

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

DOUGLAS GONZATTO DOS SANTOS

USO DE NANOSSÍLICA EM CONCRETO DOSADO EM CENTRAL

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

DOUGLAS GONZATTO DOS SANTOS

USO DE NANOSSÍLICA EM CONCRETO DOSADO EM CENTRAL

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador:
Prof. Alexandre Lima de Oliveira.

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Gonzatto, Douglas

USO DE NANOSSÍLICA EM CONCRETO DOSADO EM CENTRAL

/ Douglas Gonzatto; orientação de Alexandre Lima de Oliveira.

- Florianópolis, SC, 2026.

29 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.
Inclui Referências.

1. Concreto dosado em central. 2. Nanossílica coloidal.
3. Dosagem de concreto. 4. Análise de custos. 5. Ecoeficiência. I. Lima de Oliveira, Alexandre. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. USO DE NANOSSÍLICA EM CONCRETO DOSADO EM CENTRAL .

USO DE NANOSSÍLICA EM CONCRETO DOSADO EM CENTRAL

DOUGLAS GONZATTO DOS SANTOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 07 de Julho, 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Alexandre Lima de Oliveira, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Orientador

Profa. Juliana Machado Casali, Dra.
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Avaliadora Interna

Profa. Luciana Maltez Calçada, Dra.
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Avaliadora Interna

Dedico este trabalho à minha mãe, que com seu amor e apoio incondicional sempre me incentivou a estudar e a buscar o conhecimento.

À minha avó materna (in memoriam), que nos deixou este ano, por ter sido uma das maiores bases da minha vida. Seu amor, sua força e seus ensinamentos estarão para sempre presentes em cada passo do meu caminho.

Ao meu avô paterno, que com as mãos calejadas de pedreiro me ensinou o verdadeiro valor do trabalho, despertou em mim a paixão pela construção civil e me fez amar a área em que hoje me formo engenheiro.

A vocês, por serem o meu alicerce e a minha maior inspiração.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC) – Câmpus Florianópolis, em especial ao Departamento Acadêmico da Construção Civil (DACC), pela oportunidade de uma formação pública de excelência e por disponibilizar a infraestrutura laboratorial necessária para a realização deste estudo.

Aos professores do curso de Engenharia Civil, que compartilharam seus conhecimentos, experiências e dedicação ao longo de todos esses anos, servindo de inspiração e fornecendo a base técnica necessária para que eu pudesse chegar até este momento da minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Alexandre Lima de Oliveira, Dr., pelo direcionamento preciso, paciência, rigor científico e pela condução firme e motivadora deste trabalho durante todas as fases do programa experimental.

Às professoras Juliana Machado Casali, Dra., e Luciana Maltez Calçada, Dra., por aceitarem prontamente o convite para compor esta banca examinadora e pelas valiosas contribuições oferecidas para o enriquecimento técnico e refinamento da versão final deste artigo.

À minha família, em especial à minha mãe, pelo incentivo constante aos estudos, e ao meu avô, que me ensinou a trabalhar na prática da construção civil e despertou em mim a paixão por esta área de atuação. Obrigado por serem meu porto seguro e minha maior inspiração.

À minha namorada, pelo companheirismo, paciência e apoio incondicional diário, compreendendo as minhas ausências e dividindo comigo cada desafio e conquista ao longo de toda a jornada acadêmica.

Aos colegas de curso e aos amigos, pelas discussões técnicas, ajuda mútua nas rotinas intensas e pelos momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais leve e memorável.

A Deus, pela força, saúde e discernimento concedidos para superar cada obstáculo e concluir com sucesso esta importante etapa da minha vida.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1. Objetivos.....	9
1.1.1. Objetivo Geral.....	9
1.1.2. Objetivos Específicos.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1. Nanotecnologia em Matrizes Cimentícias.....	10
2.2. Propriedades Reológicas e a Justificativa dos Testes em Argamassa.....	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
3.1. Caracterização dos Materiais Utilizados.....	12
3.1.1. Aglomerante e Agregados.....	12
3.1.2. Nanossílica Coloidal e Aditivo Químico.....	12
3.2. Programa Experimental das Argamassas (Fase Preliminar).....	12
3.2.1. Ensaio de Determinação do Teor de Sólidos.....	12
3.2.2. Dosagem, Produção e Moldagem das Argamassas.....	13
3.3. Programa Experimental dos Concretos (Etapa 2).....	14
3.3.1. Aplicação do Método de Dosagem IPT/Epusp.....	14
3.3.2. Proporções e Quantidade dos Traços.....	15
3.3.3. Mistura, Ensaio no Estado Fresco, Modelagem e cura dos corpos de prova....	16
3.3.4. Cura e Ensaio Mecânicos de Ruptura.....	16
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	17
4.1. Comportamento das Argamassas e Definição do Teor Ótimo (Etapa 1).....	17
4.1.1. Propriedades no Estado Fresco (Trabalhabilidade e Teor de Ar).....	17
4.1.2. Comportamento no Estado Endurecido (Resistência à Compressão).....	18
4.2. Concreto no Estado Fresco (Trabalhabilidade).....	20
4.3. Propriedades do Concreto no Estado Endurecido.....	21
4.4. Análise de Viabilidade Econômica.....	23
5. CONCLUSÕES.....	24
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	25
ABSTRACT.....	26
REFERÊNCIAS.....	27

USO DE NANOSSÍLICA EM CONCRETO DOSADO EM CENTRAL

Douglas Gonzatto dos Santos

RESUMO

A busca por ecoeficiência na Engenharia Civil impulsiona pesquisas sobre nanomateriais voltados à redução do consumo de cimento Portland. Este trabalho avaliou a viabilidade técnica e econômica da incorporação de nanossílica coloidal em concretos dosados em central através do Método IPT/EPUSP, fixando o abatimento em $160\pm 20\text{mm}$. A investigação ocorreu em duas etapas. A primeira, em argamassas, definiu o teor ótimo de 0,50 % de sólidos ativos, identificando que teores maiores geram perda de resistência mecânica e que a suspensão comercial causou aprisionamento de ar. Na segunda etapa, com foco no concreto estrutural, a modelagem matemática no ábaco de dosagem determinou que o traço equivalente modificado (1:4,50) atingiu a meta de resistência da Referência (42,30MPa), reduzindo o consumo de cimento de $374,0\text{ kg/m}^3$ para $361,0\text{ kg/m}^3$. Essa otimização gerou uma economia líquida de 13,0kg de cimento por metro cúbico e uma redução de 47,51 litros de água por metro cúbico. A análise financeira demonstrou que, sob o ponto de vista estritamente econômico atual, a substituição gera um investimento adicional líquido de R\$ 9,40/m³. Todavia, o indicador ambiental é altamente sustentável, reduzindo o consumo em 2280 m³ de água anualmente e poupando 624 toneladas de cimento e evitando a emissão de 536,6 toneladas de CO₂ na atmosfera anualmente, justificando o emprego da tecnologia pelo viés da descarbonização.

Palavras-Chave: Concreto dosado em central. Nanossílica coloidal. Dosagem de concreto. Análise de custos. Ecoeficiência.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria da construção civil enfrenta um duplo desafio global: a necessidade de edificar em larga escala estrutural mantendo um viés voltado à sustentabilidade e à ecoeficiência. O cimento Portland consolida-se como o principal ligante utilizado no planeta, contudo, a sua cadeia produtiva é apontada como uma

das maiores fontes de emissões de gás carbônico (CO_2) na atmosfera. Diante disso, a Engenharia Civil direciona esforços na busca por rotas e alternativas tecnológicas capazes de mitigar o consumo desse aglomerante em matrizes cimentícias, sem comprometer os requisitos normativos de durabilidade e desempenho mecânico (Singh *et al.*, 2013; Gonçalves; Leoni; Ferreira, 2023).

Nesse panorama de inovação de materiais, a nanotecnologia desponta como uma ferramenta mais promissora, permitindo a manipulação e o controle da microestrutura da matéria em escala nanométrica (Campos Neto; Geyer, 2019). No campo das matrizes cimentícias, destaca-se o emprego da nanossílica (SiO_2) devido à sua altíssima superfície específica e reatividade. A atuação desse nanomaterial fundamenta-se não apenas no preenchimento físico dos vazios microscópicos da matriz — efeito *filler* (Nogueira *et al.*, 2018) —, mas também na aceleração cinética das reações iniciais de hidratação através do efeito de nucleação e na reação química pozolânica com o hidróxido de cálcio residual, formando fases adicionais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) resistente (Campos Neto; Geyer, 2018).

Previamente à transposição desse avanço tecnológico para o concreto usinado, faz-se imperativo mapear o comportamento reológico e reacional do sistema em escala reduzida. Investigações laboratoriais em argamassas evidenciam que a adição de nanossílica otimiza as propriedades mecânicas do concreto e densifica a zona de transição, agindo de forma sensível na trabalhabilidade e demanda de água (Nogueira *et al.*, 2018). Logo, os parâmetros e dosagens avaliados de maneira pioneira na fase de argamassa constroem o embasamento científico e a necessária calibração de teor ótimo para a posterior aplicação na matriz de concreto de uso comercial.

Entretanto, para que uma inovação desenvolvida em ambiente acadêmico alcance aplicabilidade industrial real, ela precisa alinhar-se com as exigências e processos de mercado das centrais dosadoras de concreto. Com o intuito de estruturar um esqueleto granular equilibrado, seguro e representativo das práticas de mercado, este trabalho adotou o método de dosagem IPT/EPUSP (Helene; Terzian, 1992; Isaia, 2011). O foco metodológico reside na otimização granular e no ajuste das proporções de agregados miúdos e graúdos, visando obter um concreto modificado com nanossílica que atinja a mesma equivalência exata de desempenho

mecânico com o traço de referência comercial, viabilizando uma redução efetiva no consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto.

Adicionalmente ao sucesso do desempenho técnico em laboratório, o fator de viabilidade financeira desempenha um papel decisivo na aceitação e absorção de novas tecnologias pelo setor produtivo, uma vez que a deterioração precoce de estruturas gera custos expressivos de manutenção ao longo do ciclo de vida das obras (Huseien; Shah; Sam, 2019). À vista disso, esta pesquisa conclui o escopo metodológico apresentando uma análise orçamentária. A partir das proporções de misturas definidas no programa experimental, projeta-se o balanço financeiro em escala mensal e anual para uma central dosadora padrão, confrontando os custos reais de insumos com as vantagens de sustentabilidade e descarbonização do uso da nanossílica coloidal na construção civil.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica e o impacto econômico da incorporação de nanossílica em concretos dosados em central, utilizando o método de dosagem IPT/EPUSP para propor misturas mais ecoeficientes que atinjam a mesma classe de resistência mecânica do concreto de referência, porém com uma redução no consumo de cimento Portland.

1.1.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a existência de um teor ótimo, ou mais viável, técnica e economicamente, de nanossílica a partir da análise de dados e ensaios mecânicos preliminares realizados em matrizes de argamassa;
- Avaliar o desempenho do estado fresco e endurecido por meio de ensaios, comparando os traços com nanomaterial frente ao concreto de referência;
- Realizar um levantamento de custos dos materiais e projetar a viabilidade financeira (balanço mensal e anual) da aplicação prática dessa tecnologia, simulando cenários para centrais dosadoras de diferentes portes.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Nanotecnologia em Matrizes Cimentícias

A evolução da ciência dos materiais permitiu a transição do estudo das matrizes cimentícias da escala macroscópica para a escala nanométrica. De acordo com Gleize (2011), a própria hidratação natural do cimento Portland é essencialmente um processo nanotecnológico, uma vez que o principal produto responsável pela resistência estrutural do concreto — o silicato de cálcio hidratado, ou gel C-S-H — se desenvolve e se organiza em estruturas que medem poucos nanômetros. Por essa razão, a introdução de nanopartículas adicionais na mistura atua diretamente na escala de formação desses cristais, promovendo o refino da estrutura microscópica (Gleize, 2011; Gonçalves; Leoni; Ferreira, 2023).

Neste cenário, a nanossílica (nS) destaca-se como um nanomaterial promissor para modificação microestrutural. Enquanto as pozolanas tradicionais (como a sílica ativa e a cinza volante) operam na escala micrométrica, as partículas de nanossílica apresentam dimensões controladas que variam entre 1 e 100 nanômetros (Ortiz, 2016). Essa redução extrema no tamanho da partícula confere ao material uma área superficial específica extraordinariamente elevada, multiplicando os pontos de contato reacionais e modificando o comportamento físico e químico da pasta fresca e endurecida (Nogueira et al., 2018; Ortiz, 2016).

A literatura científica estabelece que a ação da nanossílica coloidal na matriz cimentícia não se limita a um único efeito, ocorrendo por meio de três mecanismos físicos e químicos simultâneos:

- **Efeito *Filler* Físico:** Devido ao diâmetro nanométrico de suas partículas, a nanossílica consegue penetrar e preencher os espaços vazios capilares deixados entre os grãos de cimento Portland e na região de contato com os agregados. Esse empacotamento microscópico promove o refinamento da estrutura de poros, reduzindo a porosidade aberta e criando barreiras físicas que dificultam a entrada de agentes agressivos externos (Nogueira *et al.*, 2018).
- **Efeito de Nucleação Ativa:** Quando dispersas na água de amassamento, as nanopartículas de sílica atuam como núcleos de cristalização altamente energéticos. Campos Neto (2018) explica que essas superfícies ativas atraem

rapidamente os íons de cálcio livres na solução, precipitando os primeiros cristais de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) de forma muito mais distribuída pelos poros. Esse fenômeno acelera as reações de hidratação iniciais e encurta o tempo de pega do material (Campos Neto, 2018; Huseien; Shah; Sam, 2019).

- Atividade Pozolânica de Alta Cinética: Durante as reações normais do cimento, forma-se o gel C-S-H, mas também é gerado um subproduto frágil e solúvel: o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , ou portlandita, que cria pontos de fraqueza mecânica. Conforme comprovado por Longo *et al.* (2022), a nanossílica reage quimicamente com essa portlandita livre, consumindo-a e convertendo-a em C-S-H secundário de alta densidade. O resultado é o preenchimento de vazios antes ocupados por cristais instáveis por uma matriz cimentícia significativamente mais resistente.

A atuação conjunta desses três mecanismos resulta em uma melhora expressiva na microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento Portland e o agregado graúdo, região apontada como o elo mais fraco do concreto estrutural (Longo *et al.*, 2022; Nogueira *et al.*, 2018).

2.2. Propriedades Reológicas e a Justificativa dos Testes em Argamassa

Apesar das vantagens mecânicas no estado endurecido, a aplicação de nanomateriais impõe restrições reológicas complexas no estado fresco. Em decorrência da elevadíssima área superficial das nanopartículas, ocorre uma demanda imediata por água para molhar as superfícies do material, fazendo com que parte da água livre fique adsorvida na nanossílica coloidal (Campos Neto, 2018). Na prática, se a mistura não for controlada, esse fenômeno provoca um aumento severo na viscosidade da pasta, reduzindo drasticamente a trabalhabilidade e a fluidez da argamassa (Campos Neto, 2018).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental deste trabalho foi desenvolvido no laboratório de materiais de construção civil do Departamento Acadêmico da Construção Civil do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) - Câmpus Florianópolis. A pesquisa foi

estruturada em duas fases metodológicas consecutivas: a primeira focada em matrizes de argamassa e a segunda direcionada ao concreto.

3.1. Caracterização dos Materiais Utilizados

3.1.1. Aglomerante e Agregados

Utilizou-se o cimento Portland composto com fíler calcário, classificado comercialmente como CP II-F-32, fornecido diretamente pela central dosadora parceira deste estudo. A escolha deste ligante específico justifica-se por representar o aglomerante padrão adotado na produção em escala industrial da região. Dessa forma, viabiliza-se a análise do impacto técnico e econômico da incorporação de nanossílica em traços de concreto comerciais correntes, aproximando os ensaios laboratoriais com total fidelidade da realidade prática e rotineira das concreteiras.

Como agregado miúdo, visando simular as composições granulométricas comumente empregadas em centrais dosadoras da região, adotou-se uma matriz mista composta por 50 % de areia natural de rio e 50 % de areia de britagem (resíduo de britagem de rocha granítica).

Para o agregado graúdo das misturas de concreto, utilizou-se brita de origem granítica classificada comercialmente como Brita 1.

3.1.2. Nanossílica Coloidal e Aditivo Químico

O nanomaterial empregado consiste em uma suspensão coloidal de nanossílica (nS), cujo fabricante e nome comercial são mantidos sob sigilo por razões de confidencialidade industrial.

3.2. Programa Experimental das Argamassas (Fase Preliminar)

3.2.1. Ensaio de Determinação do Teor de Sólidos

Para a quantificação da massa exata de partículas secas de sílica e da fração líquida presentes na dispersão coloidal, realizou-se o ensaio de determinação do teor de sólidos por evaporação em estufa laboratorial. O procedimento experimental foi conduzido em estrito cumprimento às diretrizes normativas da ABNT NBR 11768-3 (2019), método padrão utilizado para a caracterização de componentes e aditivos em matrizes cimentícias.

O ensaio foi executado em triplicata para garantir a confiabilidade estatística dos parâmetros de dosagem. As três amostras analisadas apresentaram, respectivamente, os teores de sólidos ativos de 6,38 %, 6,45 % e 6,44 %. A partir desses dados, estabeleceu-se a média aritmética de 6,42 % de sólidos ativos (e 93,58 % de fração hídrica), valor este fixado para o balanço de massa e cálculo de todos os traços subsequentes desenvolvidos nesta pesquisa.

3.2.2. Dosagem, Produção e Moldagem das Argamassas

As misturas de argamassa foram produzidas adotando-se o traço padrão em massa na proporção de 1 : 1,25 : 1,25 (Cimento Portland CP II-F-32 : Areia Natural de Rio : Areia de Britagem), com relação água/cimento (a/c) teórica fixada em 0,55. Essa proporção foi estabelecida com base nos dados de produção industrial cedidos por uma central dosadora de concreto da região, refletindo as condições reais de dosagem empregadas em escala comercial.

Foram avaliadas quatro séries experimentais com diferentes teores de nanossílica: Referência (REF), 0,25 % nS, 0,50 % nS e 1,00 % nS, em relação ao volume, com substituição parcial do cimento.

Para cada traço modificado, a fração de água presente na suspensão coloidal (93,58 % da massa líquida da emulsão) foi matematicamente subtraída da água de amassamento calculada. Esse balanço de massa garantiu que a relação a/c real permanecesse em 0,55 em todas as composições, isolando a influência do da água contida na suspensão coloidal do nanomaterial.

O processo de mistura foi padronizado em uma argamassadeira mecânica planetária, adotando-se a sequência de homogeneização prévia dos materiais a seco por 30 segundos, seguida da introdução da água de amassamento (juntamente com a nanossílica coloidal e aditivos quando aplicável) sob agitação contínua por 1 minuto. O controle químico de consistência variou por traço: a REF recebeu 0,36 % de aditivo sobre a massa de cimento Portland e a série 0,25 % nS recebeu aditivo no teor de 0,26 %. Para as séries de 0,50 % nS e 1,00 % nS, o aditivo superplastificante foi integralmente removido da matriz, uma vez que a própria ação aglutinante e a elevada coesão conferidas pelo nanomaterial garantiram à argamassa a plasticidade e a consistência desejadas para o manuseio e moldagem.

Imediatamente após a homogeneização, determinou-se a densidade de massa e o teor de ar incorporado, conforme às diretrizes da ABNT NBR 13278 (2005). Na sequência, realizou-se o ensaio de índice de consistência (Flow Test) registrando-se o diâmetro de espalhamento da argamassa, com 10 e 30 golpes, e para cada um dos quatro traços, foram moldados 2 corpos de prova cilíndricos de dimensões padrão 5x10cm seguindo os procedimentos de adensamento, tratamento superficial e cura estabelecidos pela ABNT NBR 7215 (2019), de cada traço e para cada idade de teste. Após 24 horas, os corpos foram desmoldados e mantidos em cura imersa em água saturada de cal, a 23°C, conforme prescrições da ABNT NBR 7215 (2019) até as idades de ruptura por compressão axial aos 7 e 28 dias.

3.3. Programa Experimental dos Concretos (Etapa 2)

Esta etapa consistiu no estudo de dosagem para avaliar o comportamento do concreto estrutural modificado com nanossílica coloidal. A investigação foi estruturada a fim de analisar a viabilidade técnica e econômica do emprego do nanomaterial em traços comerciais, correlacionando os resultados com os parâmetros obtidos na etapa anterior.

3.3.1. Aplicação do Método de Dosagem IPT/Epusp

Para a execução da Etapa 2, os concretos foram dosados seguindo a metodologia IPT/Epusp. O princípio do método consistiu em fixar a consistência do concreto fresco estabelecendo um abatimento de tronco de cone (Slump Test) estipulado neste trabalho em 160 mm (com tolerância de 20 mm), determinado conforme as diretrizes da ABNT NBR 16889 (2020).

O delineamento experimental compreendeu a confecção de um concreto de Referência (REF) sem nanomaterial e três misturas modificadas com a incorporação fixa de 0,50 % de nanossílica (teor de sólidos ativos definido com base no comportamento observado na Etapa 1 em argamassas). Para as misturas com nanossílica, variou-se o consumo de agregados, avaliados em três proporções distintas de agregados secos em massa (1:m): 1:3,5; 1:5,0 e 1:6,5 (relação cimento Portland : agregados totais). A quantidade de água de cada traço foi ajustada de forma experimental no momento da mistura até que o abatimento de 160 mm fosse

atingido, visto que a premissa do método IPT/Epusp fundamenta-se em um modelo essencialmente experimental.

3.3.2. Proporções e Quantidade dos Traços

A partir do delineamento experimental estabelecido pelo método IPT/EPUSP, foram definidas as proporções de materiais para cada uma das misturas de concreto avaliadas. O traço padrão de Referência (REF) adotou a proporção convencional em massa de 1 : 2,00 : 2,50, estabelecida com base nos dados operacionais de produção cedidos por uma central dosadora da região, garantindo a representatividade industrial da pesquisa.

Para a confecção dos concretos em laboratório, foi realizado o desconto da fração hídrica (93,58 %) da suspensão coloidal da nanossílica diretamente da água de amassamento. As proporções unitárias e as massas por mistura experimental estão apresentadas na Tabela 01.

Tabela 01: Proporções de materiais e consumo de água nas misturas laboratoriais de concreto

Identificação do Traço	Tipo de Parâmetro	Cimento (kg)	Areia Mista (kg)	Brita 1 (kg)	Água Adicionada (mL)	Relação a/c	Nanossílica Coloidal (g)
REF (0 % nS)	Traço Unitário	1	2	2,5	1.800	0,60	0
	Massa por Virada	3	6	7,5			
Traço 1:3,5 (0,50 % nS)	Traço Unitário	1	1,43	2,07	1.536	0,384	311,04
	Massa por Virada	4	5,72	8,28			
Traço 1:5,0 (0,50 % nS)	Traço Unitário	1	2,24	2,76	1.519	0,51	233,28
	Massa por Virada	3	6,72	8,28			
Traço 1:6,5 (0,50 % nS)	Traço Unitário	1	3,05	3,45	1.618	0,54	233,28
	Massa por Virada	3	9,15	10,35			

Fonte: O autor (2026).

3.3.3. Mistura, Ensaios no Estado Fresco, Modelagem e cura dos corpos de prova.

O processo de mistura dos concretos foi realizado mecanicamente com o auxílio de um misturador elétrico vertical portátil de alta potência, equipado com hélice dupla de homogeneização. A sequência de introdução dos componentes seguiu um critério padronizado: inicialmente, os agregados graúdos (Brita 1) e miúdos (areia mista) foram vertidos no recipiente juntamente com o Cimento Portland Composto (CP II-F), procedendo-se à homogeneização inicial a seco por 30 segundos na velocidade 2. Na sequência, adicionou-se gradativamente a água de amassamento experimental combinada com a suspensão coloidal de nanossílica, mantendo-se a agitação mecânica contínua por 1 minuto, na velocidade 2 até a completa uniformização da matriz.

Imediatamente após a conclusão da mistura, realizou-se a determinação de consistências pelo ensaio de cone (Slump Test) conforme a ABNT NBR 16889 (2020), a fim de obter a consistência de cada traço experimental atingisse a meta fixada de (160 ± 20) mm. Também foi determinada a massa específica do concreto fresco e o teor de ar incorporado pelo método gravimétrico, seguindo os preceitos da ABNT NBR 9833 (2008).

Na sequência, foram moldados os corpos de prova cilíndricos com dimensões padrão de 10cm de diâmetro por 20cm de altura para cada um dos traços avaliados. Conforme procedimento da ABNT NBR 5738(2015). Após 24 horas, os corpos foram desmoldados e transferidos para cura imersa em água sob temperatura controlada.

3.3.4. Cura e Ensaios Mecânicos de Ruptura

Aos 28 dias, os corpos de prova foram removidos do tanque de cura e submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, conforme às diretrizes normativas da NBR 5739(2018). Os ensaios de ruptura mecânica foram executados utilizando-se a máquina universal de ensaios do laboratório de materiais de construção civil do IFSC, Campus Florianópolis. Aplicando-se uma taxa de carregamento contínuo e padronizado até o colapso físico das amostras para a obtenção da tensão máxima de ruptura.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos nas duas etapas do programa de pesquisa. Inicialmente, analisam-se os dados de argamassa, utilizados para a definição do teor ótimo de nanomaterial. Na sequência, apresentam-se as propriedades do concreto estrutural nos estados fresco e endurecido, culminando na avaliação da viabilidade técnica e econômica da substituição de cimento Portland por nanossílica em escala industrial.

4.1. Comportamento das Argamassas e Definição do Teor Ótimo (Etapa 1)

4.1.1. Propriedades no Estado Fresco (Trabalhabilidade e Teor de Ar)

Antes da moldagem dos corpos de prova para a avaliação mecânica, as matrizes de argamassa da Etapa 1 foram caracterizadas no estado fresco quanto à sua consistência de densidade de massa. Seguiu as diretrizes da ABNT NBR 13278(2005), por meio dos ensaios de espalhamento (Flow Test), densidade de massa fresca e teor de ar incorporado. Os resultados estão apresentados na Tabela 02.

Tabela 02: Espalhamento e densidade das argamassas (Etapa 1)

Identificação do Traço	Teor de Sólidos Ativos de nS (%)	Índice de Fluidiez - Flow 10 golpes (mm)	Índice de Fluidiez - Flow 30 golpes (mm)	Teor de ar incorporado (%)	Densidade de Massa (g/cm ³)
Referência (REF)	0,00 %	240	322,5	-	2,21
0,25 % nS	0,25 %	236	310	3,7	2,13
0,50 % nS	0,50 %	262,5	337,5	6,0	2,08
1,00 % nS	1,00 %	342,5	*	6,1	2,08

Fonte: Do autor (2026).

Nota: () O traço com 1,00 % nS apresentou espalhamento excessivo e espalhamento limítrofe logo aos 10 golpes, impossibilitando a continuidade do adensamento padrão.*

A dosagem inicial de 0,25 % Ns não provocou uma diferença significativa no espalhamento da consistência (de 322,5 mm para 310,0 mm), devido à elevada superfície específica do nanomaterial que adsorve a água livre. Contudo, nas dosagens de 0,50 % e 1,00 % nS, ocorreu uma inversão reológica: o índice de consistência aumentou para 337,5 mm e atingiu o limite de 342,5 mm com apenas 10 golpes no teor máximo. Esse aumento de fluidiez correlaciona-se ao efeito lubrificante físico da suspensão e à redução do atrito interno entre os grãos.

Em paralelo, observou-se redução da densidade de massa no estado fresco de $2,21\text{g/cm}^3$ (REF) para $2,08\text{g/cm}^3$ nas argamassas com maiores teores de nanossílica. Este fenômeno é nitidamente comprovado pelo aumento do teor de ar incorporado observado também na Figura 01.

Figura 01 – Análise visual da porosidade superficial dos corpos de prova de argamassa (Etapa 1).



Fonte: Do autor (2026).

A associação direta entre a redução da densidade de massa, a fluidez maior e o aspecto visual poroso (Figura 01), indica que a suspensão coloidal comercial possui provavelmente um aditivo dispersante em sua formulação. As microbolhas estáveis geradas reduziram a compacidade inicial e criaram os vazios superficiais observados, impactando no estado endurecido observado na tabela 03.

4.1.2. Comportamento no Estado Endurecido (Resistência à Compressão)

Os ensaios de resistência à compressão axial na Etapa 1 foram conduzidos com o propósito de mapear o potencial reacional inicial e a sensibilidade do ligante CP II-F à introdução de diferentes teores de nanossílica coloidal. Os dados obtidos nas idades de 7 e 28 dias foram sintetizados com foco na resistência potencial das

misturas (tensão máxima) e na sua oscilação percentual comparativa, conforme apresentados na Tabela 03.

Tabela 03: Desempenho mecânico e variação percentual das argamassas (Etapa 1)

Identificação do Traço	Tensão Máxima (MPa)	Variação frente à REF (%)
Idade: 7 Dias		
Referência (REF)	39,58	-
0,25 % nS	33,78	-14,65 %
0,50 % nS	30,23	-23,62 %
1,00 % nS	27,41	-30,75 %
Idade: 28 Dias		
Referência (REF)	52,85	-
0,25 % nS	43,95	-16,84 %
0,50 % nS	40,38	-23,60 %
1,00 % nS	39,8	-24,69 %

Fonte: Do autor (2026).

A análise dos dados de resistência da tabela 03 revela que a incorporação da suspensão comercial reduziu a resistência mecânica das argamassas em todas as dosagens e idades pesquisadas.

Aos 7 dias de cura, o traço de Referência (REF) registrou uma tensão máxima de 39,58 MPa, ao passo que as séries modificadas apresentaram quedas progressivas de -14,65 % (0,25 % nS), -23,62 % (0,50 % nS) e -30,75 % (1,00 % nS). Na idade de 28 dias, a tendência de redução de desempenho se manteve, com a série REF atingindo o topo de 52,85 MPa, enquanto os traços modificados sofreram quedas de resistência de -16,84 %, -23,60 % e -24,69 % para os teores de 0,25 %, 0,50 % e 1,00 % nS, respectivamente.

A partir dos parâmetros obtidos no estado fresco (tabela 02), esse comportamento desfavorável nas idades avaliadas fundamenta-se diretamente na queda de densidade de massa provocada pelo aumento do teor de ar incorporado. Há forte evidência de que esse decréscimo de desempenho foi mascarado ou gerado colateralmente por possível presença de aditivos dispersantes/tensoativos na formulação comercial do fabricante – e não por um comportamento intrínseco negativo da sílica em si – ganha robustez científica nesta análise. O aprisionamento das microbolhas gerado por esse agente químico estabilizante induziu um elevado

teor de vazios na microestrutura endurecida da argamassa, atuando de maneira inversa ao empacotamento *nano-filler* esperado. Consequentemente, a atividade pozolânica de alta cinética e a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) secundário não se mostraram pronunciadas o suficiente para compensar o impacto físico deletério dessa porosidade interna nas idades avaliadas de até 28 dias.

A despeito da redução de desempenho mecânico observada nesta etapa inicial, a análise comparativa aos 28 dias forneceu um importante indicador para o direcionamento da pesquisa. Observou que o comportamento mecânico estabilizou-se em um patamar muito próximo entre as dosagens mais elevadas: a série com 0,50 % nS atingiu 40,38 MPa, enquanto a série de 1,00 % nS, registrou 39,80 MPa (uma diferença de apenas 1,09 % entre si).

A perda de coesão e a fluidez excessiva observadas no traço de 1,00 % nS logo no ensaio de índice de consistência de argamassa confirmam que o incremento do produto comercial (e consequentemente do aditivo dispersante que provavelmente o acompanha) gerou um teor de ar incorporado prejudicial à matriz, tornando o teor de 1,00 % tecnicamente sem efeito.

Assim a perspectiva da otimização de insumos, a constatação de que o dobro do teor de produto resulta em desempenho equivalente de resistência à compressão indica que dosagens elevadas tornam-se economicamente inviáveis e tecnicamente injustificadas. À vista disso, com o objetivo de avaliar se existe um teor ótimo, ou mais viável, técnica e economicamente, o percentual de 0,50 % de nanossilica foi delimitado como o balizador ideal para ser transposto e avaliado em concreto estrutural na Etapa 2, onde a energia de mistura dos agregados graúdos e a dinâmica de mistura poderão ou não mitigar o aprisionamento de ar e avaliar o potencial do produto.

4.2. Concreto no Estado Fresco (Trabalhabilidade)

Ao contrário do que ocorreu nas matrizes de argamassa da Etapa 1 — onde a possível presença de um aditivo dispersante/tensoativo na suspensão comercial provocou fluidez excessiva com severo aprisionamento de ar —, no concreto o ajuste experimental do consumo de água permitiu alcançar a consistência projetada de forma homogênea e estável em todos os traços. A introdução de 0,50 % de

nanossílica modificou a demanda de água das misturas. Para os traços modificados 1:3,5 e 1:5,0, o rearranjo do esqueleto granular — possivelmente associado ao efeito lubrificante físico e químico da suspensão coloidal líquida — permitiu atingir o slump de 160 mm com volumes menores de água adicionada por virada (a/c 0,384 e 0,51, respectivamente) se comparados à série de Referência (a/c 0,60).

Essa variação ganha respaldo científico ao analisar a massa específica dos concretos produzidos. A partir da massa específica no estado fresco, determinou-se o teor de ar incorporado e o consumo real de materiais por metro cúbico (m^3), conforme consolidado na Tabela 04.

Os resultados indicam que o Traço 1:3,5 e o Traço 1:5,0 apresentaram teores de ar incorporado superiores (4,20 % e 3,85 %) ao concreto de Referência (2,15 %). Esse fenômeno confirma a hipótese de que a suspensão comercial coloidal atua introduzindo microbolhas na pasta. No entanto, no Traço 1:6,5, o expressivo teor de agregados e a redução do teor de pasta promoveram uma expulsão natural desse ar por adensamento, reduzindo o índice para 1,90 %.

Tabela 04: Parâmetros volumétricos e consumo real de materiais por m^3 de concreto

Identificação do Traço	Massa específica fresca (kg/m ³)	Teor de Ar Incorporado (%)	Consumo de Cimento Real (kg/m ³)	Consumo de Areia Mista (kg/m ³)	Consumo de Brita 1 (kg/m ³)
REF (0 % nS)	2.323	2,15 %	374	748	935
Traço 1:3,5 (0,50 % nS)	2.277	4,20 %	446,1	637,7	923,5
Traço 1:5,0 (0,50 % nS)	2.288	3,85 %	338,3	757,9	933,8
Traço 1:6,5 (0,50 % nS)	2.333	1,90 %	274,8	837,9	948

Fonte: Do autor (2026).

4.3. Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

Os ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias foram executados para monitorar o desempenho mecânico do concreto estrutural e fornecer a base de dados para o modelo matemático.

Os valores médios de tensão obtidos nestes ensaios serviram para a modelagem matemática no software OriginPro (ORIGINLAB CORP., 2026), visando à construção do ábaco de dosagem unificado pelo Método IPT/EPUSP, conforme os dados apresentados na Tabela 05.

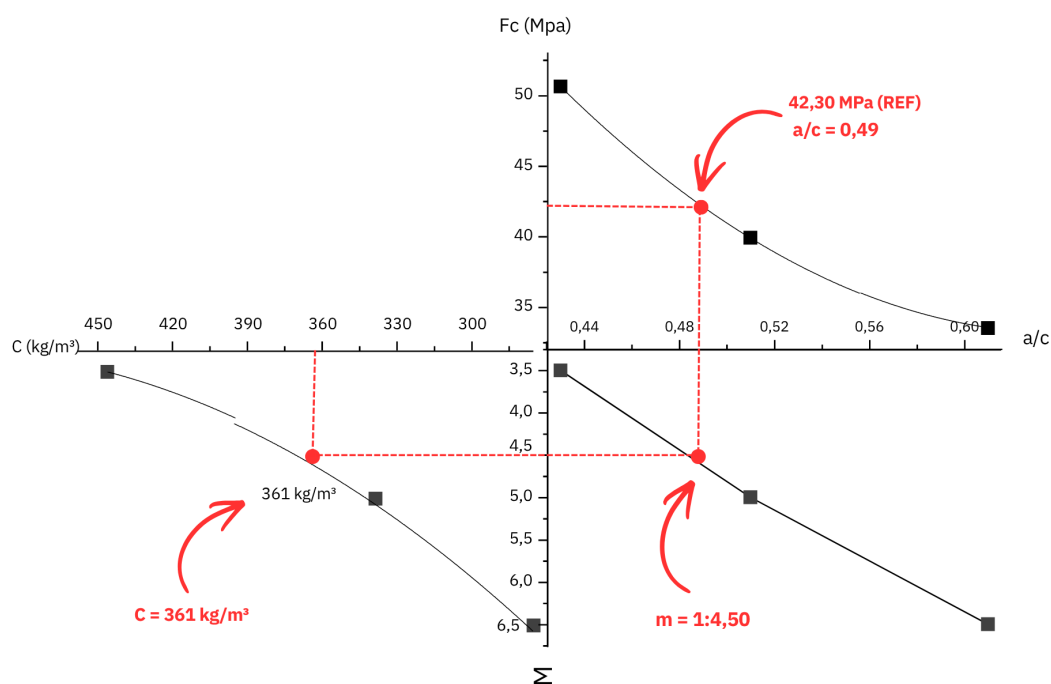
Tabela 05: Resultados de resistência à compressão axial dos concretos estruturais aos 28 dias

Identificação do Traço	Resistência Potencial (MPa)
Referência (REF)	42,3
Traço 1:3,5 (0,50 % nS)	50,64
Traço 1:5,0 (0,50 % nS)	39,93
Traço 1:6,5 (0,50 % nS)	33,54

Fonte: Do autor (2026).

A correlação analítica entre as variáveis foi unificada por meio do Diagrama de Dosagem de quatro quadrantes, conforme apresentado na Figura 04.

Figura 04 – Diagrama de dosagem experimental (Método IPT/EPUSP) para o concreto com 0,50 % de nanossílica.



Fonte: Do autor (2026).

No quadrante superior direito (f_{cm} x a/c), a Lei de Abrams foi validada por ajuste potencial, provando que a resistência da matriz modificada rege a relação água/cimento. No quadrante inferior direito (m x a/c), o ajuste linear reflete a manutenção da consistência fixada $160 \pm 20 \text{ mm}$ obtida experimentalmente no estado fresco. No quadrante inferior esquerdo (m x C), a curva de consumo de Lyse seguiu um ajuste polinomial de 2ª ordem, indicando o decréscimo do consumo de ligante.

A interpolação geométrica sequencial no ábaco (linhas vermelhas da Figura 04), adotando como meta a resistência do concreto de Referência comercial (42,30MPa), determinou para o novo concreto uma relação água/cimento ótima de 0,49, proporção entre cimento e agregado de 1:4,50 e consumo real de cimento Portland de 361,0 kg/m³.

Comparativamente, o traço equivalente nano-modificado reduziu o consumo de cimento Portland de 374,0 kg/m³ (Referência) para 361,0 kg/m³. Esta otimização microestrutural gerou uma economia líquida de 13,0 kg de cimento Portland por metro cúbico, validando a ecoeficiência da nanossílica por meio da ação conjunta dos efeitos fíler e pozolânico. Adicionalmente, a otimização permitiu a redução da relação água/cimento (a/c) de 0,60 (Referência) para 0,49 no traço nano-modificado, o que resultou em uma economia hídrica expressiva de 47,51 litros de água por metro cúbico de concreto produzido.

4.4. Análise de Viabilidade Econômica

A definição do traço equivalente modificado (1:4,50) validou o objetivo de ecoeficiência desta pesquisa. Ao fixar a meta de resistência em 42,30 MPa, a incorporação de 0,50 % de sólidos ativos de nanossílica reduziu o consumo de cimento Portland de 374,0 kg/m³ (Referência) para 361,0 kg/m³, gerando uma economia de 13,0 kg/m³, que corresponde a 3,48%. O que também reduziu o consumo de água de 224,40 L/m³ para 176,89 L/m³, gerando uma economia de 47,51 L/m³, o que corresponde a 21,17%.

Para suprir a retirada do ligante tradicional, introduziram-se 25,1kg/m³ da suspensão coloidal líquida que, dado o teor de sólidos de 6,42 %, equivale a apenas 1,61kg de nanossílica pura por metro cúbico.

Adotando os valores comerciais de mercado — R\$ 0,675/kg para o cimento Portland, R\$ 0,024/L de água e R\$ 12,00/kg para o sólido ativo da nanossílica —, o custo do nanomaterial por metro cúbico é de R\$ 19,32, enquanto o crédito pela redução do cimento é de R\$ 8,78 e da redução de água de R\$ 1,14.

O balanço financeiro resulta em um investimento adicional líquido de R\$ 9,40 por m³ de concreto produzido.

Para mensurar o impacto econômico, realizou-se uma simulação projetando este cenário para uma central dosadora regional de médio porte, adotando uma produção média conservadora de 4.000m³ de concreto por mês (160m³/dia operacional). Os dados de consumo e balanço financeiro estão consolidados na Tabela 06.

Tabela 06: Projeção de economia material e financeira em escala industrial

Período de Operação	Volume de Concreto Produzido (m ³)	Redução no Consumo de Cimento (kg)	Redução no Consumo de Água (L)	Consumo adicional em Ns (kg)
Diário (Média)	160 m ³	2.080 kg (2,08 toneladas)	7.601,6 (7,6016 m ³)	257,6 (0,258 toneladas)
Mensal	4.000 m ³	52.000 kg (52 toneladas)	190.040 (190,04 m ³)	6.440 (6,44 toneladas)
Anual	48.000 m ³	624.000 kg (624 toneladas)	2280.480 (2280,48 m ³)	77.280 (77,28 toneladas)

Fonte: O autor (2026).

A análise dos dados demonstra que, sob o ponto de vista financeiro atual, gera um acréscimo no custo de insumos da central. Todavia o indicador ambiental é positivo e sustentável: a tecnologia evita o consumo de 624 toneladas de cimento ao ano. Adotando o índice de emissão médio nacional de 860kg de CO₂ por tonelada de cimento, o traço equivalente evita a liberação de 536,6 toneladas de CO₂ na atmosfera anualmente, além disso, reduz o consumo de água em 2280 m³.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a viabilidade técnica e econômica da incorporação de nanossílica coloidal em concretos dosados em central através do Método IPT/EPUSP. Com base nos resultados experimentais obtidos, extraem-se as seguintes conclusões:

- **Teor Ótimo Obtido:** Os ensaios em argamassas delimitaram o teor de 0,50 % de sólidos ativos como o limite técnico, visto que a concentração de 1,00 % resultou em valores similares de resistência à compressão e perda de coesão, se comparado ao teor de 50%.

- **Teor de Ar Incorporado:** No estado fresco, a suspensão comercial elevou a fluidez das argamassas e reduziu a densidade de massa, indicando a possível presença de aditivos dispersantes na formulação do produto, responsáveis provavelmente por um expressivo aprisionamento de ar na mistura.
- **Estado Fresco do Concreto:** Na escala macroscópica do concreto, o atrito gerado pelos agregados graúdos durante a mistura mecânica pode ter funcionado como um dispersor natural, mitigando o impacto deletério do ar incorporado e permitindo a ativação dos mecanismos do nanomaterial.
- **Desempenho Mecânico:** Aos 28 dias, a modelagem matemática no ábaco de dosagem comprovou que o traço modificado equivalente (1:4,50) atingiu a meta de resistência estabelecida pelo concreto de Referência (42,30MPa), validando as correlações do Método IPT/EPUSP para a matriz nano-modificada.
- **Viabilidade Econômico e Ambiental:** O traço equivalente nano-modificado viabilizou uma redução líquida de 13,0 kg de cimento por metro cúbico e uma redução de 47,51 litros de água por metro cúbico. Sob o ponto de vista estritamente financeiro atual, a substituição gera um investimento adicional de R\$ 9,40/m³). Todavia, o indicador ambiental é positivo e sustentável, poupando 624 toneladas de cimento e evitando a emissão de 536,6 toneladas de CO₂ na atmosfera e poupando 2280 m³ de água anualmente.

Em suma, o estudo confirma que o emprego da nanossílica coloidal nesta dosagem se justifica exclusivamente pelo viés da sustentabilidade e da redução da pegada de carbono e do consumo de água, emitindo um alerta de que os efeitos reológicos positivos observados em produtos comerciais podem estar sendo influenciados por agentes químicos com efeito dispersante.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a continuidade desta linha de pesquisa e validação definitiva do composto, aponta-se como indispensável a execução das seguintes etapas:

Ensaio de Durabilidade ao Longo do Tempo: Realizar ensaios de carbonatação, penetração de cloretos e absorção de água para verificar se o

incremento do custo inicial se paga ao longo do ciclo de vida da estrutura através do ganho de durabilidade.

Avaliação Microestrutural de Matriz: Conduzir ensaios de Difração de Raios X (DRX) e Termogravimetria (TG) para comprovar se ocorre o real combate ao índice de vazios e a reação química efetiva da sílica com o hidróxido de cálcio residual da matriz.

Caracterização dos Insumos Aprofundadas: Executar análises químicas e de espectroscopia na emulsão comercial pura para isolar e identificar se há polímeros dispersantes e aditivos estabilizantes convencionais e seu teor.

ABSTRACT

TITLE: USE OF NANO-SILICA IN READY-MIXED CONCRETE

AUTHOR: Douglas Gonzatto dos Santos

The search for eco-efficiency in Civil Engineering drives research on nanomaterials aimed at reducing Portland cement consumption. This study evaluated the technical and economic feasibility of incorporating colloidal nanosilica in ready-mixed concrete using the IPT/EPUSP mix design method, with a fixed slump of 160 ± 20 mm. The investigation was carried out in two stages. The first, on mortars, defined the optimum active solids content of 0.50%, identifying that higher contents lead to a loss of mechanical strength and that the commercial suspension caused air entrapment. In the second stage, focusing on structural concrete, the mathematical modeling using the mix design chart determined that the modified equivalent mix proportion (1:4.50) achieved the Reference strength target (42.30 MPa), reducing cement consumption from 374.0 kg/m^3 to 361.0 kg/m^3 . This optimization generated a net saving of 13.0 kg of cement and a reduction of 47.51 liters of water per cubic meter. The financial analysis demonstrated that, from a strictly current economic standpoint, the replacement generates an additional net investment of R\$ 9.40/m³. However, the environmental indicator is highly sustainable, reducing water consumption by 2,280 m³ annually, saving 624 tons of cement, and preventing the emission of 536.6 tons of CO₂ into the atmosphere per year, justifying the employment of this technology through the perspective of decarbonization.

Keywords: Ready-mixed concrete. Colloidal nanosilica. Concrete mix design. Cost analysis. Eco-efficiency.

REFERÊNCIAS

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 11768-3**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland — Parte 3: Ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa fresca e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto fresco - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

CAMPOS NETO, T. F.; GEYER, A. L. B. Efeito da incorporação de nanossílica nas propriedades mecânicas e reológicas de matrizes cimentícias. **Revista Matéria**, v. 23, n. 4, 2018.

CAMPOS NETO, T. F.; GEYER, A. L. B. Effects of using chemical admixture with nanosilica in the consistency and mechanical strength of concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 371-385, abr. 2019.

GLEIZE, P. J. P. **Nanotecnologia aplicada ao concreto Portland**. Florianópolis: UFSC, 2011.

GONÇALVES, G. M.; LEONI, V. L.; FERREIRA, F. G. S. Efeito da nanosílica nas propriedades mecânica, física e térmica de concretos. **Principia**, João Pessoa, v. 60, n. 1, p. 50-69, jan./mar. 2023.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI: IPT, 1992. 349 p.

HUSEIEN, G. F.; SHAH, K. W.; SAM, A. R. M. Sustainability of nanomaterials in concrete industry: A review on performance and economics. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 112-125, 2019.

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Manual de comunicação científica**. Florianópolis: IFSC, 2016.

ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto**: Ciência e Tecnologia. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 2 v.

LONGO, M. A. et al. Atividade pozolânica de alta cinética da nanossílica coloidal e refinamento da zona de transição interfacial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 45-58, jan./mar. 2022.

NOGUEIRA, G. S. et al. Efeito nano-fíler e empacotamento microestrutural de matrizes de cimento CP II-F modificadas com nanopartículas. **Cerâmica**, v. 64, n. 372, p. 512-520, 2018.

ORIGINLAB CORPORATION. **OriginPro**: software de análise de dados e gráficos científicos. Versão 2026. Northampton, MA, EUA, 2026. Disponível em: <https://www.originlab.com/>. Acesso em: 15 mai. 2026.

ORTIZ, M. S. **Estudo de dispersão de nanossílica em suspensão coloidal e seu impacto reológico em argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SINGH, N. et al. 1 - Introduction to nanotechnology in concrete. In: SINGH, N. (ed.). **Nanotechnology in Eco-Efficient Construction**. Woodhead Publishing, p. 1-23, 2013.