

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

Aplicação de concretos especiais com sílica coloidal como material de reparo de estruturas de concreto

Lucas Modotte Bernardo

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LUCAS MODOTTE BERNARDO

**Aplicação de concretos especiais com sílica coloidal como
material de reparo de estruturas de concreto**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Estruturas

Orientadora: Prof.^a. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro

SÃO CARLOS

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B518a	Bernardo, Lucas Modotte Aplicação de concretos especiais com sílica coloidal como material de reparo de estruturas de concreto / Lucas Modotte Bernardo; orientadora Alessandra Lorenzetti de Castro. São Carlos, 2024. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2024. 1. concretos especiais. 2. material de reparo. 3. adições minerais. 4. sílica coloidal. I. Título.
-------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUCAS MODOTTE BERNARDO**.

Título da dissertação: "Aplicação de concretos especiais com sílica coloidal como material de reparo de estruturas de concreto".

Data da defesa: 15/04/2024.

Comissão Julgadora

Prof. Dr. Alessandra Lorenzetti de Castro
(Orientadora)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Dr. Ercio Thomaz
(Instituto de Pesquisas Tecnológicas/IPT)

Profa. Dra. Valdirene Maria Silva Capuzzo
(Universidade de Brasília/UnB)

Resultado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Prof Associado **Ricardo Carrazedo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primordialmente, a Deus, por estar sempre ao meu lado, me capacitando e renovando as minhas forças ao longo de todo o caminho percorrido para conclusão desta pesquisa.

A Douglas e Luciana, meus pais, agradeço por serem meu apoio em cada etapa da minha vida. Obrigado pela oportunidade, que nem todos possuem, de estudar.

Ao meu irmão e afilhado – Rafael – que, durante os últimos meses de escrita desta dissertação, sempre me ajudava a manter o foco.

Agradecimento especial devo à minha orientadora, Prof^ª. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro, que de forma leve, paciente, alegre, crítica e dedicada me aconselhou desde os primeiros anos de faculdade até os últimos detalhes desta pós-graduação.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas: professores, técnicos, secretários, auxiliares de limpeza etc. Destaco alguns nomes: Fabiano, pelo auxílio nos experimentos realizados no Laboratório de Estruturas da EESC; Clayton, pela assistência no âmbito administrativo; e Dani que, além de garantir um bom funcionamento do departamento, também me ajudou nas análises estatísticas realizadas na pesquisa.

Agradeço aos amigos pesquisadores – Herbert e Gustavo – que sempre me ajudavam na realização dos ensaios laboratoriais.

Às empresas *GCP Applied Technologies*, *Elkem* e *Nouryon* pelos materiais fornecidos que garantiram a realização deste estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

BERNARDO, L. M. Aplicação de concretos especiais com sílica coloidal como material de reparo de estruturas de concreto. 2024. 112 p. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

As manifestações patológicas em estruturas de concreto são inúmeras, e resultam de problemas relacionados ao projeto, execução, manutenção e degradação do material, tornando essenciais as alternativas de reparo e reforço para prolongar a vida útil dos elementos estruturais. Os concretos especiais são bons candidatos para manutenção de estruturas, destacando-se o concreto com sílica coloidal. Esta adição garante ao material baixa porosidade e elevada resistência mecânica por conta de sua atuação na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Sendo assim, esta pesquisa avalia a aplicação deste concreto especial em situações de reparo de elementos estruturais de concreto convencional. Com este objetivo, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos e prismáticos de concreto convencional que, posteriormente, foram danificados – rompidos ao meio – para serem reparados. Simultaneamente, o concreto especial foi caracterizado, fixando o teor de adição de sílica coloidal em 1% em relação à massa de cimento. Em seguida, a mistura de concreto especial desenvolvida foi utilizada como material de reparo – “ligação” – dos corpos de prova de concreto convencional danificados. A pesquisa verificou, na etapa de caracterização dos concretos especiais, que mesmo em pequenos teores da adição de sílica coloidal, as propriedades mecânicas do concreto endurecido melhoraram. Além disso, os elementos de concreto convencional reparados com o concreto especial demonstraram bons resultados em todas as propriedades medidas, destacando-se a manutenção da resistência à compressão dos corpos de prova reparados em comparação com os resultados de referência (corpos de prova de concreto convencional intactos).

Palavras-chave: concretos especiais; material de reparo; sílica coloidal; adições minerais; nanotecnologia.

ABSTRACT

BERNARDO, L. M. Application of special concretes with colloidal silica as a repair material for concrete structures. 2022. 112 p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structural Engineering)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

Pathological manifestations in concrete structures are numerous, caused by problems related to the design, construction, maintenance, and degradation of this material, making repair and reinforcement alternatives essential to prolong the service life of structural elements. Special concretes are good candidates for the maintenance of structures, especially the concrete with colloidal silica. This addition guarantees to the material low porosity and high mechanical strength due to its action in the transition zone between aggregate and cement paste. For this reason, the present research evaluates the application of this special concrete in situations of repair of ordinary concrete structural elements. For this purpose, cylindrical and prismatic specimens of ordinary concrete were made and then damaged – broken in half – to be repaired. Simultaneously, the special concrete was characterized, fixing the addition content of colloidal silica at 1% of the cement mass. Then, the special concrete mixture developed was used as a repair material – "connecting element" – for the damaged ordinary concrete specimens. The research verified, in the characterization stage of special concretes, that even at small amounts of this addition the mechanical properties of the hardened concrete improved. Furthermore, the ordinary concrete elements repaired by special concrete demonstrated satisfactory results in all measured properties, highlighting the maintenance of the compressive strength of the repaired specimens in comparison with the reference results (intact ordinary concrete specimens).

Keywords: special concrete; repair material; colloidal silica; mineral additions; nanotechnology.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura da dissertação.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Concreto e seus materiais constituintes.....	6
2.1.1 Cimento Portland.....	7
2.1.2 Água	8
2.1.3 Agregados.....	8
2.1.4 Aditivos e adições	9
2.2 Dosagem do concreto	10
2.2.1 Método de dosagem IPT/EPUSP.....	11
2.2.2 Empacotamento de partículas – Modelo de Alfred	12
2.3 Nanotecnologia aplicada ao concreto.....	14
2.3.1 Sílica coloidal	15
2.4 Durabilidade e manutenção de estruturas de concreto	20
2.4.1 Manifestações patológicas em estruturas de concreto	21
2.4.2 Reabilitação de estruturas.....	28
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
3.1 Etapa 1 - Materiais constituintes.....	32
3.2 Etapa 2 – Confeção dos corpos de prova de concreto convencional para reparação	34
3.3 Etapa 3 – Desenvolvimento dos concretos especiais com sílica coloidal	36
3.4 Etapa 4 – Reparação dos elementos danificados e caracterização do concreto especial	37
3.5 Considerações quanto aos métodos de produção e ensaio	40
3.6 Análise dos resultados	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 Etapa 1 - Caracterização dos materiais	42
4.2 Etapa 2 - Confeção dos corpos de prova de concreto convencional	50
4.3 Etapa 3 - Desenvolvimento dos concretos especiais com sílica coloidal.....	53
4.4 Etapa 4 - Reparação dos elementos danificados e caracterização do concreto especial	56
5. CONCLUSÕES	71
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	73
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICE I – TESTE ESTATÍSTICOS	79

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é uma das principais atividades econômicas de um país, sendo responsável por um grande consumo de energia e extração de recursos naturais. O principal insumo utilizado neste setor é o concreto convencional de cimento Portland, que pode ser entendido como uma mistura composta por cimento, água e agregados miúdos e graúdos, podendo haver a incorporação de um ou mais componentes. Este material é o segundo mais consumido no mundo, sendo a água o primeiro (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A ampla utilização do concreto deve-se à reação de hidratação do cimento, que forma uma pasta que adere aos agregados, proporcionando uma mistura de fácil execução. Quando as proporções são corretas, essa mistura se torna resistente, durável e com baixa permeabilidade. Portanto, é possível ser empregado em diversos tipos de obras de engenharia, além de ser o principal componente de diversos tipos de sistemas construtivos como o próprio concreto armado, o concreto protendido, as paredes de concreto moldadas no local, os elementos pré-fabricados de concreto e a alvenaria estrutural em blocos de concreto.

Todavia, projetar uma estrutura de concreto vai além da aplicação dos conceitos de engenharia de estruturas, pois devem ser consideradas as características e o comportamento dos materiais, bem como a significativa interferência do meio ao qual a estrutura estará exposta (FAGURY, 2002).

Assim, conforme recomenda a NBR 6118:2023, os projetos e construções em concreto devem considerar a durabilidade das estruturas. A estrutura deve ser capaz de resistir às influências ambientais previstas e definidas na elaboração do projeto, conservando sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço.

Garantir a durabilidade das estruturas de concreto é um desafio à construção civil, uma vez que são diversos os mecanismos de envelhecimento e deterioração deste material advindos tanto de fatores externos quanto por causas internas ao compósito (ABNT, 2023).

Como consequência dos mecanismos de envelhecimento e deterioração do material, são recorrentes as estruturas de concreto com problemas associados ao desconhecimento dos projetistas acerca destes conceitos, ou práticas equivocadas durante a execução dos elementos ou, até mesmo, ausência de manutenção preventiva.

Para solucionar as manifestações patológicas e garantir maior durabilidade às estruturas, as pesquisas avançam na busca por materiais com desempenho superior ao convencional. Estes materiais, com alto desempenho, podem ser empregados tanto para reparar estruturas problemáticas como para compor a estrutura desde o início da construção. Assim, garante-se maior vida útil às edificações, sempre prezando pela sustentabilidade econômica e ambiental.

Isso porque há uma pressão crescente para assegurar maior sustentabilidade ao concreto, visto que a extração natural dos seus agregados causa impactos ambientais significativos, além do fato de que a indústria do cimento, seu principal material aglomerante, figura entre as principais responsáveis pela pegada de carbono no planeta (SCRIVENER; KIRKPATRICK, 2008).

Surgem, assim, os concretos especiais que podem conter, além dos componentes convencionais, aditivos químicos e adições minerais. As novas misturas possuem propriedades e características únicas: aumento da fluidez no estado fresco possibilitando o autoadensamento (concreto autoadensável - CAA); redução da porosidade e permeabilidade, aumento da durabilidade e da resistência mecânica (concreto de alto desempenho – CAD); dentre outras melhorias (AITCIN, 2000).

A sílica ativa é uma das adições minerais mais utilizadas atualmente para produção destes concretos especiais. Além de ser um subproduto da produção de silício-metálico e ligas de ferro-silício (insumos utilizados nas indústrias de alumínio e aço), suas partículas são mais finas que as do cimento (diâmetro médio de 0,1 a 0,2 μm), o que garante um efeito fíler na mistura e, ainda, produzem um efeito químico devido à reação pozolânica entre a sílica amorfa e o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento (DAL MOLIN, 2011).

Com o avanço da nanociência associada às pesquisas em concreto (utilizando partículas com tamanho menor que 500 nm), destaca-se o concreto com adição de sílica coloidal, que é um material mais fino que a sílica ativa e com partículas arredondadas, apresentando, portanto, um efeito “ultra-filler” (NORHASRI *et al.*, 2017) e maior área superficial que, havendo a correta dispersão, garante maior atividade pozolânica (LI *et al.*, 2017).

Dessa forma, a sílica coloidal melhora a qualidade e desempenho do concreto, atuando na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento (ZTI), diminuindo a porosidade da matriz, aumentando sua resistência mecânica e durabilidade, entre outros benefícios (TECNOSIL, 2013).

Segundo Rai (2017), a sílica coloidal garante melhorias em propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto abrindo novas áreas de pesquisa sobre o material. Assim, este trabalho consiste em estudar a aplicabilidade do concreto com adição de sílica coloidal como material de reparo de estruturas de concreto convencional.

1.1 Justificativa

Simultaneamente à intensa utilização do concreto de cimento Portland, diversos problemas surgiram nas estruturas. Além de erros em projeto, execução e manutenção, existem vários mecanismos de deterioração deste material como lixiviação, reações expansivas (reações alcalinas, ataques por sulfatos, dentre outras) e despassivação da armadura, que muitas vezes não são considerados.

Indubitavelmente, o desenvolvimento de materiais com melhor desempenho e maior resistência contra estes mecanismos de degradação se faz necessário para garantir maior durabilidade às estruturas.

Infelizmente, mesmo diante do avanço das pesquisas que abordam esta temática, a construção civil, por diversas vezes, enfrenta dificuldades na devida aplicação destes avanços, e muitas patologias ainda se manifestam nas edificações, pontes, barragens etc.

Considerando este cenário, o estudo da aplicação dos concretos especiais para o reparo e recuperação de estruturas se mostra de grande importância, pois existe a possibilidade de desenvolvimento de soluções que garantam uma maior vida útil aos elementos estruturais com problemas patológicos.

Assim, o concreto com adição de sílica coloidal se destaca por apresentar, segundo a literatura, baixa permeabilidade e elevada resistência à compressão logo nas primeiras idades, propriedades que sinalizam um possível candidato a cumprir esta função reparadora nas estruturas. Este material pode ser utilizado, por exemplo, para a rápida reparação estrutural em pontes que não podem permanecer interditadas durante muito tempo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o emprego de concretos especiais com sílica coloidal como material de reparo para elementos de concreto convencional.

1.2.2 Objetivos específicos

- Produzir as misturas dos concretos convencionais, por meio do método de dosagem tradicional IPT/EPUSP, e dos concretos especiais com sílica coloidal, pelo modelo de empacotamento de Alfred.
- Avaliar as características do concreto com sílica coloidal, determinando suas principais propriedades, incluindo o tempo de pega e a resistência mecânica.
- Aplicar o concreto especial como material de reparo para recomposição de uma seção central de corpos de prova de concreto convencional, analisando sua atuação como elemento de ligação.
- Avaliar a utilização do concreto especial como material de reparo por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos nos corpos de prova “recuperados”.

1.3 Estrutura da dissertação

No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução do trabalho, que inclui uma breve contextualização do tema abordado, bem como a justificativa e os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica relevante ao tema em questão. No capítulo, são discutidos os métodos de dosagem utilizados no programa experimental, o contexto dos estudos que empregaram sílica coloidal como adição ao concreto, e aspectos teóricos relacionados à durabilidade e manutenção de estruturas.

No capítulo 3, são abordados os detalhes do programa experimental, que inclui a descrição minuciosa das etapas da pesquisa, englobando a caracterização dos materiais, os métodos de produção e ensaio, bem como os procedimentos empregados na análise dos resultados.

O quarto capítulo contém os resultados obtidos e as respectivas análises e discussões. Os resultados abrangem a produção dos corpos de prova de concreto convencional, a elaboração e análise dos concretos especiais com sílica coloidal, e a avaliação do desempenho desses concretos especiais como material de reparo.

Em seguida, o capítulo 5 expõe as principais conclusões da pesquisa, juntamente com sugestões para trabalhos futuros. Posteriormente, são listadas as referências bibliográficas empregadas no estudo. Por fim, disponibiliza-se o apêndice, contendo tabelas e gráficos complementares para facilitar a análise e discussão dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica dividida em quatro temas principais: concreto e seus materiais constituintes, métodos de dosagem, nanotecnologia aplicada ao concreto, e durabilidade e manutenção de estruturas.

2.1 Concreto e seus materiais constituintes

O concreto, principal material utilizado na construção civil atualmente, é um compósito que possui um aglomerante hidráulico (cimento Portland), agregados miúdos e graúdos, e água, podendo, ou não, conter adições minerais e/ou aditivos químicos. Quando misturados, estes elementos formam uma liga capaz de assumir diversas formas e, após o endurecimento, apresenta uma resistência mecânica elevada, e maior resistência à água e ao fogo quando comparada à madeira e ao aço (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Estas características, juntamente com o custo reduzido e a disponibilidade dos materiais constituintes em regiões próximas aos canteiros de obra, garantiram a intensa utilização deste material, principalmente a partir do século XIX, momento em que o concreto armado surgiu se mostrando um bom substituto para a madeira e alvenaria. Atualmente, mesmo diante de recessões enfrentadas pelas grandes economias mundiais, a produção do concreto continua elevada (CEMBUREAU, 2015).

De acordo com Daminieli (2013), a ampla utilização do compósito trouxe consigo a preocupação ambiental, pois o processo de produção do cimento (aglomerante principal do concreto) é responsável por cerca de 5% das emissões de CO₂ mundiais. Assim, a indústria do cimento se tornou uma das principais responsáveis pela pegada de carbono do planeta (SCRIVENER; KIRKPATRICK, 2008).

Diante deste cenário, as pesquisas foram impulsionadas a desenvolver melhorias sustentáveis para a mistura de concreto. Mehta e Monteiro (2014) recomendaram três caminhos para se atingir a sustentabilidade na indústria do concreto: consumir menos concreto por meio do desenvolvimento de projetos arquitetônicos e estruturais inovadores tanto para erigir novas construções como para reabilitar estruturas existentes; melhorar a dosagem das misturas visando reduzir a quantidade de cimento Portland na composição dos concreto; e reduzir a quantidade de cimento Portland ao utilizar maiores volumes de materiais cimentícios suplementares, normalmente considerados em substituição ao cimento.

Considerando estes dois últimos caminhos, a comunidade de pesquisadores continuamente busca materiais capazes de substituir parte do cimento sem perder o desempenho final desejado, dosagens que facilitem a redução da quantidade de cimento empregado, além de se aprofundarem nos estudos relacionados à reologia do material.

Além disso, os pesquisadores são desafiados pelo próprio mercado da construção civil a desenvolver melhorias para o concreto visando atender diversas demandas dos canteiros de obra. Havia, e ainda há, problemas a serem solucionados desde o transporte do material, seu lançamento e adensamento, até a sua resistência mecânica, durabilidade e manutenção.

Portanto, hoje o concreto vai muito além de sua composição convencional (cimento, agregados e água), pois incorpora materiais cimentícios suplementares (adições minerais), tais como cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto forno, pozolana, entre outros (CASTRO, 2007), além de aditivos químicos. Sendo assim, se faz necessário entender todos os seus constituintes e a proporcionalidade entre eles para a execução de estruturas de concreto mais duradouras e sustentáveis.

2.1.1 Cimento Portland

De acordo com Battagin (2011), o cimento Portland tem como principal constituinte o clínquer que, em contato com a água, desenvolve propriedades ligantes em função das suas reações químicas de hidratação.

Sabe-se que o clínquer apresenta um processo de produção com elevado gasto energético (calcinação de uma mistura de cálcio e argila em uma temperatura de aproximadamente 1450°C). Assim, foram adicionadas ao cimento adições minerais (escória granulada de alto-forno, materiais pozolânicos e fíler calcário) para obter um produto com melhor desempenho tanto no aspecto ligado à conservação de energia, como em algumas propriedades específicas garantidas por tais adições.

Outro constituinte do cimento é o gesso que tem a função de regular a pega do cimento, ou seja, evitar o endurecimento instantâneo do material. De forma geral, o gesso aumenta o intervalo de tempo para a aplicabilidade do material, pois possibilita o transporte do concreto até o local onde será utilizado, garantindo tempo hábil para seu lançamento e adensamento.

O Quadro 1 apresenta os tipos de cimento normalizados no Brasil. Observa-se que existem vários tipos de cimento dependendo de sua composição e a presença, ou não, de certas adições. Além disso, possuem classes de resistência variadas e siglas específicas.

Tabela 1 – Tipos de cimento normalizados no Brasil

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Clinker + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	95-100	0-5			
	CP I-S		90-94	0	0	6-10	
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E		51-94	6-34	0	0-15	
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z		71-94	0	6-14	0-15	
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F		75-89	0	0	11-25	
Cimento Portland de alto forno	CP III		25-65	35-75	0	0-10	
Cimento Portland pozolânico	CP IV		45-85	0	15-50	0-10	
Cimento Portland de alta resistência inicial	CPV		ARI	90-100	0	0	0-10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	75-100	-	-	0-25
	Não estrutural		-	50-74	-	-	26-50

Fonte: NBR 16697:2018 (ABNT, 2018).

2.1.2 Água

A água utilizada na dosagem do concreto é denominada água de amassamento. É um componente indispensável por ativar as reações de hidratação do cimento e garantir a homogeneidade da mistura (CASTRO, 2007).

Entretanto, de acordo com Neville (2016), a quantidade e a qualidade da água de amassamento devem ser devidamente estudadas para evitar excessos que possam causar exsudação, elevada porosidade ou efeitos nocivos causados pelas impurezas que podem estar presentes na água (corrosão acelerada das armaduras, resistência mecânica reduzida, dentre outros).

2.1.3 Agregados

Agregados são materiais granulares e relativamente inertes (em termos químicos) com dimensões e propriedades variadas. Podem ser classificados quanto à origem (naturais, artificiais e reciclados), massa unitária (leve, normal e pesado) ou dimensão das partículas (agregado graúdo, agregado miúdo e fíler).

Os agregados possuem grande importância técnica ao concreto, pois impedem o efeito acentuado de retração do aglomerante. Além disso, dependendo de suas propriedades (distribuição granulométrica, forma, textura, composição mineralógica), influenciam em diversos aspectos do compósito, desde sua resistência mecânica até possíveis manifestações patológicas associadas a estes materiais, como a reação álcali-agregado.

Vale ressaltar a importância econômica dos agregados que, por serem mais baratos que o cimento, garantem um volume de material maior com o mesmo custo que seria gasto para produzir apenas a pasta de cimento.

2.1.4 Aditivos e adições

Os aditivos químicos e adições minerais são qualquer material que não seja água, cimento, agregados e fibras adicionados como ingredientes durante a mistura do concreto ou argamassa (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Estes materiais são essenciais para a produção dos concretos contemporâneos por terem diversas finalidades importantes, a saber:

- Aumentar a plasticidade sem aumentar o consumo de água;
- Reduzir a exsudação ou a segregação;
- Retardar ou acelerar o tempo de pega;
- Acelerar o desenvolvimento de resistência mecânica nas primeiras idades;
- Aumentar a durabilidade em condições específicas de exposição.

2.1.4.1 Aditivos químicos

A NBR 11768-1:2019 (ABNT, 2019) caracteriza os aditivos químicos como materiais adicionados em pequena quantidade nas misturas cimentícias para modificar algumas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições.

Existem, atualmente, diversos tipos de aditivos químicos como os plastificantes e superplastificantes, aceleradores e retardadores de pega, incorporador de ar, retentores de água, redutores de retração, inibidores de corrosão, pigmentos, dentre outros.

No tocante à execução de concreto de alto desempenho (CAD), de acordo com Aitcin (2000), o aditivo superplastificante é essencial para possibilitar a manipulação, lançamento e adensamento das misturas que apresentam uma relação água/aglomerante baixa (menor ou igual a 0,40).

2.1.4.2 Adições Minerais

As adições minerais são materiais silicosos insolúveis finamente moídos, provenientes de fontes naturais ou de subprodutos industriais, que são adicionados ao concreto promovendo efeitos físicos e/ou químicos. Os benefícios do uso de adições em concreto são diversos, como melhor resistência à fissuração térmica, aumento da resistência mecânica final e redução da permeabilidade devido ao refinamento dos poros e fortalecimento da zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Dal Molin (2011), as adições minerais podem ser divididas em três grupos de acordo com suas funções:

- **Materiais pozolânicos:** materiais silicosos ou sílico aluminosos que possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas quando em presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, formando compostos com propriedades cimentantes.
- **Materiais cimentantes:** materiais que formam compostos cimentantes sem necessitarem da presença do hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento.
- **Fíler:** materiais muito finos que não possuem atividade química, mas possuem função física de empacotamento granulométrico (efeito fíler) e geram pontos de nucleação para hidratação por meio do refinamento de poros.

A sílica coloidal, além de possuir função física (“ultra-filler”), garante, assim como a sílica ativa, maior atividade pozolânica na mistura de concreto (LI *et al.*, 2017; NORHASRI *et al.*, 2017). Entretanto, são materiais distintos, tanto no processo de produção como no tamanho das partículas.

2.2 Dosagem do concreto

Conforme fora evidenciado, o cenário atual da tecnologia do concreto exige grande compreensão, não apenas dos materiais constituintes, mas também da proporcionalidade entre eles (dosagem) para desenvolvimento de concretos com desempenho cada vez melhor.

A dosagem do concreto é o processo por meio do qual é obtida a proporção ideal entre os materiais componentes do concreto para produzir uma mistura que atenda a certas especificações prévias (trabalhabilidade, resistência mecânica, durabilidade etc.), levando em conta o fator econômico que permeia sua execução (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Dentre as metodologias de dosagem existentes, destaca-se o método de dosagem IPT/EPUSP que pode ser empregado para a produção de concretos com resistência característica à compressão de até 150 MPa ; e o Modelo de Alfred para a dosagem de concretos com base no conceito de empacotamento de partículas, sendo possível obter valores de resistência à compressão ainda maiores.

2.2.1 Método de dosagem IPT/EPUSP

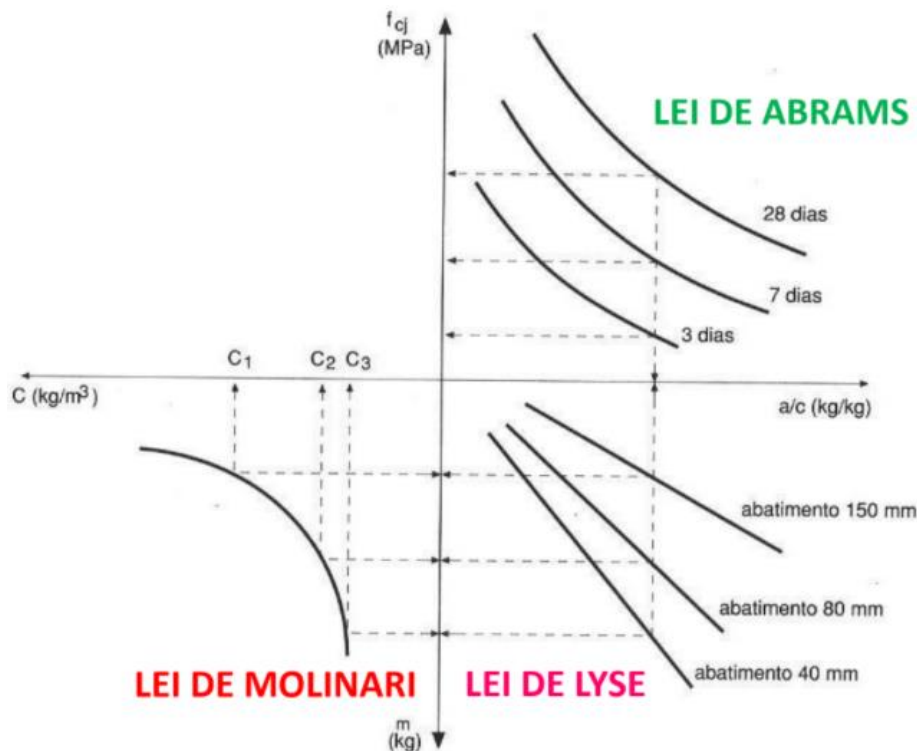
Este método foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). O principal parâmetro considerado é a relação água/cimento, e a metodologia busca a melhor proporção entre os agregados disponíveis para obter o menor consumo de água.

Segundo Tutikian e Helene (2011), as limitações do método são as seguintes:

- Resistência à compressão: $5 \text{ MPa} \leq f_c \leq 150 \text{ MPa}$;
- Relação água/cimento: $0,15 \leq a/c \leq 1,50$;
- Abatimento: $0 \text{ mm} \leq \text{abatimento} \leq \text{autoadensável}$;
- Dimensão máxima do agregado graúdo: $4,8 \text{ mm} \leq D_{\text{máx}} \leq 100 \text{ mm}$;
- Teor de argamassa seca: $30\% < \alpha < 90\%$;
- Fator água/materiais secos: $5\% < H < 12\%$;
- Módulo de finura do agregado: qualquer;
- Distribuição granulométrica dos agregados: qualquer;
- Massa específica do concreto: $> 1500 \text{ kg/m}^3$.

Portanto, é um método efetivo para a dosagem dos concretos convencionais que serão desenvolvidos nesta pesquisa. A metodologia considera um estudo teórico preliminar e, em seguida, um estudo experimental para determinação do teor ideal de argamassa seca. Após a definição deste parâmetro, são produzidos três traços auxiliares variando a relação entre a massa de cimento e dos agregados secos totais (traços pobre, médio e rico). Com os resultados encontrados, constrói-se um diagrama de dosagem (Figura 1) relacionando as leis de Abrams, Lyse e Molinari. Considerando os mesmos materiais constituintes e mantendo constantes o teor de argamassa e o abatimento, é possível determinar o traço desejado levando em conta a resistência característica à compressão determinada em projeto e a relação água/cimento.

Figura 1 – Exemplo do diagrama de dosagem pelo método IPT/EPUSP



Fonte: Adaptado de HELENE; TERZIAN (1992).

2.2.2 Empacotamento de partículas – Modelo de Alfred

Empacotamento de partículas pode ser definido como a adequada seleção da proporção e do tamanho das partículas, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão preenchidos com partículas ainda menores, e assim por diante (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Segundo Féret (1892)¹ *apud* Lopes (2019), a resistência à compressão máxima pode ser alcançada quando os vazios são mínimos. Conclui-se, a partir dessas duas referências, que o empacotamento de partículas é essencial para alcançar a máxima resistência à compressão. Portanto, os traços dos concretos especiais com sílica coloidal serão determinados utilizando modelos de dosagem baseados no conceito de empacotamento de partículas, em especial o modelo de Alfred.

Os modelos de empacotamento de partículas prescrevem, por meio de equações matemáticas, como partículas de diferentes tamanhos irão interagir geometricamente entre si.

¹ Feret, R. (1892), “Sur la Compacité des mortiers hydrauliques”, Annales des ponts et Chaussées.

Assim, calculam a densidade de empacotamento teórica de uma mistura baseado na distribuição granulométrica e na densidade de empacotamento de um determinado grupo de partículas.

O modelo de Alfred (Equação 1) apresenta a convergência matemática entre outros dois modelos de dosagem que consideram o empacotamento, sendo eles os modelos de Furnas e Andreasen (FUNK; DINGER, 1994).

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

Sendo:

CPFT – porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D;

D – diâmetro associado à abertura de peneira considerada na análise;

D_L – diâmetro da maior partícula na distribuição;

D_s – diâmetro da menor partícula na distribuição;

q – módulo da distribuição granulométrica (constante).

Segundo Castro e Pandolfelli (2009), para se determinar o melhor empacotamento de partículas podem ser desenvolvidas, por meio da otimização computacional, curvas granulométricas ideais utilizando os modelos de empacotamento. Assim, busca-se uma combinação entre as partículas dos materiais disponíveis de forma a se aproximar da curva teórica ideal.

Ressalta-se que, no caso do modelo de Alfred, quando o módulo de distribuição granulométrica (q) assume valores menores ou iguais a 0,37, favorece-se o empacotamento máximo; para valores acima disso, é sempre verificada uma porosidade residual (OLIVEIRA *et al.*, 2000; CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Lopes (2019) realizou a otimização computacional utilizando o modelo de Alfred e considerando os materiais disponíveis no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da USP. As planilhas desenvolvidas serão adaptadas, considerando a sílica coloidal, para a utilização nesta pesquisa.

2.3 Nanotecnologia aplicada ao concreto

Sabe-se que para a compreensão das propriedades e mecanismos de degradação do concreto não basta analisar o compósito apenas na macro escala, ou seja, a investigação deve se aprofundar para micro e nano escalas, pois as propriedades medidas em escala maior são explicadas pelos fenômenos que ocorrem na microestrutura do material.

Segundo Sanchez e Sobolev (2010), a busca pelo concreto que atenda às demandas do mercado atual exige a utilização de materiais em escala microscópica e a compreensão de como ocorrem as reações dessas adições com o cimento. Assim, foram empregadas adições como sílica ativa, cinza volante, metacaulim, cinza de casca de arroz, dentre outras que, de forma sustentável, substituem parcialmente o cimento. Contudo, com o avanço dos estudos do concreto, surgiu a necessidade de se aprofundar ainda mais, adentrando na escala nanométrica.

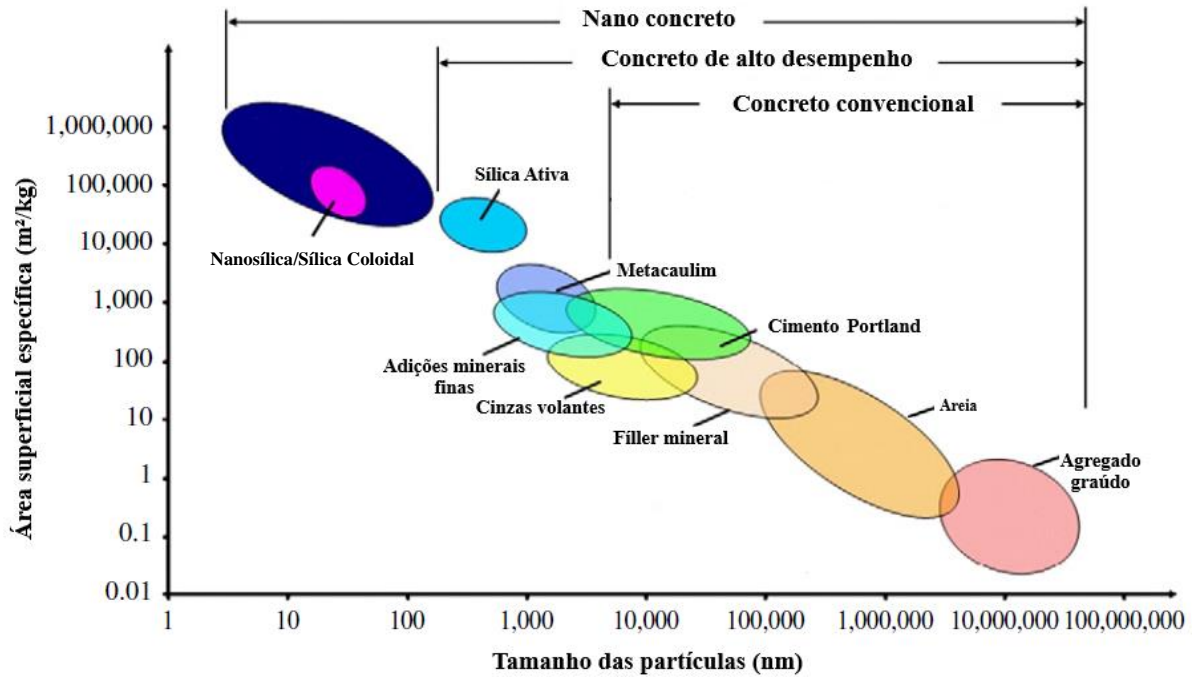
Define-se nanotecnologia como o entendimento, controle e fabricação de materiais na ordem dos nanômetros (menos de 100 nm). Assim, este campo emergente tem grande potencial de trazer mudanças no desempenho dos materiais, inclusive em materiais da construção civil.

Pode-se considerar um “nano concreto” aquele que possui adições de materiais com partículas menores que 500 nm (HOU *et al.*, 2015). Portanto, trata-se de uma mistura com partículas menores que aquelas empregadas no CAD (Figura 2), contribuindo com o preenchimento dos vazios do compósito (empacotamento).

Para o concreto nanoestruturado, as nanopartículas podem atuar como pontos de nucleação para as fases do cimento, promovendo mais hidratação devido à sua alta reatividade; como nano reforço; e como material de preenchimento, densificando a microestrutura e a zona de transição, diminuindo, assim, a porosidade do concreto. Entretanto, alguns questionamentos sobre o uso desses materiais ainda estão presentes, como a busca por uma dispersão efetiva dessas nanopartículas (RUPASINGHE *et al.*, 2011).

A partir do avanço das pesquisas que abordam a adição da nanosílica ao concreto, diversas outras nano partículas estão sendo desenvolvidas e testadas como a nano alumina, nano tubo de carbono e óxido de titânio (NORHASRI *et al.*, 2017).

Figura 2 – Tamanho das partículas e superfície específica dos materiais presentes no concreto



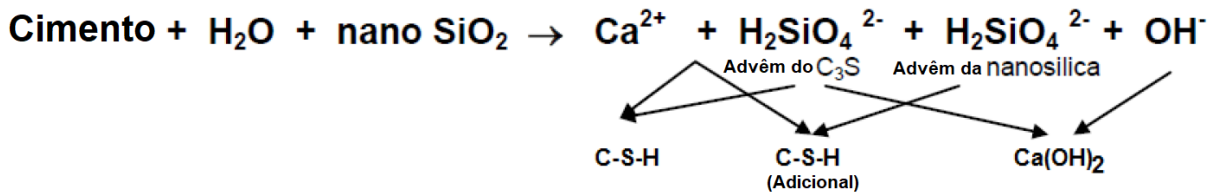
Fonte: Adaptado de SOBOLEV; GUTIÉRREZ (2005).

2.3.1 Sílica coloidal

Segundo Magliano (2009), a sílica coloidal consiste em nano partículas de dióxido de silício amorfo (nano SiO₂), estabilizadas em suspensão aquosa. A produção deste material advém da polimerização controlada de silicato Si(OH)₄ e do ácido silícico em reatores químicos. O tamanho médio das partículas pode variar de 2 a 20 nm e a área superficial específica entre 300 e 900 m²/g.

Esta adição ao concreto funciona como um agente modificador de reologia e como potencializador de resistência mecânica nas primeiras idades, pois ela se desestabiliza na presença de espécies químicas catiônicas solúveis, iniciando uma reação de gelificação. Esta reação garante a formação de nano sementes de C-S-H que aceleram a hidratação do cimento. Portanto, a sílica coloidal possui tanto uma atividade pozolânica como um efeito fíler na matriz do concreto (SINGH *et al.*, 2013). A Figura 3 apresenta a reação pozolânica da sílica coloidal na pasta de cimento, sendo possível observar a formação de C-S-H adicional.

Figura 3 – Reação pozolânica da sílica coloidal (nano SiO₂) na pasta de cimento



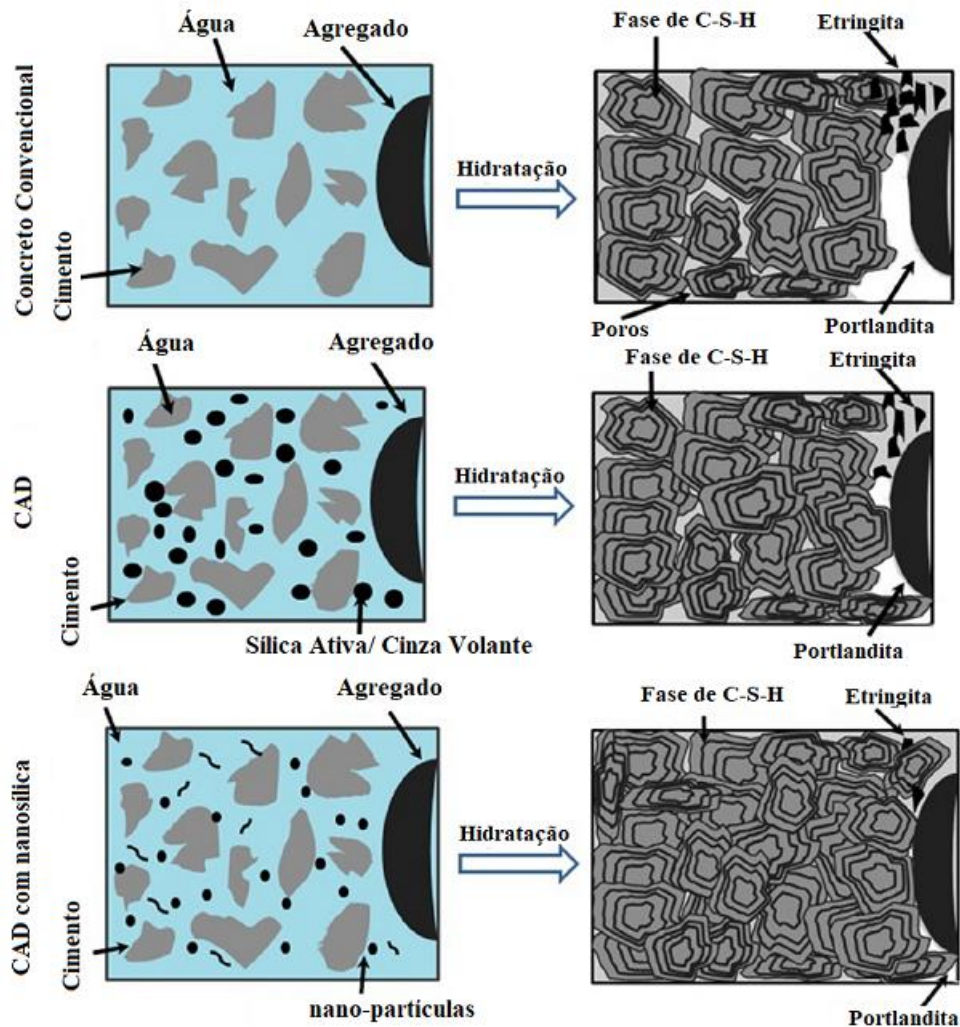
Fonte: Adaptado de Rai (2017).

Com esta reação, a sílica coloidal aumenta a viscosidade e a consistência da mistura, além de manter as partículas finas presas à sua estrutura, dificultando a segregação. Além disso, acontece o efeito da capilaridade gerado pela nano porosidade do gel que retém a água no sistema, evitando a exsudação (NORHASRI *et al.*, 2017). Evidencia-se, por fim, o efeito ligante da sílica coloidal, existindo, até mesmo, aplicações em materiais cerâmicos que utilizam este material como único agente ligante. Este efeito também pode ser considerado um mecanismo de aumento de resistência mecânica inicial (MAGLIANO, 2009).

A sílica coloidal, quando comparada à sílica ativa, possui um percentual de sílica amorfa mais elevado e partículas esféricas ainda menores, apresentando um potencial para uma maior reatividade. As partículas desta adição, em escala micro e nanoscópica, preenchem os espaços vazios entre os grãos de cimento e, em teores ideais, aumentam a densidade de empacotamento, o que contribui para a redução da porosidade e, conseqüentemente, para o aumento da resistência mecânica (SINGH *et al.*, 2013).

A Figura 4 ilustra a microestrutura de três tipos de concreto. No concreto convencional, após a hidratação, pode-se observar uma fase de C-S-H pouco densa, gerando maior quantidade de poros e a formação da zona de transição. No concreto de alto desempenho (CAD), é possível observar a formação de uma fase de C-S-H mais densa e a redução da zona de transição. Por outro lado, no concreto com sílica coloidal, a densidade do C-S-H, após hidratação, é muito alta e a zona de transição entre a pasta e o agregado é praticamente inexistente (SINGH *et al.*, 2013). Evidencia-se, portanto, o grande impacto da sílica coloidal na composição do concreto, uma vez que ela se mostra mais efetiva na redução dos poros do concreto que a própria sílica ativa presente nos concretos de alto desempenho.

Figura 4 – Microestrutura do concreto convencional, alto desempenho e com sílica coloidal



Fonte: Adaptado de SINGH *et al.* (2013).

Atualmente, a nanosílica é comercializada em pó ou em suspensão. Em pó, consiste em aglomerados de nanopartículas que, ao serem adicionadas à água, se dispersam em partículas individualizadas; em suspensão (sílica coloidal), é mantida em pH acima de 9, onde a quantidade de grupos hidroxilas (OH^-) ligados à sua superfície é muito grande, gerando uma alta repulsividade que impede a aproximação e, conseqüentemente, a aglomeração das partículas, formando suspensões estáveis por longos períodos.

A concentração máxima em que a sílica coloidal - em suspensão - pode ser estocada sem que ocorra sua gelificação é entre 30% e 40%, em peso; em casos especiais, é possível obter suspensões estáveis com concentração de até 50%, em peso. Entretanto, o tamanho das partículas para concentrações superiores a 40%, em peso, é restrito ao valor mínimo de 80 nm, sendo consideravelmente maior que o tamanho de 14 nm das partículas comumente utilizadas (MAGLIANO, 2009).

Vale ressaltar que existe uma grande incerteza quanto ao teor ideal de sílica coloidal a ser adicionado na mistura de concreto diante dos resultados distintos apresentados pela

literatura, tanto em parâmetros do estado fresco (como aumento da demanda de água para manter a trabalhabilidade) como do estado endurecido (como a resistência à compressão axial).

A Tabela 2 resume os resultados de algumas das principais pesquisas sobre o tema.

Tabela 2 – Resultados das pesquisas sobre a adição de nanosílica ao concreto de cimento Portland

Referências	Teores de NS considerados (% da massa de cimento)	Principais resultados em comparação com os traços de referência
LI, 2004	3%	Aumento de 14% na resistência à compressão (28 dias)
	5%	Aumento de 17% na resistência à compressão (28 dias)
	10%	Aumento de 26% na resistência à compressão (28 dias)
QING, 2007	1% e 2%	Aumento de 20% na resistência à compressão (28 dias)
	5%	Aumento de 25% na resistência à compressão (28 dias)
SALEMI; BEHFARNIA, 2013	5%	Aumento de 30% na resistência à compressão (28 dias)
KONG <i>et al</i> , 2019	0,5%	Aumento de 4% na resistência à compressão (28 dias)
	1%	Aumento de 5% na resistência à compressão (28 dias)
	1,5%	Aumento de 8% na resistência à compressão (28 dias)
	2%	Aumento de 13% na resistência à compressão (28 dias)
GARCÍA-DÍAZ <i>et al</i> , 2023	0,5%	Redução de 5% na resistência à compressão (28 dias)
	1%	Redução de 3% na resistência à compressão (28 dias)
	1,5%	Resistência à compressão similar à mistura de referência
	2%	Aumento de 16% na resistência à compressão (28 dias)
	2,5%	Aumento de 25% na resistência à compressão (28 dias)
ZHANG <i>et al</i> , 2014	1%	Aumento de 4% na resistência à compressão (28 dias) / Redução de 11% do abatimento
	3%	Aumento de 7% na resistência à compressão (28 dias) / Redução de 22% do abatimento
	5%	Aumento de 11% na resistência à compressão (28 dias) / Redução de 33% do abatimento
	7%	Aumento de 7% na resistência à compressão (28 dias) / Redução de 46% do abatimento
	9%	Aumento de 4% na resistência à compressão (28 dias) / Redução de 77% do abatimento
YUN <i>et al</i> , 2022	2%	Aumento de 7% na resistência à compressão (28 dias) / Sem redução do abatimento
	3%	Aumento de 7% na resistência à compressão (28 dias) / Redução de 7% do abatimento
	4%	Aumento de 9% na resistência à compressão (28 dias) / Redução de 11% do abatimento
JO <i>et al</i> , 2007	-	Determinou como teor máximo ideal 6%. Valores acima poderiam diminuir a resistência à compressão.
BJORMSTROM <i>et al</i> , 2007	-	Adições acima de 2% já poderiam reduzir o desempenho mecânico do material
SUPIT; SHAIKH, 2015	2%	Redução do abatimento em 40%
	4%	Redução do abatimento em 60%
LTIFI, 2011	3%	A partir deste teor, observou-se a necessidade de água para manter a trabalhabilidade
QUERCIA, 2012	de 0,5% a 4%	Nesta faixa de adição da NS, houve a redução da demanda de água, sem uso de superplastificante

O estudo desenvolvido por Li (2004) utilizou a nanosílica em substituição ao cimento, em proporções de 3%, 5% e 10% em massa. Observou-se um aumento significativo na resistência aos 28 dias, passando de 28,90 MPa (referência) para 32,90 MPa com a adição de 3% de nanosílica à mistura. Além disso, a pesquisa inclui imagens da microestrutura dos concretos produzidos, evidenciando que a adição nanotecnológica atuou não apenas como fíler, mas também como promotora de hidratação.

Qing (2007) também empregou a nanosílica em substituição ao cimento em diferentes proporções: 1%, 2%, 3% e 5% em relação à massa do cimento. A resistência do concreto de referência aos 28 dias foi de 79,2 MPa, enquanto as resistências dos concretos com nanosílica foram, respectivamente, 94,7 MPa, 95,8 MPa, 97,6 MPa e 98,8 MPa para cada teor.

Além disso, ainda sobre a mesma pesquisa, constatou-se que o tempo de fim de pega das misturas diminuiu à medida que a quantidade de nanosílica adicionada aumentou, passando de 4 horas e 23 minutos (referência) para 3 horas e 6 minutos no concreto com 5% de adição nanotecnológica.

A análise de Kong *et al* (2019) considerou teores menores (0,5%, 1%, 1,5% e 2% em adição a massa de cimento). A resistência à compressão aumentou conforme crescia a adição de sílica coloidal, registrando um aumento de 13% para o traço com 2% da adição – aos 28 dias.

O estudo experimental conduzido por Zhang *et al* (2014) investigou o efeito das partículas de nano-SiO₂ nas propriedades mecânicas do concreto com cinzas volantes. Diferentes teores (1%, 3%, 5%, 7% e 9% - substituição em massa de cimento) foram testados. Os resultados mostram que a adição de nanosílica reduz o abatimento e a fluidez do concreto fresco, diminuindo conforme aumentam os teores. A presença das nanopartículas melhora a resistência à compressão e o módulo de elasticidade até o teor de 5%, mas diminui após esse ponto. Analogamente, Yun *et al.* (2022) observaram aumento na resistência até a adição de 4%, mantendo o comportamento de redução do abatimento conforme se aumentam os teores de NS.

A pesquisa realizada por Ltifi (2011) investigou os efeitos na trabalhabilidade do concreto ao utilizar sílica coloidal (nanosílica em suspensão) em substituição cimento, em teores de 3% e 10% em relação à massa de cimento. A fluidez das misturas foi avaliada utilizando o Maniabilimètre LCPC, um teste francês que mede o tempo que a argamassa leva, sob vibração, para escoar em um molde retangular. Observou-se que o tempo de escoamento da mistura sem sílica coloidal foi de 3 segundos, enquanto para a mistura com 3% de adição foi de 8 segundos, e para aquela com 10% excedeu 120 segundos, indicando a necessidade de maior quantidade de água ou aditivos químicos para manter a trabalhabilidade do concreto.

Vale notar que a água presente na solução de nanosílica foi levada em conta durante a execução das misturas, resultando na diminuição da quantidade de água a ser adicionada, mantendo, assim, a relação água/aglomerante.

2.4 Durabilidade e manutenção de estruturas de concreto

Durabilidade, conforme a NBR 15575-1:2021, consiste na capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas previamente (ABNT, 2021). Segundo a NBR 12655:2022, as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob condições ambientais, de utilização e de manutenção previstas em projeto, conservem sua segurança e estabilidade em serviço durante o prazo correspondente a vida útil (ABNT, 2022).

A NBR 6118:2023 estabelece critérios que visam a durabilidade das estruturas de concreto em função do tipo de ambiente em que a estrutura está inserida (ABNT, 2023). Assim, em função da classe de agressividade ambiental, são definidos os parâmetros de projeto: relação água/cimento máxima; classe de resistência mínima do concreto; consumo mínimo de cimento constituinte do concreto; e cobrimento mínimo da armadura. A Tabela 3 resume os parâmetros de projeto para durabilidade de estruturas de concreto armado e protendido de acordo com as classes de agressividade ambiental, conforme estabelecido na normalização.

Tabela 3 – Parâmetros de projeto de acordo com a classe de agressividade ambiental

Parâmetros de projeto		Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
Agressividade		Fraca	Moderada	Forte	Muito Forte
Classificação		Rural/Submersa	Urbana	Marinha/ Industrial	Industrial/Respingos de maré
Risco de deterioração		Insignificante	Pequeno	Grande	Elevado
Relação a/c	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe do concreto	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Cobrimento - viga e pilar (mm)	CA	25	30	40	50
	CP	30	35	45	55
Cobrimento - laje (mm)	CA	20	25	35	45
	CP	25	30	40	50
Cobrimento - elementos em contato com o solo (mm)	CA	30	30	40	50
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m ³	CA e CP	> 260	> 280	> 320	> 360

Nota: CA = concreto armado; CP = concreto protendido.

Fonte: Adaptado da NBR 6118:2023 (ABNT, 2023).

Conforme Possan (2004), em harmonia com a norma citada, a influência do ambiente sobre a estrutura de concreto pode ser reduzida pela dosagem adequada do concreto buscando melhores características de resistência mecânica e menores relações água/cimento, ou pela camada de concreto de cobrimento.

Segundo Helene (1993), uma camada de cobrimento executada utilizando um concreto com alta compactidade, sem ninhos de concretagem, vazios ou excesso de exsudação, garante, por meio da baixa permeabilidade, a proteção da armadura contra os agentes agressivos externos. Portanto, a durabilidade do concreto depende muito da permeabilidade, ou seja, da facilidade com que os líquidos e gases conseguem penetrar e se movimentar na estrutura de concreto (NEVILLE, 2016).

Assim, a durabilidade do concreto é um critério chave para um bom projeto (AITCIN, 2000). Entretanto, observa-se que, até hoje, mesmo com todas as determinações normativas, nem sempre é dada importância suficiente para este conceito e, muitas vezes, ocorre um descuido por parte dos profissionais da construção civil com fatores externos (ambiente no qual o concreto estará exposto, tipo de utilização da estrutura) e internos (escolha dos materiais, disposição das armaduras, porosidade e permeabilidade do concreto) que podem degradar mais facilmente as estruturas. Ademais, o problema se acentua quando não são adotadas boas estratégias de manutenção.

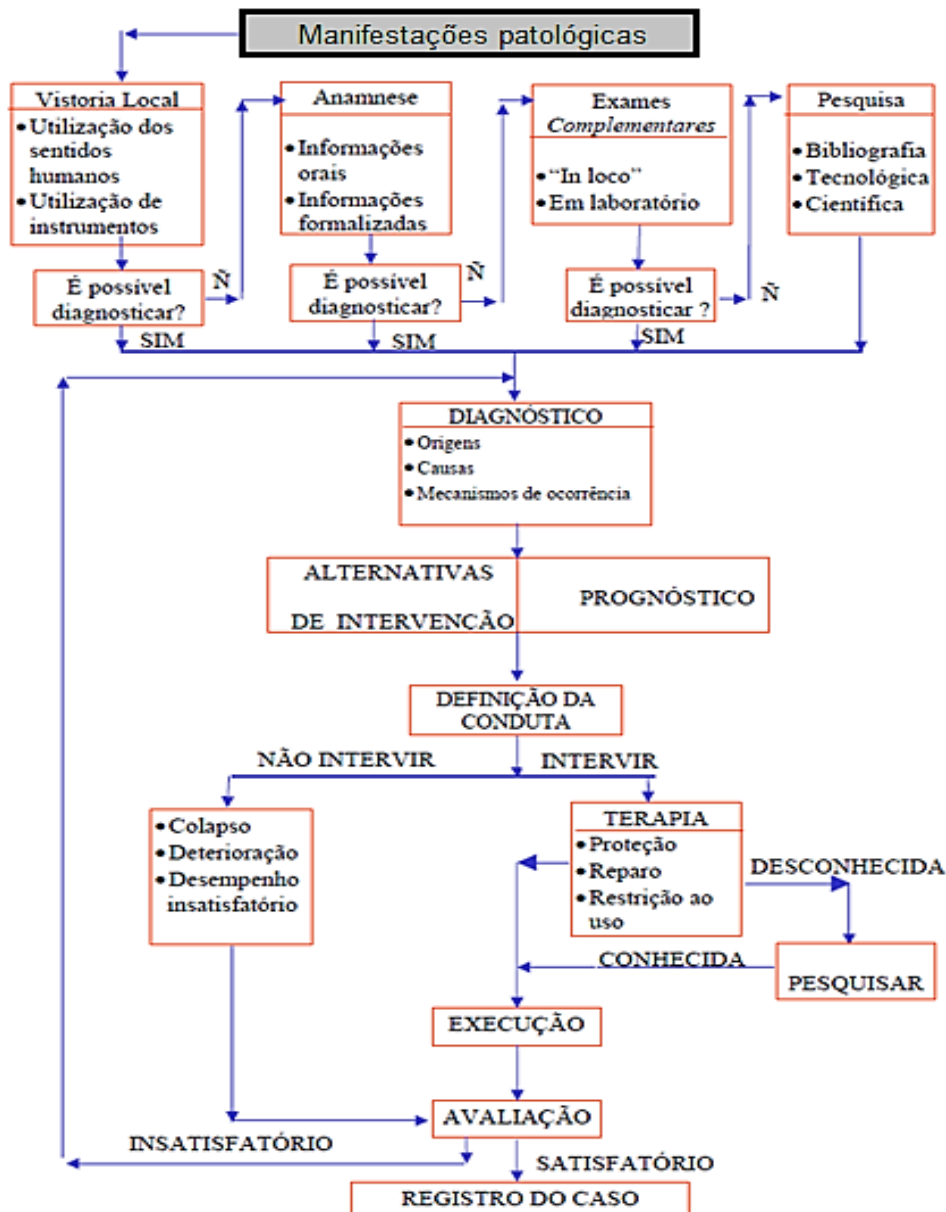
Diante do exposto, manifestações patológicas em estruturas de concreto se mantêm recorrentes e, conseqüentemente, surge a necessidade de se fazer reabilitações nas estruturas degradadas. Contudo, para determinar o melhor caminho para a recuperação ou reparo, faz-se necessária a compreensão das principais causas de degradação das estruturas de concreto e determinar um modelo de estudo para lidar com as situações reais.

2.4.1 Manifestações patológicas em estruturas de concreto

As manifestações patológicas nas estruturas são tão antigas quanto a própria construção civil. Com o aprimoramento das técnicas de construção, as incidências patológicas se reduziram, mas ainda hoje são muitos os problemas encontrados nas edificações (FAGURY, 2002).

Portanto, a atuação de profissionais para identificar, analisar e sanar estes problemas é vital para a durabilidade das estruturas. Entretanto, observa-se que não há um modelo de estudo das manifestações patológicas universalmente aceito e utilizado. A Figura 5 apresenta um exemplo das rotinas metodológicas para tratamento de patologias.

Figura 5 – Estrutura de estudo de manifestações patológicas em edificações



Fonte: Adaptado de FAGURY (2002)

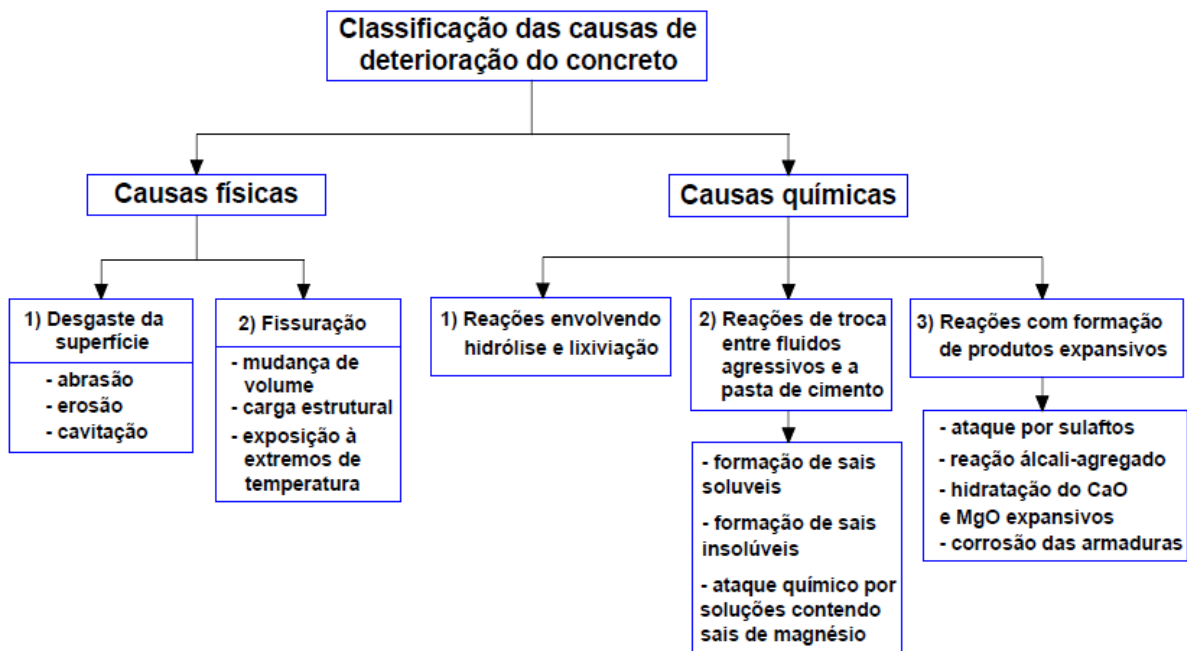
O modelo propõe que o primeiro passo seja vistoriar o local. Na hipótese de apenas com a vistoria já se saber as origens da manifestação patológica é possível seguir para o diagnóstico; caso contrário, deve ser feita uma anamnese, questionando os usuários sobre o histórico da estrutura. Caso ainda não seja possível identificar as causas, são feitos exames complementares e posteriormente pesquisas para, com todas essas informações, chegar a um diagnóstico efetivo.

Quando se chega em um diagnóstico é possível discernir como solucionar o problema. Após a execução da intervenção, é necessário avaliar a estrutura novamente para determinar se a terapia empregada foi satisfatória.

Para aplicar esta rotina de inspeção, no caso de estruturas de concreto, é essencial entender as principais causas de deterioração deste material. Estas podem ser divididas em dois blocos: causas físicas e causas químicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As causas físicas são o desgaste superficial e as fissuras; as causas químicas contemplam as interações entre os agentes agressivos do meio externo e os materiais constituintes da pasta de cimento hidratada ou barras de armadura. Além disso, podem ser consideradas as reações que formam produtos expansivos como a reação álcali-agregado, que ocorre entre os álcalis da pasta de cimento e certos materiais reativos presentes nos agregados (apenas elementos internos), na presença de água. A Figura 6 apresenta um resumo das causas citadas.

Figura 6 – Principais causas de deterioração das estruturas de concreto



Fonte: Adaptado de MEHTA; MONTEIRO (2014)

Por outro lado, Neville (2016) divide as ações de deterioração do concreto em três grupos:

- Físicas: causadas pelo efeito da alta temperatura, dilatação térmica e ciclos de gelo e degelo;
- Mecânicas: causadas por impacto, abrasão, erosão ou cavitação;
- Químicas: causadas pela ação de íons agressivos, como cloretos, sulfatos e gás carbônico.

Sendo assim, ambos os autores, apesar de dividirem de forma diferente as causas de deterioração do concreto, apontam causas similares para os principais tipos de degradação do concreto. Neville (2016) complementa ainda que muitas vezes nos processos de deterioração as ações atuam de forma sinérgica, ou seja, raramente a deterioração de uma estrutura de concreto decorre de uma única causa.

Santos (2019), tendo como referência a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), resume os mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado na Tabela 4.

Tabela 4 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado.

Mecanismos de deterioração do concreto	<ul style="list-style-type: none"> • Lixiviação • Expansão por sulfato • Reação álcali-agregado
Mecanismos de deterioração da armadura	<ul style="list-style-type: none"> • Carbonatação • Ação de cloretos
Mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita	<ul style="list-style-type: none"> • Ações mecânicas • Movimentações de origem térmica • Impactos • Ações cíclicas • Retração • Fluência • Relaxação • Demais ações atuantes sobre a estrutura.

Fonte: SANTOS (2019).

Diante de tantos mecanismos de deterioração, é essencial entendê-los e conhecer suas consequências para identificar a melhor forma para reabilitar a estrutura.

2.4.1.1 Deterioração das estruturas de concreto por ações físicas e mecânicas

As ações físicas associadas a danos na superfície exposta do concreto são a abrasão, a erosão e a cavitação. A abrasão acontece quando há ação mecânica por arraste de sólidos sobre a superfície, como o tráfego de veículos sobre um pavimento rígido. A erosão está ligada à passagem de fluidos com partículas sólidas em suspensão, como ocorre no revestimento de canais e tubulações de água e esgoto. A cavitação deve-se à perda de massa pela constante ruptura de bolhas de vapor devido às mudanças repentinas de direção em águas que fluem em alta velocidade (HELENE, 2003).

Neville (2016) inclui o impacto nas ações mecânicas que podem danificar as estruturas de concreto. Quando o objeto impactante é pequeno e pouco resistente e atinge a estrutura sob baixa velocidade, as consequências para uma estrutura rígida serão desprezíveis e em geral apenas se traduzirão em ruptura local ou lascamentos. No caso de objetos de grande tamanho, rígidos e deslocando-se a grande velocidade, estes podem provocar danos consideráveis, tais como a perda de rigidez, resistência, e inclusive o colapso.

Outra manifestação patológica geralmente ligada às ações físicas e mecânicas é a fissuração. As fissuras são provocadas por movimentações da estrutura, seja por causas térmicas, movimentações higroscópicas, atuação de sobrecargas ou concentração de tensões, deformação excessiva, recalques diferenciados das fundações, retração dos produtos à base de cimento, dentre outros fatores (THOMAZ, 1989).

2.4.1.2 Deterioração das estruturas de concreto por ações químicas

Lixiviação

A lixiviação acontece quando a água tem possibilidade de percolar através do concreto de forma intermitente ou contínua. Assim, sais como o carbonato de cálcio são arrastados para fora do elemento estrutural e, após se cristalizarem, formam eflorescências. Este processo pode levar a um aumento de porosidade, diminuindo a resistência, aumentando a permeabilidade, tornando o concreto mais vulnerável a outros ataques e, conseqüentemente, afetando indiretamente a durabilidade (HELENE, 2003).

A NBR 6118:2023 (ABNT, 2023) sugere como prevenção a este mecanismo a restrição da fissuração, e proteção de superfícies expostas com produtos hidrófugos.

Expansão por sulfato

Os sulfatos em solução aquosa (cita-se a água subterrânea em solos argilosos e a água do mar) atacam o concreto provocando reações expansivas e deletérias que podem conduzir à deterioração do elemento estrutural. A prevenção pode ser feita pelo uso de cimento resistente a sulfatos (ABNT, 2023).

Formação de etringita tardia (DEF)

A etringita tardia, ou DEF (*Delayed Ettringite Formation*), é um fenômeno de deterioração no concreto que ocorre quando a formação da etringita, um composto que normalmente se forma durante a hidratação do cimento Portland, é retardada e ocorre após a cura inicial do concreto. Sob condições normais, a etringita se forma durante as primeiras fases de hidratação e se incorpora de maneira estável na microestrutura do concreto. No entanto, quando o concreto é exposto a altas temperaturas (acima de 70°C) durante a cura, a formação inicial da etringita é suprimida, e os componentes que a formariam (sulfato de cálcio e aluminato de cálcio) permanecem no sistema. Posteriormente, quando o concreto curado a altas temperaturas entra em contato com umidade, esses componentes podem reagir e formar etringita de maneira tardia.

A formação tardia da etringita é problemática porque ela ocorre nos poros do concreto e resulta em expansão interna. Essa expansão pode gerar tensões internas significativas, levando ao surgimento de microfissuras e, eventualmente, à deterioração da integridade estrutural do concreto. As consequências incluem a perda de resistência mecânica, redução da durabilidade e aumento da permeabilidade do concreto, comprometendo sua capacidade de desempenho ao longo do tempo. A prevenção deste fenômeno envolve o controle da temperatura durante a cura e a limitação do teor de sulfatos no cimento, conforme discutido por Taylor, Famy e Scrivener (2001).

Reações deletérias dos agregados

Os agregados para concreto frequentemente interagem com a pasta de cimento podendo produzir reações expansivas que deterioram o material.

Dentre as reações prejudiciais dos agregados destaca-se a reação álcali-agregado. Esta ocorre quando o agregado utilizado não se mantém estável em ambientes alcalinos, formando produtos com grande volume e, assim, resultando em aumento da pressão interna do elemento de concreto (RAUPACH; BUTTNER, 2014). Esse aumento de pressão interna pode ocasionar fissuração do concreto.

Corrosão da armadura de aço do concreto – carbonatação e ação de cloretos

A corrosão da armadura é um fenômeno que acontece na solução existente nos poros internos do concreto. Este problema ocorre com frequência em concretos de baixa qualidade que apresentam elevada porosidade.

Por outro lado, o concreto de boa qualidade, que mantém elevada alcalinidade, proporciona um meio protetor ao aço reduzindo muito a velocidade de corrosão. Esta condição é denominada passividade, que pode ser perdida, principalmente, devido à ação de dois mecanismos: ataque por cloretos e a carbonatação (HELENE, 2003).

A presença de íons cloreto em contato com a superfície da armadura provoca a despassivação do aço e a corrosão em pontos localizados do elemento (pites). Com o passar do tempo e o contínuo ataque à armadura, estes pontos podem crescer e se encontrar, formando maiores comprimentos de corrosão (RAUPACH; BUTTNER, 2014).

A corrosão induzida pela carbonatação é do tipo predominante, uma vez que acontece com todo concreto em que a frente de carbonatação atingiu a profundidade da armadura.

A carbonatação ocorre como resultado da reação química entre o hidróxido de cálcio e outros álcalis presentes na solução dos poros do concreto com o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico. Os produtos dessa reação são um sal, o carbonato de cálcio (CaCO_3), e água, conforme equacionamento simplificado, a seguir: $\text{CO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Dessa forma, a carbonatação torna o concreto mais ácido, o que provoca a despassivação do aço e, conseqüentemente, a exposição das armaduras à corrosão.

Os produtos de corrosão da armadura ocupam um volume que é muito superior ao do metal original. A acumulação destes produtos na interface entre o aço e o concreto gera tensões de tração que provocam a fissuração e desprendimento do cobrimento de concreto. Além disso, ocorre a diminuição da seção útil do aço estrutural.

2.4.2 Reabilitação de estruturas

Diante de tantas formas de degradação, observa-se que a relevância dada em projeto, ou durante a execução, utilização e manutenção, para garantir maior durabilidade para a estrutura, nem sempre é suficiente. Dessa forma, são encontradas diversas estruturas de concreto com problemas patológicos sérios e, mesmo assim, a área de recuperação, reparo e reforço dessas estruturas ainda é pouco privilegiada no que diz respeito a normalização nacional. Muitas vezes, os projetos de recuperação são baseados em experiências pessoais, ao invés da adoção de critérios específicos normalizados.

A norma europeia EN 1504:2005 enumera 11 princípios de reparação e proteção de estruturas de concreto armado, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Princípios de reparação e proteção das estruturas segundo a EN 1504:2005

Princípios relacionados com defeitos no concreto	Princípio 1	Proteção contra a penetração de agentes agressivos
	Princípio 2	Controle da umidade
	Princípio 3	Reconstituição do concreto
	Princípio 4	Reforço estrutural
	Princípio 5	Resistência física
	Princípio 6	Resistência química
Princípios relacionados com a corrosão de armaduras	Princípio 7	Manutenção ou reparo da passivação
	Princípio 8	Aumento de resistividade
	Princípio 9	Controle catódico
	Princípio 10	Proteção catódica
	Princípio 11	Controle das zonas anódicas

Fonte: Adaptado de EN 1504-1:2005 (EN, 2005)

Existem dois tipos de manutenção: preventiva e corretiva. A primeira é caracterizada por medidas tomadas com antecedência e previsão, durante o período de uso e manutenção da estrutura, e pode ser associado a um custo de cinco a vinte e cinco vezes menor que aquele necessário à correção dos problemas gerados a partir da não intervenção preventiva tomada com antecedência à manifestação patológica explícita.

A manutenção corretiva corresponde aos trabalhos de diagnóstico, prognóstico, reparo e proteção das estruturas que já apresentam manifestações patológicas, ou seja, correção de problemas evidentes. A estas atividades pode-se associar um custo 125 vezes superior ao custo de medidas que poderiam ser tomadas em nível de projeto e que implicariam em um mesmo grau de proteção e durabilidade (HELENE, 1992).

Tratando-se, portanto, da manutenção corretiva, segundo Liborio *et al.* (1998), esta é dividida em três tipos: recuperação, quando são empregadas ações que visam restituir a construção para um grau de desempenho mínimo pré-estabelecido ou pós determinado; reforço, quando as ações são destinadas a garantir que a construção resista às solicitações às quais está submetida; e reparo, quando as ações executadas na construção são para atingir o desempenho mínimo aceitável em projeto.

A garantia de um bom desempenho após a reabilitação da estrutura depende da correta compatibilidade entre a estrutura e o material de reparo (MORENO; SELMO, 2002). Entretanto, um material compatível não necessariamente possui resistência mecânica semelhante à estrutura a ser reparada; em muitos casos, são utilizados materiais mais resistentes que aquele constituinte da estrutura, como graute, argamassas estruturais e até mesmo reforços com elementos metálicos.

Existe, de acordo com o manual de reparo do concreto publicado pelo *American Concrete Institute* (ACI, 1997), uma diversidade de métodos de reparo e/ou reforço de estruturas de concreto, cabendo ao profissional responsável a escolha adequada do método e dos materiais a serem utilizados.

O material a ser empregado deve ser capaz de se aderir ao substrato de forma efetiva e não se degradar com facilidade, pois será aplicado em regiões críticas das estruturas. Destaca-se, dessa forma, o concreto de alto desempenho, constituído de adições minerais e aditivos químicos que trazem melhorias aos materiais empregados em situações de recuperação, reforço e reparo de estruturas de concreto.

Além disso, o uso de aditivo superplastificante possibilita a produção de pastas, argamassas e concretos com relação água/aglomerante muito baixa, garantindo uma densa microestrutura para o concreto de alto desempenho (CAD) que, além de conferir-lhe alta resistência mecânica, reduz a sua permeabilidade e, conseqüentemente, aumenta sua durabilidade (AITCIN, 2000).

A utilização de adições minerais, como a sílica ativa, tem proporcionado avanços significativos nesse sentido. Conforme Melo (2000), avaliando o refinamento de poros em pastas de cimento Portland, com e sem a utilização de aditivo superplastificante e sílica ativa,

verifica-se a ocorrência de um grande refinamento de poros quando esses materiais são incorporados às misturas de concreto.

Portanto, em situações de recuperação de estruturas, onde é necessário fazer a ligação entre o concreto novo e o concreto antigo (região vulnerável a ataques de agentes agressivos), a necessidade de baixíssima porosidade e permeabilidade é evidente. Dessa forma, o concreto de alto desempenho vem ganhando espaço na substituição do uso de resinas epóxi para reparos, pois este consegue uma aderência de até 100%, se mostrando uma solução melhor para a maior parte dos casos, principalmente em ambientes de elevada agressividade (REIS, 1999).

Para produzir um concreto de alto desempenho com baixa porosidade e permeabilidade, pode-se considerar a incorporação da sílica coloidal na composição do concreto. De acordo com Du *et al.* (2015), em consonância com o que fora previamente apresentado sobre este tipo de concreto especial, mesmo em pequenas quantidades da adição (0,3% a 0,9%, em massa), o efeito pozolânico da sílica coloidal no concreto, juntamente com o efeito nano-fíler, densifica a microestrutura da pasta de cimento, principalmente na zona de transição.

Este comportamento garante redução da penetração de íons cloreto e da absorção de água por capilaridade. Conforme Said *et al.* (2012), a profundidade média de penetração dos íons cloreto no concreto com 3% de adição de NS foi reduzida em 70% em comparação como concreto de referência. Kong *et al.* (2019) encontraram resultados similares, notando uma redução de quase 50% na profundidade de penetração para a mistura com 2% de adição de sílica coloidal. Jalal *et al.* (2015) observaram que a incorporação de 2% de NS reduziu a absorção de água por capilaridade em 58% em comparação com a mistura sem a adição.

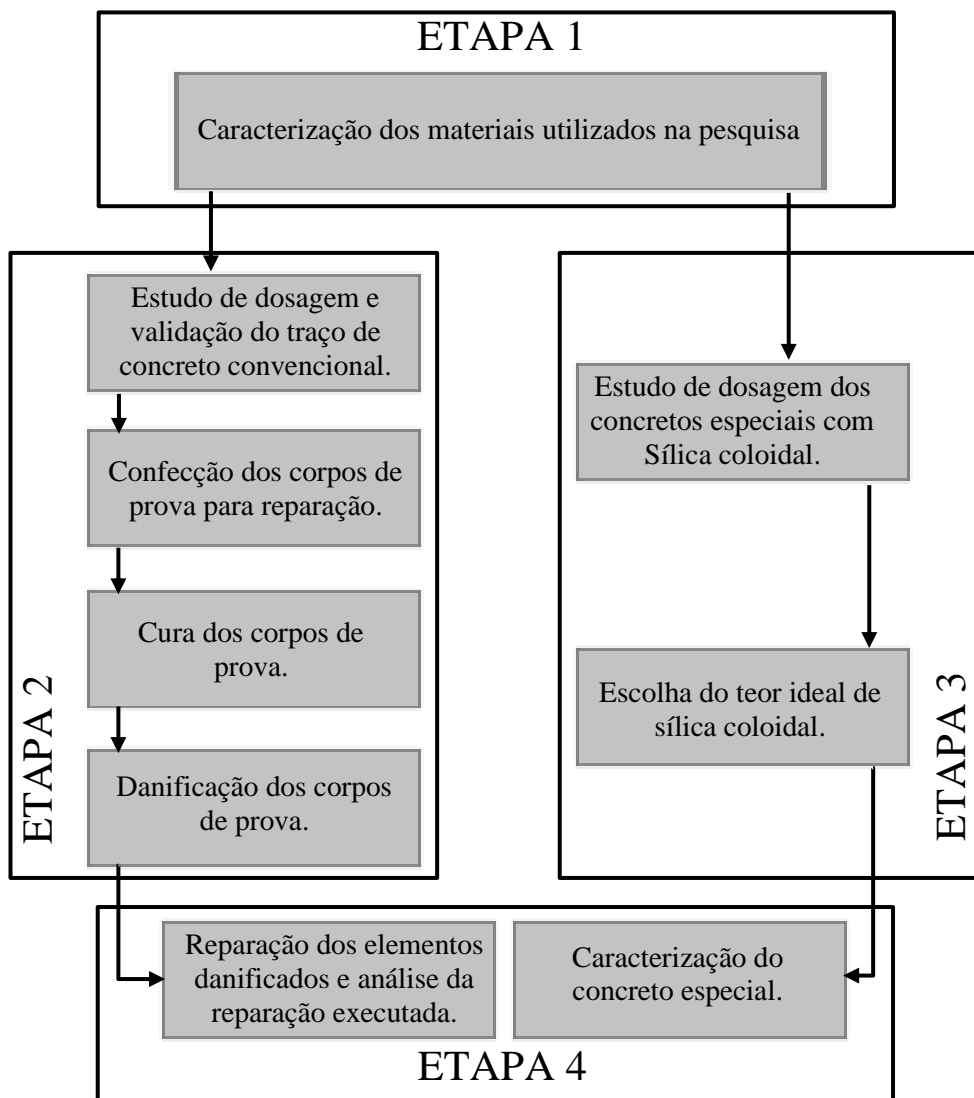
Trata-se, portanto, de um material com porosidade e permeabilidade muito baixas, sendo, dessa forma, um ótimo candidato para atuar como material de reparo ou reabilitação de estruturas de concreto. Faz-se necessário avaliar, por fim, sua aderência à estrutura danificada.

Para desenvolvimento desta análise, Clímaco (1991) cita que os ensaios utilizados devem simular um estado de tensões que represente, o melhor possível, as condições de serviço. Podem ser citados os seguintes ensaios: resistência de aderência à tração direta; resistência de aderência à tração na flexão; resistência de aderência ao cisalhamento direto; resistência de aderência ao cisalhamento na flexão (FAGURY, 2002).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em quatro etapas. A primeira foi uma etapa preliminar, a segunda e a terceira aconteceram de forma paralela e simultânea se encontrando na etapa final da pesquisa, conforme fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma das atividades do programa experimental



Fonte: Autor (2024).

Resumidamente, após a caracterização dos materiais, foram confeccionados corpos de prova de concreto convencional e estes foram danificados. Enquanto isso, desenvolviam-se os concretos especiais com sílica coloidal. Por fim, os corpos de prova danificados foram reparados utilizando os concretos especiais a fim de verificar a eficiência dos concretos especiais como material de reparo.

3.1 Etapa 1 - Materiais constituintes

Considerando o concreto convencional e os concretos especiais produzidos nesta pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais para sua produção: cimento Portland, agregados miúdo e graúdo, água, sílica ativa, pó de quartzo, fíler calcário, aditivo superplastificante e sílica coloidal.

a) Cimento Portland

Utilizou-se, nas misturas de concreto convencional, cimento Portland composto com escória de classe de resistência 32 MPa (CP II-E-32). Nos traços de concreto de alta resistência foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI).

O emprego do CP II-E-32 no concreto convencional se justifica por ser um cimento amplamente utilizado em estruturas de concreto nacionais. O CPV ARI, apesar de não possuir adições como escória e materiais pozzolânicos, garante maior resistência inicial para os concretos especiais desenvolvidos na pesquisa.

A massa específica dos cimentos foi determinada de acordo com a NBR 16605:2017 (ABNT, 2017). A verificação do tamanho dos grãos do cimento foi realizada por meio do ensaio de granulometria a laser seguindo as orientações da norma ISO 13320:2020 (ISO, 2020). Além disso, fez-se a análise química dos cimentos por fluorescência de raios X conforme a NBR ISO 12677:2014 (ABNT, 2014).

b) Agregado miúdo

Nas misturas de concreto convencional e nos traços de concreto especial com resistência característica à compressão de 80 MPa foram utilizadas duas areias naturais, originárias da região de São Carlos-SP, popularmente classificadas como areia média e areia fina. Para o traço de concreto especial com resistência característica à compressão de 100 MPa, utilizou-se a areia industrial denominada comercialmente como AG 80-100.

Cada material foi caracterizado separadamente determinando-se as propriedades de massa específica de acordo com a NBR NM 52:2002 (ABNT, 2009), absorção de água segundo a NBR NM 30:2000 (ABNT, 2000) e a composição granulométrica seguindo a NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003). Ressalta-se que essas são as versões das normas vigentes à época da execução dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos.

c) Agregado graúdo

Para o concreto convencional, utilizou-se pedra britada de origem basáltica, comercialmente classificada como brita 1 (DCM de 19 mm). Para o concreto especial C80 empregou-se brita 0 (DCM de 9,5 mm) de mesma origem. A composição granulométrica foi definida a partir da NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003); a massa específica e a absorção de água, com a NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009). Como já ressaltado para o agregado miúdo, essas são as versões das normas vigentes à época da execução dos ensaios de caracterização do agregado graúdo.

d) Água de amassamento

Utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento local, dispensando o controle de aceitação, vide NBR 15900-1:2009 (ABNT, 2009).

e) Sílica ativa

A sílica ativa (produzida pela empresa *Elkem*) foi empregada nos traços de concreto de alta resistência. Para esta adição foi determinada a massa específica de acordo com a NBR 16605:2017 (ABNT, 2017), a distribuição granulométrica a laser conforme norma ISO 13320:2020 (ISO, 2020) e a área superficial específica pelo método de Blaine, conforme NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), além da análise química por fluorescência de raios X (FRX).

f) Pó de Quartzo

O pó de quartzo foi adicionado na mistura de concreto especial C100. Empregou-se um material da empresa *Jundu* denominado SM200. Foram realizados os mesmos ensaios de caracterização da sílica ativa.

g) Fíler calcário

O fíler calcário (disponibilizado pela empresa *Brasil Minas*) foi utilizado apenas nos concretos de resistência característica à compressão de 80 MPa. Determinou-se, para caracterização desta adição, a massa específica e fez-se a análise química (FRX).

h) Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante ADVA 458 UHPC (fabricado pela *GCP Applied Technologies*) foi adicionado durante a produção das misturas para garantir o atendimento à consistência desejada para os concretos. Para este aditivo foi feita a análise química por fluorescência de raios X (FRX).

i) Sílica coloidal

Optou-se pela utilização de um único tipo de sílica coloidal a *Levasil* CB8 da empresa *Nouryon*. Trata-se de uma dispersão aquosa de nanosílica com uma concentração de aproximadamente 50% de sólidos. Para esta adição também foi realizada a análise química por fluorescência de raios X (FRX).

Ressalta-se que, como se trata de uma dispersão aquosa (50% de água), a água constituinte da sílica coloidal foi descontada da água de amassamento da mistura visando a manutenção da relação água/cimento estabelecida para cada traço.

3.2 Etapa 2 – Confecção dos corpos de prova de concreto convencional para reparação

A segunda etapa compreende quatro fases, que incluem desde o estudo de dosagem do traço de concreto convencional até a confecção e subsequente danificação dos corpos de prova.

a) Estudo de dosagem e validação do traço de concreto convencional

Os corpos de prova de concreto convencional deveriam ser similares ao que usualmente se utiliza nas estruturas comuns existentes na construção civil no Brasil. Dessa forma, optou-se pelo desenvolvimento de um concreto com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 35 MPa. Para dosagem desta mistura adotou-se o método tradicional IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), considerando a sua elevada eficiência e aplicabilidade.

Conforme considerações feitas por Lopes (2019) em sua pesquisa desenvolvida com equipamentos e materiais semelhantes aos do presente estudo, foram fixados os valores de teor ideal de argamassa (α) e teor de água/materiais secos (H) em 53% e 8,5%, respectivamente. Com estes parâmetros definidos e fixando o abatimento em (120 ± 20) mm, foram desenvolvidos os traços pobre, médio e rico e, conseqüentemente, elaborado o diagrama de dosagem. Como a quantidade de água do traço foi mantida constante, o abatimento desejado foi obtido por meio do ajuste do teor de aditivo plastificante.

A partir do diagrama de dosagem, considerando os mesmos materiais constituintes – cimento Portland, areia fina e média, britas 1 e 0, aditivo plastificante e água – definiu-se o traço a ser utilizado na produção do concreto convencional (f_{ck} de 35 MPa).

O traço foi validado por meio de ensaios tanto no estado fresco como no estado endurecido. No estado fresco foram medidos o abatimento de tronco de cone (ABNT NBR 16889:2020), a massa específica e o teor de ar pelo método gravimétrico (ABNT NBR 9833:2008). No estado endurecido foi determinada a resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2018), nas idades de 7 e 28 dias.

b) Confeção dos corpos de prova para reparação

Com o traço de concreto convencional validado, foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos, possibilitando a análise do comportamento dos elementos tanto na sollicitação de compressão (cilindro) como na tração (prismas).

Para atender a demanda de ensaios da pesquisa, que incluía tanto os experimentos nos corpos de prova que seriam reparados quanto nos CPs intactos (referência), foram produzidos 27 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) e 6 prismáticos (150 mm x 150 mm x 500 mm).

c) Cura dos corpos de prova

A cura úmida foi a única metodologia empregada na presente pesquisa. Assim, os corpos de prova de concreto convencional foram mantidos em cura úmida nos primeiros 28 dias após a concretagem, com exceção dos que foram ensaiados aos 7 dias de idade.

Após o período de cura, os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório para que estivessem secos na idade da danificação e, subsequente, reparação. Os elementos reparados voltaram para a cura úmida por mais 28 dias, para, enfim, serem feitos os devidos ensaios que analisaram os reparos realizados.

d) Danificação dos corpos de prova

Os corpos de prova prismáticos foram danificados por meio do ensaio de resistência à tração na flexão (flexão em quatro pontos, conforme ABNT NBR 12142:2010). Este ensaio, usualmente, rompe o corpo de prova próximo a sua região central gerando uma superfície irregular, propícia à aderência do material de reparo.

Os corpos de prova cilíndricos foram serrados ao meio, formando, assim, dois cilindros menores com, aproximadamente, 100 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Porém, a serragem do concreto gera uma superfície lisa. Então, a face cortada foi desgastada no intuito de gerar certa aspereza para melhor aderência do material de reparo.

O desgaste foi feito aplicando leves impactos na superfície do concreto utilizando martelo e talhadeira (escarificação manual). Assim, o agregado graúdo ficou exposto, situação que aumenta a rugosidade da superfície do concreto e, conseqüentemente, melhora o desempenho da interface entre o corpo de prova de concreto convencional e o material ligante (PRADO, 2020).

As superfícies, após a danificação, foram limpas utilizando jato de ar comprimido e escova, visando eliminar ao máximo pequenos pedaços de concreto ou poeira. Nenhum tipo de material de tratamento da superfície foi utilizado previamente à aplicação do concreto de reparo.

3.3 Etapa 3 – Desenvolvimento dos concretos especiais com sílica coloidal

A terceira etapa consiste em duas fases dedicadas ao desenvolvimento do traço dos concretos especiais e à determinação do teor ideal de sílica coloidal.

a) Estudo de dosagem dos concretos especiais com sílica coloidal

Os concretos especiais com adição de sílica coloidal foram dosados com base no conceito de empacotamento de partículas, utilizando o modelo de Alfred. Para isso, utilizou-se a otimização computacional desenvolvida por Lopes (2019).

O autor introduziu no programa Excel as curvas de distribuição granulométrica discreta dos materiais disponíveis no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos e, em seguida, implementou o modelo matemático de Alfred. Desta maneira, encontrou uma curva de distribuição teórica, que foi comparada e corrigida de acordo com os resultados experimentais.

Considerando a similaridade entre os materiais utilizados por Lopes (2019) e os que foram empregados na presente pesquisa, extraiu-se, da citada otimização computacional, dois traços de alta resistência, buscando atingir resistências características à compressão de 80 MPa e 100 MPa. O traço com menor resistência considerou como materiais constituintes o cimento, a sílica ativa, o fíler calcário, as areias naturais fina e média, brita 0 e água; o traço de maior resistência considerou o uso de cimento, sílica ativa, pó de quartzo, areia natural fina e água (não foram utilizados agregados graúdos no traço com maior resistência).

b) Escolha do teor ideal de sílica coloidal

Com os traços de referência de alta resistência definidos, foram desenvolvidas, para cada resistência (80 MPa e 100 MPa), misturas com adição de sílica coloidal nos teores de 1%, 2,5%, 5% e 10% em relação à massa de cimento.

A escolha do teor ideal de sílica coloidal levou em conta dois parâmetros principais: a consistência da mistura no estado fresco (medida pelo espalhamento conforme ABNT NBR 15823-2:2017) e a resistência à compressão axial determinada nas idades de 7 e 28 dias.

3.4 Etapa 4 – Reparação dos elementos danificados e caracterização do concreto especial

A etapa final também se divide em duas fases: a caracterização do concreto especial e a reparação dos elementos danificados

a) Caracterização do concreto especial

Neste estágio, após definir os traços dos concretos de alta resistência e determinar o teor ideal de sílica coloidal a ser incorporado às misturas, realizou-se a concretagem na qual foram moldados os corpos de prova (CP) necessários para os ensaios de caracterização do concreto especial com sílica coloidal, bem como para o reparo dos corpos de prova de concreto convencional previamente danificados.

Considerando o volume de concreto necessário a ser produzido e as limitações laboratoriais devido à sobrecarga de demanda das atividades no laboratório quando de sua reabertura logo após a pandemia da COVID-19, decidiu-se, a partir deste ponto, prosseguir o estudo exclusivamente com o concreto C80, o qual foi devidamente caracterizado e utilizado como material de reparo. A exclusão do concreto C100 na etapa 4 se justifica pela dificuldade de mistura na betoneira convencional de eixo inclinado disponível no laboratório. Produzir este concreto com a trabalhabilidade desejada, utilizando esse equipamento de mistura, seria necessário utilizar um elevado teor de aditivo superplastificante, interferindo nos resultados da pesquisa, especialmente no tempo de pega e resistência mecânica nas primeiras idades. Vale ressaltar que durante o estudo de dosagem e escolha do teor ideal de sílica coloidal, as misturas de concreto especial foram feitas utilizando uma argamassadeira de eixo planetário (Figura 8), que permitiu obter uma mistura eficiente e homogênea deste material com menor demanda de aditivo superplastificante para dispersão adequada das partículas, sem interferência no comportamento do concreto nas primeiras idades.

Figura 8 – Argamassadeira de eixo planetário



Fonte: Autor (2024).

Para caracterização do concreto C80 foram realizados os ensaios listados na Tabela 6, sendo que os resultados sempre foram comparados com uma mistura de referência C80 sem sílica coloidal.

Tabela 6 – Ensaios para caracterização dos concretos especiais

Ensaio	Norma de referência
Determinação do tempo de pega na pasta de cimento	ABNT NBR 16607:2018
Espalhamento	ABNT NBR 15823-2:2017
Massa específica no estado fresco	ABNT NBR 9833:2008
Resistência à compressão	ABNT NBR 5739:2018
Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios	ABNT NBR 9778:2005
Resistência à tração na flexão (Prismas 40 x 40 x 160 mm)	ABNT NBR 13279:2005
Módulo de elasticidade estático à compressão	ABNT NBR 8522-1:2021
Módulo de elasticidade dinâmico	ABNT NBR 8522-2:2021
Velocidade de propagação de onda ultrassônica	ABNT NBR 8802:2019

Fonte: Autor (2024)

b) Reparação dos elementos danificados e análise da reparação executada

Finalmente, após 150 dias da produção dos corpos de prova de concreto convencional, os elementos danificados foram reparados com o concreto especial de sílica coloidal.

O material de reparo funcionou como ligação entre as duas partes de concreto dos corpos de prova (cilindros e prismas) que foram divididos ao meio. Tentou-se manter uma camada de material de ligação com espessura entre 1 e 2 cm.

A avaliação da reparação considerou os cinco ensaios listados na Tabela 7. Observa-se que os experimentos iniciaram nas primeiras idades dos corpos de prova de concreto convencional e se estenderam até 178 dias após sua produção, ou seja, 28 dias após a reparação.

Tabela 7 – Ensaios para avaliação da reparação

Ensaio	Norma de referência	Idades
Resistência à compressão	NBR 5739:2018	7, 28, 150, 157 e 178 dias
Resistência à tração na flexão (Prismas 150 x 150 x 500 mm)	NBR 12142:2010	28, 150 e 178 dias
Módulo de elasticidade estático à compressão	NBR 8522-1:2021	28 e 178 dias
Módulo de elasticidade dinâmico	NBR 8522-2:2021	7, 28, 150, 157 e 178 dias
Velocidade de propagação de onda ultrassônica	NBR 8802:2019	7, 28, 150, 152, 157 e 178 dias

Fonte: Autor (2024)

A Tabela 8 apresenta apenas os ensaios destrutivos, indicando a quantidade de corpos de prova de concreto convencional produzidos para realização da pesquisa.

Tabela 8 – Ensaios destrutivos dos corpos de prova de concreto convencional (referência e reparados)

Corpos de Prova Cilíndricos (10,00 x 20,00 cm)							
Ensaio	Resistência à compressão axial (7 dias)	Resistência à compressão axial (28 dias)	Módulo de elasticidade estático (28 dias)	Resistência à compressão axial dos CPs de referência na data da reparação (150 dias)	Resistência à compressão axial após 7 dias da reparação (157 dias)	Resistência à compressão após 28 dias da reparação (178 dias)	Módulo de elasticidade após 28 dias da reparação (178 dias)
Nº de CPs	3	3	3	3	3 reparados	3 reparados + 3 de referência (6)	3 reparados + 3 de referência (6)
Total	27						

Corpos de Prova Prismáticos (15,00 x 15,00 x 50,00 cm)			
Ensaio	Resistência à tração na flexão 28 dias	Resistência à tração na flexão na data da reparação (150 dias)	Resistência à tração na flexão 28 dias após a reparação (178 dias)
Nº de CPs	3	3	Reutilizam-se os mesmos 3 CPs
Total	6		

Fonte: Autor (2024).

3.5 Considerações quanto aos métodos de produção e ensaio

As misturas de concreto foram produzidas nos dois laboratórios do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP): Laboratório de Estruturas e Laboratório de Materiais e Construção Civil.

O concreto convencional foi confeccionado utilizando betoneira de eixo inclinado. Os concretos especiais foram misturados por argamassadeira ou por betoneira, a depender do volume de material necessário em cada fase da pesquisa.

O procedimento de mistura, tanto na betoneira quanto na argamassadeira, utilizou sempre materiais secos e obedeceu a seguinte sequência: inicialmente, cerca de 70% da água foi misturada com os agregados por 1 minuto; em seguida, o cimento e as adições foram incorporados, junto com o restante da água, e a mistura foi homogeneizada por aproximadamente 5 minutos; por fim, para os concretos de alta resistência, o aditivo superplastificante foi adicionado gradualmente à mistura, levando de 5 a 7 minutos para estar completamente homogeneizada.

Vale ressaltar que a água presente na solução de nanosílica (ou seja, sílica coloidal) foi levada em conta durante a execução das misturas, resultando na diminuição da quantidade de água a ser adicionada, mantendo, assim, a relação água/aglomerante.

Os ensaios realizados nas amostras, tanto no estado fresco como no estado endurecido, citados nos itens anteriores deste capítulo, seguiram as recomendações normativas vigentes.

Para realização do ensaio de resistência à compressão utilizou-se uma máquina de ensaio hidráulica, da marca *ELE*, modelo AUTOTEST 2000, com capacidade de 2000 kN.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto foi realizada por meio de ensaio acústico dos corpos de prova. Utilizou-se o sistema *Sonelastic* fornecido pelo fabricante ATCP ENGENHARIA FÍSICA e um martelo de impacto excitador com cabeça metálica.

A velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU) foi medida com o equipamento *Pundit Lab* da *Proceq*. Foram utilizados transdutores com frequência nominal de 54 kHz (posicionados sempre em faces opostas do corpo de prova) e gel de ultrassonografia à base de água, garantindo o contato contínuo entre as superfícies. Para cada ensaio de ultrassom emitem-se 10 pulsos ultrassônicos registrando o tempo de chegada de cada onda com o auxílio do programa *Pundit Link*. O resultado do ensaio se dá pela média aritmética das velocidades medidas.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico e a velocidade do pulso ultrassônico são ensaios não destrutivos (ENDs) que auxiliaram a análise dos resultados sem danificar a integridade da amostra. Vale ressaltar que os ENDs possibilitam o estudo do comportamento do material sem elevar o número de corpos de prova a ser confeccionado e, conseqüentemente, reduzem os custos da pesquisa.

3.6 Análise dos resultados

Para verificação da homogeneidade dos dados e estabelecer o descarte de valores espúrios foi aplicado o teste de Grubbs (equação 2). Este teste baseia-se na razão entre a distância de certo resultado suspeito para a média e o desvio padrão da amostra. O valor será considerado “*outlier*” quando esta razão (G) for maior que o valor crítico tabelado ($G_{\text{crítico}}$) para o nível de significância de 95% (GRUBBS, 1969).

$$G = \frac{|\text{Valor suspeito} - \text{Média}|}{\text{Desvio Padrão}} \quad (2)$$

$$G_{\text{crítico 95\% para } n=3} = 1,15$$

Com os dados homogeneizados, a comparação estatística entre os resultados foi feita considerando o teste t de *Student* com nível de confiança de 95%. Assim, foi possível afirmar, estatisticamente, se as diferenças entre resultados encontradas são significativas ou não.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos na presente pesquisa. Após apresentação das propriedades dos materiais constituintes das misturas de concreto, são discutidos os resultados seguindo a mesma sequência descrita no programa experimental.

No Apêndice I são apresentados os resultados dos testes estatísticos para exclusão de *outliers* dos resultados da pesquisa (Teste de *Grubbs*) e as comparações estatísticas entre resultados (Teste *t* de *Student*).

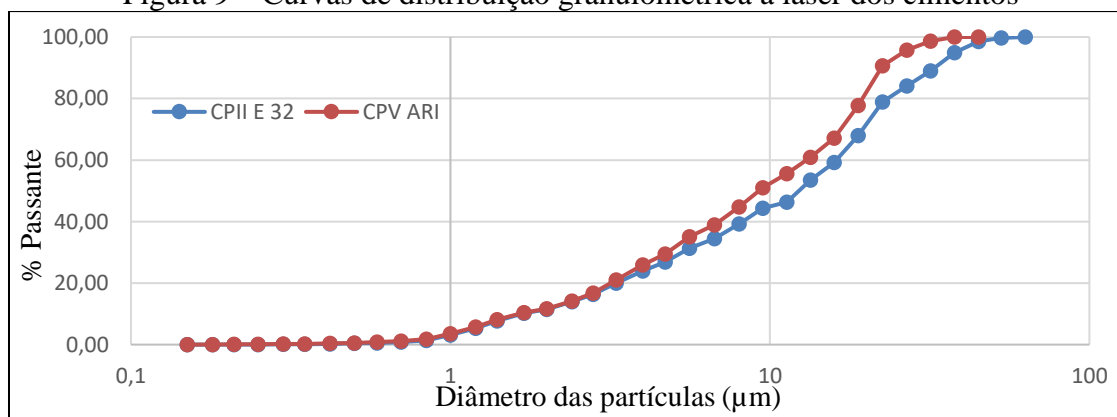
4.1 Etapa 1 - Caracterização dos materiais

A seguir são apresentadas as propriedades dos materiais utilizados na presente pesquisa.

a) Cimento Portland

Os cimentos utilizados, CP II-E-32 e CPV ARI, obtiveram, respectivamente, 2,95 g/cm³ e 3,16 g/cm³ como resultados de massa específica. Os resultados do ensaio de granulometria a laser (Figura 9) e da análise química (FRX – Tabela 9) são dispostos a seguir.

Figura 9 – Curvas de distribuição granulométrica a laser dos cimentos



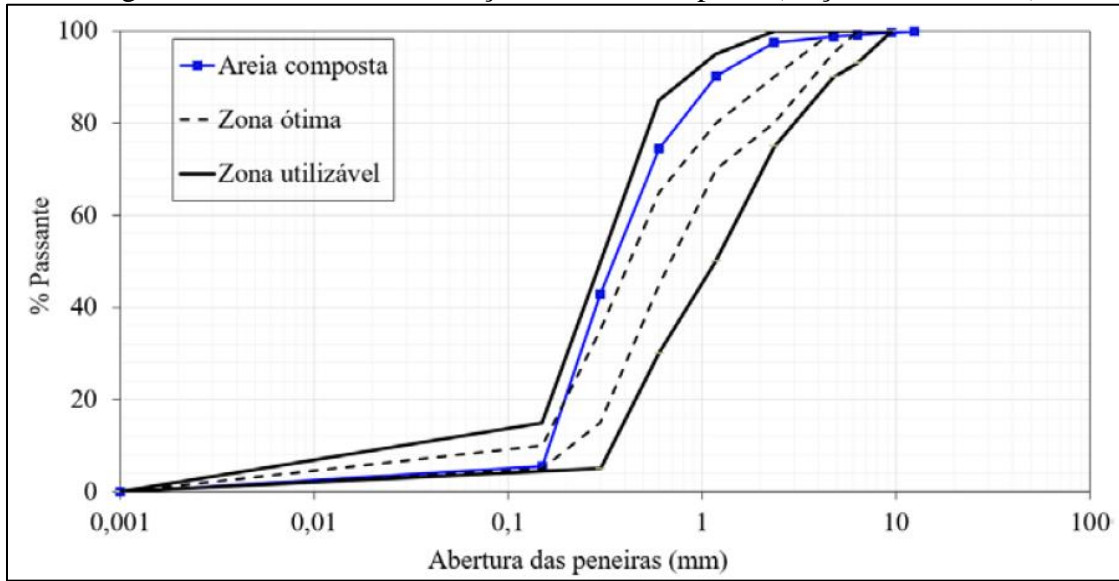
Fonte: Autor (2024).

Tabela 9 – Composição química dos cimentos utilizados

Componentes	Teores obtidos (%)	
	CP II-E-32	CPV ARI
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	5,51	3,29
Dióxido de silício (SiO ₂)	21,83	16,44
Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,09	4,33
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,26	0,39
Óxido de cálcio (CaO)	64,80	68,96
Dióxido de titânio (TiO ₂)	0,52	0,29
Óxido de manganês (MnO)	0,46	0,14
Óxido de ferro III (Fe ₂ O ₃)	3,06	4,21
Óxido de estrôncio (SrO)	0,34	0,37
Óxido de índio III (In ₂ O ₃)	1,13	1,26
Cloro (Cl)	-	0,33

Fonte: Autor (2024).

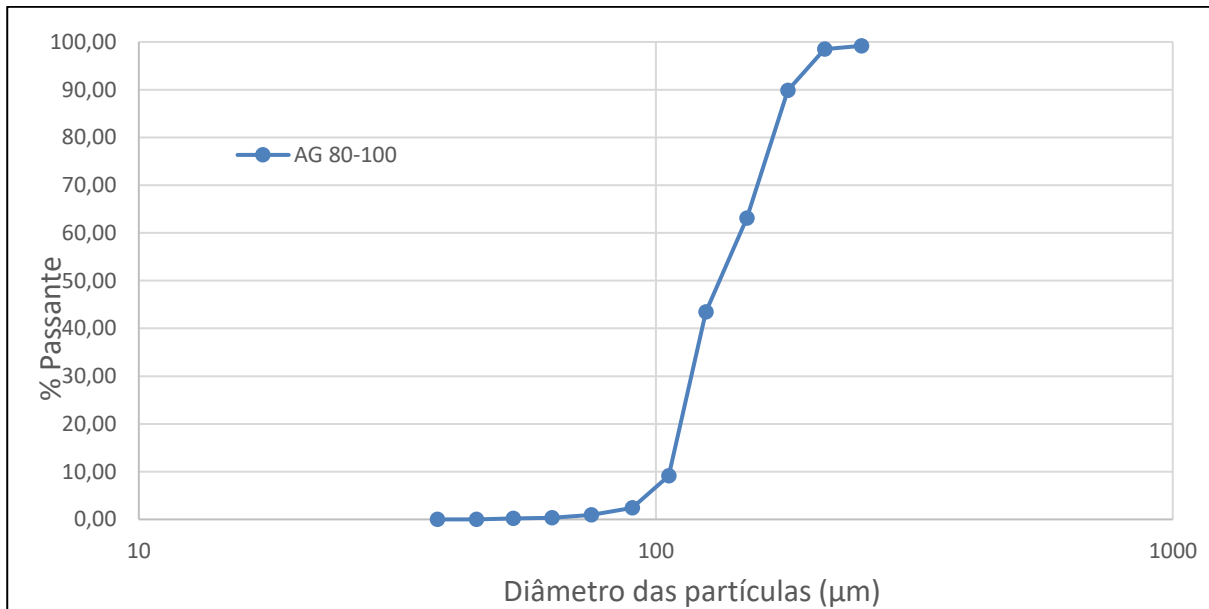
Figura 11 – Curva de distribuição da areia composta (fração média e fina)



Fonte: LOPES (2019).

Para a areia industrial AG 80-100, comercializada pela Mineração *Jundu*, determinou-se a massa específica, obtendo-se o valor de 2,64 g/cm³. A Tabela 10 apresenta a análise química obtida por FRX, enquanto a Figura 12 ilustra a granulometria deste agregado.

Figura 12 – Curva de distribuição granulométrica da areia industrial AG 80-100.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 10 – Composição química da areia industrial AG 80-100

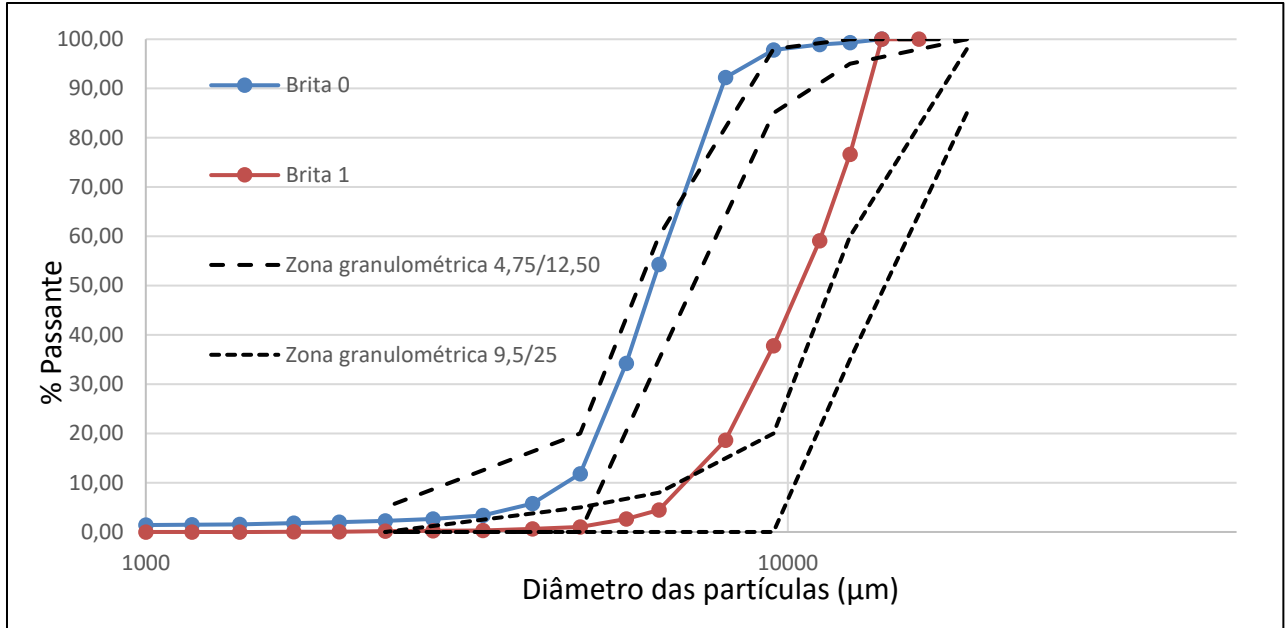
Componentes	Teores obtidos (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	99,741
Óxido de cálcio (CaO)	0,112
Óxido de ferro III (Fe ₂ O ₃)	0,147

Fonte: Autor (2024).

c) Agregado graúdo

A massa específica das Britas 0 e 1 foi determinada em 2,99 g/cm³ e 2,82 g/cm³, respectivamente. Em relação à absorção de água, os valores foram de 0,53% para a Brita 0 e 0,33% para a Brita 1. A distribuição granulométrica dos agregados está disposta na Figura 13.

Figura 13 – Curvas de distribuição granulométrica dos agregados graúdos



Fonte: Autor (2024).

Observou-se que a Brita 1 utilizada possui dimensões ligeiramente menores que zona granulométrica 9,5/25 proposta pela NBR 7211:2022 (ABNT, 2022), enquanto a Brita 0 se encaixa nos tamanhos da faixa 4,75/12,50.

d) Sílica ativa

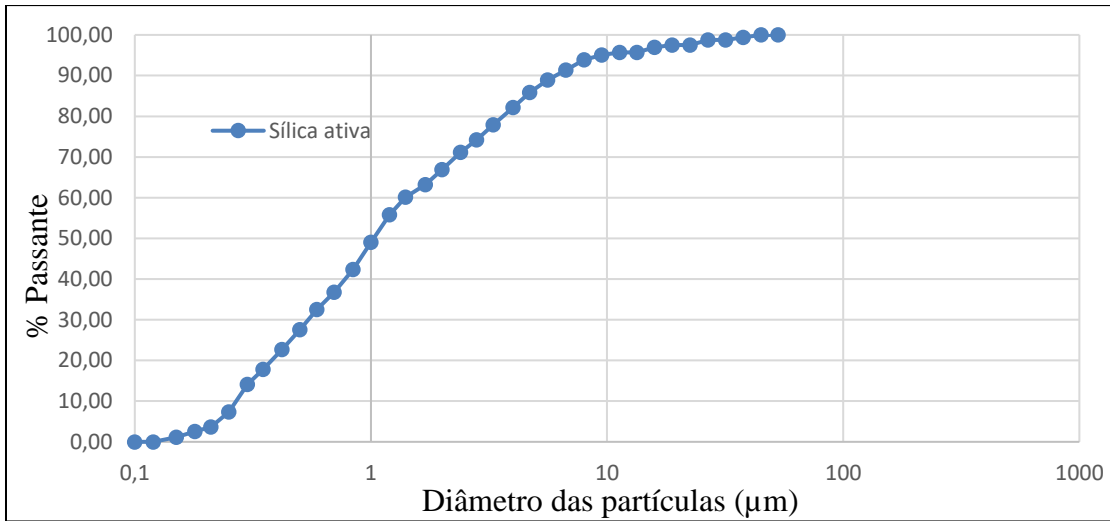
Os resultados da caracterização da sílica ativa utilizada na pesquisa são apresentados na Tabela 11 e na Figura 14.

Tabela 11 – Caracterização da sílica ativa

Sílica Ativa (Elken)	
Massa específica	2,20 g/cm ³
Área superficial - Blaine	17900 cm ² /g
FRX	
Componentes	Teores obtidos (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	98,629
Trióxido de enxofre (SO ₃)	0,326
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,576
Óxido de cálcio (CaO)	0,254
Cloro (Cl)	0,215

Fonte: Autor (2024).

Figura 14 – Curvas de distribuição granulométrica a laser da sílica ativa



Fonte: Autor (2024).

e) Pó de Quartzo

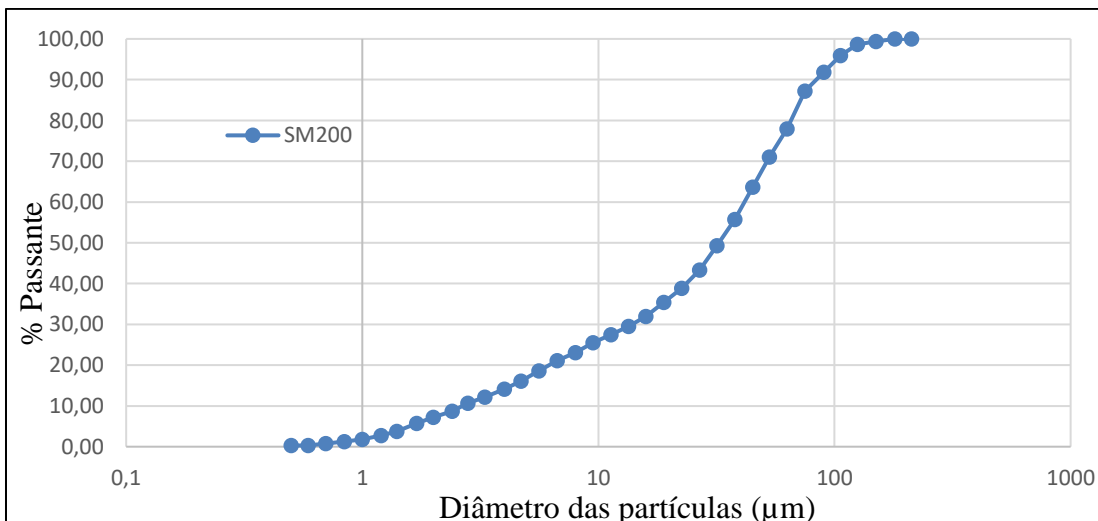
O pó de quartzo (SM200) comercializado pela empresa *Jundu*, obteve os seguintes resultados em sua caracterização (Tabela 12 e Figura 15):

Tabela 12 – Caracterização do Pó de Quartzo

Pó de Quartzo SM200 (<i>Jundu</i>)	
Massa específica	2,70 g/cm ³
Área superficial - Blaine	2340 cm ² /g
FRX	
Componentes	Teores obtidos (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	99,801
Trióxido de enxofre (SO ₃)	0,109
Óxido de cálcio (CaO)	0,09

Fonte: Autor (2024).

Figura 15 – Curvas de distribuição granulométrica do Pó de Quartzo



Fonte: Autor (2024).

Nota-se que a área superficial da sílica ativa e a sua distribuição granulométrica indicam que suas partículas são menores que as partículas de pó de quartzo. Tanto a sílica ativa como a SM200 apresentaram composição química quase pura, uma vez que suas partículas possuem altos teores de dióxido de silício (SiO₂) quando comparado à presença de outros elementos.

f) Fíler calcário

A massa específica do fíler calcário (fornecido pela Brasil Minas) foi determinada, obtendo-se o valor de 2,60 g/cm³. Os resultados da análise química por fluorescência de raio X são expostos a seguir na Tabela 13.

Tabela 13 – Composição química do Fíler Calcário (*Brasil Minas*)

Componentes	Teores obtidos (%)
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,427
Dióxido de silício (SiO ₂)	2,597
Óxido de cálcio (CaO)	95,665
Óxido de ferro III (Fe ₂ O ₃)	0,385
Óxido de estrôncio (SrO)	0,599
Cloro (Cl)	0,327

Fonte: Autor (2024).

g) Aditivo superplastificante

A Tabela 14 compila as propriedades citadas no catálogo do aditivo ADVA 458 UHPC (fornecido pela empresa *GCP Applied Technologies*).

Tabela 14 – Características do aditivo superplastificante ADVA 458 UHPC

ADVA 458 UHPC	
Aspecto	Líquido alaranjado
Descrição	Superplastificante à base de policarboxilato
Massa Específica (g/cm ³)	1,075 – 1,115

Fonte: Grace (GCP Applied Technologies).

h) Sílica coloidal

A Tabela 15 reúne as propriedades listadas no catálogo da sílica coloidal *Levasil CB8* (fornecida pela *Nouryon*) e a análise química extraída do ensaio de fluorescência de raios X.

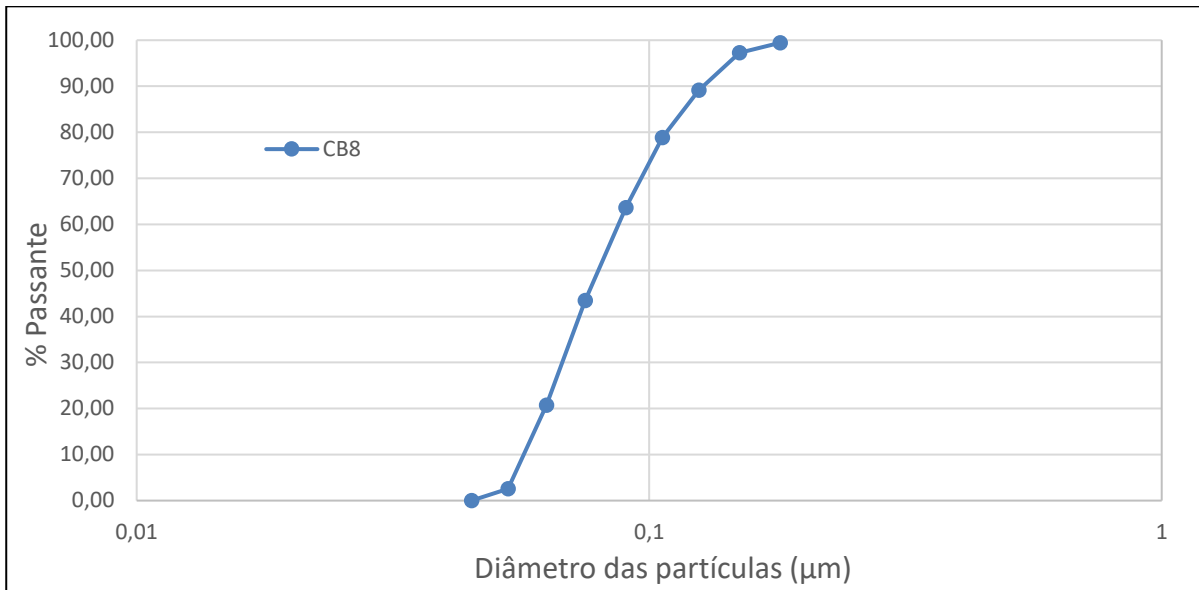
Tabela 15 – Características da Sílica coloidal

<i>Levasil CB8 (Nouryon)</i>	
Aparência	Líquido branco
Teor de sólidos (%)	50
Massa específica (g/cm ³)	1,4
Viscosidade (v)	8
pH	9,5
FRX	
Componentes	Teores obtidos (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	99,570
Cloro (Cl)	0,222
Óxido de cálcio (CaO)	0,208

Fonte: *Nouryon* e Autor (2024).

A Figura 16 apresenta a curva granulométrica da sílica coloidal – Levasil CB8.

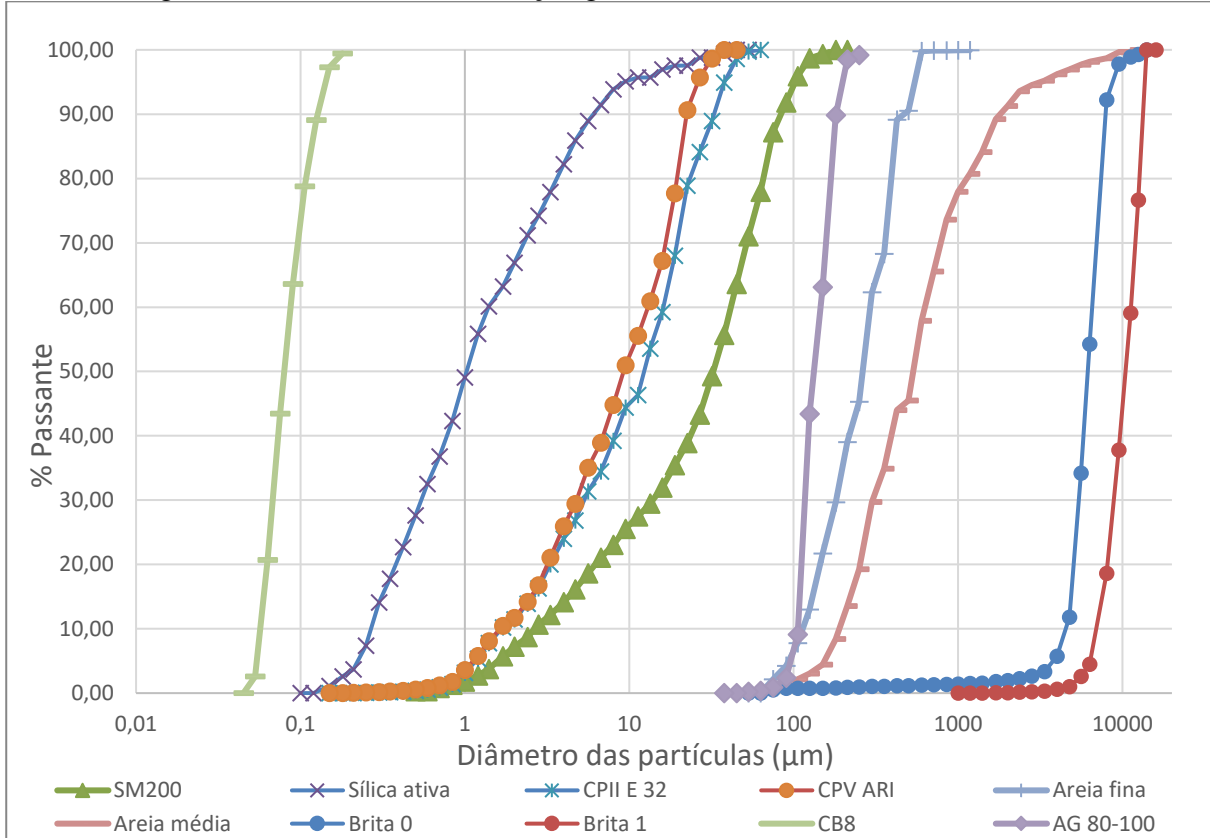
Figura 16 – Curva de distribuição granulométrica da sílica coloidal



Fonte: Autor (2024).

Por fim, para análise geral dos materiais, a Figura 17 reúne as curvas granulométricas apresentadas anteriormente em um único gráfico.

Figura 17 – Curvas de distribuição granulométrica dos materiais utilizados



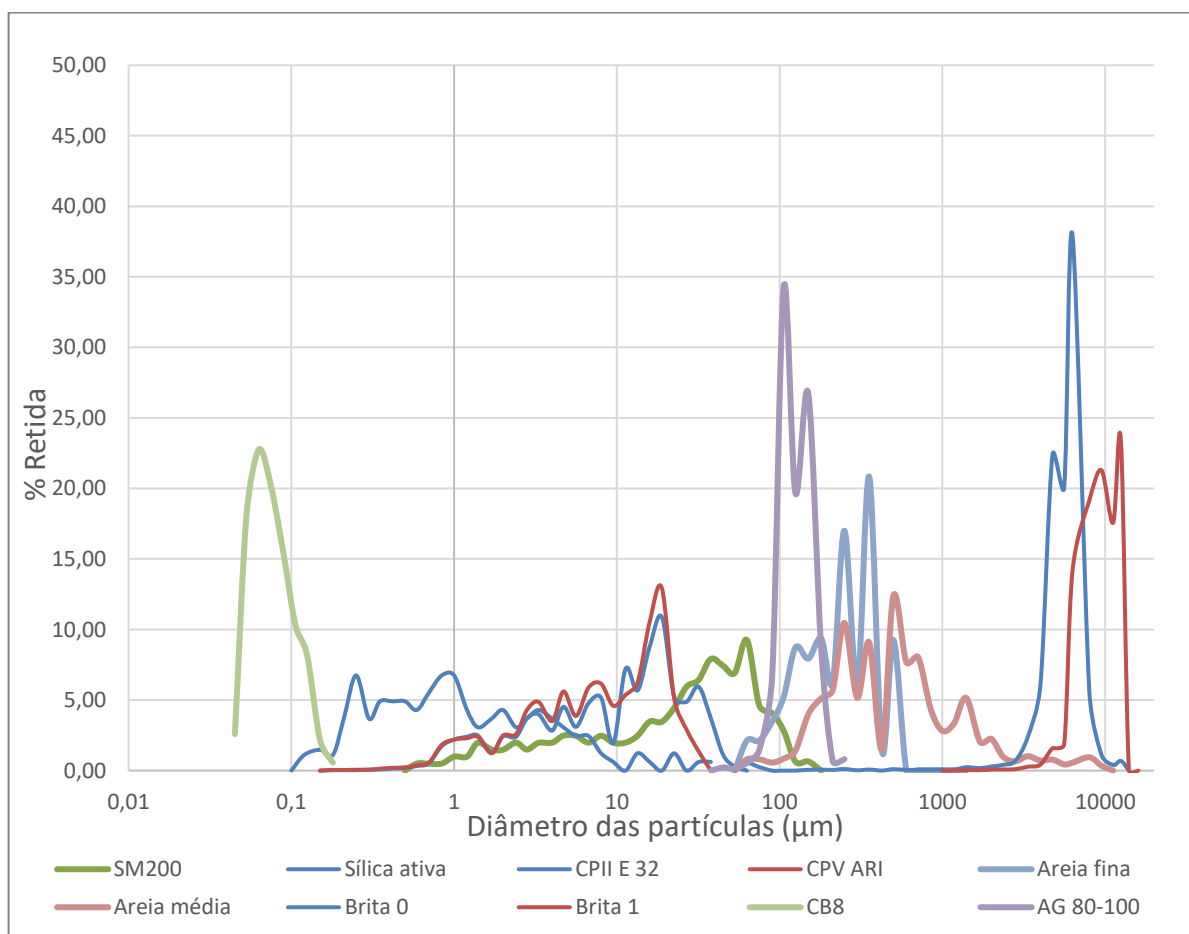
Fonte: Autor (2024).

Observa-se que os materiais escolhidos tendem a preencher várias faixas granulométricas diferentes. Este é um fator essencial para se obter maior densidade de empacotamento nas misturas de concreto (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

A ordem crescente do tamanho das partículas inicia-se pela sílica coloidal, sílica ativa, CPV ARI, CII E 32, SM200, e se encerra com os agregados: areia industrial, areia fina, areia média, brita 0 e brita 1, respectivamente.

Nota-se que a sílica coloidal utilizada se encaixou na região com partículas de diâmetro entre 0,01 e 0,1 μm , acompanhando a descrição de Sobolev e Gutiérrez (2005). Assim, reitera-se o efeito “ultra-filler” desta adição (NORHASRI *et al.*, 2017), uma vez que o material nanométrico preenche os vazios até mesmo entre as partículas de sílica ativa (0,1 μm a 10 μm), conforme pode ser observado nas curvas de distribuição granulométrica discreta dos materiais apresentadas na Figura 18.

Figura 18 – Curvas de distribuição granulométrica discreta dos materiais utilizados



Fonte: Autor (2024).

4.2 Etapa 2 - Confeção dos corpos de prova de concreto convencional

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas 4 fases da Etapa 1.

a) Estudo de dosagem e validação do traço de concreto convencional

Utilizando a metodologia de dosagem tradicional IPT/EPUSP, tendo como objetivo desenvolver um concreto com resistência característica à compressão de 35 MPa (f_{ck}), adotou-se a composição para o concreto convencional apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Composição do concreto convencional

C35					
Traço em massa	Cimento	Areia fina	Areia média	Brita 1	Água
	1,00	0,78	1,16	2,61	0,47
Consumo de materiais (kg/m ³ de concreto)					
Cimento (CPII E 32)			411		
Areia fina			319		
Areia média			478		
Brita 1			1072		
Água			193		

Fonte: Autor (2024).

A validação deste traço considerou ensaios tanto no estado fresco como no estado endurecido. No estado fresco, o ensaio de abatimento de tronco de cone (Figura 19) resultou em um valor de 130 mm, valor dentro da faixa esperada para este tipo de concreto. A massa específica no estado fresco atingiu o valor médio de 2,473 g/cm³ e o teor de ar, calculado pelo método gravimétrico, foi de 2,3%.

Figura 19 – Ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: Autor (2024).

No estado endurecido foi determinada a resistência à compressão axial nas idades de 7 e 28 dias. Para cada idade foram ensaiados 3 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resistência à compressão axial do concreto convencional C35

Identificação	<i>fcm</i> 7 dias			<i>fcm</i> 28 dias		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
C35	24,83	0,06	0,25	38,77	1,43	3,70

Fonte: Autor (2024).

Sendo assim, os ensaios para validação do traço de concreto convencional apresentaram resultados admissíveis, se aproximando de resultados da literatura (FAGURY, 2002) que empregaram traços similares e atingindo valores esperados para este tipo de concreto.

b) Confecção dos corpos de prova para reparação

Com o traço de concreto convencional validado, fez-se a concretagem dos corpos de prova para reparação (Figura 20) seguindo a metodologia apresentada no capítulo anterior.

Figura 20 – Corpos de prova de concreto convencional



Fonte: Autor (2024).

c) Danificação dos corpos de prova

Após a cura dos corpos de prova, parte deles foi danificada para posterior reparo. Os corpos de prova prismáticos foram ensaiados quanto à resistência à tração na flexão, que resulta na divisão do corpo de prova em duas partes (Figura 21). No caso dos corpos de prova cilíndricos, estes foram serrados ao meio e tiveram a superfície desgastada a fim de criar uma superfície rugosa para melhor a aderência com o concreto especial composto com sílica coloidal, considerado como material de reparo (Figura 22).

Figura 21 – Ensaio do CP prismático e superfície áspera resultante



Fonte: Autor (2024).

Figura 22 – Superfície serrada do corpo de prova cilíndrico em processo de desgaste



Fonte: Autor (2024).

4.3 Etapa 3 - Desenvolvimento dos concretos especiais com sílica coloidal

A dosagem dos concretos especiais foi feita utilizando a otimização computacional desenvolvida por Lopes (2019), baseada no modelo de empacotamento de partículas de Alfred. Inicialmente, foram determinadas as composições apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Composições dos concretos de alta resistência

Identificação	C80							C100				
	Cimento	Sílica Ativa	Fíler Calcário	Areia Fina	Areia Média	Brita 0	a/c	Cimento	Sílica Ativa	Pó de Quartzo	Areia Fina (AG 80-100)	a/c
Traço em massa	1,00	0,10	0,30	0,638	0,956	1,594	0,30	1,00	0,21	0,25	1,10	0,20
Consumo de materiais (kg/m ³ de concreto)	Cimento		491					Cimento		870		
	Sílica Ativa		49					Sílica Ativa		183		
	Fíler Calcário		147					SM 200		217		
	Areia Fina		313					AG 80-100		957		
	Areia Média		469					Água		174		
	Brita 0		783							-		
	Água		147							-		

Fonte: Autor (2024).

A partir destes dois traços, foram desenvolvidas dez misturas para escolha do teor ideal de sílica coloidal. Para cada resistência, além do concreto de referência, foram considerados quatro teores de adição do nano material (1%, 2,5%, 5% e 10%, em relação à massa de cimento).

No estado fresco, mediu-se o espalhamento (Figura 23) de cada mistura utilizando um tronco de cone de dimensões reduzidas, empregado na determinação da consistência de argamassas na *flow table*. Adicionando o aditivo superplastificante aos poucos, buscou-se um espalhamento variando entre 20 e 25 cm. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Quantidade de aditivo superplastificante utilizado e espalhamento obtido (ensaios para determinação do teor ideal de sílica coloidal)

Identificação	C80 - REF	C80 1%	C80 2,5%	C80 5%	C80 10%	C100 - REF	C100 1%	C100 2,5%	C100 5%	C100 10%
Aditivo SP (% da massa de cimento)	1,00%	1,00%	1,50%	1,75%	2,25%	2,50%	2,75%	3,00%	3,75%	5,00%
Espalhamento (cm)	25,50	21,50	22,50	21,00	18,50	23,50	23,50	23,00	20,50	16,50

Fonte: Autor (2024)

Figura 23 – Ensaio de espalhamento.



Fonte: Autor (2024).

Esperava-se que, no estado fresco, os concretos com sílica coloidal apresentassem certa fluidez para facilitar sua aplicação em reparos estruturais, semelhante ao graute comumente empregado na construção civil. Pela imagem acima observa-se que a consistência atendeu às expectativas estabelecidas.

No estado endurecido, mediu-se a resistência à compressão axial nas idades de 7 e 28 dias, obtendo os resultados dispostos na Tabela 20.

Tabela 20 – Resistência à compressão (ensaios para determinação do teor ideal de sílica coloidal)

Identificação	<i>fcm</i> 7 dias			<i>fcm</i> 28 dias		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
C80 - REF	46,83	1,76	3,76	57,69	3,99	6,92
C80 1%	48,03	3,27	6,80	57,91	5,56	9,60
C80 2,5%	27,50	0,24	0,87	36,98	4,80	12,99
C80 5%	41,55	0,19	0,45	47,71	2,24	4,69
C80 10%	46,09	0,09	0,20	55,19	3,22	5,84
C100 - REF	92,90	3,26	3,51	120,60	0,85	0,70
C100 1%	95,84	1,83	1,91	130,97	4,11	3,13
C100 2,5%	102,29	2,03	1,98	127,63	4,27	3,35
C100 5%	85,11	0,35	0,41	93,21	5,04	5,41
C100 10%	72,43	9,64	13,31	80,39	8,73	10,86

Fonte: Autor (2024).

Com base nestes primeiros resultados foi possível concluir que, no estado fresco, mantendo o espalhamento predeterminado, o aumento na quantidade de sílica coloidal resultou em maior demanda por aditivo superplastificante. Relações semelhantes foram observadas por Supit e Shaikh (2015) e Ltifi (2011). Os primeiros autores constataram redução do abatimento em 40% e 60% para adição de 2% e 4% de sílica coloidal, respectivamente. Ltifi (2011) observou que a partir da adição de 3% de sílica coloidal em relação à massa de cimento havia a necessidade de incorporar mais água para a manutenção da trabalhabilidade de misturas à base de cimento.

Com relação ao estado endurecido, observou-se a necessidade de revisar o traço de resistência característica de 80 MPa, uma vez que a resistência à compressão desta mistura não atingiu os valores esperados. Nas misturas C80, o concreto com adição de 1% de sílica coloidal atingiu resistência similar ao concreto de referência (sem diferença significativa conforme apresentado no Apêndice I), enquanto adições em teores de 2,5% ou superiores resultaram na redução da resistência à compressão. Por outro lado, nas misturas de C100, observou-se aumento de 8,5% na resistência aos 28 dias para a adição de 1% (diferença significativa), e aumento de 5,8% para a adição de 2,5%. Nos dois teores mais altos (5% e 10%), houve redução da resistência aos 28 dias para ambas as misturas.

A melhora no desempenho mecânico da mistura “C100 1%” pode ser comparada aos resultados de Qing (2007) e Zhang *et al.* (2014). Estes autores também utilizaram 1% de adição de sílica coloidal e obtiveram, respectivamente, aumento de 20% e 4% na resistência à compressão axial quando comparado com as misturas de referência.

Os valores baixos de resistência à compressão para as misturas com altos teores de sílica coloidal se justificam pela dificuldade de atingir a correta dispersão de quantidades altas da adição do nano material (nota-se o elevado valor de desvio padrão do concreto C100 10% aos 28 dias). Bjormstrom *et al.* (2007) perceberam comportamento semelhante em seu estudo, constatando redução no desempenho mecânico do concreto em teores da adição maiores que 2%.

Sendo assim, considerando os resultados encontrados, definiu-se que o teor de sílica coloidal que seria utilizado nos concretos de reparo seria de 1% em relação à massa de cimento. A escolha se justifica tanto economicamente (menor gasto com aditivo superplastificante e com a própria sílica coloidal) como mecanicamente (adição de 1% garantiu manutenção da resistência à compressão para o C80, e aumento desta propriedade mecânica para o C100).

Considerando a necessidade de revisão do traço C80, fez-se um ajuste na composição do traço, conforme apresentado na Tabela 21. Com esta nova dosagem, foram refeitos os ensaios para validação da mistura (Tabela 22) considerando apenas a adição de 1% de sílica coloidal, uma vez que este teor foi definido como ideal após os resultados obtidos para o C100.

Tabela 21 – Nova composição do C80

C80-2							
Traço em massa	Cimento	Sílica Ativa	Fíler Calcário	Areia fina	Areia média	Brita 0	a/c
	1,00	0,10	0,30	0,29	0,43	0,72	0,19
Consumo de materiais (kg/m ³ de concreto)							
Cimento				792,08			
Sílica Ativa				79,21			
Fíler Calcário				237,62			
Areia Fina				288,11			
Areia Média				342,18			
Brita 0				570,30			
Água				150,50			

Fonte: Autor (2024).

Tabela 22 – Novos resultados de validação do C80

Identificação	Aditivo Superplastificante (% da massa de cimento)	Espalhamento (cm)	<i>fcm</i> 7 dias			<i>fcm</i> 28 dias		
			Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
C80 2 – REF	2,20%	25,00	68,92	1,70	2,46	80,23	3,66	4,56
C80-2 1%	2,50%	24,50	68,98	1,96	2,85	88,72	1,80	2,03

Fonte: Autor (2024).

Os resultados obtidos com o novo traço atenderam os parâmetros esperados, uma vez que o traço de referência atingiu uma resistência à compressão de 80,23 MPa aos 28 dias. Além disso, observou-se um aumento de 10,60% na resistência à compressão do concreto com sílica coloidal em comparação com a referência. Esta diferença pode ser considerada significativa pelo teste *t* de Student, conforme apresentado no Apêndice I.

4.4 Etapa 4 - Reparação dos elementos danificados e caracterização do concreto especial

A seguir apresentam-se os resultados da última etapa da pesquisa.

a) Caracterização do concreto especial

Conforme esclarecido no capítulo anterior, considerando o volume de concreto a ser produzido e as limitações laboratoriais, a partir deste ponto, prossegue-se o estudo utilizando apenas o concreto C80.

Para caracterizar este material, em cada ensaio, uma mistura de referência, sem a adição de sílica coloidal (denominada C80) foi usada como comparação para o concreto com sílica coloidal, adicionada no teor de 1% em relação à massa de cimento (C80-1%).

- Massa específica no estado fresco

A massa específica no estado fresco foi medida para as duas composições. O C80 e C80-1% atingiram os valores médios de 2,518 g/cm³ e 2,490 g/cm³, respectivamente.

- Espalhamento

O C80 obteve espalhamento de 255 mm utilizando 3% de aditivo superplastificante, em relação à massa de cimento, enquanto o C80-1% apresentou um espalhamento de 225 mm com um teor de 4,75% de aditivo superplastificante.

Nota-se que a quantidade de aditivo adicionada à mistura com sílica coloidal foi superior àquela usada nas misturas de referência. Este fato pode ser atribuído a duas razões: primeira, relacionada à metodologia de mistura, visto o concreto de referência foi produzido utilizando uma argamassadeira de eixo planetário, enquanto o concreto com sílica coloidal foi preparado na betoneira de eixo inclinado (um equipamento menos eficiente em comparação com a argamassadeira); e segunda, à influência da sílica coloidal na trabalhabilidade da mistura, como discutido por ZHANG *et al.* (2014).

- Resistência à compressão axial e à tração na flexão

A resistência à compressão, medida aos 7 e 28 dias, teve como resultados os valores médios apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resistência à compressão axial (caracterização do concreto especial)

Identificação	<i>f_{cm}</i> 7 dias			<i>f_{cm}</i> 28 dias		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
C80	87,94	3,45	3,93	89,97	2,25	2,50
C80-1%	72,07	1,63	2,26	90,18	2,43	2,69

Fonte: Autor (2024).

Nota-se que o concreto C80-1% apresentou resistência aos 7 dias inferior ao concreto C80 e, após 28 dias, atingiu um valor similar ao concreto de referência, sem diferença estatisticamente significativa. Esse resultado não seguiu o padrão observado na etapa de escolha do teor ideal de sílica coloidal, na qual os valores para as misturas com 1% de sílica coloidal foram consideravelmente maiores.

Esses novos resultados se justificam principalmente pela metodologia de mistura adotada nesta fase da pesquisa. Na etapa 3, tanto para as misturas de referência quanto para os traços com sílica coloidal, foi utilizada uma argamassadeira de eixo planetário. Por outro lado, o concreto C80-1%, nesta fase, foi produzido em betoneira convencional de eixo inclinado. Assim, a utilização de um equipamento menos eficiente como misturador exigiu um consumo elevado de aditivo superplastificante para atingir a consistência desejada. Além disso, a dispersão das partículas foi prejudicada, reduzindo os efeitos positivos da sílica coloidal.

Considerando a incerteza presente na literatura quanto ao teor ideal de sílica coloidal em comparação à sua influência, este resultado indica que os distintos resultados obtidos pelos pesquisadores podem estar relacionados com a efetividade da mistura e, conseqüentemente, a dispersão das nanopartículas. Ainda assim, a manutenção da resistência mecânica aos 28 dias para ambos os concretos analisados, apesar das diferentes metodologias de mistura utilizadas, destaca a eficácia da sílica coloidal em potencializar a resistência mecânica do concreto.

A resistência à tração na flexão foi medida aos 28 dias pelo ensaio de flexão em 3 pontos (Figura 24) em corpos de prova prismáticos (40 x 40 x 160 mm) conforme NBR 13279:2005. As resistências encontradas estão dispostas na Tabela 24.

Tabela 24 – Ensaio de tração na flexão (caracterização do concreto especial)

Identificação	R _f 28 dias		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
C80	11,83	0,42	3,52
C80-1%	13,05	0,03	0,25

Fonte: Autor (2024).

O C80-1% apresentou resistência à tração na flexão ligeiramente maior que o concreto de referência (C80), sendo esta diferença significativa a partir da análise estatística (Apêndice I).

Figura 23 – Ensaio de flexão em 3 pontos



Fonte: Autor (2024).

- Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios (MAV)

A NBR 9778:2005 descreve como deve ser feita a determinação da absorção de água por imersão (A), índice de vazios (Iv) e massa específica (ρ) para argamassas e concretos endurecidos. Trata-se de um único ensaio que determina todas estas características do material.

Vale ressaltar que, a partir deste ensaio, pode-se determinar a massa específica da amostra seca (ρ_s), da amostra saturada (ρ_{sat}), e a massa específica real (ρ_r). Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 24 – MAV (caracterização do concreto especial)

Identificação	A (%)	Iv (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{sat} (g/cm ³)	ρ_r (g/cm ³)
C80	1,69	4,13	2,44	2,48	2,55
C80 1%	1,42	3,47	2,45	2,48	2,53

Fonte: Autor (2024).

O C80-1%, apesar de apresentar valores de resistência à compressão similares ao C80 (referência), obteve valor estatisticamente igual para a absorção de água por imersão e resultado significativamente melhor para o índice de vazios.

Este resultado evidencia o trabalho da sílica coloidal na mistura, atuando na redução da zona de transição do concreto, mitigando a porosidade do compósito, por meio de seu efeito “ultra-filler” (NORHASRI *et al.*, 2017) e sua elevada atividade pozolânica (LI *et al.*, 2017). Estes resultados consoam com Du *et al.* (2015), que em pequenos teores de adição de sílica coloidal (0,3% a 0,9%, em massa), observaram a densificação da microestrutura da pasta de cimento e redução da zona de transição.

Além disso, destaca-se, novamente, o potencial do concreto especial com sílica coloidal para reparo de estruturas, uma vez que devem ser empregados materiais com baixa porosidade para este fim, evitando a penetração de agentes agressivos. Neste contexto, cita-se Said *et al.* (2012), que observaram redução de 70% na profundidade média de penetração de íons cloreto no concreto com 3% de adição de NS.

- Módulo de elasticidade

A caracterização dos concretos especiais levou em conta os módulos de elasticidade estático de compressão (Figura 24) e dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. As partes 1 e 2 da NBR 8522:2021 (ABNT, 2021) apresentam as orientações normativas quanto à determinação destes dois módulos de elasticidade. As Tabelas 25 e 26 resumem os resultados encontrados.

Tabela 25 – Módulo estático à compressão (caracterização do concreto especial)

Identificação	Módulo de Elasticidade Estático 28 dias		
	Média (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
C80	49,18	1,11	2,25
C80-1%	48,48	1,17	2,42

Fonte: Autor (2024).

Tabela 26 – Módulo de elasticidade dinâmico (caracterização do concreto especial)

Identificação	Módulo de elasticidade dinâmico 7 dias						Módulo de elasticidade dinâmico 28 dias					
	EL (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	EF (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	EL (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	EF (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
C80	54,20	2,09	3,85	54,48	2,45	4,49	56,21	0,92	1,64	56,46	0,51	0,90
C80-1%	51,65	1,48	2,86	53,09	1,91	3,59	54,40	1,13	2,07	55,50	1,74	3,13

Fonte: Autor (2024).

O módulo de elasticidade flexional (E_F) é referente à média dos valores obtidos nos três modos de vibração (flexional, longitudinal e torcional) e o módulo de elasticidade longitudinal (E_L) é a média relativa aos valores indicados no módulo de vibração longitudinal. Segundo Otani e Pereira (2017), o módulo de elasticidade longitudinal apresenta, usualmente, maior proximidade com o ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático à compressão.

Além disso, vale ressaltar que Metha e Monteiro (2014) indicam que os valores de módulo de elasticidade dinâmico para concretos de alta resistência são cerca de 20% maiores que o módulo de elasticidade estático.

Na presente pesquisa, comparando o módulo dinâmico longitudinal (28 dias) com o módulo estático, constata-se diferença de 14,3% e 12,2% para o C80 e C80-1%, respectivamente.

Figura 24 – Determinação do módulo de elasticidade estático à compressão



Fonte: Autor (2024).

- Velocidade de propagação de onda ultrassônica

A velocidade do pulso ultrassônico foi medida nos corpos de prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm) nas condições saturada e saturada superfície seca, e em três idades (48 horas, 7 e 28 dias). Optou-se por medir a velocidade no sentido longitudinal dos prismas (160 mm) com o intuito de analisar uma faixa maior do material.

Segundo Hernández *et al* (2000), quanto menor o volume de vazios no interior do concreto, maior é a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, uma vez que a velocidade no ar é menor do que no sólido. Além disso, Naik *et al.* (2004) classificam a qualidade do concreto de acordo com as velocidades do pulso ultrassônico, de maneira que velocidades de 5000 m/s, 4000 m/s e 3000 m/s estão relacionadas com misturas de concreto classificadas como de qualidade muito boa, média e muito ruim, respectivamente.

Na Tabela 27 estão apresentadas as velocidades medidas nos concretos analisados. Aos 28 dias, ambas as velocidades medidas foram superiores a 5000 m/s (classificação “muito boa”).

Tabela 27 – Velocidade do pulso ultrassônico (caracterização dos concretos especiais)

Velocidade do pulso ultrassônico (m/s)				
Idade		48 horas	7 dias	28 dias
C80	Média (m/s)	5058,00	5134,83	5278,53
	DP (m/s)	43,51	44,56	2,79
	CV (%)	0,86	0,87	0,05
C80-1%	Média (m/s)	4632,05	5143,53	5281,23
	DP (m/s)	60,62	40,62	14,66
	CV (%)	1,31	0,79	0,28

Fonte: Autor (2024).

- Tempo de pega na pasta de cimento

O ensaio para determinação do tempo de pega foi conduzido separadamente dos demais ensaios de caracterização. Essa estratégia foi adotada para focar exclusivamente na pasta de cimento, onde a presença da sílica coloidal exerce a maior influência. Utilizou-se o aparelho de Vicat (Figura 25) para medir o tempo de pega na pasta de cimento, seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR 16607:2018 (ABNT, 2018).

Considerando apenas a relação água/cimento dos dois traços (C80 e C80-1%), foram desenvolvidas as pastas de cimento e, para o C80-1% foi adicionado 1% de sílica coloidal em relação à massa de cimento.

Tabela 28 – Tempos de pega (caracterização do concreto especial)

Tempos de pega expressos em minutos		
Parâmetro	C80	C80-1%
Tempo de início de pega (+ 5 min)	520	266
Tempo de fim de pega (+ 15 min)	610	336

Fonte: Autor (2024).

Os dados fornecidos na Tabela 28 indicam uma aceleração nos tempos de início e término de pega devido à inclusão de sílica coloidal na pasta de cimento. Foi observada uma diminuição de mais de 4 horas (240 minutos) nos períodos de pega entre as duas misturas analisadas. Essa aceleração dos tempos de pega pode ser entendida como uma resposta direta à complexa interação entre a sílica coloidal e os componentes da pasta de cimento.

Conforme discutido por Singh *et al.* (2013) e Magliano (2009), a sílica coloidal atua como um agente modificador de reologia e potencializador da resistência mecânica nas primeiras idades do concreto. Isso ocorre devido à sua capacidade de se desestabilizar na presença de espécies químicas catiônicas solúveis, desencadeando uma reação de gelificação que resulta na formação de nano sementes de C-S-H adicionais, acelerando assim a hidratação do cimento e, conseqüentemente, reduzindo os tempos de pega da mistura.

Figura 25 – Aparelho de Vicat



Fonte: Autor (2024).

b) Reparação dos elementos danificados e análise da reparação executada

Neste item são apresentados os resultados dos corpos de prova de concreto convencional desde as primeiras idades até serem reparados pelos concretos especiais com sílica coloidal. Os corpos de prova reparados com o C80-1% foram denominados de “Reparados C80-1%”

Nos cilindros reparados (Figura 26) foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão axial, módulos de elasticidade estático e dinâmico e velocidade de propagação de onda ultrassônica, aos 7 e 28 dias de idade após a execução do reparo. Os prismas reparados (Figura 27) foram ensaiados apenas quanto à resistência à tração na flexão em 4 pontos.

Figura 26 – CP cilíndrico reparado pelo concreto especial de sílica coloidal



Fonte: Autor (2024).

Figura 27 – CP prismático reparado pelo concreto especial (ensaio de flexão em 4 pontos).



Fonte: Autor (2024).

- Resistência à compressão axial e à tração na flexão

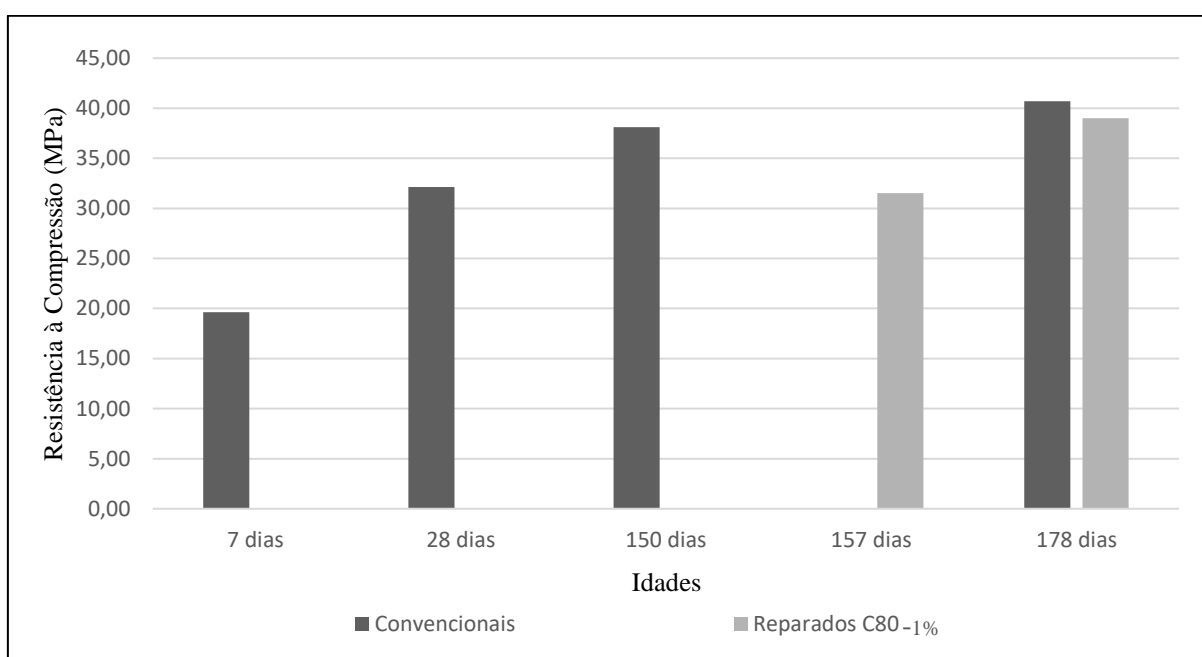
Com intuito de garantir boa comparação entre os resultados de referência (corpos de prova de concreto convencional intactos) e os resultados dos CPs reparados, acompanhou-se a evolução da resistência a compressão desde as primeiras idades até 28 dias após a recomposição. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 29 e resumidos na Figura 28.

Tabela 29 – Resistência à compressão axial (análise da reparação)

Identificação	<i>fcm</i> 7 dias			<i>fcm</i> 28 dias			<i>fcm</i> recomposição (150 dias)			<i>fcm</i> 157 dias			<i>fcm</i> 178 dias		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Convencionais	19,62	0,49	2,52	32,12	1,31	4,08	38,11	1,85	4,84	-	-	-	40,71	2,17	5,34
Reparados C80-1%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,54	1,05	3,31	39,35	1,24	3,16

Fonte: Autor (2024).

Figura 28 – Gráfico da evolução da resistência à compressão (análise da reparação)



Fonte: Autor (2024).

Observa-se que os resultados encontrados são satisfatórios, uma vez que, 28 dias após a reparação, a resistência à compressão dos CPs reparados se aproximou da resistência da mistura de referência, não sendo observadas diferenças estatisticamente significativas entre os resultados dos 3 tipos de concreto aos 28 dias (Apêndice I). Além disso, foram obtidos valores maiores que a resistência característica esperada para o concreto convencional (35 MPa).

Vale ressaltar que em todos os ensaios houve fissuração generalizada do corpo de prova (Figura 29), ou seja, não ocorreu deslocamento do material de reparo.

Figura 29 – Corpos de prova reparados submetidos ao ensaio de compressão axial



Fonte: Autor (2024).

Considerando que não foi aplicado nenhum material colante (ponte de aderência) entre o concreto convencional antigo e o concreto especial de reparo, a interface entre estes materiais se tornou o ponto mais frágil do elemento para solicitação na flexão.

Sendo assim, todos os corpos de prova reparados romperam no contato entre os materiais. Porém, vale notar que, nas superfícies de ruptura, havia resquícios de ambos os concretos (Figura 30), evidenciando a ligação do material de reparo ao concreto do corpo de prova, mesmo sem a aplicação de adesivos ou pastas de cimento Portland na superfície que seria reparada.

Foi possível movimentar o elemento reparado sem que houvesse perda da ligação entre as partes, e no ensaio de resistência à tração na flexão, como pode ser observado na Tabela 30, para os “Reparados C80-1%” observou-se uma redução (diferença significativa) de 8,5% de resistência quando comparado com a resistência medida aos 28 dias no corpo de prova de concreto convencional intacto (original, sem reparo).

Fagury (2002), realizando este mesmo ensaio e utilizando pasta de cimento Portland como ponte de ligação entre concreto antigo e concreto de reforço, verificou que o corpo de prova prismático reparado se rompeu no concreto velho e, em alguns casos, atingiu a resistência maior que o corpo de prova intacto.

Entretanto, é importante destacar que, em composições semelhantes às desenvolvidas neste estudo, Fagury obteve resistências à tração variando entre 3 e 4 MPa, resultados comparáveis aos obtidos na pesquisa atual. Assim, observa-se bom desempenho do concreto especial com sílica coloidal como material de reparo, uma vez que, mesmo sem ponte de ligação, garantiu a integridade do corpo de prova reparado e atingiu resistências similares aquelas encontradas na literatura.

Tabela 30 – Resistência à tração na flexão (análise da reparação)

Identificação	f _{ct,f} 28 dias			f _{ct,f} 150 dias			f _{ct,f} 178 dias		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Convencional	4,40	0,01	0,22	5,01	0,35	7,08	-	-	-
Reparados C80-1%	-	-	-	-	-	-	3,95	0,09	2,15

Fonte: Autor (2024).

Figura 30 – Superfície de ruptura dos prismas reparados



Fonte: Autor (2024)

- Velocidade do pulso ultrassônico

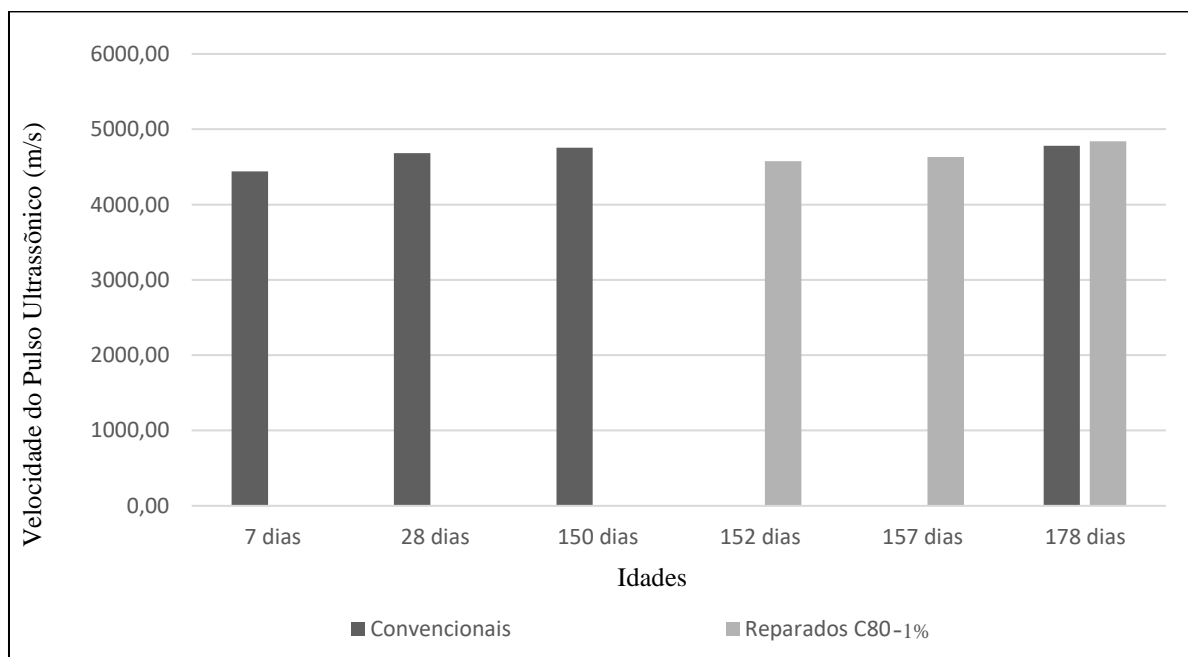
A velocidade do pulso ultrassônico foi medida no sentido longitudinal dos corpos de prova cilíndricos. A Tabela 31 e a Figura 31 apresentam os resultados encontrados.

Tabela 31 – Velocidade do pulso ultrassônico (análise da reparação)

		Velocidade do pulso ultrassônico (m/s)					
Idade		7 dias	28 dias	150 dias	152 dias	157 dias	178 dias
Convencionais	Média (m/s)	4441,47	4681,50	4756,37	-	-	4782,33
	DP (m/s)	18,22	6,22	51,79	-	-	45,38
	CV (%)	0,41	0,13	1,09	-	-	0,95
Reparados C80-1%	Média (m/s)	-	-	-	4575,90	4631,63	4840,73
	DP (m/s)	-	-	-	33,16	35,94	16,56
	CV (%)	-	-	-	0,72	0,78	0,34

Fonte: Autor (2024).

Figura 31 – Evolução da velocidade do pulso ultrassônico (análise da reparação)



Fonte: Autor (2024).

As velocidades registradas 28 dias após a recomposição dos corpos de prova (178 dias) foram superiores a 4500 m/s, indicando que os concretos podem ser classificados como de média a muito boa qualidade, de acordo com os critérios estabelecidos por Naik *et al.* (2004).

Esperava-se um aumento na velocidade de propagação do pulso ultrassônico devido à substituição de parte do corpo de prova de concreto convencional por um concreto de maior resistência e menor porosidade. Isto se deve ao fato de que, conforme Malhotra, Naik e Popovics (2004), o aumento da relação água/cimento não apenas reduz a resistência do concreto, mas também sua velocidade de ultrassom.

No entanto, é importante considerar que a região de contato entre os materiais pode conter vazios, o que resultaria em uma redução da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Ao analisar os dados da última leitura realizada, observou-se que as velocidades medidas para os corpos de prova reparados com concreto C80-1% estavam ligeiramente superiores das medidas para os corpos de prova de referência. Esse resultado sugere que, apesar das expectativas de uma diferença mais significativa devido à mudança nos materiais, não houve uma distinção substancial entre os resultados aos 178 dias de análise.

- Módulos de elasticidade

A terceira característica medida nos corpos de prova cilíndricos reparados foi o módulo de elasticidade. Similarmente ao que foi feito na etapa de caracterização dos concretos especiais, esta propriedade do material foi medida tanto pelo ensaio estático à compressão como pelo ensaio dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. As Tabelas 32 e 33 apresentam os resultados encontrados para os citados ensaios.

Vale ressaltar que os valores do módulo de elasticidade dinâmico para concretos de média e baixa resistência são cerca de 30% e 40% superiores que o módulo de elasticidade estático, respectivamente (METHA; MONTEIRO, 2014). Observa-se, pelas tabelas a seguir, que as diferenças entre o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal (E_L) aos 28 dias após a reparação e o módulo de elasticidade estático na mesma data foram de 25,2% e 24,9%, para os Convencionais e Reparados C80-1%, respectivamente.

Tabela 32 – Módulo de elasticidade estático à compressão (análise da reparação)

Identificação	Módulo de Elasticidade Estático					
	28 dias			178 dias		
	Média (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	Média (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
Convencionais	32,752	1,723	5,26	34,986	1,652	4,72
Reparados C80-1%	-	-	-	33,072	0,890	2,69

Fonte: Autor (2024).

Tabela 33 – Módulos de elasticidade dinâmico (análise da reparação)

Identificação	Parâmetros	Idade				
		7 dias	28 dias	150 dias	157 dias	178 dias
Convencionais	EL (GPa)	36,97	42,83	43,03	-	43,80
	DP (GPa)	0,41	1,66	1,38	-	0,01
	CV (%)	1,11	3,87	3,21	-	0,02
	EF (GPa)	37,02	41,87	42,73	-	43,60
	DP (GPa)	1,74	1,28	1,44	-	0,01
	CV (%)	4,70	3,06	3,37	-	0,02
Reparados C80-1%	EL (GPa)	-	-	-	38,13	41,32
	DP (GPa)	-	-	-	0,61	0,01
	CV (%)	-	-	-	1,61	0,03
	EF (GPa)	-	-	-	37,71	42,73
	DP (GPa)	-	-	-	0,93	0,06
	CV (%)	-	-	-	2,46	0,15

Fonte: Autor (2024).

Os concretos "Reparados C80-1%" exibiram módulos de elasticidade estático semelhantes aos dos CPs ("Convencionais") intactos, o que destaca a eficácia da reparação utilizando o concreto especial com sílica coloidal. Esse resultado sugere que, mesmo após o processo de divisão e reconstituição dos corpos de prova, o módulo de elasticidade foi mantido em níveis comparáveis aos do concreto não danificado.

Assim, reforça-se a possível viabilidade de se empregar o concreto especial com sílica coloidal para restauração da integridade estrutural de elementos construtivos.

5. CONCLUSÕES

Após estudo das produções acadêmicas sobre o tema, desenvolvimento de todo o programa experimental e análise dos resultados, as conclusões da presente pesquisa podem ser divididas em dois grupos: características do concreto especial com sílica coloidal e concreto especial como material de reparo de estruturas.

a) Características do concreto especial com sílica coloidal

A validação e caracterização das misturas com sílica coloidal mostraram que menores teores da adição são os que impactam positivamente no desempenho mecânico do concreto. Por exemplo, na etapa de validação, um aumento de 8 a 10% na resistência à compressão aos 28 dias foi observado com a adição de apenas 1% do nano material em relação à massa de cimento, enquanto teores maiores que 2,5% reduziram o desempenho mecânico do material.

No entanto, observou-se que quanto maior a adição de sílica coloidal, maior a demanda por aditivo superplastificante para se manter a trabalhabilidade da mistura, dada a maior dificuldade de garantir a dispersão das partículas da sílica coloidal.

Os resultados da caracterização do concreto contendo sílica coloidal, que foram comparados com um concreto semelhante, mas sem essa adição, revelaram um desempenho consistentemente igual ou superior para o concreto com sílica coloidal. Destaca-se, em particular, os ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios, que evidenciaram a eficácia da sílica coloidal na redução da porosidade do compósito.

Além disso, visando entender melhor o comportamento deste tipo de nano material, optou-se pela realização do ensaio de determinação dos tempos de pega na pasta de cimento. A pasta com 1% de sílica coloidal (em relação a massa de cimento) reduziu o tempo de pega em, aproximadamente, 40%. O resultado evidencia a atuação da sílica coloidal como agente modificador de reologia.

Diante de todo o exposto, conclui-se que a adição de sílica coloidal possui grande potencial para reduzir a porosidade do concreto e, conseqüentemente, elevar a resistência mecânica do material. Por outro lado, considerando seu impacto na reologia do compósito, é essencial utilizar metodologias de mistura que garantam a correta dispersão das partículas, para extrair toda capacidade da adição nanotecnológica.

b) Concreto especial como material de reparo de estruturas

A metodologia utilizada para danificação e, subsequente, reparação dos corpos de prova demonstrou ser eficaz ao viabilizar a realização de uma série de ensaios destinados à avaliação do reparo.

A análise das propriedades mecânicas dos corpos de prova reparados mostrou que as reparações foram efetivas. Os corpos de prova cilíndricos reparados obtiveram resistências à compressão maiores que 35 MPa (f_{ck} do concreto convencional) e velocidades de pulso ultrassônico maiores que 4700 m/s, indicando uma boa qualidade do material. Além disso, os corpos de prova recuperados com o concreto C80-1% mantiveram módulo de elasticidade na mesma ordem de grandeza que o medido nos corpos de prova intactos (convencionais).

Os prismas reparados foram manuseados sem perda da integridade da ligação entre o concreto convencional antigo e o concreto especial de reparo, mesmo sem a aplicação de qualquer material adesivo. Além disso, conseguiram alcançar uma resistência à tração apenas 8,5% menor do que a resistência de referência medida aos 28 dias.

Vale notar que, nas superfícies de ruptura, havia resquícios de ambos os concretos, evidenciando o potencial ligante do material de reparo mesmo sem a aplicação de adesivos ou pastas de cimento Portland na superfície que seria reparada.

Diante de todo o exposto, o concreto especial com sílica coloidal se mostrou efetivo para atuar como material de reparo nas estruturas de concreto convencional. Porém, conforme apresentado no item a seguir, é importante aprofundar o estudo em alguns detalhes deste material para adequá-lo à construção civil.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

As pesquisas brasileiras envolvendo nanotecnologia aplicada às misturas à base de cimento Portland ainda tem um vasto caminho a percorrer para estabelecimento de correlações mais precisas. Considerando apenas a sílica coloidal, faltam dados para determinar qual o melhor tipo, o teor ideal, a melhor forma de dispersão e quais os verdadeiros benefícios para as misturas cimentícias (tanto nas propriedades mecânicas como na durabilidade deste concreto especial). Portanto, as sugestões para trabalhos futuros sobre esta temática são as seguintes:

- Avaliar a durabilidade (carbonatação, ataque por sulfatos etc.) de reparos feitos com concreto especial de sílica coloidal;
- Verificar a influência da sílica coloidal em materiais de reparo que já são utilizados na construção civil (argamassa estrutural e graute);
- Aprofundar no desenvolvimento e caracterização de um concreto especial com sílica coloidal estabelecendo o teor ideal a ser adicionado e a melhor metodologia de mistura;
- Verificar o comportamento da sílica coloidal como principal agente ligante da mistura (substituição de todo, ou boa parte, do cimento);
- Analisar a utilização de concretos especiais com sílica coloidal para reparação de elementos de alta resistência;
- Verificar o comportamento do concreto nanoestruturado quanto a aderência por tração e retração.

REFERÊNCIAS

AITCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000. 667p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) - COMMITTEE 546, Concrete Repair Guide. 1997.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 9**: Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração. 2002. 6p.

_____. **NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. 2000. 3p.

_____. **NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. 2009. 6p.

_____. **NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. 2001. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023. 242p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022. 10p.

_____. **NBR 8522-1**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021. 24p.

_____. **NBR 8522-2**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro, 2021. 10p.

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019. 11p.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4p.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008. 7p.

_____. **NBR 11768 - 1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019. 27p.

_____. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010. 5p.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022. 22p.

_____. **NBR 13279**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 9p.

_____. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021. 98 p.

_____. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017. 5p.

_____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 11p.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4p.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempo de pega. Rio de Janeiro, 2018. 4p.

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015. 11p.

_____. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020. 5p.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 16p.

_____. **NBR ISO 12677**: Análise química de produtos refratários por fluorescência de raios X (XRF) – Método do corpo de prova fundido. Rio de Janeiro, 2014. 84p.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ipsis, v.1, 2011. P. 185-232.

BJÖRNSTRÖM, J. et al., Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement, **Chemical Physics Letters**, v. 392 (1), p. 242–248, 2004.

BRITZ, C.; MAGLIANO, M. V. M.; HELENE, P. **Nanotecnologia aplicada a concretos: estudo da influência da sílica coloidal nas propriedades no estado fresco e endurecido**. Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto, CBC2018, Foz do Iguaçu/PR, setembro, 2018.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese (Doutorado) em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2007.

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

CASTRO, A.; FERREIRA, F. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes. **Ingeniería de Construcción**, v. 31, n. 2, p. 91–104, 2016.

CEMBUREAU. **Activity Report 2015**. Brussels, Belgium: CEMBUREAU, 2015.

CLÍMACO, J.C.T. **Uma análise crítica dos métodos de avaliação de aderência e do uso de agentes adesivos no reparo de estruturas de concreto**. XXV JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, Porto Alegre, novembro, 1991.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 261–309.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. 237 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DU, H. et al. Effect of nano-silica on mechanical and transport properties of lightweight concrete, **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 114–122, 2015.

FAGURY, S. C. **Concretos e pastas de elevado desempenho: contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concreto novo e velho, com tratamento da zona de interface.** 2002.184p. Dissertação (Mestrado em ciência e engenharia de materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FUNK, J. E., DINGER, D. R. **Predictive process control of crowded particulate suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing.** Nova York: Springer Science Business Media, 1994.

GARCÍA-SÍAZ, Y; TORRES-ORTEGA, R.; SABA, M.; QUIÑONES-BOLAÑOS, E.; TORRES-SÁNCHEZ, J. Combined effect of nano-silica and silica fume to improve concrete workability and compressive strength: a case study. **Ingeniería y Competitividad**, 2023.

GRUBBS, F. E., **Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples**, *Technometrics*, 11:1, 1-21, 1969.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.** São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 1992. 349 p.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto.** Red Rehabilitar, São Paulo, 2003.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Acesso em: 20 out. 2023.

HERNÁNDEZ, M. G. et al., Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. **Ultrasonics**. v. 38, p. 531-533, 2000.

HOU, P. et al., **Effects of the pozzolanic reactivity of nanoSiO₂ on cement-based materials**, *Cem. Concr. Compos.* 55 (2015) 250–258.

ISO 13320:2020. **Particle size analysis – Laser diffraction methods.** International Organization for Standardization, 2020

JALAL, M. et al., Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete, **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 366–374, 2015.

JO, B. W. et al. Investigations on the development of powder concrete with nano-SiO₂ particles, **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 11, p. 37-42, 2007.

KONG, D. et al. Effect and mechanism of colloidal silica sol on properties and microstructure of the hardened cement-based materials as compared to nano-silica powder with agglomerates in micron-scale, **Cement and Concrete Composites**, v. 98, p. 137-149, 2019.

LI, L. G. et al. Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 229–238, 1 jun. 2017.

LIBORIO, J. B. L. et al. **Sílica da casca de arroz em concreto de alto desempenho** In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA & 40 IBERO AMERICANO DE CERÂMICA, VIDRIOS Y REFRACTÁRIOS - Poços de Caldas/MG, junho, 1998.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland.** 174p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

LTIFI, M. et al. Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars. **Procedia Engineering**, v.10, p. 900-905, 2011.

MAGLIANO, M. V. M. **Sílica coloidal como agente ligante e fonte multizadora em concretos refratários**. 163p. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) – Universidade Federal de São Carlos, 2009.

MALHOTRA, V. M.; NAIK, T. R.; POPOVICS, J. S. **The Ultrasonic Pulse Velocity Method**. In: MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MEHTA, K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

MELO, A. B. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. Tese de doutorado, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MORENO Jr., R. & SELMO S. M. S. **Reparos localizados superficiais em estruturas de concreto – Análise da aderência segundo métodos de ensaios distintos**. Anais do 44º IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte/MG, agosto, 2002.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. The ultrasonic pulse velocity method. In MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto – 5ª Edição**. Editora Bookman, Porto Alegre, 2016.

NORHASRI, M. S. M. et al. Applications of using nano material in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v 133. p. 91-97, 2017.

OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p.

OLIVEIRA, C. O. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Matéria**, 2018. ISSN 1517-7076 artigo e-11962.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. **Estimativa do módulo de elasticidade estático de concretos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso**. Informativo técnico-científico ITC-07/ATCP. 2017. 36p.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PRADO, L. P. **Estudo da interface do Concreto Pré-Moldado e Concreto de Altíssimo Desempenho Reforçado com Fibras**. 291p. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

QING, Y. et al. Influence of nano-SiO₂ addition on Properties of hardened cement paste as compared with sílica fume. **Construction and Building Materials**, v 21. p. 539-545, 2007.

QUERCIA, G. et al. Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v.42, p. 344-357, 2012.

RAI, S.; TIWARI, S. **Nano Silica in Cement Hydration**. In: 6th National Conference on Nanomaterials and Nanotechnology (NCNN VI-2017), 2017.

- RAMÍREZ, F. C. **Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- RAUPACH, M.; BUTTNER, T. **Concrete Repair to EN 1504 – Diagnosis, Design, Principles and Practice**. Boca Raton (FL – EUA), CRC Press, 2014.
- REIS, A.P.A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- RUPASINGHE, R. et al. Nanoengineering concrete for sustainable built environment: a review. In: **International conference on structural engineering construction and management**, 2011.
- SAID, A. M. et al. Properties of concrete incorporating nano-SiO₂, **Construction and Building Materials**, v 36. p. 838-844, 2012.
- SALEMI, N.; BEHFARNIA, N. Effect of nano-particles on durability of fiberreinforced concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v 48. p. 934-941, 2013.
- SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete – A review. **Construction and Building Materials**, 2010.
- SANTOS, M. O. **Estudos de concretos com adição de sílica coloidal submetidos à ação combinada de cloretos e CO₂**. 125p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. **Innovation in use and research on cementitious material**. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 128-136, 2008.
- SINGH, L. P. et al. Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. **Construction and Building Materials**, 2013.
- SOBOLEV, K.; GUTIÉRREZ, M. F. How nanotechnology can change the concrete world. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 84, i. 10, p. 14-18, 2005.
- SUPIT, S.W.M.; SHAIKH, F.U.A. Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica, **Materials and Structures**. v. 48, p. 2431–2445, 2015.
- TAYLOR, H.F.W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K.L. Delayed ettringite formation, **Cement and Concrete Research**. v. 31, i. 5, p. 683-693, 2001.
- TECNOSIL – **Sílica ativa**. Disponível em: www.tecnosilbr.com.br. Acesso em: 14 de outubro de 2021.
- THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo, Ed. Pini, 1989.
- TUTIKIAN, B.; HELENE, P. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. São Paulo: Ipsilon, p. 415–452, 2011.
- YUN, K. et al. Influence of Colloidal Silica and Silica Fume on the Rheology and Mechanical Properties of High-Performance Shotcrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2022.
- ZHANG, P. et al. Mechanical properties of fly ash concrete composite reinforced with nano-SiO₂ and steel fiber. **Current Science**, 2014.

APÊNDICE I – TESTE ESTATÍSTICOS

Neste anexo são apresentados todos os testes estatísticos (Quadro 1 ao 27) para exclusão de outliers dos resultados da pesquisa (Teste de *Grubbs*) e comparação de alguns resultados (Teste *t* de *Student*). A sequência das análises estatísticas acompanha a mesma sequência descrita no programa experimental.

Validação do traço de concreto convencional

Quadro 1 – Teste de Grubbs – Validação do traço de concreto convencional (ensaio de massa específica no estado fresco e resistência à compressão axial – 7 e 28 dias)

Massa específica no estado fresco (g/cm ³)			Resistência à compressão (7 dias) MPa			Resistência à compressão (28 dias) MPa		
Valor	G	Resultado	Valor	G	Resultado	Valor	G	Resultado
2,461	0,64	Ok	24,88	0,637	Ok	37,51	0,879	Ok
2,478	0,22	Ok	23,55	1,153	Não Ok	40,33	1,088	Ok
2,443	1,57	Ok	24,79	0,516	OK	38,47	0,209	OK
2,500	1,38	Ok	Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
2,478	0,25	Ok	Média	24,41		Média	38,77	
2,480	0,35	Ok	Desvio-padrão	0,74		Desvio-padrão	1,43	
Gcrítico N=6	1,89		Nova média			Coefficiente de variação (%)	3,70	
Média	2,473		Valor					
Desvio-padrão	0,019		24,88					
Coefficiente de variação (%)	0,7779		24,79					
			Média	24,83				
			Desvio-padrão	0,06				
			Coefficiente de variação (%)	0,25				

Fonte: Autor (2024).

Estudo de dosagem dos concretos especiais e escolha do teor ideal de sílica coloidal

Quadro 2a – Teste de Grubbs – Escolha do teor ideal de sílica coloidal (ensaios de resistência à compressão axial - concreto C80)

C80 - REF - <i>fcm</i> 7 dias			C80 - REF - <i>fcm</i> 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
48,11	0,726	Ok	62,14	1,114	Ok
47,56	0,414	Ok	56,51	0,296	Ok
44,82	1,141	Ok	54,42	0,819	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	46,83		Média	57,69	
Desvio-padrão	1,76		Desvio-padrão	3,99	
Coefficiente de variação (%)	3,76		Coefficiente de variação (%)	6,92	
C80 - 1% - <i>fcm</i> 7 dias			C80 - 1% - <i>fcm</i> 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
47,05	0,299	Ok	57,54	0,067	Ok
51,67	1,115	Ok	63,65	1,032	Ok
45,36	0,816	Ok	52,55	0,965	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	48,03		Média	57,91	
Desvio-padrão	3,27		Desvio-padrão	5,56	
Coefficiente de variação (%)	6,80		Coefficiente de variação (%)	9,60	
C80 - 2,5% - <i>fcm</i> 7 dias			C80 - 2,5% - <i>fcm</i> 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
31,81	1,152	Não Ok	33,63	0,697	Ok
27,67	0,508	Ok	42,48	1,146	Ok
27,33	0,644	Ok	34,82	0,449	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	28,94		Média	36,98	
Desvio-padrão	2,49		Desvio-padrão	4,80	
Coefficiente de variação (%)	8,62		Coefficiente de variação (%)	12,99	
C80 - 5% - <i>fcm</i> 7 dias			C80 - 5% - <i>fcm</i> 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
41,76	1,134	Ok	45,54	0,971	Ok
41,41	0,756	Ok	47,59	0,055	Ok
41,48	0,378	Ok	50,01	1,026	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	41,55		Média	47,71	
Desvio-padrão	0,19		Desvio-padrão	2,24	
Coefficiente de variação (%)	0,45		Coefficiente de variação (%)	4,69	
C80 - 10% - <i>fcm</i> 7 dias			C80 - 10% - <i>fcm</i> 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
46,02	0,590	Ok	58,69	1,087	Ok
54,95	1,155	Não Ok	52,35	0,882	Ok
46,15	0,565	Ok	54,53	0,205	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	49,04		Média	55,19	
Desvio-padrão	5,12		Desvio-padrão	3,22	
Coefficiente de variação (%)	10,44		Coefficiente de variação (%)	5,84	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 2b – Novas médias Teste de Grubbs – Escolha do teor ideal de sílica coloidal (ensaios de resistência à compressão axial - concreto C80)

Novas médias	
C80 - 2,5% - <i>fcm</i> 7 dias	
Valor (MPa)	
27,67	
27,33	
Média	27,50
Desvio-padrão	0,24
Coeficiente de variação (%)	0,87
C80 - 10% - <i>fcm</i> 7 dias	
Valor (MPa)	
46,02	
46,15	
Média	46,09
Desvio-padrão	0,09
Coeficiente de variação (%)	0,20

Fonte: Autor (2024).

Quadro 3 – Teste *t* de Student – Comparativo entre o C80 - REF e C80 - 1% (ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias)

C80 – REF (MPa)	C80 – 1% (MPa)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
62,14	57,54	0,95139	0,05	Não
56,51	63,65			
54,42	52,55			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 4a – Teste de Grubbs – Escolha do teor ideal de sílica coloidal (ensaios de resistência à compressão axial - concreto C100)

C100 - REF - <i>f</i> cm 7 dias			C100 - REF - <i>f</i> cm 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
95,53	0,807	Ok	121,2	0,607	Ok
93,92	0,312	Ok	120	0,548	Ok
89,26	1,119	Ok	85,35	1,154	Não Ok
Gcrítico N=3		1,15	Gcrítico N=3		1,15
Média		92,90	Média		108,85
Desvio-padrão		3,26	Desvio-padrão		20,36
Coefficiente de variação (%)		3,51	Coefficiente de variação (%)		18,71
C100 - 1% - <i>f</i> cm 7 dias			C100 - 1% - <i>f</i> cm 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
94,07	0,966	Ok	129,9	0,260	Ok
95,72	0,065	Ok	127,5	0,844	Ok
97,73	1,031	Ok	135,5	1,104	Ok
Gcrítico N=3		1,15	Gcrítico N=3		1,15
Média		95,84	Média		130,97
Desvio-padrão		1,83	Desvio-padrão		4,11
Coefficiente de variação (%)		1,91	Coefficiente de variação (%)		3,13
C100 - 2,5% - <i>f</i> cm 7 dias			C100 - 2,5% - <i>f</i> cm 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
103,72	0,654	Ok	125,9	0,406	Ok
100,85	0,497	Ok	132,5	1,139	Ok
70,77	1,151	Não Ok	124,5	0,733	Ok
Gcrítico N=3		1,15	Gcrítico N=3		1,15
Média		91,78	Média		127,63
Desvio-padrão		18,25	Desvio-padrão		4,27
Coefficiente de variação (%)		19,89	Coefficiente de variação (%)		3,35
C100 - 5% - <i>f</i> cm 7 dias			C100 - 5% - <i>f</i> cm 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
84,81	0,865	Ok	92,65	0,111	Ok
85,03	0,231	Ok	88,47	0,940	Ok
85,49	1,095	Ok	98,51	1,051	Ok
Gcrítico N=3		1,15	Gcrítico N=3		1,15
Média		85,11	Média		93,21
Desvio-padrão		0,35	Desvio-padrão		5,04
Coefficiente de variação (%)		0,41	Coefficiente de variação (%)		5,41
C100 - 10% - <i>f</i> cm 7 dias			C100 - 10% - <i>f</i> cm 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
80,55	0,843	Ok	89,82	1,080	Ok
61,78	1,105	Ok	78,77	0,186	Ok
74,96	0,263	Ok	72,59	0,894	Ok
Gcrítico N=3		1,15	Gcrítico N=3		1,15
Média		72,43	Média		80,39
Desvio-padrão		9,64	Desvio-padrão		8,73
Coefficiente de variação (%)		13,31	Coefficiente de variação (%)		10,86

Fonte: Autor (2024).

Quadro 4b – Novas médias Teste de Grubbs – Escolha do teor ideal de sílica coloidal (ensaios de resistência à compressão axial - concreto C100)

Novas médias			
C100 - 2,5% - f_{cm} 7 dias		C100 - REF - f_{cm} 28 dias	
Valores (MPa)		Valores (MPa)	
103,72		121,2	
100,85		120	
Média	102,29	Média	120,60
Desvio-padrão	2,03	Desvio-padrão	0,85
Coefficiente de variação (%)	1,98	Coefficiente de variação (%)	0,70

Fonte: Autor (2024).

Quadro 5 – Teste t de *Student* – Comparativo entre o C100 - REF e C100 - 1% (ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias)

C100 – REF (MPa)	C100 – 1% (MPa)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
121,2	129,9	0,04175	0,05	Sim
120	127,5			
-	135,5			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 6a – Teste de Grubbs – Novos resultados de validação do C80 (ensaio de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias)

C80 2 - REF - <i>fcm</i> 7 dias			C80 2 - REF - <i>fcm</i> 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
70,11	0,699	Ok	83,93	1,011	Ok
69,68	0,446	Ok	76,61	0,989	Ok
66,98	1,145	Ok	80,15	0,022	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	68,92		Média	80,23	
Desvio-padrão	1,70		Desvio-padrão	3,66	
Coefficiente de variação (%)	2,46		Coefficiente de variação (%)	4,56	
C80 2 - 1% - <i>fcm</i> 7 dias			C80 2 - 1% - <i>fcm</i> 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
67,22	0,896	Ok	89,99	0,665	Ok
68,62	0,183	Ok	87,44	0,485	Ok
71,1	1,079	Ok	45,12	1,153	Não Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	68,98		Média	74,18	
Desvio-padrão	1,96		Desvio-padrão	25,20	
Coefficiente de variação (%)	2,85		Coefficiente de variação (%)	33,97	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 6b – Nova média Teste de Grubbs – Novos resultados de validação do C80

Nova média	
C80 2 - 1% - <i>fcm</i> 28 dias	
Valores (MPa)	
89,99	
87,44	
Média	88,72
Desvio-padrão	1,80
Coefficiente de variação (%)	2,03

Fonte: Autor (2024).

Quadro 7 – Teste t de *Student* – Comparativo entre o C80 2 - REF e C80 2 - 1% (ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias)

C80 2 – REF (MPa)	C80 2 – 1% (MPa)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
83,93	89,99	0,04257	0,05	Sim
76,61	87,44			
80,15	-			

Fonte: Autor (2024).

Caracterização do concreto especial

Quadro 8 – Teste de Grubbs – Caracterização do concreto especial (ensaio de determinação da massa específica no estado fresco)

Massa específica no estado fresco - C80			Massa específica no estado fresco - C80 - 1%		
Valor (g/cm ³)	G	Resultado	Valor (g/cm ³)	G	Resultado
2,519	0,076	Ok	2,422	1,146	Ok
2,515	1,036	Ok	2,531	0,694	Ok
2,521	0,960	Ok	2,516	0,453	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	2,518		Média	2,490	
Desvio-padrão	0,003		Desvio-padrão	0,059	
Coefficiente de variação (%)	0,12		Coefficiente de variação (%)	2,38	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 9a – Teste de Grubbs – Caracterização do concreto especial (ensaio de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias)

C80 - <i>f</i> _{cm} 7 dias			C80 - <i>f</i> _{cm} 28 dias		
Valor (G	Resultado	Valor	G	Resultado
90,24	0,666	Ok	92,50	1,126	Ok
83,97	1,150	Ok	88,21	0,784	Ok
89,61	0,484	Ok	89,20	0,343	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	87,94		Média	89,97	
Desvio-padrão	3,45		Desvio-padrão	2,25	
Coefficiente de variação (%)	3,93		Coefficiente de variação (%)	2,50	
C80 - 1% - <i>f</i> _{cm} 7 dias			C80 - 1% - <i>f</i> _{cm} 28 dias		
Valor	G	Resultado	Valor	G	Resultado
70,52	0,948	Ok	88,46	0,485	Ok
73,77	1,045	Ok	57,26	1,150	Não Ok
71,91	0,096	Ok	91,89	0,665	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	72,07		Média	79,20	
Desvio-padrão	1,63		Desvio-padrão	19,08	
Coefficiente de variação (%)	2,26		Coefficiente de variação (%)	24,09	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 9b – Novas médias Teste de Grubbs – Caracterização do concreto especial (ensaio de resistência à compressão axial)

Novas médias	
C80 - 1% - f_{cm} 28 dias	
Valores (MPa)	
88,46	
91,89	
Média	90,18
Desvio-padrão	2,43
Coeficiente de variação (%)	2,69

Fonte: Autor (2024).

Quadro 10 – Teste t de *Student* – Caracterização do concreto especial - Comparativo entre o C80 e C80 - 1% (ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias)

C80 (MPa)	C80 – 1% (MPa)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
92,50	88,46	0,9322	0,05	Não
88,21	91,89			
89,20	-			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 11 – Teste de Grubbs – Caracterização do concreto especial (massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios - MAV)

Identificação	A (%)						Iv (%)											
	Valores	G	Resultado	Média	DP	CV (%)	Valores	G	Resultado	Média	DP	CV (%)						
C80	1,89	0,929	Ok	1,69	0,218	12,89	4,25	1,121	Ok	4,13	0,104	2,52						
	1,72	0,130	Ok				4,10	0,32	Ok									
	1,46	1,058	Ok				4,05	0,801	Ok									
C80 1%	1,44	1,038	Ok	1,42	0,013	0,92	3,47	0,577	Ok	3,47	0,000	0,00						
	1,42	0,080	Ok				3,47	0,577	Ok									
	1,41	0,958	Ok				3,52	1,155	Não Ok	-	-	-						
	1,30	1,087	Ok				3,03	1,080	Ok									
	1,76	0,207	Ok				4,06	0,185	Ok									
Identificação	ρ_s (g/cm ³)						ρ_{sat} (g/cm ³)						ρ_r (g/cm ³)					
	Valores	G	Resultado	Média	DP	CV (%)	Valores	G	Resultado	Média	DP	CV (%)	Valores	G	Resultado	Média	DP	CV (%)
C80	2,41	0,871	Ok	2,44	0,036	1,47	2,46	0,861	Ok	2,48	0,031	1,26	2,53	0,841	Ok	2,55	0,025	0,98
	2,43	0,221	Ok				2,48	0,235	Ok				2,54	0,265	Ok			
	2,48	1,092	Ok				2,52	1,097	Ok				2,58	1,106	Ok			
C80 1%	2,41	1,113	Ok	2,45	0,032	1,30	2,45	1,111	Ok	2,48	0,032	1,29	2,50	1,108	Ok	2,53	0,033	1,32
	2,47	0,823	Ok				2,51	0,828	Ok				2,56	0,836	Ok			
	2,46	0,290	Ok				2,49	0,283	Ok				2,54	0,271	Ok			
	2,33	0,747	Ok				2,36	0,134	Ok				2,40	0,732	Ok			
	2,31	1,136	Ok				2,35	0,926	Ok				2,41	0,408	Ok			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 12 – Teste t de *Student* – Comparativo entre o C80 e C80 - 1% (Absorção de água por imersão)

C80 (%)	C80 – 1% (%)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
1,89	1,44	0,1662	0,05	Não
1,72	1,42			
1,46	1,41			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 13 – Teste t de *Student* – Comparativo entre o C80 e C80 - 1% (Índice de vazios)

C80 (%)	C80 – 1% (%)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
4,25	3,47	0,0079	0,05	Sim
4,10	3,47			
4,05	-			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 14a - Teste de Grubbs – Caracterização do concreto especial (ensaio de tração na flexão aos 28 dias)

C80 - R _f 28 dias			C80 - 1% - R _f 28 dias		
Valor (MPa)	G	Resultado	Valor (MPa)	G	Resultado
11,65	0,431	Ok	13,03	0,621	Ok
11,53	0,712	Ok	13,08	0,532	Ok
12,30	1,143	Ok	13,97	1,154	Não Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	11,83		Média	13,36	
Desvio-padrão	0,42		Desvio-padrão	0,53	
Coefficiente de variação (%)	3,52		Coefficiente de variação (%)	3,95	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 14b – Nova média Teste de Grubbs – Caracterização do concreto especial (ensaio de tração na flexão aos 28 dias)

Nova média	
C80 - 1% - R _f 28 dias	
Valores (MPa)	
13,03	
13,08	
Média	13,05
Desvio-padrão	0,03
Coefficiente de variação (%)	0,25

Fonte: Autor (2024).

Quadro 15 – Teste t de *Student* – Comparativo entre o C80 e C80 - 1% (ensaio de tração na flexão aos 28 dias)

C80 (MPa)	C80 – 1% (MPa)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
11,65	13,03	0,0353	0,05	Sim
11,53	13,08			
12,30	-			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 16 - Teste de Grubbs – Caracterização do concreto especial (Módulos de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias)

Módulo de elasticidade estático - C80			EL - C80			EF - C80		
Valor (GPa)	G	Resultado	Valor (GPa)	G	Resultado	Valor (GPa)	G	Resultado
49,25	0,06	Ok	55,22	1,07	Ok	56,24	0,42	Ok
48,04	1,03	Ok	57,05	0,91	Ok	56,09	0,72	Ok
50,25	0,97	Ok	56,36	0,16	Ok	57,04	1,14	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	49,18		Média	56,21		Média	56,46	
Desvio-padrão	1,11		Desvio-padrão	0,92		Desvio-padrão	0,51	
Coefficiente de variação (%)	2,25		Coefficiente de variação (%)	1,64		Coefficiente de variação (%)	0,90	
Módulo de elasticidade estático - C80 - 1%			EL - C80 - 1%			EF - C80 - 1%		
Valor (GPa)	G	Resultado	Valor (GPa)	G	Resultado	Valor (GPa)	G	Resultado
49,57	0,93	Ok	54,03	0,33	Ok	57,43	0,83	Ok
47,24	1,06	Ok	53,51	0,79	Ok	55,00	1,11	Ok
48,64	0,13	Ok	55,67	1,12	Ok		0,29	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	48,48		Média	54,40		Média	55,50	
Desvio-padrão	1,17		Desvio-padrão	1,13		Desvio-padrão	1,74	
Coefficiente de variação (%)	2,42		Coefficiente de variação (%)	2,07		Coefficiente de variação (%)	3,13	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 17 - Teste de Grubbs – Caracterização do concreto especial (Velocidade do pulso ultrassônico aos 28 dias)

Velocidade do pulso - C80 (28 dias)			Velocidade do pulso - C80 1% (28 dias)		
Valor (m/s)	G	Resultado	Valor (m/s)	G	Resultado
5275,50	1,086	Ok	5296,80	1,062	Ok
5281,00	0,883	Ok	5267,70	0,923	Ok
5279,10	0,203	Ok	5279,20	0,139	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	5278,53		Média	5281,23	
Desvio-padrão	2,79		Desvio-padrão	14,66	
Coefficiente de variação (%)	0,053		Coefficiente de variação (%)	0,278	

Fonte: Autor (2024).

Reparação dos elementos danificados e análise da reparação executada

Quadro 18a – Teste de Grubbs – Análise da reparação (ensaio de resistência à compressão axial aos 7 dias)

<i>f</i> _{cm} 7 dias - Convencional		
Valor (MPa)	G	Resultado
20,17	1,107	Ok
19,21	0,837	Ok
19,49	0,270	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	19,62	
Desvio-padrão	0,49	
Coefficiente de variação (%)	2,52	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 18b – Teste de Grubbs – Análise da reparação (ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias)

<i>f</i> _{cm} 28 dias - Convencional		
Valor (MPa)	G	Resultado
33,55	1,088	Ok
31,85	0,208	Ok
30,97	0,879	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	32,12	
Desvio-padrão	1,31	
Coefficiente de variação (%)	4,08	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 18c – Teste de Grubbs – Análise da reparação (ensaio de resistência à compressão axial aos 150 dias – data da reparação)

<i>fcm</i> recomposição (150 dias) - Convencional		
Valor (MPa)	G	Resultado
39,61	0,811	Ok
38,68	0,307	Ok
36,05	1,117	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	38,11	
Desvio-padrão	1,85	
Coeficiente de variação (%)	4,84	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 18d – Teste de Grubbs – Análise da reparação (ensaio de resistência à compressão axial 157 dias)

<i>fcm</i> 157 dias - Rep. C80		
Valor (MPa)	G	Resultado
32,73	1,138	Ok
30,77	0,737	Ok
31,12	0,402	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	31,54	
Desvio-padrão	1,05	
Coeficiente de variação (%)	3,31	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 18e – Teste de Grubbs – Análise da reparação (ensaio de resistência à compressão axial 28 dias após a reparação)

<i>fcm</i> 178 dias - Convencional		
Valor (MPa)	G	Resultado
41,65	0,431	Ok
38,23	1,143	Ok
42,26	0,712	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	40,71	
Desvio-padrão	2,17	
Coeficiente de variação (%)	5,34	
<i>fcm</i> 178 dias - Rep. C80		
Valor (MPa)	G	Resultado
39,02	0,268	Ok
38,31	0,839	Ok
40,73	1,107	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	39,35	
Desvio-padrão	1,24	
Coeficiente de variação (%)	3,16	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 19 – Teste t de *Student* – Comparativo entre os corpos de prova convencionais intactos e os Reparados com concreto C80 (resistência à compressão axial aos 28 dias)

Convencional (MPa)	Reparados C80-1% (MPa)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
41,65	39,02	0,4124	0,05	Não
38,23	38,31			
42,26	40,73			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 20a – Teste de Grubbs – Análise da reparação (velocidade do pulso ultrassônico 178 dias – Concreto convencional)

Velocidade do pulso 178 dias - Convencional		
Valor (m/s)	G	Resultado
4830,9	1,070	Ok
4775,1	0,159	Ok
4741	0,911	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	4782,33	
Desvio-padrão	45,38	
Coefficiente de variação (%)	0,95	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 20b – Teste de Grubbs – Análise da reparação (velocidade do pulso ultrassônico 178 dias – Corpos de prova reparados com concreto C80)

Velocidade do pulso 178 dias - Reparados C80		
Valor (m/s)	G	Resultado
4855,8	0,910	Ok
4843,4	0,161	Ok
4823	1,071	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	4840,73	
Desvio-padrão	16,56	
Coefficiente de variação (%)	0,34	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 21 – Teste t de *Student* – Comparativo entre os corpos de prova convencionais intactos e os Reparados com concreto C80 (velocidade do pulso ultrassônico aos 28 dias)

Convencional (m/s)	Reparados C80-1% (m/s)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
4830,9	4855,8	0,1442	0,05	Não
4775,1	4843,4			
4741	4823			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 22 – Teste de Grubbs – Análise da reparação (ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático à compressão)

Módulo Estático 28 dias - Convencional			Módulo Estático 178 dias - Convencional		
Valor (GPa)	G	Resultado	Valor (GPa)	G	Resultado
34,665	1,110	Ok	33,485	0,908	Ok
32,271	0,279	Ok	36,756	1,072	Ok
31,321	0,831	Ok	34,716	0,163	Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	32,752		Média	34,986	
Desvio-padrão	1,723		Desvio-padrão	1,652	
Coeficiente de variação (%)	5,26		Coeficiente de variação (%)	4,72	
Módulo Estático 178 dias - C80					
Valor (GPa)	G	Resultado			
33,211	0,156	Ok			
32,121	1,069	Ok			
33,885	0,913	Ok			
Gcrítico N=3	1,15				
Média	33,072				
Desvio-padrão	0,890				
Coeficiente de variação (%)	2,69				

Fonte: Autor (2024).

Quadro 23 – Teste t de *Student* – Comparativo entre os corpos de prova convencionais intactos e os Reparados com concreto C80 (Módulo estático à compressão)

Convencional (GPa)	Reparados C80-1% (GPa)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
34,665	33,211	0,7936	0,05	Não
32,271	32,121			
31,321	33,885			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 24a – Teste de Grubbs – Análise da reparação (Módulo de elasticidade dinâmico 178 dias - concreto convencional)

EL 178 dias - Convencional			EF 178 dias - Convencional		
Valor (GPa)	G	Resultado	Valor (GPa)	G	Resultado
43,810	0,582	Ok	43,600	0,573	Ok
43,800	0,573	Ok	43,610	0,582	Ok
41,740	1,155	Não Ok	41,570	1,155	Não Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	43,117		Média	42,927	
Desvio-padrão	1,19		Desvio-padrão	1,17	
Coeficiente de variação (%)	2,77		Coeficiente de variação (%)	2,74	
Nova média			Nova média		
Média	43,805		Média	43,605	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,01	
Coeficiente de variação (%)	0,02		Coeficiente de variação (%)	0,02	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 24b – Teste de Grubbs – Análise da reparação (Módulo de elasticidade dinâmico 178 dias – corpos de prova reparados)

EL 178 dias - Reparados C80-1%			EF 178 dias - Reparados C80-1%		
Valor (GPa)	G	Resultado	Valor (GPa)	G	Resultado
42,640	1,155	Não Ok	42,780	0,619	Ok
41,310	0,590	Ok	42,690	0,535	Ok
41,330	0,564	Ok	40,890	1,154	Não Ok
Gcrítico N=3	1,15		Gcrítico N=3	1,15	
Média	41,760		Média	42,120	
Desvio-padrão	0,76		Desvio-padrão	1,07	
Coefficiente de variação (%)	1,83		Coefficiente de variação (%)	2,53	
Nova média			Nova média		
Média	41,320		Média	42,735	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,06	
Coefficiente de variação (%)	0,03		Coefficiente de variação (%)	0,15	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 25 – Teste t de *Student* – Comparativo entre os corpos de prova convencionais intactos e os Reparados com concreto C80-1% (Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal)

Convencional (GPa)	Reparados C80-1% (GPa)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
43,810	-	0,0002	0,05	Sim
43,800	41,310			
-	41,330			

Fonte: Autor (2024).

Quadro 26a – Teste de Grubbs – Análise da reparação (ensaio de resistência à tração na flexão 28 dias após a concretagem de concreto convencional)

f _{ct,f} 28 dias - Convencional		
Valor (MPa)	G	Resultado
4,40	0,629	Ok
4,17	1,153	Não Ok
4,39	0,524	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	4,32	
Desvio-padrão	0,13	
Coefficiente de variação (%)	3,01	
Nova média		
Valores (MPa)		
4,40		
4,39		
Média	4,40	
Desvio-padrão	0,01	
Coefficiente de variação (%)	0,22	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 26b – Teste de Grubbs – Análise da reparação (ensaio de resistência à tração na flexão na data da reparação)

f _{ct,f} 150 dias - Convencional		
Valor	G	Resultado
5,29	0,807	Ok
4,78	0,638	Ok
4,70	0,857	Ok
4,60	1,141	Ok
5,45	1,256	Ok
5,21	0,572	Ok
Gcrítico N=3	1,89	
Média	5,01	
Desvio-padrão	0,35	
Coefficiente de variação (%)	7,08	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 26c – Teste de Grubbs – Análise da reparação (ensaio de resistência à tração na flexão
178 dias – corpos de prova reparados)

f _{ct,f} 178 dias - Reparados C80-1%		
Valor	G	Resultado
3,95	0,039	Ok
3,86	1,019	Ok
4,03	0,980	Ok
Gcrítico N=3	1,15	
Média	3,95	
Desvio-padrão	0,09	
Coefficiente de variação (%)	2,15	

Fonte: Autor (2024).

Quadro 27 – Teste t de *Student* – Comparativo entre os corpos de prova convencionais intactos e os Reparados com concreto C80 (resistência à tração na flexão)

Convencional (MPa)	Reparados C80-1% (MPa)	Teste t	Nível de confiança	Diferença significativa?
4,40	3,95	0,0106	0,05	Sim
-	3,86			
4,39	4,03			

Fonte: Autor (2024).

