasticidade em pavimentos rígidos. Olita, Diomedi e Ciampa (2020) comentam que esse valor pode variar consideravelmente dependendo do material e do projeto. Os resultados desta revisão sistemática de literatura, indicam que os concretos à base de LC³ atingem os requisitos mecânicos para serem usados em pavimentos rígidos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, investigou-se a adequação do cimento LC³ para a produção de concretos para pavimentação rígida. Definiu-se o método do programa experimental, avaliando o Quadro 1', e as normas DNIT: 50/2004 EM, 54/2004 PRO e 59/2004 ES .

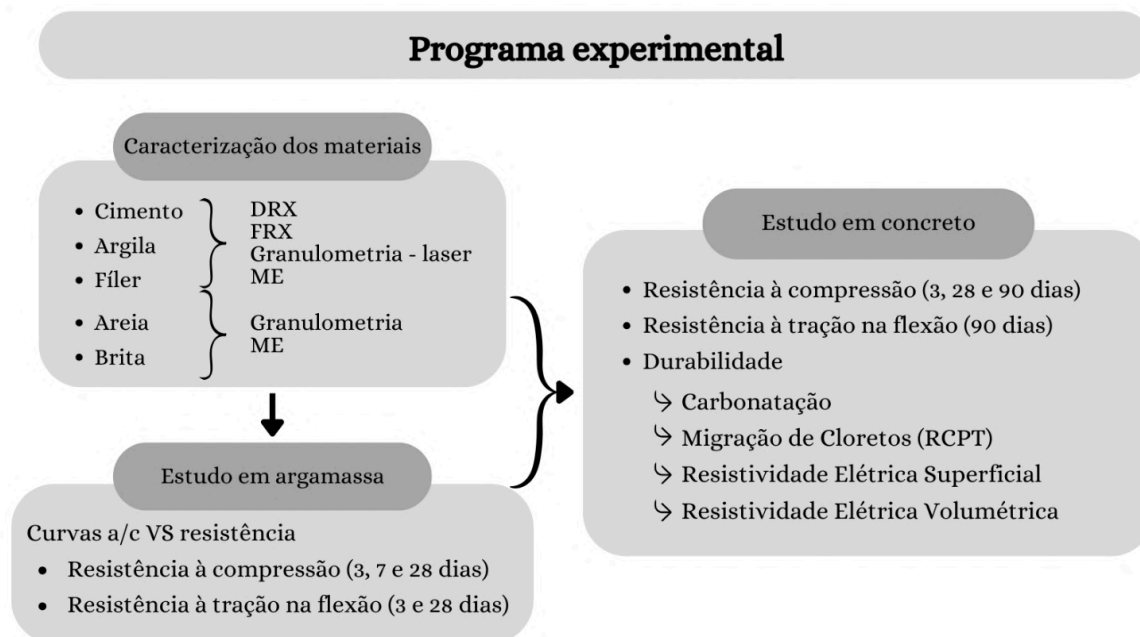
Devido ao consenso na literatura de que, o desempenho mecânico (de argamassas e concretos) diminui à medida que o teor de água aumenta, e ao fato que o LC³ demanda mais água para hidratação do que o Portland. (Brito; Almeida; Oliveira, 2019; Henriques *et al.*, 2021; Santos; Molin; Isaia, 2023). Decidiu-se investigar a relação a/c adequada para produzir concretos de LC³ capazes de atender aos requisitos.

Os materiais secos foram mantidos constantes, a relação a/c foi variada visando correlacionar o desempenho mecânico à relação a/c da formulação. Para atingir este propósito, inicialmente, o estudo foi realizado em argamassas.

Essa decisão foi motivada pela economia de materiais e pela facilidade de manuseio de argamassas em comparação ao concreto. Dessa forma, evitou-se preparar concretos para todas as relações a/c de interesse, posteriormente os resultados das argamassas foram base para a dosagem dos concretos.

É importante salientar que, o estudo em argamassas é um procedimento preliminar, os resultados a serem efetivamente comparados com as exigências do DNIT são provenientes do estudo em concreto. A Figura 22 é um fluxograma do programa experimental, que por sua vez foi dividido em duas partes.

Figura 22 - Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste estudo, utilizou-se cimento Portland do tipo CP V - ARI, filer calcário comercial, argila calcinada (fornecida pela empresa Circlua S.A.) e areia natural de quartzo passante na peneira 1,2 mm. A argila utilizada nesta pesquisa é proveniente de um subproduto da mineração de ferro, originária do estado de Minas Gerais, Brasil, foi calcinada em laboratório a 750 °C durante 3 horas. Possui teor de caulinita de 47%, determinado por análise termogravimétrica.

A análise termogravimétrica - TGA foi conduzida com o equipamento SDT650 (TA Instruments), sob atmosfera de N₂, com aquecimento de 20 °C/min e estabilização prévia de 10 min a 40 °C, Para detalhes adicionais sobre o procedimento de ensaio, consulte (Matos *et al.*, 2025), pois o material avaliado no artigo corresponde ao mesmo lote de material empregado nesta pesquisa acadêmica. Além disso, no ANEXO A', as curvas termogravimétricas estão disponíveis para consulta.

Para todas as misturas envolvendo ligantes LC³, fixou-se uma proporção de cimento:argila calcinada:calcário de 55:30:15 em massa. Fundamentada em estudos prévios que indicam desempenho otimizado para o sistema LC³. Essa combinação equilibra a reatividade da argila calcinada com o preenchimento de poros pelo filer calcário, maximizando as propriedades hidráulicas e mecânicas (Matos *et al.*, 2025).

Nesta pesquisa, não foi realizado ajuste de sulfatos na dosagem, devido a questões logísticas. Entre o estudo em argamassa e o estudo em concreto, a demanda por material é elevada, o que torna a correção de sulfatos um procedimento de alto custo. Para além da pesquisa, visando o uso em vias de concreto, o ajuste de sulfatos na mistura não seria prático em obras de pavimentação.

No Quadro 5 é apresentada a composição química dos materiais que foram utilizados na pesquisa, a qual foi obtida por fluorescência de raios X (FRX) utilizando um equipamento S2 Puma (Bruker) em amostra de pó solto.

A densidade dos materiais foi determinada por meio de picnometria à hélio, com o equipamento AccuPyc II (Micromeritics) calculando-se a média de 10 medições com desvio padrão inferior a 0,004 g/cm³ (Matos *et al.*, 2025). Enquanto a distribuição do tamanho de partículas foi determinada por difração à laser utilizando um equipamento PSA 1190 (Anton Paar) em meio líquido - isopropanol.

Quadro 5 – Composição química e física dos materiais.

Propriedade	CP V – ARI	Filer calcário	Argila calcinada
Composição química (% peso)			
SiO ₂	20,47	2,80	51,63
Al ₂ O ₃	4,86	0,50	18,61
Fe ₂ O ₃	2,60	0,34	21,69
CaO	58,06	55,44	0,21
K ₂ O	0,20	0,00	0,06
Na ₂ O	-	0,33	0,16
MgO	2,60	0,21	0,23
SO ₃	3,39	0,23	-
TiO ₂	0,34	0,05	3,05
P ₂ O ₅	0,15	0,14	0,65
SrO	0,24	0,10	-
Perda ao fogo	8,04	43,56	2,18
Propriedades físicas			
Densidade (g/cm ³)	2,982	2,714	2,894
Dv 10 (µm)	3,55	2,29	1,10
Dv 50 (µm)	13,04	16,44	9,11
Dv90 (µm)	30,45	56,69	45,08
Perda ao fogo aos 950°C			

Fonte: Adaptado de Matos *et al.* (2025).

Foram realizadas medições de DRX em pó utilizando um difratômetro XRDynamic 500 (Anton Paar) em modo de reflexão. O qual estava operando com radiação CuK α 1,2 a 40 kV e 40 mA, no intervalo de 5–70° 2 θ com tamanho de passo de 0,010° 2 θ (Matos, *et al.*, 2025). Os resultados da difração de raios X para o cimento, a argila e o filer calcário se encontram no APÊNDICE A'. Já o Quadro 6 apresenta a composição mineralógica dos mesmos.

Quadro 6 – Composição mineralógica dos materiais

Fase/amostra	CP V – ARI	Filer calcário	Argila calcinada	Gipsita
C ₃ S	65,0			
C ₂ S	8,3			
C ₃ A	5,1			
C4AF	9,1			
Lime	0,1			
Gipsita	0,7			88,2
Bassanite				10,8
Anidrita				1,0
Aphthitalite	0,3			
Syngenite	2,9			
Periclase	0,9			
Portlandita	1,9			
Calcite	4,6	85,8		
Dolomite	0,7	11,7		
Quartz	0,3	2,5	35,9	
Ilite				
Albite				
Hematita			20,1	
Kalinita			9,2	
A Cn*			34,9	

*amorfo

Fonte: Adaptado de Matos *et al.* (2025).

3.2 ESTUDO EM ARGAMASSA

Conforme mencionado anteriormente, o estudo em argamassas é preliminar, com o objetivo de testar diferentes relações água/cimento e, com base nesses resultados, prosseguir para o estudo em concreto. Dessa forma, há economia no quantitativo de material utilizado e facilidade na execução.

Em ordem de construir uma curva que correlaciona a resistência mecânica das argamassas com a relação a/c, foi delimitado o intervalo de a/c compreendido entre 0,40 e 0,56 sendo este, o recomendado pelo DNIT (ver Quadro 1^o). Ademais, prepararam-se misturas com valores de a/c superiores a 0,56, com o objetivo de gerar mais pontos na curva de resistência versus a/c. O Quadro 7 contém detalhes das formulações estudadas.

Devido a elevada demanda de água para hidratação do LC³ em comparação ao cimento Portland. Estudos com argamassas similares mantiveram proporções de água/materiais secos por volta de 15% à 18% (em massa). Com o intuito de otimizar a trabalhabilidade, desempenho mecânico e minimizar o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes (Barbalho; Silva; Rêgo, 2020; Cunha; Aguiar, 2022).

Sendo assim, para a dosagem das argamassas, fixou-se a relação água/materiais secos em 15% em massa, variando as proporções entre os constituintes. Outros fatores que foram mantidos fixos incluem: abatimento (*flow table*), trabalhabilidade, agregados (faixa granulométrica) e o processo de cura.

Quadro 7 – Misturas de argamassas utilizadas.

Mistura	CPV - ARI	Fíler calcário	Argila calcinada	Areia	a/c	Aditivo
CPV - 0,40	1	-	-	1,667	0,40	0,2 %
CPV - 0,48	1	-	-	2,200	0,48	0,5 %
CPV - 0,56	1	-	-	2,733	0,56	0,7 %
CPV - 0,73	1	-	-	3,333	0,73	0,7 %
LC ³ - 0,40	1			1,667	0,40	0,4 %
LC ³ - 0,48	1			2,200	0,48	0,8 %
LC ³ - 0,58	1			2,733	0,58	0,8 %
LC ³ - 0,80	1			3,333	0,80	0,8 %

Fonte: Elaborado pela autora.

Nas misturas com ligante LC³, adotou-se a proporção cimento:argila calcinada:calcário de 55:30:15 em massa, em virtude do seu reconhecimento na literatura. O valor para o *flow table test* fixado para todas as argamassas, foi de 26 cm (± 1 cm) sendo incorporado aditivo superplastificante à formulação para mantê-lo.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm, diâmetro x altura) e prismáticos (4 x 4 x 16 cm), os quais, após o desmolde, foram submetidos à cura úmida por submersão em tanque contendo solução saturada de cal. Os corpos de prova prismáticos, foram utilizados exclusivamente para o ensaio de tração na flexão, não foi executado o rompimento dos cubos à compressão.

Realizaram-se ensaios mecânicos de resistência à compressão (aos 3, 7 e 28 dias) e à tração na flexão (aos 3 e 28 dias). Para cada composição e idade, foram ensaiados pelo menos dois corpos de prova. Os resultados foram analisados e utilizados na elaboração de gráficos, contendo uma curva que relaciona a resistência mecânica da argamassa à relação água/cimento adotada. Os gráficos podem ser encontrados no capítulo 4.1^o (Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29).

3.3 ESTUDO EM CONCRETO

Com base no estudo em argamassas, a pesquisa prosseguiu para o estudo em concreto, selecionaram-se as relações a/c que apresentaram bom desempenho nos ensaios (ver capítulo 4.1^o). Para a dosagem, foi considerado o maior valor para a/c que atingiu resistência à compressão >30 MPa e à tração na flexão >4,5 MPa aos 28 dias.

O Quadro 8 detalha as três dosagens de concreto preparadas: (i) uma com cimento Portland de relação a/c de 0,56: por ser o valor máximo recomendado pela normativa e por seu desempenho no estudo em argamassa; (ii) uma mistura de LC³ com a mesma relação a/c = 0,56: para fins de comparação; e (iii) uma dosagem de LC³ com a/c = 0,48: por seu desempenho no estudo em argamassas. Nas misturas de concreto com ligante LC³, assim como no estudo em argamassa, adotou-se a proporção cimento:argila calcinada:calcário de 55:30:15 em massa.

Ainda dentre os parâmetros fixos, o *slump test* alvo foi estabelecido em 70 mm (± 10 mm), por ser um valor ‘intermediário’ entre o abatimento de cone para dias secos e o para dias úmidos, conforme o DNIT (Quadro 1^o). Esse valor visa assegurar uma trabalhabilidade adequada para o concreto de pavimentos rígidos, sem comprometer a resistência mecânica, aspecto determinante para a durabilidade (Martins *et al.*, 2018).

A proporção água/materiais secos, a priori, foi mantida em 15% em massa, da mesma maneira que no estudo de argamassas. No entanto, durante a execução dos concretos, o abatimento de cone resultou em valores superiores aos adequados para pavimentos de concreto. Então, ajustou-se esse parâmetro para 10,80% (em massa) para todas as misturas, o que se confirma no Quadro 8.

Quadro 8 – Misturas de concretos utilizadas na pesquisa.

Mistura	CPV - ARI	Fíler calcário	Argila calcinada	Areia	Brita	a/c	Aditivo
CPV - ARI	1	-	-	1,70	2,49	0,56	0,27%
LC ³ 0,48	1			1,31	2,13	0,48	0,26%
LC ³ 0,56	1			1,70	2,49	0,56	0,25%

Fonte: Elaborado pela autora.

Adicionou-se aditivo superplastificante às misturas, para que os concretos atingissem o resultado do ensaio de *slump* o mais próximo do desejado (70 ± 10 mm), preservando a relação a/c. Veja no Quadro 8 que a quantidade de aditivo não foi idêntica entre as misturas, porém próxima.

3.3.1 Ensaios mecânicos

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para rompimento à compressão e ensaios de durabilidade. Também moldaram-se cps prismáticos de 10 x 10 cm (largura x altura) com 50 cm de comprimento para rompimento à tração na flexão. Todos foram submetidos à cura úmida em tanque, contendo solução saturada de cal. Foi utilizada a Máquina de ensaio universal (200T, EMIC/Instron) a uma taxa de carregamento de 0,6 mais ou menos 0,15 MPa/s para os rompimentos.

O número de corpos de prova a serem rompidos e as idades de ensaio foram limitados pela disponibilidade de moldes. Em razão disso, os rompimentos de compressão ocorreram aos 3, 28 e 90 dias, ensaiando no mínimo 2 corpos de prova por idade para cada mistura. Foram reservados 3 cps (cilíndricos) de cada dosagem para os ensaios de durabilidade, sendo eles: migração de cloretos, carbonatação e resistividade elétrica volumétrica e superficial. Estes serão descritos em tópicos seguintes.

Já os rompimentos de tração na flexão ocorreram apenas aos 28 dias, em virtude da quantidade reduzida de moldes prismáticos para concreto disponíveis, 3 corpos de prova foram ensaiados para cada mistura.

3.3.2 Teste de significância estatística - Análise de variância (ANOVA)

Os dados obtidos nos ensaios mecânicos foram analisados por meio de Análise de Variância - ANOVA, para avaliar a significância estatística das diferenças entre as 3 misturas de concreto e idades de cura. Para tanto, utilizou-se o software RStudio, cujo código e saída estão disponíveis nos materiais suplementares^ç. O grau de significância adotado foi 0,05, qualquer diferença observada somente é considerada estatisticamente significativa se a probabilidade de ela ocorrer por acaso for inferior a 5%.

3.3.3 Durabilidade: Resistividade Elétrica Superficial

A resistividade superficial é uma medida indireta da permeabilidade do concreto, indicando sua capacidade de resistir à penetração de substâncias agressivas (Henriques *et al.*, 2021).

O ensaio é realizado com um medidor de Wenner que utiliza quatro eletrodos alinhados e igualmente espaçados para injetar corrente elétrica e medir a queda de potencial, permitindo o cálculo da resistividade aparente do material. O equipamento utilizado foi o Resipod, (Proceq SA) que opera com corrente alternada de 40 Hz. O fabricante afirma seguir conformidade com a normativa AASHTO T 358/2022.

O ensaio se dá por meio da aplicação de uma corrente elétrica entre as duas sondas externas, medindo a diferença de potencial entre as duas sondas internas, realizando o cálculo automático da resistividade elétrica superficial do concreto. Para garantir adequado contato elétrico, utilizaram-se contatos de espuma condutora previamente umedecidos.

O uso da espuma não é obrigatório, porém é recomendado pelo fabricante do aparelho, outra recomendação é verificar o funcionamento adequado do equipamento utilizando uma placa teste, antes de iniciar os ensaios.

Considerando a influência do teor de umidade na resistividade elétrica, os corpos de prova foram saturados¹² em água com cálcio por 10 dias e ensaiados em condição de superfície seca saturada. Os ensaios foram conduzidos em cps cilíndricos de 10 x 20 cm (\varnothing x h), em superfícies limpas, assegurando ausência de partículas soltas, contaminantes ou revestimentos isolantes.

Os corpos de prova foram posicionados sobre uma superfície plana, então as leituras foram realizadas com a sonda posicionada perpendicularmente à superfície, em diferentes pontos do cp, rotacionando o aparelho para obter uma média representativa que minimiza a influência de heterogeneidades locais.

Por tanto, foram realizadas medidas em quatro posições do espécime, leitura em 0°, rotaciona-se o aparelho para leitura em 90°, novamente para leitura em 180° e a última rotação para leitura em 270°. A média das quatro leituras mencionadas é o resultado da resistividade superficial para este corpo de prova. Foram ensaiados três cps por mistura de concreto. Para acessar dados e cálculos veja material suplementar⁷.

¹² Os corpos de prova foram moldados na UDESC em Joinville - SC, passaram por 28 dias de cura úmida, então foram enviados à UFES em Vitória - ES, lá foram realizados os ensaios de durabilidade. O envio se deu em estado seco, então no destino foram levados ao tanque por 10 dias.

3.3.4 Durabilidade: Resistividade Elétrica Volumétrica

De acordo com o Manual Resipod (2017) a resistividade volumétrica é determinada por eletrodos em contato direto com as faces opostas do corpo de prova, o ensaio foi realizado utilizando o acessório específico acoplado ao equipamento Resipod (Proceq SA), permitindo a passagem de corrente elétrica através do volume total do corpo de prova.

O sistema consiste em duas placas metálicas condutoras, providas de elementos de espuma condutora, posicionadas nas extremidades dos corpos de prova cilíndricos. O equipamento opera com corrente alternada de 40 Hz, e a resistividade volumétrica é obtida a partir da medição da resistência elétrica e da aplicação de fatores de correção geométrica em função das dimensões do corpo de prova.

Considerando a influência do teor de umidade na resistividade elétrica, os cps foram saturados¹³ por 10 dias em água com cálcio e ensaiados em condição de superfície seca saturada. Em seguida, a preparação do corpo de prova foi feita garantindo que as superfícies de contato estivessem limpas, planas e livres de impurezas.

Os ensaios foram conduzidos em cps cilíndricos de 10 x 20 cm (\varnothing x h), como pequenas variações devido a moldagem e retificação. O que deve ser levado em consideração, para os cálculos de áreas e do fator geométrico de cada corpo de prova ensaiado, sendo ensaiados três cps por mistura de concreto.

As espumas condutoras foram umedecidas, assegurando contato elétrico homogêneo entre as placas metálicas e o concreto. O corpo de prova foi posicionado verticalmente, mantendo alinhamento axial e pressão uniforme durante as medições.

Inicialmente, foram determinadas as resistências elétricas individuais das espumas condutoras, conforme procedimento do fabricante, seguidas da medição da resistência total do sistema. A resistência efetiva do concreto foi obtida por subtração, permitindo o cálculo da resistividade volumétrica. Para acessar dados e cálculos veja material suplementar⁴.

Os ensaios de resistividade não comprometem os corpos de prova, estes podem ser utilizados em outros ensaios, sem prejuízo aos resultados.

¹³ Os corpos de prova foram moldados na UDESC em Joinville - SC, passaram por 28 dias de cura úmida, então foram enviados à UFES em Vitória - ES, lá foram realizados os ensaios de durabilidade. O envio se deu em estado seco, então no destino foram levados ao tanque por 10 dias.

3.3.5 Durabilidade: Migração de Cloretos (Rapid Chloride Permeability Test)

O ensaio de migração de cloretos, conforme a norma ASTM C1202/2022, avalia a durabilidade do concreto por meio da condutância elétrica. Nesse teste, aplica-se uma diferença de potencial à uma amostra imersa em soluções de cloreto de sódio e hidróxido de sódio, em seguida avalia-se a resistência do material à penetração de íons cloreto por meio da carga elétrica total passante, expressa em Coulombs.

As amostras foram produzidas a partir dos corpos de prova cilíndricos de concreto, que já foram utilizados nos ensaios de resistividade elétrica. Destes foram extraídos discos com aproximadamente 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, obtidos por corte perpendicular ao eixo longitudinal.

As superfícies dos discos foram regularizadas e limpas, em ordem de garantir bom contato. Após o corte, os discos voltaram ao tanque de cura úmida por mais dois dias. Nesta pesquisa não foi realizada a etapa de pré - condicionamento a vácuo, devido ao estado já saturado das amostras.

Aplicando o potencial de 60 V durante 6 horas, conforme ASTM C1202, o estudo enfrenta um comprometimento dos dados do ensaio, devido ao efeito Joule¹⁴, que esquenta as soluções e o corpo de prova de concreto.

Para evitar que isso ocorra, o ensaio prosseguiu com 18 V durante 20 horas, dessa maneira a temperatura é mantida entre 20 - 25°C e ao finalizar o ensaio a amostra foi submetida aos mesmos 360 V*h como aconteceria no ensaio original.

Durante o ensaio, a temperatura das soluções foi monitorada, assegurando-se que não ultrapassasse os limites estabelecidos pela norma, de modo a evitar interferências térmicas nos resultados.

Neste ensaio, seguindo a normativa, espera-se que a corrente passante no corpo de prova seja a mesma durante todo o ensaio. Porém, o efeito Joule faz com que as soluções e o corpo de prova comecem a aquecer. Alterando a resistividade elétrica, aumentando a corrente passante, e à medida que mais corrente passa, mais o sistema se aquece, tornando-se um ciclo.

Para simular o ensaio de 60 V foram feitas aferições de tempo máximo de 10 minutos, antes que o sistema pudesse aquecer. Para acessar dados e cálculos veja material complementar⁷.

¹⁴ O efeito Joule é um fenômeno físico no qual a passagem de corrente elétrica através de algum meio resulta em seu aquecimento.

3.3.6 Durabilidade: Ensaio de Carbonatação

A carbonatação é um processo de degradação do concreto que ocorre quando o dióxido de carbono presente na atmosfera reage com os hidróxidos de cálcio (Ca(OH)_2) na matriz cimentícia, formando carbonato de cálcio e reduzindo o pH do concreto. Essa redução do pH compromete a camada passivadora que protege a armadura de aço, tornando-a vulnerável à corrosão (Elkhaldi *et al.*, 2022).

Os corpos de prova 10 x 20 cm (\varnothing x h), foram cortados transversalmente, resultando em discos com 50 mm de espessura. Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 40 °C por um período de sete dias.

Após o período de secagem, as superfícies laterais dos corpos de prova foram seladas com epóxi, de modo a restringir a penetração do CO_2 exclusivamente pelas faces superior e inferior. Após a aplicação do epóxi, as amostras permaneceram em repouso por 24 horas, garantindo a completa cura do material selante.

Posteriormente, os corpos de prova foram inseridos em câmara de carbonatação, sob concentração de dióxido de carbono de 3%, umidade relativa controlada de 65% e temperatura de 27 °C, condições recomendadas pela norma ISO 1920-12:2015 para regiões laboratoriais de clima quente. Os corpos de prova foram sujeitos à câmara de CO_2 por 28 dias.

Após o período de exposição, o corpo de prova foi seccionado, expondo as superfícies internas, sobre as quais foi aspergida solução de fenolftaleína a 1%, onde a área não carbonatada (pH elevado) adquire coloração rosa e a carbonatada (pH reduzido) permanece incolor, permitindo a medição da profundidade de penetração do CO_2 .

A profundidade de carbonatação foi determinada por meio da realização de cinco medições na face superior e cinco na face inferior de cada corpo de prova, utilizando-se paquímetro digital, sendo o valor final obtido pela média aritmética das leituras, conforme recomendação das normas.

A profundidade de carbonatação detectada por este método é um parâmetro para avaliar o risco de corrosão das armaduras, já que a despassivação do aço pode ocorrer quando a frente de carbonatação atinge o alinhamento principal das armaduras (Campos *et al.*, 2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados do estudo em argamassa, seus ensaios mecânicos e discussões. Da mesma forma, serão apresentados os resultados do estudo em concreto, seus ensaios mecânicos e de durabilidade. Esses resultados serão comparados com valores da literatura, a fim de avaliar a adequação do cimento LC³ para aplicação em pavimentação rígida.

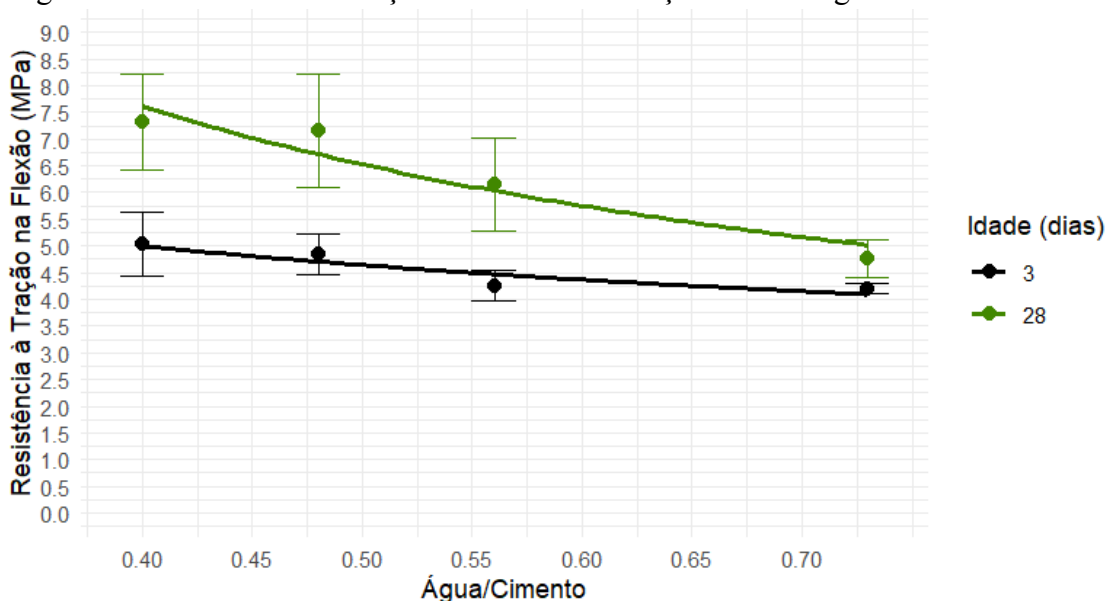
4.1 RESULTADOS DO ESTUDO EM ARGAMASSA

Como descrito anteriormente, os ensaios com argamassas foram apenas mecânicos. A Figura 23 apresenta a curva que relaciona a resistência à tração na flexão com a relação a/c das argamassas de CPV-ARI, avaliadas aos 3 e 28 dias. Da mesma maneira, a Figura 24 exibe a curva correspondente para as argamassas de cimento LC³.

Nota-se que para o CPV-ARI, o alvo de resistência à flexão de 4,5 MPa já é atingido aos 3 dias com uma relação a/c de 0,55. Já para o LC³, naturalmente com ganho de resistência mais lento nas primeiras idades, atingiu-se um máximo de aproximadamente 4,0 MPa (a/c = 0,40) nesta idade.

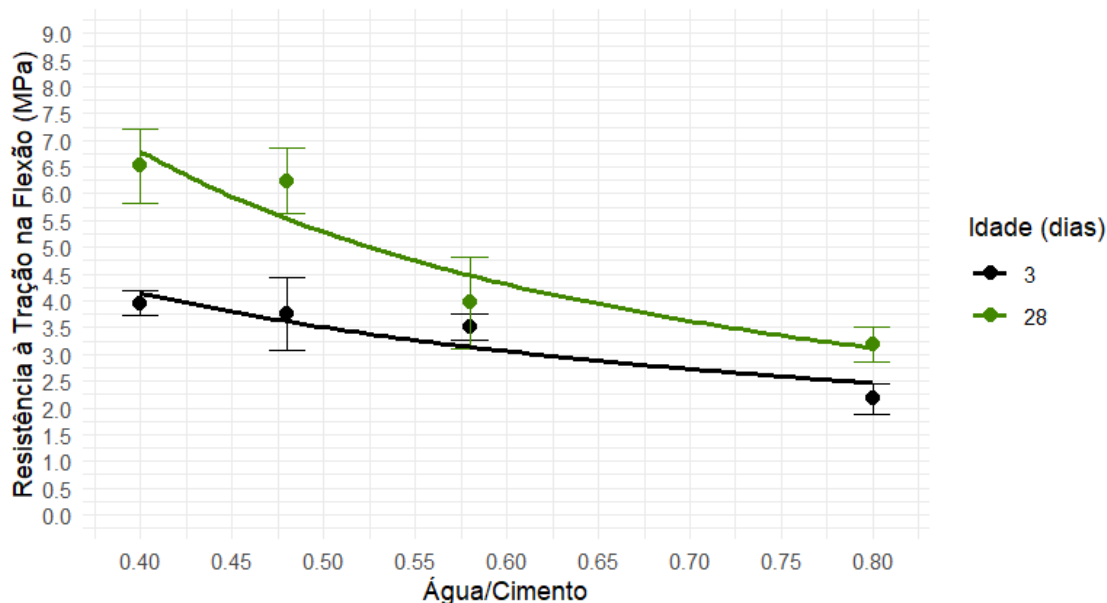
A Figura 23 evidencia que todas as dosagens de CPV-ARI testadas superam 4,5 MPa aos 28 dias, embora se observe que, quanto maior a relação a/c menor o ganho de resistência entre ensaios. Na Figura 24, a tendência se repete, nota-se que os resultados aos 28 dias indicam que as relações a/c de argamassas com LC³ devem ser > 0,58 para atender o valor estipulado 4,5 MPa.

Figura 23 - Resistência de tração na flexão VS relação a/c das argamassas CPV-ARI.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 - Resistência de tração na flexão VS relação a/c das argamassas LC³.



Fonte: Elaborado pela autora.

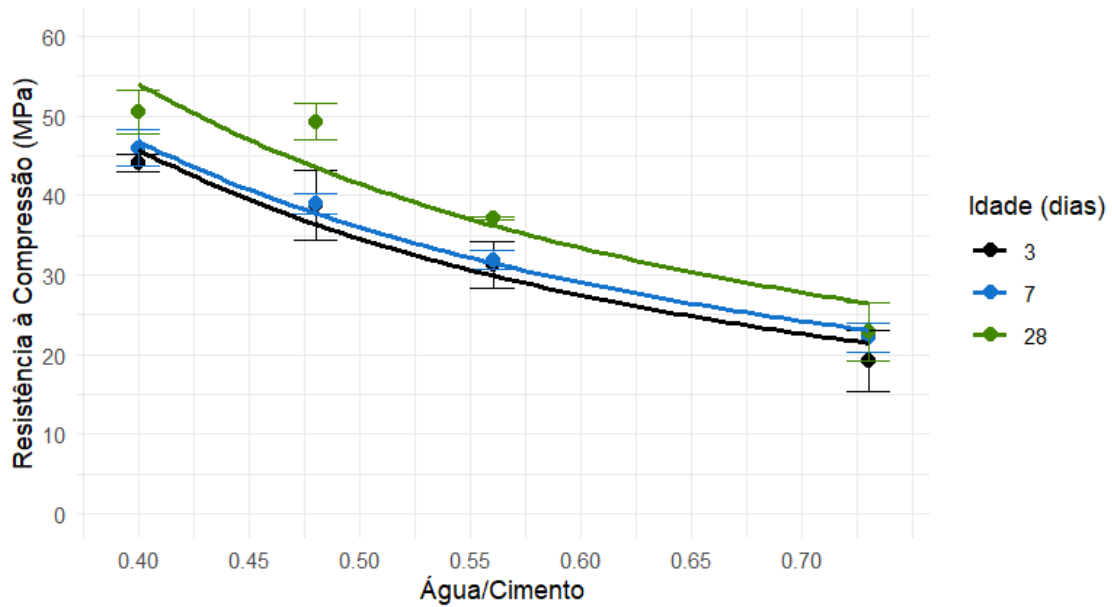
A Figura 25 apresenta um gráfico com a curva que relaciona a resistência à compressão à relação a/c das argamassas de CPV-ARI, avaliadas aos 3, 7 e 28 dias e da mesma forma a Figura 26 para o cimento LC³. O requisito de resistência à compressão de 30 MPa é atingido por ambos os ligantes já aos 3 dias, com relações a/c = 0,56 e 0,40 respectivamente para CPV-ARI e LC³.

Nota-se um ganho mais expressivo de resistência à compressão dos 3 aos 7 dias nas argamassas LC³, já esperado. O CPV-ARI, Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, apresenta elevado aumento nas primeiras 24 horas até 3 dias, com menor ganho entre 3 e 7 dias, alinhado ao seu perfil de alta precocidade (Wally; Magalhães; Filho, 2020). Enquanto o LC³ apresenta hidratação mais gradual, e o ganho de resistência (parcialmente associado à reação da argila calcinada), se dá de forma mais lenta.

Aos 28 dias, as argamassas de LC³ e CPV-ARI com relação a/c = 0,40 apresentam desempenhos mecânicos muito semelhantes de resistência à compressão, alcançando ≈ 50 MPa, com a barra de erro se sobrepondo. Esse resultado é coerente com a literatura acadêmica, que relata performance semelhante entre os ligantes citados.

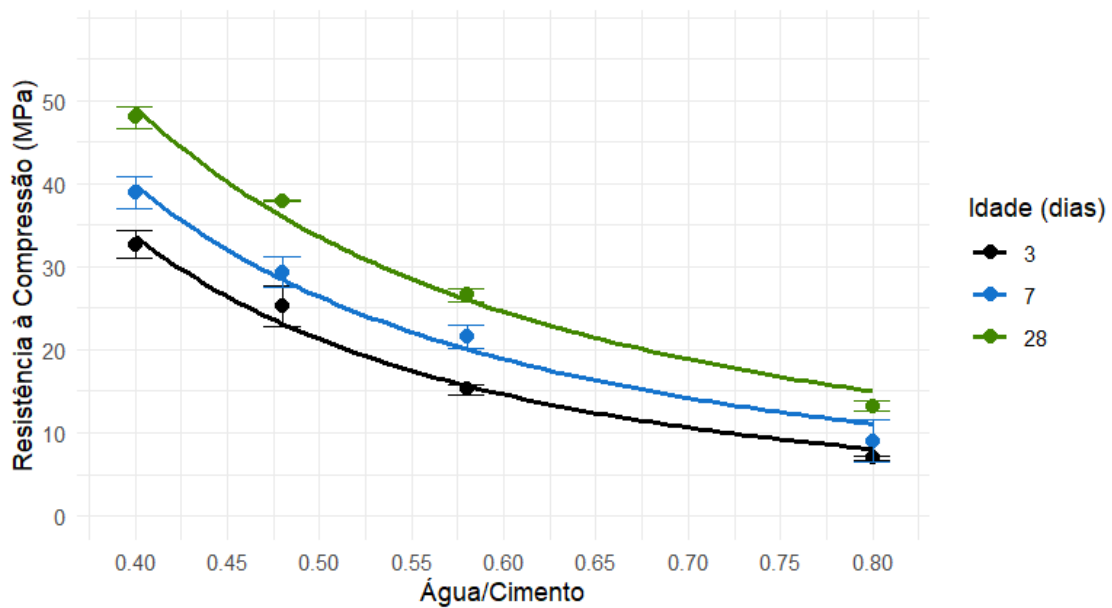
Prosseguindo com a análise das curvas nota-se que, para o CPV-ARI ultrapassar 30 MPa a relação a/c deve ser $< 0,60$, enquanto para o ligante LC³ a relação a/c precisa ser $< 0,50$.

Figura 25 - Resistência à compressão vs relação a/c das argamassas CPV - ARI.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 - Resistência à compressão VS relação a/c das argamassas LC³.



Fonte: Elaborado pela autora.

É importante lembrar que, a tendência é que a resistência mecânica dos concretos seja superior à obtida em argamassas, devido à presença de agregados graúdos. Devido a essa característica, o estudo em argamassas serve como parâmetro, mas não como delimitador. A avaliação de concretos à base de LC³ é essencial para confirmar se os requisitos técnicos para pavimentos rígidos são atendidos.

4.2 RESULTADOS DO ESTUDO EM CONCRETO

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios realizados com concretos, abrangendo resistência mecânica e propriedades de durabilidade.

4.2.1 Resultado dos ensaios mecânicos

Como já foi mencionado, a resistência mecânica é um parâmetro muito relevante para a pavimentação rígida, inclusive em seu processo de dimensionamento. Neste tópico, são apresentados os gráficos de resistência à compressão e a tração na flexão.

Os dados de resistência à compressão foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) fatorial de dois fatores de interação, considerando o tipo de mistura e a idade de ensaio como variáveis independentes, bem como sua interação. Visando garantir a adequada interpretação dos resultados.

Definições iniciais da ANOVA:

Variável resposta: resistência à compressão (MPa).

Fatores:

a) Mistura: 3 níveis (CPV 0,56 ; LC³ 0,48 ; LC³ 0,56).

b) Idade do ensaio: 3 níveis (3, 28 e 90 dias);

Tratamentos: (3 misturas * 3 idades) = 9

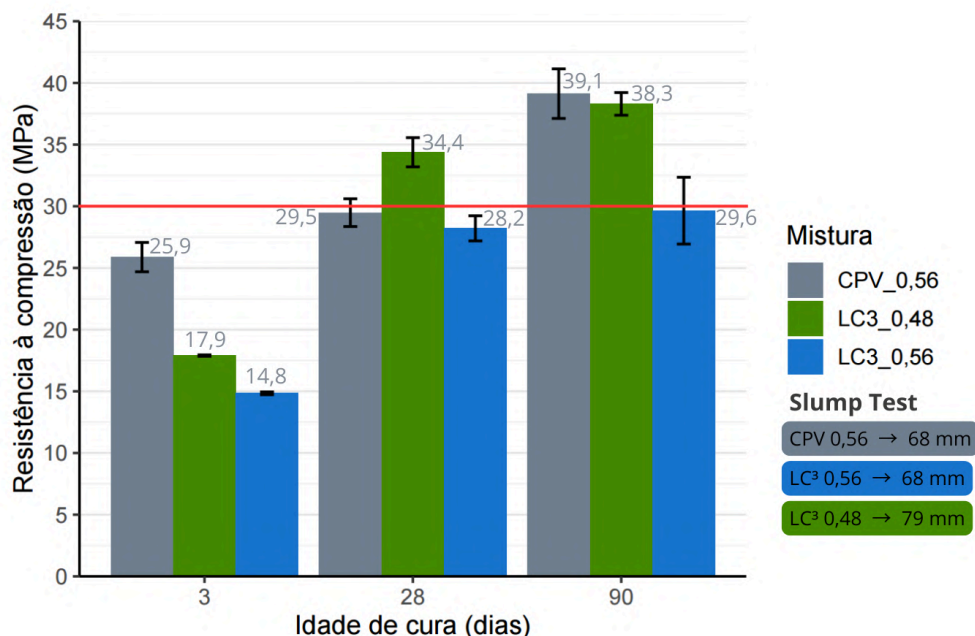
Réplicas: mais de um corpo de prova por combinação. (de 2 à 3)

Foram aplicados o teste de Shapiro-Wilk, para verificar a normalidade dos dados, e o teste de Levene, para avaliar a homogeneidade das variâncias, ambos com nível de significância de 5%. O teste de Shapiro-Wilk resultou em p-valor = 0,976, não rejeitando a hipótese nula e confirmando que os dados seguem distribuição normal. O teste de Levene apresentou p-valor = 0,3512, superior ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), não rejeitando a hipótese nula de homogeneidade das variâncias e confirmando que as dispersões entre os grupos analisados são estatisticamente iguais.

Essas informações reforçam a validade dos pressupostos da ANOVA fatorial, considerando a robustez do método em delineamentos balanceados com normalidade confirmada, mesmo com número reduzido de réplicas. Tal como reportado na literatura para experimentos com concretos, pequenas variações residuais podem decorrer da heterogeneidade natural das misturas, mas não comprometem a análise (Zaleski; Marangoni; Vanzetto, 2022; Uysal *et al.*, 2019).

A Figura 27 é composta por dados de resistência à compressão no eixo das ordenadas, sendo a linha vermelha = 30 MPa¹⁵. E no eixo das abscissas, as idades de ensaio dos cps. Ademais, o valor de *slump test*, no canto inferior direito.

Figura 27– Resistência à compressão dos concretos ao decorrer do tempo.



Fonte: Elaborado pela autora.

O Quadro 9 foi construído com com embasamento nos resultados do teste de Tukey (5% de significância). Apresentando as determinações de significância ou não significância, na comparação entre o desempenho das misturas para a mesma idade.

Quadro 9 – Comparação estatística entre as resistências à compressão de cada mistura de concreto por idade.

n°	Comparação		Idade	p-valor	Conclusão estatística
1	CVP_0,56	LC3_0,48	3 dias	0,0001	Diferença significativa
2	CVP_0,56	LC3_0,56	3 dias	<0,0001	Diferença significativa
3	LC3_0,48	LC3_0,56	3 dias	0,057	Limítrofe*
4	CVP_0,56	LC3_0,48	28 dias	0,0015	Diferença significativa
5	CVP_0,56	LC3_0,56	28 dias	0,5436	Limítrofe*
6	LC3_0,48	LC3_0,56	28 dias	0,0006	Diferença significativa
7	CVP_0,56	LC3_0,48	90 dias	0,7999	Diferença NÃO significativa
8	CVP_0,56	LC3_0,56	90 dias	<0,0001	Diferença significativa
9	LC3_0,48	LC3_0,56	90 dias	0,0001	Diferença significativa

*O resultado está no limite da diferença estatisticamente significante e diferença irrelevante.

Fonte: Elaborado pela autora, com uso do software RStudio .

¹⁵ Valor mínimo normatizado para resistência à compressão de concretos, aos 28 dias de cura, para pavimentos de concreto no Brasil, DNIT (2005).

Como esperado, aos 3 dias, a mistura com Cimento Portland de alta resistência inicial - CPV-ARI, apesar da relação a/c superior à da dosagem LC³ 0,48, obteve o maior valor de resistência à compressão - veja a comparação n° 1 no Quadro 9 e gráfico Figura 27. Ao comparar as duas misturas com ligante LC³, a diferença observada é limítrofe na primeira idade, ou seja, está no limite da significância estatística ($p \approx 0,05$) conforme comparação n° 3 no Quadro 9. Portanto, pode-se afirmar que a mistura CPV 0,56 exibiu resistência significativamente superior aos 3 dias, o que pode ser atribuído à elevada reatividade inicial do cimento Portland.

Aos 28 dias, as misturas com relação a/c = 0,56, porém ligantes diferentes (CPV e LC³), apresentam diferença limítrofe, conforme comparação n° 5 no Quadro 9. Ambas possuem médias próximas ao valor alvo de 30 MPa; todavia, a média da dosagem CPV 0,56 não atinge o valor almejado por apenas 0,5 MPa.

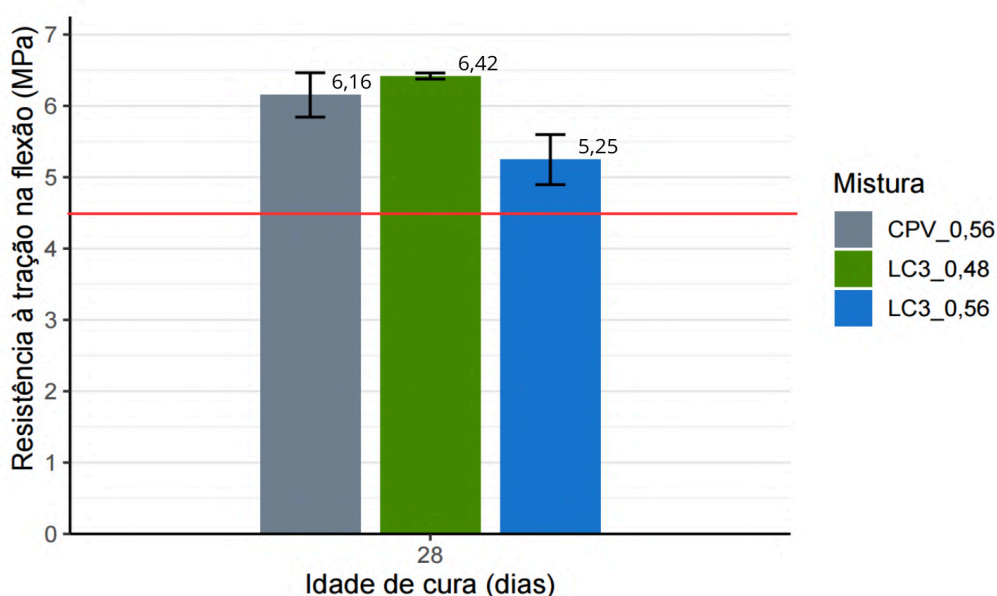
A mistura LC³ 0,48 apresentou o melhor desempenho aos 28 dias, possivelmente devido à menor relação a/c, ao efeito filler do calcário e à ativação pozolânica da argila calcinada. Observando o Quadro 9, LC³ 0,48 apresentou diferença estatisticamente significativa com ambas as outras misturas, veja as comparações n° 4 e n° 6.

Aos 90 dias, não há diferença estatisticamente significativa entre as misturas CPV 0,56 e LC³ 0,48, conforme comparação n° 7 no Quadro 9, podendo-se considerar que apresentam resistências equivalentes. As demais comparações revelam diferenças estatisticamente significativas, veja n° 8 e n° 9.

Em resumo, as comparações do teste de Tukey entre as misturas mostraram que, aos 3 dias, o concreto CPV 0,56 apresentou maiores resistências, enquanto aos 28 dias LC³ 0,48 obteve desempenho superior. Aos 90 dias, CPV 0,56 e LC³ 0,48 não diferiram estatisticamente entre si, e ambas obtiveram resultados superiores à mistura LC³ 0,56.

Na Figura 28, o gráfico da resistência à tração na flexão revela que todas as misturas analisadas exibiram desempenho satisfatório aos 28 dias. A linha vermelha representa o requisito mínimo de 4,5 MPa. Inclusive a mistura LC³ 0,56, com relação a/c mais elevada, superou o valor estipulado. Tal como observado na resistência à compressão, as dosagens CPV 0,56 e LC³ 0,48 obtiveram resultados muito próximos; neste caso, a mistura LC³ 0,48 apresentou resistência à tração na flexão ligeiramente superior.

Figura 28 – Resistência à tração na flexão dos concretos aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após análise dos resultados obtidos e das normativas DNIT, os desempenhos mecânicos de concretos à base de argila calcinada indicam que, o cimento LC³ é capaz de atender os requisitos, se houver controle adequado da relação água/cimento. Nos parâmetros adotados nesta pesquisa o cimento LC³ com $a/c = 0,48$ obteve desempenho estatisticamente equivalente ao Cimento Portland V - ARI com $a/c = 0,56$.

4.2.2 Resultado dos ensaios de durabilidade

De acordo com o Quadro 10, e em consonância com resultados reportados na literatura, observa-se que os concretos produzidos com cimento Portland apresentam menor avanço de carbonatação quando comparados aos concretos com LC³. Tal comportamento pode ser atribuído ao maior teor de hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ disponível na pasta hidratada de cimento Portland, o qual, ao carbonatar, precipita carbonato de cálcio, preenchendo parcialmente a porosidade da matriz, limitando o avanço da frente de carbonatação (Avet; Scrivener, 2020).

A Figura 29 apresenta graficamente os resultados do ensaio de profundidade de carbonatação. Entre as três dosagens de concreto testadas, aquela produzida com cimento LC³ $a/c = 0,56$ apresentou a maior suscetibilidade à carbonatação, com maior profundidade de penetração do CO₂. Em contrapartida, o concreto CPV $a/c = 0,56$ exibiu a menor profundidade de carbonatação.

O comportamento na Figura 29 se relaciona também, com a argila calcinada em cimentos LC³, que tende a reduzir a quantidade de hidróxido de cálcio livre por meio de reações pozolânicas, acelerando a taxa de carbonatação (Matos *et al.*, 2024). No entanto, essa diminuição de portlandita é compensada por uma microestrutura mais densa e uma conectividade de poros refinada, benéficas para a resistência à penetração de cloretos (Avet; Scrivener, 2020; Matos; Sakata; Prudêncio, 2019).

Assim, o cimento Portland comum exibe melhor desempenho nos ensaios de carbonatação devido ao maior teor de clínquer/portlandita e maior capacidade de ligar CO₂, mantendo o pH alto por mais tempo, enquanto o LC³, carbonata mais rápido e em maior profundidade.

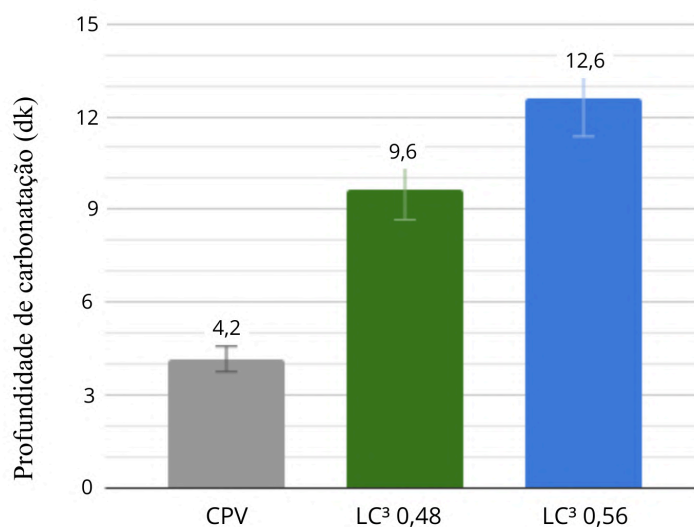
Continuando a análise do Quadro 10 e da Figura 29, as duas misturas de LC³ confirmam a influência da relação a/c na profundidade de carbonatação, com a dosagem de menor relação a/c apresentando menor profundidade de penetração do CO₂. Sendo assim, a dosagem de LC³ 0,48 desempenha melhor neste ensaio que LC³ 0,56

Quadro 10 – Ensaio de carbonatação.

Mistura	Profundidade (dk)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
CPV 0,56	4,2	0,1	2,5%
LC ³ 0,48	9,6	0,2	1,8%
LC ³ 0,56	12,6	0,1	1,1%

Fonte: Autora em parceria com Dr. Ronaldo Pilar e equipe (UFES).

Figura 29 – Ensaio de carbonatação.



Fonte: Autora em parceria com Dr. Ronaldo Pilar e equipe (UFES).

É importante destacar que a carbonatação isoladamente, não constitui o único mecanismo de passivação responsável pela corrosão das armaduras de aço. Em ambientes agressivos, como (potencialmente) em pavimentos rígidos, a migração de íons cloreto frequentemente atua como o agente predominante em comparação à carbonatação, exigindo que ambos sejam avaliados para análise da durabilidade.

O Quadro 11 contém os resultados do ensaio de migração de cloretos, indicando que os concretos produzidos com LC³ apresentaram carga elétrica total passante inferior em relação aos concretos de Portland. A Figura 30 evidencia maior resistência à penetração de íons cloreto no concreto LC³.

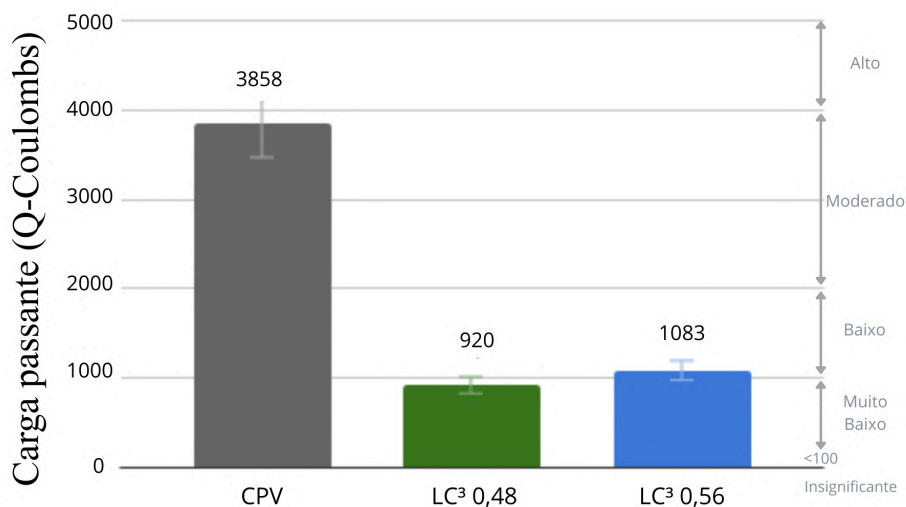
Quadro 11– Ensaio de migração de cloretos, carga passante (ASTM C1202).

Mistura	Carga passante (Q-Coulombs)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
CPV 0,56	3.858,45	368,36	9,5%
LC ³ 0,48	920,12	90,47	9,8%
LC ³ 0,56	1.083,78	90,56	8,4%

Fonte: Autora em parceria com Dr. Ronaldo Pilar e equipe (UFES).

O melhor desempenho do LC³ observado na Figura 30 é resultado do refinamento da conectividade porosa e da formação de uma microestrutura mais densa, promovidos pelo efeito filler calcário e pelas reações pozolânicas da argila calcinada. Também pode ser pela redução da alcalinidade no LC³, por ter portlandita em menor quantidade. Esses mecanismos favorecem o empacotamento das partículas, reduzem a porosidade capilar conectada e dificultam o transporte iônico na matriz cimentícia, reduzindo significativamente a migração de íons cloreto (Avet; Scrivener, 2020).

Figura 30 – Ensaio de migração de cloretos, carga passante (ASTM C1202).



Obs.: Faixas de referência de acordo com a ASTM C1202.

Fonte: Autora em parceria com Dr. Ronaldo Pilar e equipe (UFES).

Além disso, esse comportamento também se relaciona à maior capacidade de ligação química de cloretos proporcionada pela formação de fases AFm, incluindo a conversão de carboaluminatos em soluções sólidas do tipo sal de Friedel, que incorporam cloretos em sua estrutura cristalina, diminuindo a fração livre desses íons na solução dos poros (Avet; Scrivener, 2020).

Ademais, parte dos cloretos pode ser adsorvida fisicamente em fases do tipo C-(A)-S-H, sendo esse processo influenciado pelas condições químicas da solução dos poros, como o pH, contribuindo para a imobilização parcial desses íons no interior da matriz cimentícia (Avet; Scrivener, 2020).

Por esta razão, registra-se maior resistência à penetração de íons cloreto e outros agentes agressivos, evidenciando aumento significativo da durabilidade do concreto em ambientes desfavoráveis (Avet e Scrivener, 2020; Matos; Sakata; Prudêncio, 2019).

Na Figura 30, no canto direito, estão delimitadas as faixas de classificação de referência de acordo com a norma ASTM C1202. Baseadas na carga elétrica total passante (Q-Coulombs), que indicam a suscetibilidade à penetração de íons cloreto

Nos concretos avaliados, o CPV 0,56 encontra-se na faixa moderada, porém próximo à fronteira com a faixa de alta suscetibilidade. Em contrapartida, o LC³ 0,48 posiciona-se na faixa de suscetibilidade muito baixa, enquanto o LC³ 0,56 alcançou valores na faixa de baixa suscetibilidade, próximo à fronteira com muito baixa.

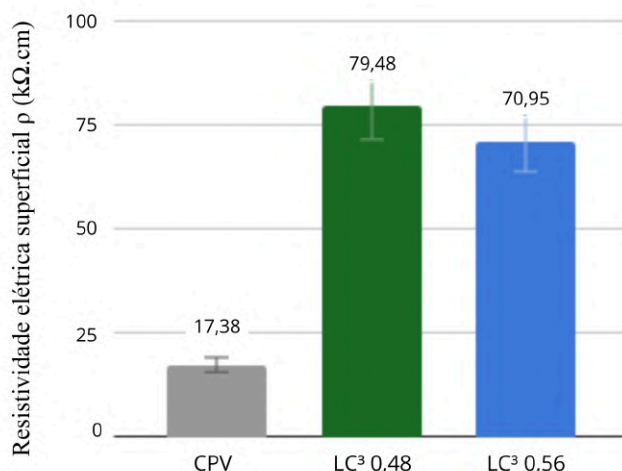
Os valores baixos de carga elétrica total passante (Q-Coulombs), indicam maior resistência à penetração de íons cloreto, ou seja, baixa suscetibilidade à cloretos. Isso significa que há melhor desempenho na proteção de armaduras contra a corrosão (Matos; Sakata; Prudêncio, 2019).

Ao contrário do ensaio de migração de cloretos, onde valores baixos indicam bom desempenho. Nos ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica, quanto maior foi o valor de resistividade, maior a dificuldade para migração de íons cloreto. Há uma correlação entre o aumento da resistividade com a diminuição da carga passada em testes de penetração rápida de cloretos (Matos *et al.*, 2019).

Assim como ocorre no desempenho frente à penetração de cloretos, o aumento da resistividade elétrica superficial e volumétrica no LC³ está associado principalmente ao refinamento da estrutura porosa e à redução da conectividade capilar, que dificultam o transporte iônico na matriz cimentícia (Matos; Sakata; Prudêncio, 2019).

A Figura 31 apresenta o gráfico da resistividade elétrica superficial, enquanto o Quadro 12 contém os principais dados do ensaio. Como esperado, a mistura LC³ de menor a/c apresentou maior resistividade.

Figura 31 – Ensaio de resistividade elétrica superficial.



Fonte: Autora em parceria com Dr. Ronaldo Pilar e equipe (UFES).

Quadro 12 – Ensaio de resistividade elétrica superficial.

Mistura	ρ (kΩ.cm)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
CPV 0,56	17,38	0,65	3,8%
LC ³ 0,48	79,48	1,17	1,5%
LC ³ 0,56	70,95	3,19	4,5%

Fonte: Autora em parceria com Dr. Ronaldo Pilar e equipe (UFES).

O Quadro 13, apresenta referências para classificar os concretos quanto ao risco de corrosão e suscetibilidade à cloretos. Na análise dos dados, a resistividade elétrica superficial e a volumétrica utilizam as mesmas referências para classificar, quanto ao risco de corrosão da armadura e permeabilidade à cloretos. Uma vez que, a resistividade superficial é um indicador rápido da resistividade em volume (Dhandapani *et al.*, 2018).

Quadro 13 – Referência para resistividade elétrica.

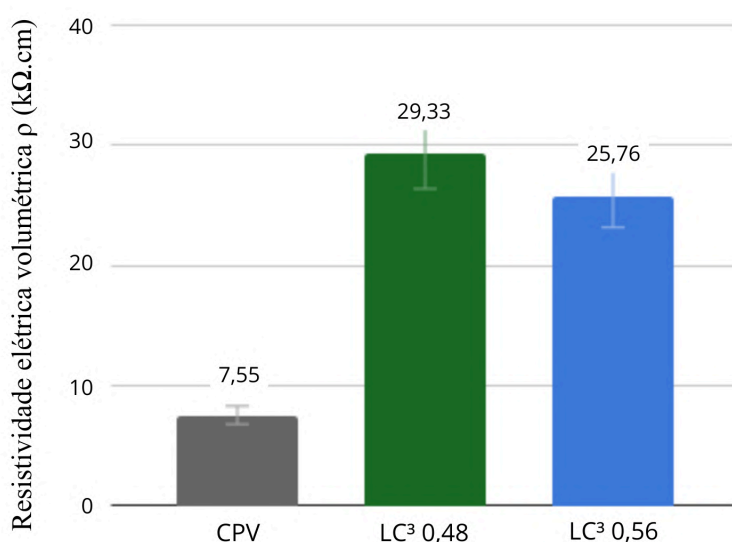
Possibilidade de penetração de cloretos		Possibilidade de corrosão de armadura	
Classificação	Resistividade superficial (kΩ.cm)	Classificação	Resistividade superficial (kΩ.cm)
Alta	< 12	Muito alta	< 5
Moderada	12 - 21	Alta	5 - 10
Baixa	21 - 37	Baixa	10 - 20
Muito baixa	37 - 254		
Insignificante	> 254	Insignificante	> 20

Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de: AASHTO T358 (2015); RILEM TC 154 EMC (2000); CEB (1989); Wosniack *et al.*, (2021).

Comparando os resultados apresentados na Figura 31 e Quadro 12 com os valores de referência no Quadro 13, ambas dosagens LC³ apresentam classificação “muito baixa” para penetração de cloretos e “insignificante” para possibilidade de corrosão de armadura. Enquanto o concreto CPV 0,56 é tido como “moderado” para cloretos e “baixa” possibilidade de corrosão de armadura. O comportamento dos ligantes neste ensaio é coerente com a literatura.

A Figura 32 apresenta o gráfico da resistividade elétrica volumétrica, enquanto o Quadro 14 contém os principais dados do ensaio. Tal qual no ensaio anterior, já esperado, a mistura LC³ de menor a/c apresentou maior resistividade.

Figura 32 – Ensaio de resistividade elétrica volumétrica.



Fonte: Autora em parceria com Dr. Ronaldo Pilar e equipe (UFES).

Comparando os resultados apresentados na Figura 32 e Quadro 14 com os valores de referência no Quadro 13, ambas dosagens LC³ apresentam classificação “baixa” para cloretos e “insignificante” para corrosão de armadura. Enquanto o concreto CPV 0,56 é tido como “alto” para penetração de cloretos e “alto” para possibilidade de corrosão de armadura.

Quadro 14 – Ensaio de resistividade elétrica volumétrica.

Mistura	ρ (kΩ.cm)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
CPV 0,56	7,55	0,16	2,1%
LC ³ 0,48	29,33	0,80	2,7%
LC ³ 0,56	25,79	0,94	3,7%

Fonte: Autora em parceria com Dr. Ronaldo Pilar e equipe (UFES).

Tendo em vista a pavimentação rígida, o mais vantajoso é um concreto de boa resistência à penetração de cloretos, mesmo que não tenha bom desempenho frente à carbonatação. Segundo DNIT (2010), na ausência de cloretos, a corrosão induzida pela carbonatação só se torna significativa sob condições de umidade relativa do concreto superiores a 80%, indicando que a penetração de cloretos exerce papel mais crítico na iniciação da corrosão em comparação à carbonatação isolada.

Ademais, é preciso considerar que o tipo de pavimento rígido mais comum, não contém armadura estrutural, apenas barras de ligação e barras de transferência que, são tratadas para obter resistência a agentes agressivos, comumente por meio de epóxi ou galvanização.

A resistividade está diretamente ligada à durabilidade da via, que se associa à redução de intervenções de manutenção e restauração ao longo da vida útil do pavimento. Assim, o emprego do cimento LC³ revela-se promissor sob o aspecto da durabilidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão sistemática de literatura analisou dados de 33 artigos sobre concretos com cimento LC³, dos quais oito tratam de concretos de alta performance e apenas um não atendeu ao mínimo exigido pelo DNIT. Com base nessa revisão, conclui-se que os concretos com LC³ atendem ao requisito de resistência à compressão. Para a resistência à tração na flexão, os resultados indicam adequação do LC³ à pavimentação rígida, embora apenas 7 dos 33 estudos avaliados tenham realizado esse ensaio.

Nos ensaios em argamassa, a resistência à compressão de 30 MPa foi atingida já aos 3 dias com LC³ a/c = 0,42. A curva mostra que o LC³ supera 30 MPa aos 28 dias quando a relação a/c for inferior a 0,52. Para resistência de tração na flexão superior a 4,5 MPa aos 28 dias, a relação a/c para LC³ deve ser inferior a 0,55; destaque para a mistura LC³ 0,40, apresentando resistência superior a 6,5 MPa, e LC³ 0,48, atingindo acima de 6 MPa.

No estudo com concreto, a resistência à compressão do LC³ 0,48 aos 28 dias está no limite mínimo do DNIT, mas atende à normativa. Já aos 90 dias, igualou-se estatisticamente à do CPV 0,56, superando o mínimo em ≈ 9 MPa. Todas as misturas atingiram a resistência à tração na flexão normatizada aos 28 dias, chegando em valores na faixa de 5,2 a 6,4 MPa, com destaque ao concreto LC³ 0,48. Todas as dosagens atingiram a trabalhabilidade adequada para pavimentação rígida (*slump* = 70 \pm 10 mm), com uso de aditivo superplastificante inferior a 0,3%. Nesse sentido, a argila calcinada empregada não apresentou prejuízo para a trabalhabilidade do concreto.

Os ensaios de durabilidade indicam que, os concretos de cimento LC³ exibem penetração de CO₂ mais profunda em comparação aos concretos de cimento Portland. Todavia, concretos LC³ apresentam desempenho superior frente à migração de íons cloreto, apresentam mais resistência à penetração de cloretos. Característica que satisfaz as necessidades dos pavimentos de concreto.

De modo geral, verificou-se que o cimento LC³ é adequado ao uso em pavimentos rígidos nos requisitos avaliados; com resistências equiparáveis ao Portland convencional e durabilidade superior, qualificando-se como alternativa promissora. Especialmente onde a durabilidade e resistência a agentes agressivos são qualidades necessárias.

Sugere-se estudos adicionais sobre a adequação discutida neste estudo, para aprofundar o conhecimento técnico no uso do LC³ em obras de pavimentação.

BIBLIOGRAFIA

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142:2010. Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2015. Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015. Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:2011. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

ALONSO, C.; ANDRADE, C. **Corrosion rate monitoring in the laboratory and on site.** *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 5, p. 315–328, 1996.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de pavimento urbano: execução do concreto moldado in loco.** São Paulo: ABCP, 2025.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Pavimento verde, cada vez mais presente.** Disponível em: <http://viasconcretas.com.br/tecnologia/pavimento-de-concreto/>. Acesso em: 19 jun. 2024.

AVET, François; SCRIVENER, Karen. **Influence of pH on the chloride binding capacity of limestone calcined clay cements (LC3).** *Cement and Concrete Research*, v. 131, p. 106031, 2020. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106031 . Acesso em: nov. 2025.

BALESTRA, Carlos E. T.; SAVARIS, Gustavo.; NAKANO, Alberto Y.; SCHNEIDER, Ricardo. **Carbonation of concretes containing LC3 cements with different supplementary materials.** *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 43, n. 2, p. 161, 2022. DOI: 10.5433/1679-0375.2022v43n2p161 . Acesso em: out. 2025.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009. ISBN: 978-85-86238-90-1.

BARBALHO, Enéas de Andrade; SILVA, Eugênia Fonseca da; RÊGO, João Henrique da Silva. **Estudo da proporção de argila calcinada e filer calcário no cimento LC3 para diferentes teores de substituição.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 1, 2020. DOI: 10.1590/s1517-707620200001.0906. Acesso em: nov. 2025.

BATTAGIN, Arnaldo F.; MUNHOZ, Flávio A. C.; BATTAGIN, Inês; LARANJEIRAS, S. **Evolução da normalização, finura e resistência à compressão dos cimentos Portland brasileiros.** *Concreto e Construções*, v. 73, p. 39–51, 2014.

BOANADA-FUCHS, Anthony; HEIERLI, Urs; SCRIVENER, Karen. **The potential contribution of limestone calcined clay cement (LC3) as a viable solution to simultaneously meet climate goals and address the global housing challenge.** *Harmonizing Environmental Goals and Housing Needs*, 2024. Disponível em: <https://lc3.ch/wp-content/uploads/2024/05/LC3-Digital-Version-Final-26th-July.pdf>

BORRERO, Edgar L. S.; FARHANGI, Visar.; JADIDI, Kazem.; KARAKOUZIAN, M. **An experimental study on concrete's durability and mechanical characteristics subjected to different curing regimes.** *Civil Engineering Journal*, v. 7, n. 4, p. 676, 2021. DOI: 10.28991/cej-2021-03091681. Acesso em: out. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Brasília, 2021.

BRITO, Luciana Rabelo de; ALMEIDA, Antônia Fabiana Marques; OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de. **Análise da correlação entre resistência à compressão axial e à tração na flexão em pavimentos rígidos.** *Revista Tecnologia*, v. 40, n. 2, 2019. DOI: 10.5020/23180730.2019.9812. Acesso em: nov. 2025.

CAMPOS, Jackyel Venâncio Andrade et al. **Concrete at high temperatures: a case study of a fire in a residential building in Minas Gerais.** *Research, Society and Development*, v. 10, n. 9, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i9.18551. Acesso em: abr. 2025.

CARVALHO, Erick Phellipe Rodrigues; JÚNIOR, Flávio Vieira da Silva. **Estudo de caso: estrutura de pavimento.** *Engineering Sciences*, v. 7, n. 1, p. 30, 2019. DOI: 10.6008/cbpc2318-3055.2019.001.0004. Acesso em: nov. 2025.

CAVALET, Victor N.; LUVIZÃO, Gislaine; NIENOV, Fabiano A.; ZAMPIERI, Lucas Q. **Análise comparativa do custo-benefício entre pavimentos flexíveis e rígidos.** In: *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, 33., 2019, Balneário Camboriú. Anais [...]. 2019.

CHUNG, Hung-Wen et al. **Developing sustainable pavement concrete mix.** *Transportation Research Record*, v. 2677, n. 7, p. 209, 2023. DOI: 10.1177/03611981231152244. Acesso em: nov. 2025.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2023.** Brasília, 2023. Disponível em: <https://cnt.org.br/pesquisas>. Acesso em: 02 mar. 2024.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília, 2017. Disponível em: <https://cnt.org.br/por-que-pavimentos-rodovias-nao-duram>. Acesso em: 20 jun. 2024.

DHANDAPANI, Yuvaraj.; SAKTHIVEL, T.; SANTHANAM, Manu.; GETTU, Ravindra.; PILLAI, Radhakrishna G. **Mechanical properties and durability performance of concretes with limestone calcined clay cement (LC3).** *Cement and Concrete Research*, v. 107, p. 136–151, 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.005. Acesso em: nov. 2025.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentos rígidos.** Brasília: IPR, 2005.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação.** Brasília: IPR, 2006.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos rígidos.** Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 054/2004 — Pavimento rígido: estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2004.

ELKHALDI, Imane et al. **Durabilité des bétons bas carbone vis-à-vis de la corrosion induite par carbonatation.** *HAL*, 2022. Disponível em: <https://hal.science/hal-03881067>. Acesso em: ago. 2025.

FANG, Mingjing et al. **Toughness improvement mechanism and evaluation of cement concrete.** *Journal of Road Engineering*, 2023. DOI: 10.1016/j.jreng.2023.01.005. Acesso em: nov. 2025.

FARIAS, Lidianne do Nascimento et al. **ACV de materiais cimentícios suplementares.** *MIX Sustentável*, v. 9, n. 3, p. 67, 2023. DOI: 10.29183/2447-3073.mix2023.v9.n3.67-81. Acesso em: out. 2025.

FERREIRA, Daniele de Moura; ABREU, Aguida Gomes de; VELOSO, Anne Caroline Guimarães. **Estudo da corrosão da armadura em argamassas submetidas ao ataque por agrotóxicos utilizando medidas de potencial de corrosão (ecorr).** [S. l.: s. n.], 2021.

FERREIRA, Carina Farias; PALIGA, Charlei Marcelo; TORRES, Ariela da Silva. Comportamento do concreto frente à ação de cloretos e CO₂. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 15, n. 2, p. 35, 2019. DOI: 10.5216/reec.v15i2.51363. Acesso em: set. 2025.

GARTNER, Ellis; HIRAO, Hidetoshi. **A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions.** *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 126–142, 2015.

HENRIQUES, Renata Leal et al. **Estudo da penetração de íons cloreto em concretos produzidos com substituição parcial de cimento portland por sílica ativa e de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado.** in: , 2021. *Caderno de Resumos do Congresso Brasileiro do Concreto*. [S. l.]: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/2175-8182.62cbc009>.

KIM, Jaehwan; PARK, Ki-Tae; YOON, Jinyoung. **Performance-based durability assessment.** *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 19, n. 1, 2025. DOI: 10.1186/s40069-025-00806-z. Acesso em: set. 2025.

KRISHNA, U. Siva Rama; TADI, Chiranjeevi. **Sustainable concrete pavements for low volume roads-Scientometric analysis of the literature.** In: , 2022. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. [S. l.]: IOP Publishing, 2022. p. 12005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/982/1/012005>.

LANGFORD, P.; BROOMFIELD, J. **Monitoring the corrosion of reinforcing steel.** *Construction Repair*, v. 1, n. 2, p. 32–36, 1987.

MALACARNE, Camila Salvi et al. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC3 – cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário – a partir de matérias primas do Rio Grande do Sul.** [S. l.: s. n.], 2019.

MATEOS, Angel et al. **Structural response of concrete pavement slabs.** *Construction and Building Materials*, v. 243, p. 118261, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118261. Acesso em: nov. 2025.

MATOS, Paulo Ricardo de.; DOERNER, Gabriel.; NAZÁRIO, Samara da Silva.; NETO, José da Silva Andrade.; LONGHI, Marlon.; FOLGUERAS, Marilena.; RODRÍGUEZ, Erich David. **Limestone calcined clay cements (LC³) produced with iron ore tailings and ceramic waste: Hydration, mechanical performance and rheology.** *Construction and Building Materials*, [s. l.], vol. 458, p. 139604, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139604>>.

MATOS, Paulo Ricardo de.; SAKATA, Rafael Dors.; PRUDÊNCIO, Luiz Roberto. **Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes.** *Construction and Building Materials*, v. 225, p. 941, 27 Jul. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.254>>.

MESQUITA, F. J. M.; FERREIRA, T. S.; VIEIRA, G. L.; FUBER, H.; ISHIHARA, J. H. **Análise bibliométrica de publicações sobre concreto com reaproveitamento de resíduos a partir da base de dados Web of Science.** *Research Society and Development*, [s. l.], vol. 9, no. 9, 2020. Available at: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.6114>. Accessed at: Oct. 2025.

OLIVEIRA, Patrícia Lizi de. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto.** 2000. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World population prospects 2022.** Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Publications/>. Acesso em: 17 jun. 2024.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World urbanization prospects: the 2018 revision.** Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2024.

PERDRIX, Carmen Andrade. **Diseño y evaluación de la vida útil a través de resistividad eléctrica concreta.** *Revista ALCONPAT*, v. 8, n. 3, p. 264, 2018. DOI: 10.21041/ra.v8i3.349. Acesso em: out. 2025.

PICCINI, Guilherme Danezi et al. **Análise do custo do ciclo de vida de concretos ecoamigáveis com agregado residual de demolição e pozolana. mix sustentável**, [s. l.], vol. 9, no. 1, p. 62, 2022. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2023.v9.n1.62-70>. Accessed at: Oct. 2025.

PITTA, Márcio Rocha. **Construção de pavimentos de concreto simples**. 3. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

PY, Lucas Goldenberg et al. **Balanco de sulfatos e hidratação de cimentos ternários à base de calcário e argilas calcinadas**. [S. l.: s. n.], 2021.

PROCEQ S.A. **Manual Resipod**. 2017. Disponível em: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf.

ROADMAP tecnológico do cimento: **potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

ROY, Partha Pratim. **Study on Rigid Pavement Analysis and Design**. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, [s. l.], vol. 9, no. 8, p. 1842, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.37672>. Accessed at: Aug. 2025.

ROBBIE, M. A. **Global CO₂ emissions from cement production**. *Earth System Science Data*, v. 11, n. 4, p. 1675–1710, 2019.

SALAMA, Magdy I. et al. **Influence of concrete type on rigid pavement behavior under static loads**. *Innovative Infrastructure Solutions*, [s. l.], vol. 9, no. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01316-1>. Acesso em: Nov. 2025.

SANTOS, Gustavo Soares et al. **Concrete Roads: Sustainable Paving**. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, [s. l.], vol. 18, no. 10, 2024. Available at: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-095>. Acesso em: Oct. 2025.

SAFHI, Amine el Mahdi et al. **Durability and transport properties of SCC incorporating dredged sediments**. *Construction and Building Materials*, v. 288, p. 123116, 27 Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123116>. Acesso em: oct. 2025.

SCHNEIDER, Martin. **The cement industry on the way to a low-carbon future**. *Cement and Concrete Research*, v. 124, 2019. DOI: [10.1016/j.cemconres.2019.105792](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792). Acesso em: jun. 2024.

SCRIVENER, Karen.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for low - co₂ cement-based materials industry**. *Cement and Concrete Research*, v. 114, 2018. DOI: [10.1016/j.cemconres.2018.03.015](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015). Acesso em: mar. 2024.

SCRIVENER, Karen.; MARTIRENA, Fernando.; BISHNOI, Shashanh.; MAITY, Soumen. **Calcined clay limestone cements (LC3)**. *Cement and Concrete Research*, 2018. DOI: [10.1016/j.cemconres.2017.08.017](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017). Acesso em: maio 2024.

SCRIVENER, Karen. **Options for the future of cement**. *Indian Concrete Journal*, v. 88, n. 7, p. 11 - 21, July. 2014. Disponível em: https://www.giatecscientific.com/wp-content/uploads/2018/05/0851_ICJ_Article.pdf. Acesso em: 18 jun 2024.

SHARMA, Meenakshi. BISHNOI, Shashank. MARTIRENA, Fernando. SCRIVENER, Karen. **Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review**. *Cement and Concrete Research*. v. 149. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>. Acesso em: 20 mai 2024.

SHAO, Jingjing; GUO, Shenglian; WANG, Haibo. **A Review of the Performance, Sustainable Applications, and Research Challenges of Limestone-Calcined Clay-Cement (LC3) Systems**. *Coatings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, , 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings15050611>. Acesso em: Nov. 2025.

SUN, Jinfeng. ZUNINO, Franco. SCRIVENER, Karen. **Hydration and phase assemblage of limestone calcined clay cements (LC³) with clinker content below 50%**. *Cement and Concrete Research*. v. 177. 2024.

UYSAL, Mücteba.; AKYUNCU, Veysel.; TANYILDIZI, Harun.; SUMER, Mansur.; YILDIRIM, Hasan. **Optimization of durability properties of concrete containing fly ash using Taguchi's approach and Anova analysis**. *Revista de la construcción*, [s. l.], vol. 17, no. 3, p. 364, 2019. DOI: <https://doi.org/10.7764/rdlc.17.3.364>. Acesso em: Jul. 2025.

VENTURA, Sebastião; MAIA, Lino. **Municipal solid waste incineration slag as potential materials in green engineering as partial or total substitutes for conventional cement in future decades**. *Research Square* [s. l.], 2024. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4608120/v1>. Acesso em: Set. 2025.

VIANA, Arthur Vinícius da Costa et al. **Avaliação, diagnóstico e recuperação de pavimentos de concreto hidráulico em trechos localizados na Cidade de Natal/RN e na Região Metropolitana**. *Research Society and Development*, [s. l.], vol. 10, no. 16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.23448>. Acesso em: Set. 2025.

WALI, S., SAXENA, S., KUMAR, M., MAITY, S., BISHNOI, S. **Application of Industrially Produced LC3 to Pavements, AAC Blocks and Other Products**. In: Martirena, F., Favier, A., Scrivener, K. (eds) *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. RILEM Bookseries, vol 16. Springer, Dordrecht. 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_77

WALLY, Gustavo Bosel; MAGALHÃES, Fábio Costa; FILHO, Luiz Carlos Pinto da Silva. **Conceitos e aspectos da abordagem com base no desempenho na avaliação da durabilidade das estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos**. *Concreto & Construções*, [s. l.], nº 100, p. 81, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4322/1809-7197.2020.100.0006>.

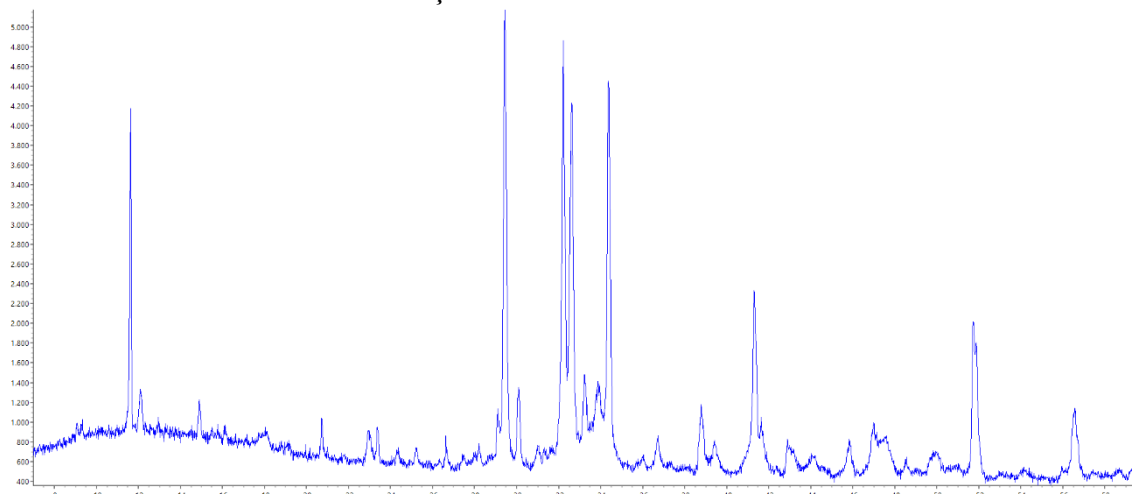
WOSNIACK, Laís Mariana et al. **Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos**. *Ambiente Construído*, [s. l.], vol. 21, no. 3, p. 321, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300554>. Accessed at: Nov. 2025.

YOON, In Seok. **Chloride Transport Parameters of Carbonated Concrete**. *Journal of Civil Construction and Environmental Engineering*, [s. l.], vol. 10, no. 3, p. 123, 2025. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.jceee.20251003.13>. Acesso em: Nov. 2025.

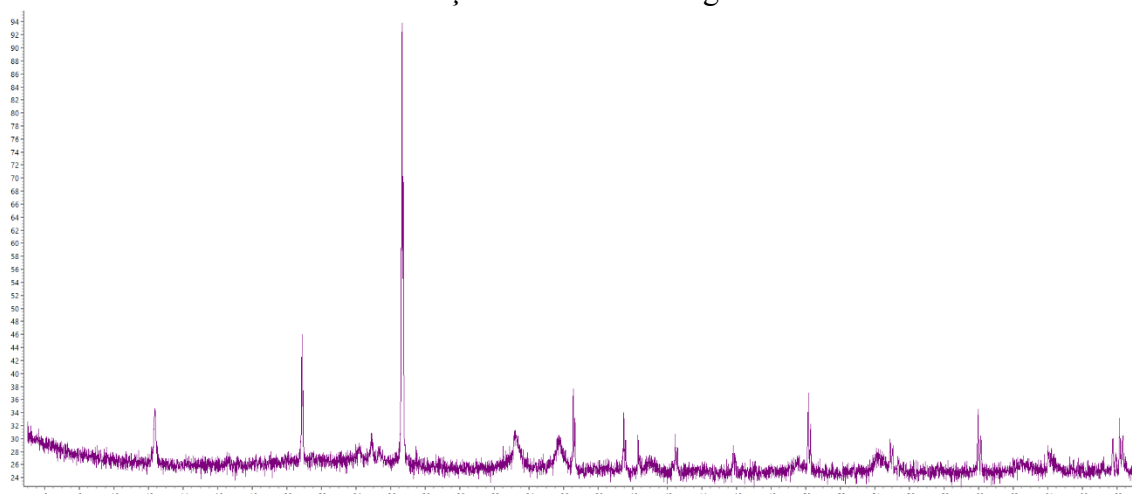
ZALESKI, Alessandra; MARANGONI, B.; VANZETTO, S.C. **Comportamento mecânico e de durabilidade de concretos produzidos com efluente industrial tratado e bruto**. *Engenharia Civil UM*, [s. l.], no. 61, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21814/ecum.4153>.

APÊNDICE A - RESULTADOS DA DIFRAÇÃO DE RAIOS X

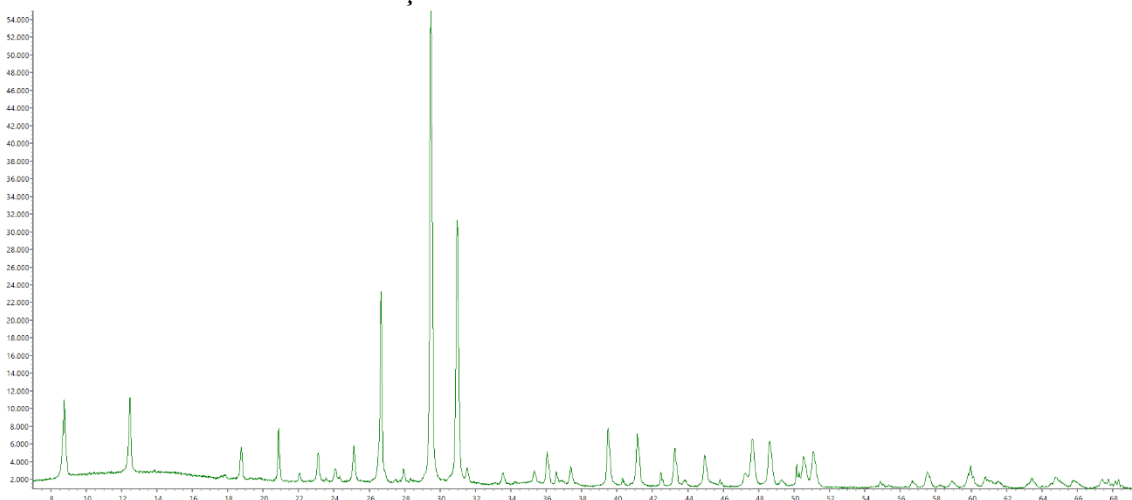
Difração de raios X do cimento.



Difração de raios X da argila.



Difração de raios X do filer calcário.



ANEXO A - RESULTADOS DA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA - TGA

Fonte: MATOS, Paulo Ricardo de. DOERNER, Gabriel. NAZÁRIO, Samara da Silva. NETO, José da Silva Andrade. LONGHI, Marlon. FOLGUERAS, Marilena. RODRÍGUEZ, Erich David. **Limestone calcined clay cements (LC³) produced with iron ore tailings and ceramic waste: Hydration, mechanical performance and rheology.** Construction and Building Materials, [s. l.], vol. 458, p. 139604, 2024.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139604>

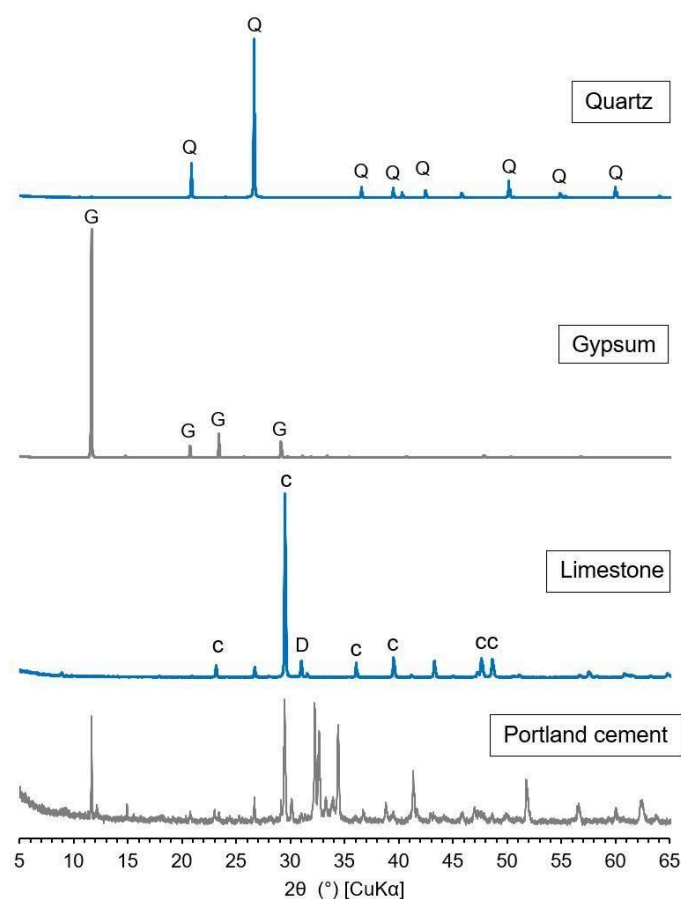
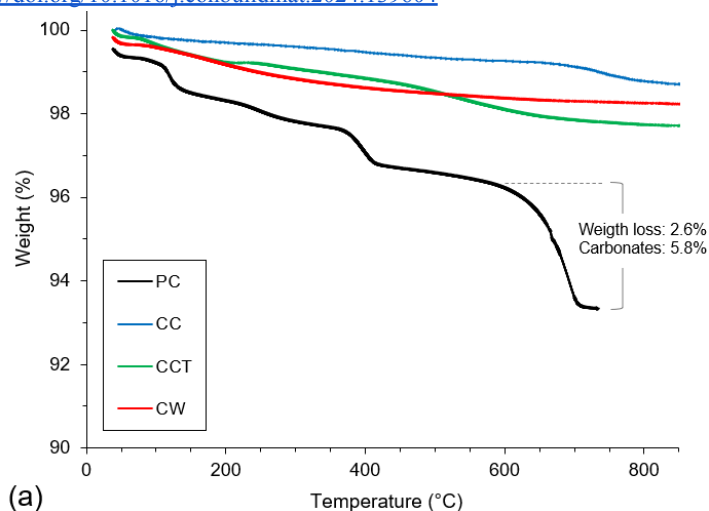


Figura S1. Caracterização das matérias-primas. (a) Curvas de perda de massa obtidas por TGA – nota: o teor de carbonatos foi calculado com base na perda de massa da calcita (44,0% em massa), que foi a fase carbonática predominante – ver Tabela S1. A perda de massa semelhante da dolomita (47,7% em massa) resultaria em um erro desprezível nessa quantificação; (b) e (c) Difractogramas de DRX das matérias-primas: – Q: quartzo; G: gipsita; C: calcita; K: caulinita (Figura S1, material suplementar; tradução nossa.)

MATERIAL SUPLEMENTAR

https://drive.google.com/drive/folders/1jg-ns47W1_ESPP0tEfP0RsUYyag2_avQ?usp=sharing



JOINVILLE
CENTRO DE CIÊNCIAS
TECNOLÓGICAS

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA
REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT

ATESTADO DE VERSÃO FINAL

Eu, Paulo Ricardo de Matos, professor do curso de Mestrado em Engenharia Civil, declaro que esta é a versão final aprovada pela comissão julgadora da dissertação/tese intitulada: **“DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS PRODUZIDOS COM CIMENTOS À BASE DE CALCÁRIO E ARGILA CALCINADA”** de autoria da acadêmica Natália Martins Bezerra.

Joinville, 15 de abril de 2026.

Assinatura digital do(a) orientador(a):

PAULO RICARDO DE MATOS