



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Bianca de Córdova Caetani

Título: Análise do efeito de dióxido de silício micrométrico e nanométrico em propriedades mecânicas de uma areia cimentada

Florianópolis
2025

Bianca de Córdova Caetani

Título: Análise do efeito de dióxido de silício micrométrico e nanométrico em propriedades mecânicas de uma areia cimentada

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.(a) Helena Paula Nierwinski, Dr.(a)
Coorientador: Prof. Nilo Cesar Consoli, Dr.

Florianópolis

2025

Caetani, Bianca de Córdova

Análise do efeito de dióxido de silício micrométrico e nanométrico em propriedades mecânicas de uma areia cimentada / Bianca de Córdova Caetani ; orientadora, Helena Paula Nierwinski, coorientador, Nilo Cesar Consoli, 2025.

130 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Estabilização de solos. 3. Areia cimentada. 4. Nanopartículas. 5. Dióxido de silício. I. Nierwinski, Helena Paula. II. Consoli, Nilo Cesar. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Bianca de Córdova Caetani

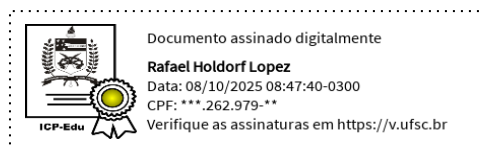
**Análise do efeito de dióxido de silício micrométrico e nanométrico em propriedades mecânicas
de uma areia cimentada**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 14 de agosto de 2025, pela
banca examinadora composta pelos seguintes membros:

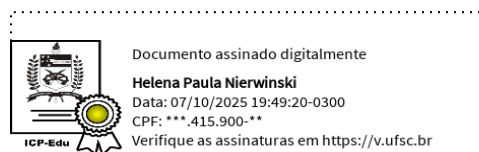
Prof.(a) Gracieli Dienstmann Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof.(a) Carina Silvani Dr.(a)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado
para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.



Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Prof.(a) Helena Paula Nierwinski Dra.
Orientadora

Florianópolis, 2025

Dedico este trabalho a minha mãe, que foi quem me incentivou a seguir seus passos e me tornar mestra. Obrigada por ser a professora da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Os meus anos de mestrado foram os anos mais desafiadores da minha vida. Foram muitos os dias em que tive que manter a disciplina mesmo exausta, moldar os corpos de prova em dias difíceis, conciliar com o trabalho e com mudanças na vida pessoal. Foi graças a uma rede de apoio tão especial, que eu mantive a motivação e hoje, com muito orgulho, entrego minha pesquisa, para a qual me dediquei tanto.

Início meus agradecimentos aos meus maiores incentivadores, minha família: minha mãe, Raquel, meu pai, Ricardo e minha irmã, Rúbia, minha maior parceira. Vocês estiveram comigo diariamente durante todo o processo, sempre interessados no andamento da pesquisa e me acolhendo nos momentos de estresse. Eu tenho a melhor família comigo, meu mais profundo obrigada por serem tão parceiros virando noites de escrita comigo para que não ficasse acordada sozinha. Obrigada por valorizarem minha profissão e se orgulharem tanto de mim.

Ao meu tio e engenheiro Mario Cesar Cantarelli e ao engenheiro Danilo Nereu Nunes, representantes da Ecografe Inteligência Energética, empresa que forneceu o dióxido de silício estudado nesta pesquisa. Obrigada por permitirem que eu testasse o material de vocês e por sempre estarem à disposição em prontidão quando precisei repor quantidades de material e tirar dúvidas. Sem essa parceria, este trabalho não teria atingido seus objetivos nem tratado de um material inovador.

Agradeço o apoio e incentivo de todos meus amigos que fiz durante a engenharia civil. Em especial, às minhas amigas da faculdade (hoje são as amigas da minha vida), algumas estão comigo desde 2017, outras surgiram um tempinho depois, mas todas me viram arriscar ao seguir direto da formatura para o mestrado e sempre demonstraram orgulho e me deram os melhores conselhos. Cris, Ju, Giu, Bonelli, Mari e Pami, as mensagens de vocês ajudam mais do que vocês possam imaginar. Obrigada por tornarem essa jornada mais leve e divertida e por me apoiarem sempre.

Ao Inácio Ribeiro, meu amigo que fiz nas aulas do mestrado e tive a sorte de manter contato, obrigada por ser minha duplinha nos trabalhos e por sempre tirar um tempo para me dar alguma dica na dissertação. Agradeço também ao Bruno Karasiak, que me auxiliou durante muitos ensaios no LMS.

A toda a equipe do LabTrans, que valoriza imensamente a pesquisa e proporcionam um cotidiano e ambiente de trabalho tão agradável e ao mesmo tempo uma gama de conhecimentos de altíssima qualidade e privilégio de participar de projetos de grande porte. Iniciei na empresa como bolsista de mestrado e meses depois fui efetivada como engenheira, é

um orgulho estreitar o título trabalhando para o Lab. Agradecimentos especiais vão para a equipe de engenharia, na qual criei laços não só profissionais, mas também pessoais. À Juliana V. Santos Albuquerque, minha chefe e amiga, sempre compreensiva e que me deu muito incentivo e à Laís Torreão, minha parceira no trabalho e que se tornou uma grande amiga, obrigada pelos conselhos, apoio e pela companhia diária.

Agradeço ao professor Naloan Coutinho Sampa, que foi meu orientador do TCC e o responsável por ter me instigado a seguir para o mestrado logo após a formatura. Obrigada por sempre ser tão acessível durante a execução dos meus ensaios no LMS, tirar minhas dúvidas e aconselhar em momentos de estresse durante a pesquisa.

Estendo meus agradecimentos ao LDRX e LSCnM da UFSC, representados pelo prof. Carlos E. M. Campos, que me deu um apoio imenso na moagem do dióxido de silício, nas análises dos resultados do DRX e se dispôs a ler toda minha dissertação e dar suas contribuições. Obrigada por todo o conhecimento valioso compartilhado e por me deixar usar os equipamentos dos laboratórios da Física.

Agradeço ao professor Nilo Consoli, por aceitar ser meu coorientador e pelas suas dicas e apontamentos únicos. Uma honra ter um dos maiores nomes da estabilização de solos no meu trabalho.

Meu muito obrigada às professoras Gracieli Dienstmann e Carina Silvani, por aceitarem compor esta banca de peso. Um agradecimento especial à prof. Graci também pelas aulas incríveis ministradas durante o mestrado, dicas, escrita de artigos e acolhimento durante o processo.

Agradeço imensamente a minha orientadora, prof. Helena Paula Nierwinski, por seu trabalho de excelência tanto na disciplina de Percolação e Adensamento, quanto sendo minha mentora. Essa dissertação pertence a nós duas, obrigada por todo o apoio e por compartilhar todo teu conhecimento comigo, foi um prazer trabalhar contigo, Helena.

Por fim, agradeço à UFSC, à equipe do PPGEC e à CAPES, da qual recebi bolsa de auxílio durante todo o processo, por me proporcionarem o acesso a um dos melhores cursos de Pós Graduação em Engenharia Civil do país. O conhecimento que adquiri e o networking que pude criar foram essenciais para eu atingir meus objetivos e moldaram a profissional que me tornei. Fico lisonjeada de poder contribuir com minha pesquisa para a engenharia geotécnica e nosso país.

RESUMO

O desenvolvimento de novas tecnologias para estabilização de solos busca reduzir o consumo de cimento e tornar a técnica mais sustentável. Nesse contexto, a incorporação de partículas de pequenas dimensões tem se destacado por sua alta área de superfície, que permite tanto o preenchimento dos poros e a melhoria da compactação quanto a ocorrência de reações pozolânicas com os produtos da hidratação do cimento. Neste trabalho foi investigada a inserção de um material alternativo na mistura de uma areia com cimento: dióxido de silício em dois tamanhos, micrométrico e nanométrico, com o objetivo principal de avaliar o efeito no comportamento mecânico da mistura. Para a obtenção do dióxido de silício nanométrico, o pó em tamanho micrométrico passou por uma moagem mecânica. Obtidos os dois tamanhos de dióxido de silício, foi realizada uma série de ensaios de resistência à compressão simples, à tração e à compressão triaxial na mistura de areia com cimento substituindo 1%, 3% e 5% do peso seco do solo e também em misturas variando, além do teor de cimento, o de dióxido de silício substituindo 5%, 10% e 20% do peso do cimento. Complementarmente, foram realizadas microscopias de varredura eletrônica para caracterização morfológica das misturas curadas. Os resultados mostraram que a resistência à compressão simples cresceu com o aumento do teor de cimento e atingiu maiores resistências nas misturas contendo dióxido de silício. Os teores de cimento e de dióxido de silício observados nos tamanhos micro e nanométrico que proporcionaram os maiores ganhos de resistência foram de, respectivamente, 5% e 10% para a resistência à compressão simples. Os valores de resistência à tração atingiram de 11% a 17% dos valores de resistência à compressão simples para os três tipos de misturas. Observando os resultados dos ensaios triaxiais drenados, para as três misturas, a resistência ao cisalhamento cresceu com o aumento da tensão confinante. As misturas de apenas areia e cimento e de areia, cimento e dióxido de silício micrométrico, apresentaram comportamento com pico bem definido. Já a mistura de areia, cimento e dióxido de silício nanométrico, mostrou-se mais dúctil, sem tendência de formação de pico. Em todos os casos as misturas tiveram deformação volumétrica caracterizada por comportamento compressivo nas deformações axiais iniciais e depois dilatante, sendo que a adição de dióxido de silício nanométrico reduziu o potencial expansivo e tornou a mistura mais dúctil. Observando as imagens MEV, foi possível identificar a formação de produtos de hidratação e uma matriz mais densa nas misturas com dióxido de silício nos dois tamanhos. A adição de dióxido de silício é inédita, ainda que sejam necessários estudos mais aprofundados, mostrou-se um material promissor para contribuir na redução do consumo de cimento na estabilização de solos.

Palavras-chave: estabilização de solos; areia cimentada; nanopartículas; dióxido de silício.

ABSTRACT

The study of new technologies to be implemented in soil stabilization seeks to reduce cement consumption in order to make the technique more sustainable. In this context, the incorporation of small particles has stood out for its high surface area, which allows both pore filling and improved compaction, as well as the occurrence of pozzolanic reactions with cement hydration products. This study investigated the insertion of an alternative material into a sand-cement mixture: silicon dioxide in two sizes, micrometric and nanometric, with the main objective of evaluating the effect on the mechanical behavior of the mixture. To obtain nanometric silicon dioxide, the micrometric powder underwent mechanical grinding. Once the two sizes of silicon dioxide were obtained, a series of simple compressive strength, tensile strength, and triaxial compression tests were performed on the sand-cement mixture, replacing 1%, 3%, and 5% of the dry weight of the soil, as well as on mixtures varying not only in cement content but also in silicon dioxide content, replacing 5%, 10%, and 20% of the weight of the cement. In addition, scanning electron microscopy was performed for morphological characterization of the cured mixtures. The results showed that the simple compressive strength increased with the increase in cement content and reached higher strengths in mixtures containing silicon dioxide. The cement and silicon dioxide contents observed in the micro and nanometric sizes that provided the highest strength gains were 5% and 10%, respectively, for simple compressive strength. Tensile strength values reached 11% to 17% of the simple compressive strength values for the three types of mixtures. Observing the results of the drained triaxial tests for the three mixtures, the shear strength increased with the increase in confining stress. The mixtures of sand and cement only and sand, cement, and micrometric silicon dioxide showed well-defined peak behavior. The mixture of sand, cement, and nanometric silicon dioxide proved to be more ductile, with no tendency to form a peak. In all cases, the mixtures underwent volumetric deformation characterized by compressive behavior in the initial axial deformations and then dilating behavior, with the addition of nanometric silicon dioxide reducing the expansive potential and making the mixture more ductile. Observing the SEM images, it was possible to identify the formation of hydration products and a denser matrix in the mixtures with silicon dioxide in both sizes. The addition of silicon dioxide is unprecedented, although further studies are needed, it proved to be a promising material to contribute to the reduction of cement consumption in soil stabilization.

Keywords: soil stabilization; cemented sand; nanoparticles; silicon dioxide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples para diferentes solos estabilizados com cimento.....	28
Figura 2 – Variação da resistência média à compressão simples com o teor de cimento	29
Figura 3 – Efeito do teor de cimento no valor da resistência à compressão simples .	30
Figura 4 – Gráficos de compressão (a) e tração (b) em função do teor de cimento..	31
Figura 5 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento para solo arenoso basáltico	31
Figura 6 – Resultados de q_t em relação à q_u para solo arenoso basáltico	32
Figura 7 – Relação de q_t com o teor de cimento adicionado em solo arenoso basáltico	32
Figura 8 – Resistência à compressão simples da areia com 5% de cimento em relação ao teor de caulim.....	33
Figura 9 – Relação tensão-deformação para um solo com diferentes teores de cimento	34
Figura 10 – Tensão-deformação axial e deformação volumétrica das amostras com 5,06% de cimento	35
Figura 11 – Curvas de tensão-deformação e variação volumétrica do ensaio triaxial para $E_3 = 0,8$ e $C=5\%$	37
Figura 12 – Envoltórias para $E_3 = 0,8$ e $C=5\%$	37
Figura 13 – Tensão-deformação para areia estabilizada com 6% de cimento	38
Figura 14 – Tensão desviadora e deformação volumétrica para adição de 5% de cimento nas tensões confinantes de 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa	39
Figura 15 – Categorias de nanomateriais	43
Figura 16 – Folha de grafeno e nanotubo de carbono. a) SWCNT e b) MWCNT.....	43
Figura 17 – Resultados dos ensaios de compressão simples. a) apenas água. b) com surfactante.....	45
Figura 18 – Resistência à compressão simples para mistura de <i>loess</i> com nanoargila	47
Figura 19 – Esquemas bidimensionais para a estrutura do (a) dióxido de silício cristalino e (b) dióxido de silício não cristalino (amorfo).	48
Figura 20 – Influência da nanosílica sobre a temperatura de hidratação	49

Figura 21 – Resistência à compressão simples em função da adição de nanosílica ..	50
Figura 22 – Curvas tensão-deformação dos ensaios triaxiais para 5% de cimento com 10% e 20% de adição de nanosílica em areia	51
Figura 23 – Curvas tensão-deformação das amostras com adição de 10% (a) e 15% (b) de cimento	52
Figura 24 – Resistência à compressão simples para os teores de nanosílica em função do período de cura	53
Figura 25 – Efeito da microsílica na resistência à compressão simples com adição de 2% de cal.	54
Figura 26 – Efeito da relação microsílica/cimento na resistência à compressão simples	55
Figura 27 – Resistência à compressão da pasta de cimento em função dos teores de nanosílica e microsílica em 7 dias de cura.	57
Figura 28 – Areia no local de coleta.....	59
Figura 29 – Evolução média da resistência à compressão dos tipos de cimento.	60
Figura 30 – Amostra do dióxido de silício puro.....	61
Figura 31 – Moinho Vibratório de Bolas de Alta Energia Modelo 8000D 230V/50hz	62
Figura 32 – Pote de aço inox utilizado para a moagem do SiO_2	63
Figura 33 – Foto das amostras obtidas da moagem no pote/esferas de aço inox.	64
Figura 34 – Ensaios de caracterização da areia: a) análise granulométrica. b) massa específica real dos grãos.	65
Figura 35 – Preparação das amostras para ensaio DRX usando porta-amostras de Si “zerobackground”.....	66
Figura 36 – Amostras prontas para o ensaio. a) alocadas na torre de porta-amostras e b) torre alocada no difratômetro de raios X.....	67
Figura 37 – Programa experimental dos ensaios de compressão simples.....	71
Figura 38 – Programa experimental dos ensaios de tração por compressão diametral.	72
Figura 39 – Programa experimental dos ensaios de compressão triaxial.....	73
Figura 40 – Mistura do cimento com a) MS e b) NS	74
Figura 41 – a) mistura do cimento + aditivo com a areia e b) mistura final com água	74
Figura 42 – Medidas do corpo de prova de a) massa; b) diâmetro e c) altura.	75

Figura 43 – Corpos de prova em imersão por 24h	76
Figura 44 – Plano de ruptura do corpo de prova	77
Figura 45 – Ensaio de compressão diametral: a) visão frontal e b) visão lateral	78
Figura 46 – Equipamento utilizado para os ensaios triaxiais	79
Figura 47 - Curva granulométrica da areia.....	81
Figura 48 - Curva de compactação da areia	82
Figura 49 – Comparação da curva granulométrica dos dióxidos de silício e cimento	83
Figura 50 – Padrões de difração de raios X das amostras moídas com conjunto (pote e esferas) de aço inox. Traços pretos representam o padrão de DRX da amostra de partida (mMS). Traços coloridos representam padrões das amostras moídas por 5 min (vermelho), 30 min (verde) e 45 min (azul). Os símbolos (barras verticais) representam as posições dos picos de Bragg das fases cristalinas do α -quartzo (cinza) e do α -Fe (laranja).....	84
Figura 51 – Resistência à compressão simples da mistura de areia e cimento	87
Figura 52 - Resistência à compressão simples da mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício micrométrico	89
Figura 53 - Resistência à compressão simples da mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício nanométrico.....	92
Figura 54 - Comparação dos resultados de resistência à compressão simples dos três tipos de mistura – cimento real.....	94
Figura 55 - Resistência à tração da mistura de areia e cimento	96
Figura 56 - Resistência à tração da mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício micrométrico	98
Figura 57 - Resistência à tração da mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício nanométrico.....	100
Figura 58 - Comparação dos resultados de resistência à tração dos três tipos de mistura – cimento real	101
Figura 59 – Tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial - mistura de areia com 5% de cimento	103
Figura 60 – Trajetórias de tensões efetivas - mistura de areia com 5% de cimento	104
Figura 61 – Envoltória de ruptura e círculos de Mohr - mistura de areia com 5% de cimento	105
Figura 62 – Tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial da mistura de areia com 5% de cimento e 10% de MS	107

Figura 63 – Trajetórias de tensões efetivas - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de MS	108
Figura 64 – Envoltória de ruptura e círculos de Mohr - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de MS.....	109
Figura 65 – Tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de dióxido de silício nanométrico.....	111
Figura 66 – Trajetórias de tensões efetivas - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de NS.....	112
Figura 67 – Envoltória de ruptura e círculos de Mohr - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de NS	113
Figura 68 – Comparação das curvas tensão-deformação entre as três misturas – TC 50 kPa.....	115
Figura 69 – Comparação das curvas tensão-deformação entre as três misturas – TC 100 kPa	116
Figura 70 – Comparação das curvas tensão-deformação entre as três misturas – TC 200 kPa	117
Figura 71 – Imagens MEV da mistura de areia e cimento nas ampliações de a) 30x; b) 100x, c) 2000x; d) 10000x.....	118
Figura 72 – Imagens MEV da mistura de areia e cimento com adição de MS nas ampliações de a) 30x; b) 100x, c) 2000x; d) 10000x.	120
Figura 73 – Imagens MEV da mistura de areia e cimento com adição de NS nas ampliações de a) 30x; b) 100x, c) 2000x; d) 10000x.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dosagem de cimento recomendada para cada tipo de solo	26
Tabela 2 – Propriedades químicas do cimento CP-ARI Itambé.....	60
Tabela 3 – Propriedades físicas do cimento CP-ARI Itambé.....	60
Tabela 4 – Massa das amostras coletadas por período de moagem.	63
Tabela 5 – Ensaios a serem realizados	64
Tabela 6 – Variáveis controladas	68
Tabela 7 – Variáveis fixadas	68
Tabela 8 – Variáveis de resposta.....	69
Tabela 9 – Variáveis de ruído.....	69
Tabela 10 – Parâmetro B de Skempton para cada mistura.....	80
Tabela 11 – Comparação entre areia de Florianópolis e areia de Osório – Baseado em Cruz (2008).....	82
Tabela 12 – Resumo da análise Rietveld dos resultados obtidos por difração de raios X. Global R-Values: Rwp 9.98 e GOF 6.77	85
Tabela 13 – Resultado do ensaio de compressão simples para a mistura de areia e cimento	86
Tabela 14 - Resultado do ensaio de compressão simples para a mistura de areia e cimento com dióxido de silício micrométrico	88
Tabela 15 - Resultado do ensaio de compressão simples para a mistura de areia e cimento com dióxido de silício nanométrico.....	90
Tabela 16 - Teor real de cimento com SiO ₂	93
Tabela 17 - Resultado do ensaio de compressão diametral para a mistura de areia e cimento	95
Tabela 18 - Resultado do ensaio de compressão diametral para a mistura de areia e cimento com dióxido de silício micrométrico	96
Tabela 19 - Resultado do ensaio de compressão diametral para a mistura de areia e cimento com dióxido de silício nanométrico.....	98
Tabela 20 – Comparação dos resultados dos ensaios triaxiais.....	114

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Brunauer-Emmett-Teller
BPR	Ball to powder ratio
CC	Coeficiente de curvatura
CID	Ensaio triaxiais consolidados isotropicamente drenados
CNT	Nanotubos de Carbono
CP	Corpo de Prova
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CSA	Cimento Sulfoaluminato de Cálcio
CU	Coeficiente de uniformidade
D10	Diâmetro do grão correspondente a 10 % mais fino
D30	Diâmetro do grão correspondente a 30 % mais fino
D60	Diâmetro do grão correspondente a 60 % mais fino
DRX	Difração de Raios X
LDRX	Laboratório Multiusuário de Difração de Raios X
LL	Limite de Liquidez
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
LP	Limite de Plasticidade
LSCnM	Laboratório de Síntese e Caracterização de nanoMateriais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MS	Dióxido de Silício no tamanho micrométrico
MWCNT	Multi-Wall Carbon Nanotubes
NS	Dióxido de Silício no tamanho nanométrico
OPC	Cimento Portland Comum
RCS	Resistência à Compressão Simples
RTCD	Resistência à tração por compressão diametral
SF/C	Relação Microsílica/Cimento
SWCNT	Single-Wall Carbon Nanotube
UCS	Uniaxial Compressive Strength
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Intercepto coesivo
α_f	Ângulo de atrito efetivo
B	Parâmetro de poropressão de Skempton
c	Coesão
c'	Coesão efetiva
C_i	Teor de cimento
e	Índice de vazios
p'	Tensão média efetiva
q	Tensão de cisalhamento
q_u	Resistência à Compressão Simples
q_t	Resistência à Tração por Compressão Diametral
Si	Silício
SiO_2	Dióxido de Silício / Sílica
w	Teor de umidade
τ_f	Tensão cisalhante na ruptura
σ'_f	Tensão normal efetiva na ruptura
σ_d	Tensão desviadora
σ_1	Tensão máxima de resistência
σ_3	Tensão confinante
ε_a	Deformação axial
ε_v	Deformação volumétrica
Δu	Excesso de poropressão.
ϕ	Ângulo de atrito interno
ϕ'	Ângulo de atrito interno efetivo
γ_d	Peso específico aparente seco
G_s	Densidade Real dos Grãos
ρ_s	Massa Específica dos Grãos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo geral.....	22
1.1.2	Objetivos específicos.....	22
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	24
2.1.1	Estabilização química pela adição de cimento	24
2.1.1.1	<i>Reações de cimentação.....</i>	<i>25</i>
2.1.2	Comportamento mecânico de areias cimentadas	27
2.1.2.1	<i>Resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral</i>	<i>27</i>
2.1.2.2	<i>Relação tensão-deformação</i>	<i>34</i>
2.1.3	Estimativa dos parâmetros de resistência de areias cimentadas.....	40
2.2	INFLUÊNCIA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NAS REAÇÕES CIMENTÍCIAS	41
2.2.1	Nanomateriais usados na estabilização de solos	43
2.2.1.1	<i>Nanotubos de carbono.....</i>	<i>43</i>
2.2.1.2	<i>Nanoargila.....</i>	<i>46</i>
2.2.1.3	<i>Nanosílica.....</i>	<i>47</i>
2.2.2	Microsílica usada na estabilização de solos	53
2.2.3	Comparação da aplicação de microsílica e nanosílica	56
2.2.4	Comentários finais.....	58
3	MATERIAIS, MÉTODOS E PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
3.1	MATERIAIS	59
3.1.1	Areia.....	59
3.1.2	Cimento Portland de alta resistência inicial CP V -ARI.....	59
3.1.3	Água destilada.....	61
3.1.4	Dióxido de Silício no tamanho micrométrico (MS)	61
3.1.5	Dióxido de Silício no tamanho nanométrico (NS).....	61
3.1.5.1	<i>Moagem e caracterização do dióxido de silício.....</i>	<i>62</i>
3.2	MÉTODOS	64
3.2.1	Caracterização física dos materiais.....	65

3.2.2	Caracterização (micro)estrutural das partículas de dióxido de silício	66
3.2.2.1	<i>Ensaio de difração de raios X (DRX)</i>	66
3.2.2.1	<i>Análise Rietveld</i>	67
3.2.3	Análise da área superficial do dióxido de silício	68
3.2.4	Ensaio de resistência	68
3.2.4.1	<i>Delineamento experimental</i>	68
3.2.4.2	<i>Moldagem dos corpos de prova</i>	73
3.2.4.3	<i>Ensaio de resistência à compressão simples</i>	77
3.2.4.4	<i>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral</i>	78
3.2.4.5	<i>Ensaio de compressão triaxial</i>	79
3.2.5	Caracterização morfológica das misturas	80
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	81
4.1.1	Areia	81
4.1.2	Cimento CP V ARI e Dióxido de silício	83
4.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	85
4.2.1	Mistura de areia e cimento	86
4.2.2	Mistura de areia, cimento e dióxido de silício micrométrico	87
4.2.3	Mistura de areia, cimento e dióxido de silício nanométrico	90
4.2.4	Comparação do desempenho das três misturas	92
4.2.5	Análise extra – adição MS substituindo o solo	94
4.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	94
4.3.1	Mistura de areia e cimento	95
4.3.2	Mistura de areia, cimento e dióxido de silício micrométrico	96
4.3.3	Mistura de areia, cimento e dióxido de silício nanométrico	98
4.3.4	Comparação do desempenho das três misturas	100
4.4	ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL	102
4.4.1	Mistura de areia e cimento	102
4.4.1.1	<i>Análise do comportamento de tensão-deformação</i>	102
4.4.1.2	<i>Parâmetros de resistência de pico</i>	104
4.4.1.2.1	<i>Estimativa método Consoli (2014)</i>	105
4.4.2	Mistura de areia, cimento e dióxido de silício micrométrico	106
4.4.2.1	<i>Análise do comportamento de tensão-deformação</i>	106
4.4.2.2	<i>Parâmetros de resistência de pico</i>	108

4.4.2.2.1	Estimativa método Consoli (2014)	109
4.4.3	Mistura de areia, cimento e dióxido de silício nanométrico	110
4.4.3.1	<i>Análise do comportamento de tensão-deformação</i>	<i>110</i>
4.4.3.2	<i>Parâmetros de resistência</i>	<i>112</i>
4.4.3.2.1	Estimativa método Consoli	113
4.4.4	Comparação do desempenho das três misturas.....	114
4.5	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS MISTURAS	118
4.5.1	Amostra 1 (5% de cimento – CP 21).....	118
4.5.2	Amostra 2 (5% de cimento e 10% de MS – CP 37).....	119
4.5.3	Amostra 3 (5% de cimento e 10% de NS – CP 62).....	120
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122
5.1	CONCLUSÕES	122
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade, cada vez mais central nos debates da engenharia, tem evidenciado as limitações ambientais das técnicas tradicionais de melhoria do solo que utilizam materiais cimentícios. A produção extensiva de cimento Portland, por exemplo, demanda alto consumo de energia e gera poluição ambiental. He *et al.* (2020) apontaram que são lançadas na atmosfera cerca de 0,8 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento produzido e, segundo o último Inventário de Gases do Efeito Estufa (2021), a produção de cimento é responsável por aproximadamente 7% das emissões totais de gases de efeito estufa causadas pelo homem. Diante da necessidade de reduzir esses impactos, busca-se o uso de aditivos minerais em substituição parcial ao cimento. Entre as abordagens mais promissoras nesse contexto, destaca-se a aplicação de materiais com partículas de pequeno tamanho, como micro e nanopartículas.

A nanotecnologia é foco das pesquisas de vários campos de estudo durante as últimas décadas, uma vez que por meio da transformação de materiais na escala nanométrica, é possível alcançar propriedades aprimoradas. As nanopartículas, definidas como materiais que apresentam ao menos uma dimensão inferior a 100 nm (NSTC, 2007), têm sido amplamente estudadas na engenharia civil, especialmente na melhoria do desempenho do concreto (Mendes, 2016; P. P. *et al.*, 2021) e aplicações de diferentes nanopartículas na pavimentação (Manfro, 2022, Wolfart, 2024). Na engenharia geotécnica, pesquisas pioneiras como as de Correia *et al.* (2015), Tabarsa *et al.* (2018), Abbasi *et al.* (2018), Choobbasti, Vafaei e Kutanaei (2018) e Liu *et al.* (2023) demonstraram que a adição de nanopartículas pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas de diversos tipos de solo.

Uma das características mais atrativas das nanopartículas é sua elevada área de superfície, que favorece o preenchimento dos vazios entre grãos e densifica a matriz do solo, além de potencializar reações pozolânicas (Wang *et al.*, 2020). Como resultado, é possível obter melhorias mecânicas com baixos teores de aditivo (Karumanchi *et al.*, 2020), o que contribui para a redução do consumo de cimento e consequentemente a diminuição da emissão de gases do efeito estufa.

A nanosílica, que apresenta grande quantidade de íons de silício em sua estrutura, permitindo reações pozolânicas, é um nanomaterial bastante utilizado na estabilização de solos (Bahmani *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2019). Choobbasti, Vafaei e Soleimani Kutanaei (2018) obtiveram um incremento de 40% na resistência ao adicionar 10% de nanosílica em uma mistura de areia com 5% de cimento. Complementarmente, comparando tamanhos diferente de nanosílicas, Aksu *et al.* (2023) obtiveram resistências para a nanosílica de 15 nm 32% maiores

que a nanosílica de 60 nm, evidenciando que o tamanho e a finura do material influenciam diretamente no incremento da resistência.

Entre os aditivos pesquisados na literatura, a microsílica, mais conhecida como sílica ativa, destaca-se como um subproduto industrial amplamente disponível, pois cerca de 2,5 milhões de toneladas são produzidas anualmente em escala global (Lewis, 2018). Apesar de não ser considerada um estabilizante tradicional, sua aplicação na estabilização de solos tem sido alvo de diversos estudos (Phanikumar; M; E, 2020; Singh; Kumar Dash; Samantaray, 2020) evidenciando resultados positivos na melhoria da resistência e na redução da permeabilidade. Rahman e Ahmed (2017) introduziram 1,2% de microsílica em uma areia tratada com 6% de cimento e observaram um incremento de 8% na resistência.

Desta forma, é interessante o comparativo dos efeitos de partículas com diferentes granulometrias, como a nanosílica e a microsílica, sobre o comportamento de solos cimentados. Ainda que a nanosílica apresente desempenho potencialmente superior, seu alto custo e a dificuldade de obtenção em larga escala, especialmente no Brasil, limitam sua aplicação prática em projetos de engenharia geotécnica. Em decorrência disso, optou-se neste trabalho pela utilização de dióxido de silício em duas escalas: micrométrica (comercial) e nanométrica (produzida por moagem em laboratório), como alternativa viável, de menor custo e mais abundante.

Esta pesquisa visa avaliar a influência da incorporação de partículas de pequeno tamanho, tanto micro quanto nanométricas, na estabilização de uma areia cimentada, com foco na redução do teor de cimento necessário. Busca-se verificar se tais partículas são capazes de melhorar o desempenho mecânico do solo-cimento por mecanismos físicos (como o aumento da área de contato e o empacotamento de partículas) e/ou por reações químicas com o cimento. Além disso, o uso do dióxido de silício moído surge como uma proposta inovadora, uma vez que ainda não há registros, no escopo da literatura pesquisada, de sua aplicação direta no contexto de estabilização de solos.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da adição de dióxido de silício nos tamanhos micro e nanométrico no comportamento mecânico de uma areia cimentada.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Verificar o comportamento mecânico das misturas de areia cimentada com adição de dióxido de silício micrométrico e nanométrico em relação às misturas sem aditivos por meio da análise dos resultados de ensaios de compressão simples, tração e triaxial;
- Obter dióxido de silício em tamanho nano por meio da moagem mecânica (mecanoquímica) em moinho de alta energia;
- Avaliar o efeito da variação de porcentagem de dióxido de silício em tamanhos micro e nanométrico adicionados à mistura areia-cimento;
- Comparar o comportamento mecânico das misturas estabilizadas por meio da análise dos resultados de ensaios de compressão simples e tração;
- Comparar parâmetros de resistência das misturas estabilizadas obtidos por meio de formulações empíricas e ensaios triaxiais.
- Avaliar os compósitos gerados no processo de reação da areia com cimento e dióxido de silício nos tamanhos micrométrico e nanométrico por meio da análise dos resultados da microscopia eletrônica de varredura.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A estrutura deste trabalho foi organizada em 5 capítulos, discriminados como segue:

- Capítulo 1: contempla a introdução, em que é apresentado o contexto geral da problemática ambiental da produção de cimento, técnica amplamente usada na estabilização de solos e a busca por novas tecnologias mais sustentáveis e de melhor custo-benefício, como a inserção de materiais de pequenos tamanhos, além da justificativa, dos objetivos e da organização deste trabalho.

- Capítulo 2: é apresentada a revisão bibliográfica, que traz conceitos abordados em trabalhos disponíveis na literatura a respeito da estabilização de solos com o uso de cimento, da nanotecnologia e aplicação da microsíllica e da nanosíllica, com foco na melhora do comportamento mecânico. Tais conceitos são essenciais para o entendimento e discussão dos resultados do presente trabalho e dão embasamento para a investigação do uso do dióxido de silício em tamanho micro e nano.

- Capítulo 3: consiste na metodologia adotada, descreve de forma sucinta os materiais utilizados e obtenção e os procedimentos para a realização dos ensaios de laboratório de caracterização e de resistência à compressão não confinada, à tração por compressão diametral e à compressão triaxial.

- Capítulo 4: apresenta e discute resultados das análises laboratoriais feitas para os materiais micrométricos e nanométricos e as análise da influência da adição do dióxido de silício em tamanho micro e nano no comportamento mecânico de misturas de areia e cimento.

- Capítulo 5: apresenta as considerações finais e as principais conclusões do trabalho. No final do capítulo, são enumeradas as sugestões para os trabalhos futuros.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Quando um solo não apresenta as mínimas propriedades de engenharia requeridas, relacionadas à resistência ao cisalhamento e à compressão, à deformação, permeabilidade e durabilidade, ele é considerado de baixa capacidade de suporte e o engenheiro geotécnico deve buscar alternativas para contornar este problema. A estabilização de solos trata da modificação das propriedades originais do solo, a fim de melhorar seu desempenho utilizando diferentes técnicas e tecnologias. Desta forma, é possível reduzir a compressibilidade, aumentar a resistência para melhorar a estabilidade, capacidade de suporte e durabilidade, reduzir (restringir o fluxo de água) a permeabilidade ou aumentar (permitir drenagem) e diminuir o potencial de liquefação dos solos (Nicholson, 2015).

Ingles e Metcalf (1972) dividem a estabilização de solos em três principais categorias, dependendo do modo de modificação utilizado para o melhoramento do solo. São elas:

- Estabilização mecânica: modificação pela manipulação dos solos, diminuindo o índice de vazios pela compactação ou estabilização granulométrica;
- Estabilização química: alteração das propriedades do solo por meio de reação química com a adição de um material com melhores características;
- Estabilização física: alteração das propriedades do solo por meio de técnicas mecânicas, térmicas ou elétricas.

No próximo item a estabilização química pela adição de cimento será detalhada, uma vez que será utilizada nesta pesquisa.

2.1.1 Estabilização química pela adição de cimento

Ingles e Metcalf (1972) apontam que, para areias, os estabilizadores recomendados são: cimento, para proporcionar maior densidade e coesão; materiais betuminosos, para coesão e; adição de argila, para maior estabilidade mecânica.

O Cimento Portland é um dos materiais enrijecedores de solo mais usados devido a sua alta disponibilidade no mercado a um preço acessível. É definido como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, ao qual se adiciona a quantidade necessária de sulfato de cálcio nos teores estabelecidos pela NBR 16697:2018.

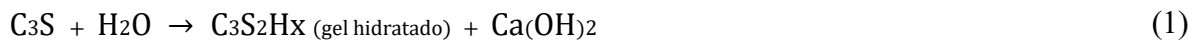
Muito aplicado na estabilização de solo para a construção de estradas, o solo-cimento não se restringe à pavimentação, sendo bastante usado na proteção e construção de taludes, reforço de aterros, contenções, prevenção da liquefação de areias, construção civil, construção de túneis e em fundações, entre outros (Ingles e Metcalf, 1972; Bergado *et al.*, 1996).

Conforme apontam Ingles e Metcalf (1972), com a adição de cimento ao solo, diversas propriedades se alteram: a resistência e capacidade de suporte aumentam, durabilidade nos testes de simulação de chuva e seca, por meio de ciclos secagem/umedecimento aumenta, permeabilidade diminui em solos granulares e aumenta em solos argilosos.

2.1.1.1 Reações de cimentação

É importante destacar as reações químicas (de hidratação e pozolânicas) que ocorrem durante o processo de cimentação. A hidratação do cimento ocorre com a adição de água e produz silicato de cálcio hidratado (CSH), aluminato de cálcio hidratado (CAH) e cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando uma matriz mais rígida e forte. Moh (1965) estudou as reações dos minerais do solo com o cimento.

Bergado *et al.* (1996) também apresentaram as Equações (1) a (4), relativas às reações da estabilização solo-cimento. As reações primárias de hidratação com o silicato tricálcico (C3S) são apresentadas na Equação (1) e a hidrólise com a dissolução dos íons de cálcio excedentes da hidratação na Equação (2). As Equações (3) e (4) exibem as reações pozolânicas com a sílica e a alumina em estado amorfo presentes no solo, resultando na formação de silicatos de cálcio hidratado (CSH) e aluminatos de cálcio hidratado (CAH).



Uma vez que nos solos granulares não há argila nem pozolanas, a cimentação ocorre pelos produtos da hidratação e hidrólise do cimento. Isso promove a cimentação dos grãos nos pontos de contato, sendo essa união mais eficaz quando a distribuição granulométrica do solo é melhor, o índice de vazios é menor e o contato entre as partículas é maior. Por outro lado, nos solos argilosos ou naqueles que possuem pozolanas, naturalmente ou por aditivos, a cimentação

ocorre por meio de reações primárias e secundárias, devido à presença de sílica e alumina, as quais são fundamentais para obtenção de alta resistência na mistura (Bergado *et al.*, 1996).

Essas reações são fundamentais para o desenvolvimento das propriedades mecânicas desejadas no solo estabilizado, como o aumento da resistência à compressão e ao cisalhamento, a redução da plasticidade e da permeabilidade, e a melhoria da durabilidade ao longo do tempo. Além disso, a presença de materiais pozolânicos, como a nanosílica, pode intensificar essas reações secundárias, consumindo a cal livre e promovendo a formação adicional de CSH, o que resulta em uma microestrutura mais densa e com melhores características de resistência e estabilidade a longo prazo.

A Tabela 1 apresenta valores frequentemente indicados para a estabilização com cimento em função do tipo de solo. Pode-se observar que os valores recomendados variam de 0,5 a 15%, sendo que os menores percentuais são indicados para materiais granulares e os valores mais altos para solos argilosos.

Tabela 1 – Dosagem de cimento recomendada para cada tipo de solo

Tipo de solo	Porcentagem de cimento
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argila-arenosa	4 a 6
Argila-siltosa	6 a 8
Argilas	8 a 15

Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1972)

Solos tratados com cimento podem ser suscetíveis à retração e consequentemente surgimento de fissuras, uma vez que com a hidratação há a perda de umidade. É possível evitar a retração com certos cuidados como a limitação da plasticidade do solo, que pode ser feita pela pulverização do solo, mistura e cura adequada (Nicholson, 2015).

Os ensaios mais adequados para verificação da eficácia da estabilização utilizando o cimento são resistência à compressão não confinada, ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) e resistência a ciclos de congelamento/descongelamento e secagem/umedecimento.

A estabilização de solos pela adição de cimento, rotineiramente é associada a um processo de compactação, conforme apresentado pela NBR 12023 (ABNT, 2012). Esta normativa estabelece que o teor de cimento deve ser dado em função da granulometria do solo

(A1, A2, A3 ou A4 da norma ASTM D 3282). São recomendadas, portanto, as porcentagens de 5 a 10% de cimento para execução do ensaio.

2.1.2 Comportamento mecânico de areias cimentadas

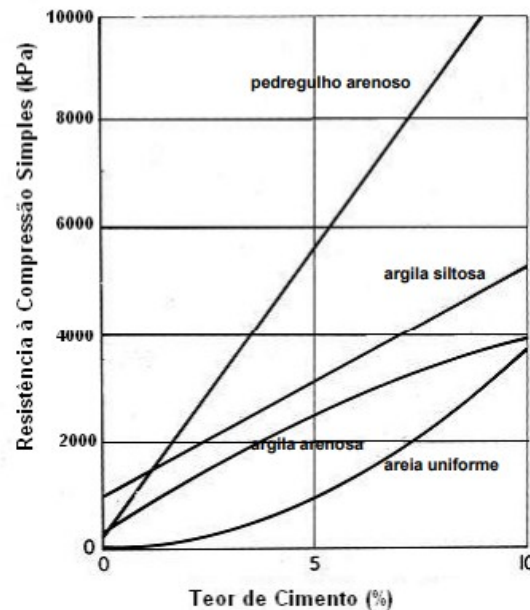
O estudo do comportamento de solos cimentados é complexo e engloba a resistência à compressão, à tração e o comportamento de deformação e rigidez. É de extrema importância também encontrar a relação entre resistência à compressão e tração (Floss, 2012).

Conforme exposto por Clough *et al.* (1981), a quantidade de agente cimentício, a densidade da areia, a tensão confinante e a distribuição granulométrica influenciam o comportamento de areias cimentadas. Em uma sequência de testes realizados em areia naturalmente cimentada e artificialmente cimentada, Clough *et al.* (1981) observaram que os efeitos da cimentação nos parâmetros de resistência e deformação das areias se tratam do aparecimento de um intercepto coesivo e uma resistência à tração, não alterando de forma significativa o ângulo de atrito, porém aumentando a rigidez. Em relação a outros parâmetros, destacam o aumento da densidade das areias artificialmente cimentadas.

2.1.2.1 Resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral

A resistência à compressão simples é proporcional à quantidade de cimento (Schnaid; Prietto; Consoli, 2001; Foppa, 2005; Marques, 2016). Tal aumento varia de acordo com o tipo de solo. Da Figura 1, pode-se dizer que o pedregulho arenoso apresenta crescimento quase linear da resistência, atingindo mais de 10000 kPa com teor de 10% de cimento; a argila siltosa, por conter mais partículas finas com uma maior área de contato e, conseqüentemente, a ocorrência de reações pozolânicas, atinge mais de 5000 kPa com teor de 10% de cimento; a argila arenosa apresenta uma taxa menor de crescimento da resistência em relação ao teor de cimento; a areia uniforme apresenta o menor ganho de resistência e sua curva tende à estabilização. Pode-se inferir que solos granulares, bem graduados e com baixa plasticidade têm maior ganho de resistência com aumento da adição de cimento.

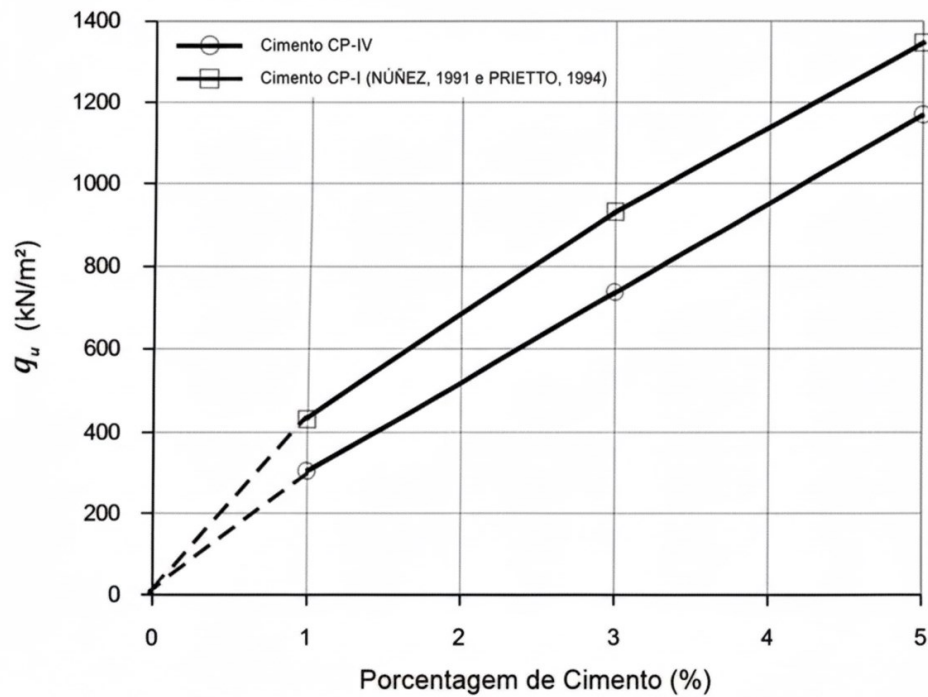
Figura 1 – Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples para diferentes solos estabilizados com cimento.



Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1972)

Prietto (1996) realizou ensaios de compressão simples em um solo arenoso e concluiu que a relação entre a porcentagem de cimento adicionada e a resistência à compressão simples é linear na faixa de 1 a 5%. O autor também destaca que o tipo de cimento utilizado influencia o valor da resistência, visto que os corpos de prova moldados com cimento CP-I atingiram resistências à compressão simples mais altas (cerca de 40% de aumento) que os que utilizaram CP-IV, como se pode observar na Figura 2.

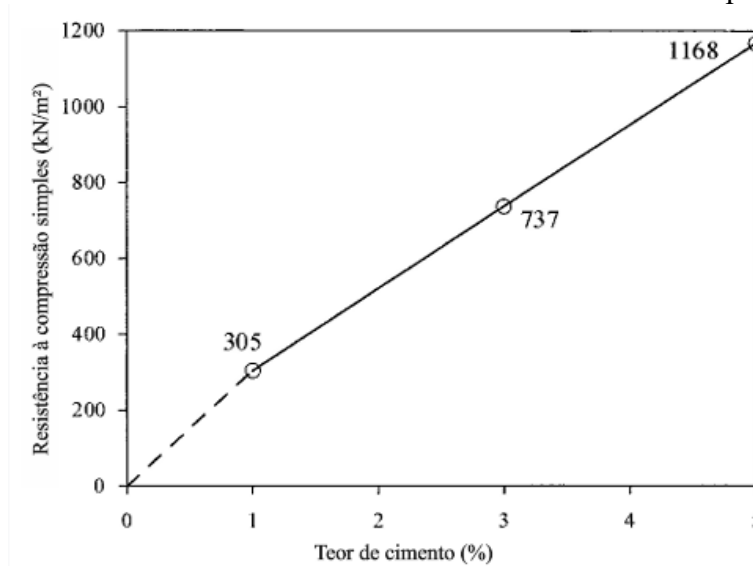
Figura 2 – Variação da resistência média à compressão simples com o teor de cimento



Fonte: Prietto (1996)

Schnaid, Prietto e Consoli (2001) investigaram o comportamento mecânico de uma areia fina siltosa artificialmente cimentada por meio de uma série de ensaios. Os corpos de prova foram moldados com um peso unitário seco de $17,5 \text{ kN/m}^3$ e umidade ótima de 15,8% e depois curados por 7 dias, com imersão por 24h antes da compressão. Os resultados dos ensaios de compressão simples evidenciaram uma relação praticamente linear entre o teor de cimento e a resistência à compressão, conforme apresenta a Figura 3.

Figura 3 – Efeito do teor de cimento no valor da resistência à compressão simples

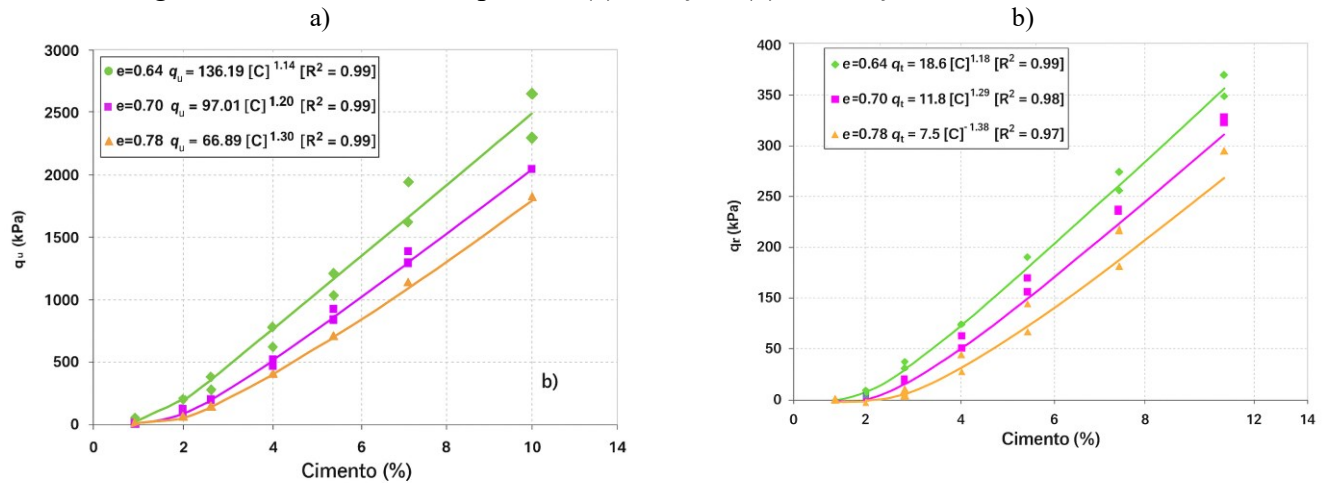


Fonte: Schnaid *et al.* (2001)

Como apontam Ingles e Metcalf (1972), a resistência à tração geralmente atinge aproximadamente 10% da resistência à compressão simples nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. Clough *et al.* (1981) obtiveram resistências à tração variando de 11 a 13% da resistência à compressão simples para areia artificialmente cimentada.

Consoli *et al.* (2010) realizaram ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral na areia de Osório, caracterizada por ser uniforme, fina e não plástica. Os resultados obtidos mostraram que quanto maiores os teores de cimento, maiores são as resistências à compressão e tração. Conforme a Figura 4, percebe-se que a resistência à tração, no gráfico b), atingiu valores na faixa de 11 a 15% da resistência à compressão, no gráfico a).

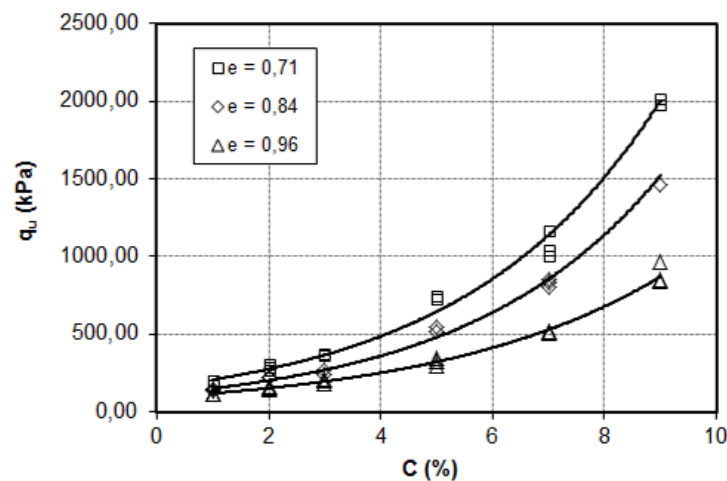
Figura 4 – Gráficos de compressão (a) e tração (b) em função do teor de cimento.



Fonte: Consoli *et al.* (2010)

Floss (2012) estudou um solo arenoso basáltico cimentado com 1, 2, 3, 5, 7 e 9% de cimento e encontrou que quanto maior o teor de cimento, maior a resistência à compressão simples. Em uma amostra com índice de vazios de 0,71, a resistência à compressão simples passou de 177 kPa com o teor de 1% de cimento para 2012 kPa com o teor de 9% de cimento, o que equivale a um acréscimo de 1037% na resistência. Já em uma amostra mais fofa ($e_0 = 0,96$), a resistência passou de 121 kPa para 962 kPa (acréscimo de 695%), para a mesma variação no teor de cimento. A Figura 5 apresenta a curva do efeito do teor de cimento na resistência à compressão simples para três índices de vazios diferentes, $e_0 = 0,71$, $e_0 = 0,84$ e $e_0 = 0,96$.

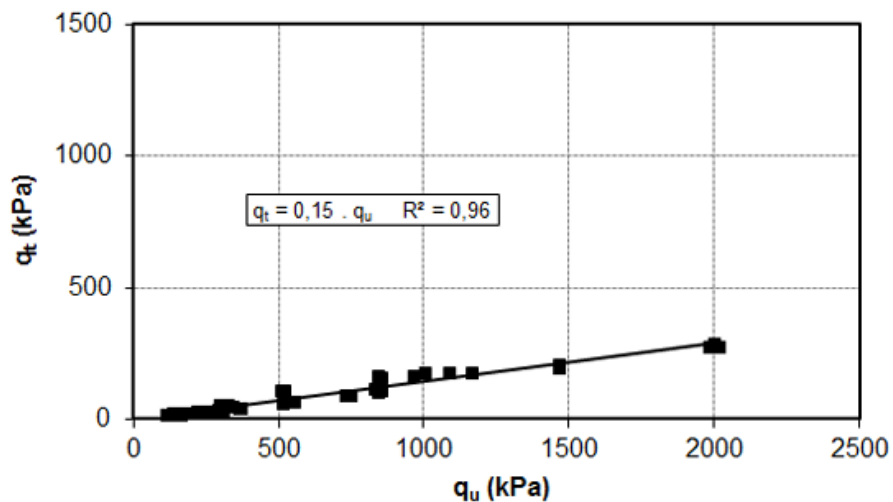
Figura 5 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento para solo arenoso basáltico



Fonte: Floss (2012)

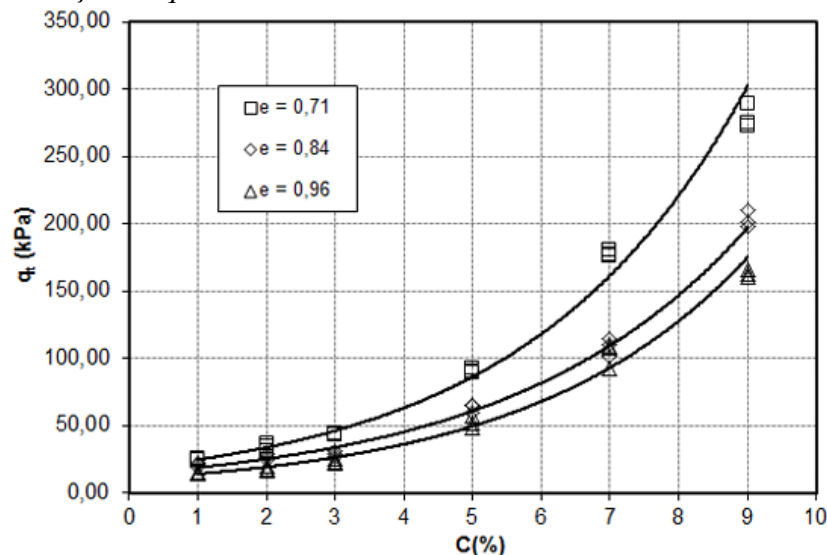
Em relação à compressão diametral, Floss (2012) encontrou que a resistência à tração foi equivalente a 15% da resistência à compressão simples, como mostra a Figura 6. Analisando a Figura 7, que traz a resistência à tração por compressão diametral das mesmas amostras acima, na mesma variação do teor de cimento, houve acréscimo de 1100% da resistência, passando de 24 kPa para 288 kPa na amostra com $e_0 = 0,71$ e acréscimo de 1086%, passando de 14 kPa para 166 kPa na amostra com $e_0 = 0,96$.

Figura 6 – Resultados de q_t em relação à q_u para solo arenoso balsático



Fonte: Floss (2012)

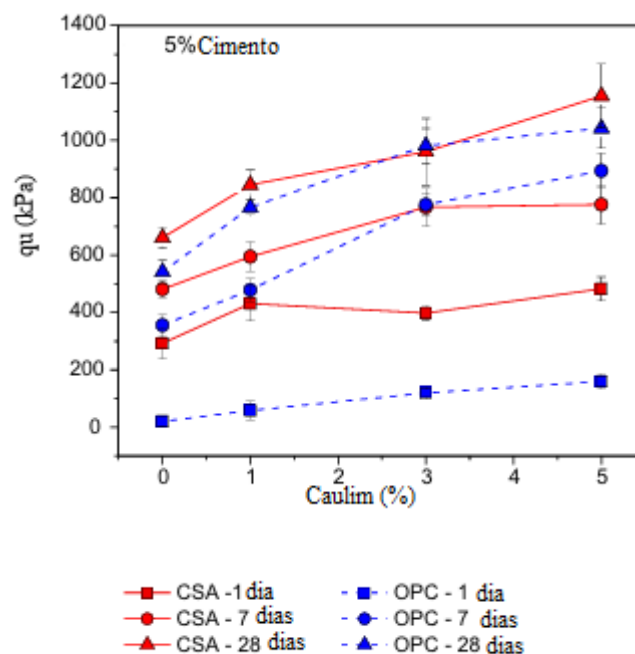
Figura 7 – Relação de q_t com o teor de cimento adicionado em solo arenoso balsático



Fonte: Floss (2012)

Moon *et al.* (2020) investigaram o efeito de uma areia uniforme cimentada com a presença de finos em pequenas proporções. Para isso, foram adicionadas partículas de caulim nos teores de 1%, 3% e 5%, atuando como material de preenchimento, proporcionando aumento da densidade. Foram utilizados dois tipos de cimento: Portland comum (OPC) e cimento sulfoaluminato de cálcio (CSA), ambos nos teores de 3%, 5% e 7%. Analisando os resultados dos ensaios de compressão simples para o cimento Portland comum, o aumento tanto do teor do cimento quanto do teor de caulim permitiram o alcance de maiores resistências. A Figura 8 apresenta os resultados dos ensaios para as amostras com adição de 5% de cimento para períodos de cura de 1, 7 e 28 dias, em que as séries em azul se referem ao OPC e em vermelho ao CSA. Analisando a série que corresponde à amostra estabilizada com cimento Portland durante 7 dias de cura, observa-se que a resistência passou de cerca de 350 kPa para quase 900 kPa para um teor de 5% de caulim. A ausência de um aumento significativo na resistência entre 7 e 28 dias, apesar da potencial reação pozolânica entre o caulim e a cal hidratada, sugere que o aumento da resistência com o teor de finos é principalmente devido ao efeito de preenchimento e ao aumento da densidade.

Figura 8 – Resistência à compressão simples da areia com 5% de cimento em relação ao teor de caulim



Fonte: Adaptado de Moon *et al.* (2020)

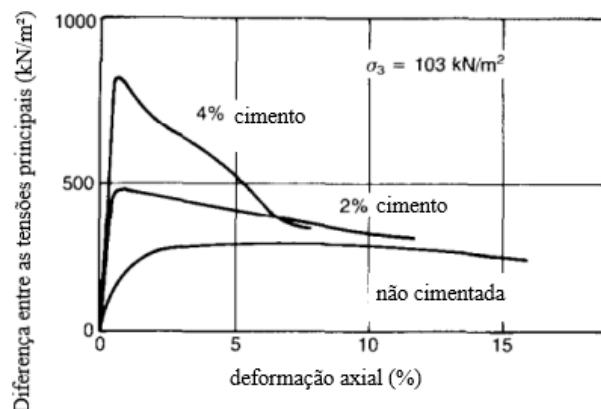
2.1.2.2 Relação tensão-deformação

De acordo com Prietto (2004) os solos cimentados apresentam comportamento intermediário entre os solos estudados pela mecânica dos solos clássica e a mecânica das rochas. Na curva de tensão-deformação, inicialmente apresentam comportamento linear muito rígido até um ponto de plastificação que caracteriza uma mudança irreversível na rigidez e na resistência do material. Do ponto de plastificação até a ruptura, o solo apresenta deformações plásticas crescentes. A ruptura é frágil e o comportamento pós pico indica tendência de estabilização, em que a tensão desvio e a deformação volumétrica são estáveis com a deformação axial. Depois de comprimidas inicialmente, as amostras de Prietto (2004) expandiram durante o cisalhamento.

Esse fenômeno de plastificação está associado com a quebra das ligações cimentantes, que leva à perda de rigidez e queda da resistência de pico. Essa degradação da resistência leva o solo a se comportar como o solo solto, ou desestruturado.

A Figura 9, retirada de Clough *et al.* (1981) pode ser utilizada para ilustrar melhor esse conceito, em que se pode observar que o comportamento da curva tensão-deformação pós pico é bastante influenciado pelo grau de cimentação: o solo não cimentado apresenta um comportamento dúctil, com aumento progressivo da tensão desviadora até um patamar estável, sem ruptura definida. Já os solos com maior teor de cimento, principalmente com 4% de cimento (maior teor do estudo), apresentam um pico de resistência expressivo em baixas deformações, seguido de queda acentuada da tensão com o aumento da deformação axial, cessando as deformações antes de atingir 10% e se comportando semelhantemente a uma areia densa.

Figura 9 – Relação tensão-deformação para um solo com diferentes teores de cimento

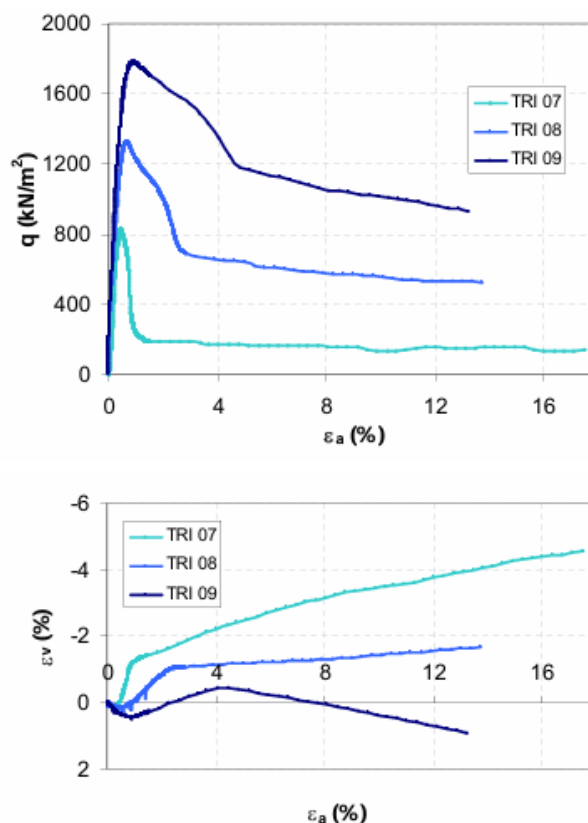


Fonte: Adaptado de Clough *et al.* (1981)

Em relação à ruptura, as areias cimentadas são frágeis em baixas tensões confinantes e dúcteis em tensões mais altas. Segundo Clough *et al.* (1981), tal transição se deve às contribuições relativas dos componentes de resistência. Em baixas tensões de confinamento, o componente de cimentação é muito mais significativo do que o componente de fricção. Devido à ruptura frágil das ligações de cimentação, a própria areia se mostra frágil nessa faixa de pressão. Por outro lado, em altas tensões confinantes, o componente friccional é dominante para areias fracamente cimentadas, resultando em uma resposta mais dúctil. No caso de uma areia fortemente cimentada, a cimentação é o componente de resistência mais significativo até mesmo em altas tensões confinantes e, portanto, observa-se uma ruptura frágil sempre.

Cruz (2008), estudando a areia de Osório, realizou uma série de ensaios triaxiais drenados sob tensões confinantes de 20 kPa (TRI 07), 200 kPa (TRI 08) e 400 kPa (TRI 09) para diferentes teores de cimento. Analisando os resultados para a adição de 5,06% de cimento, apresentados na Figura 10, observa-se pico definido e a relação de quanto maior a tensão confinante, maior a resistência ao cisalhamento, assim como comportamento inicialmente compressivo e depois expansivo, com menor magnitude para as tensões confinantes mais altas.

Figura 10 – Tensão-deformação axial e deformação volumétrica das amostras com 5,06% de cimento

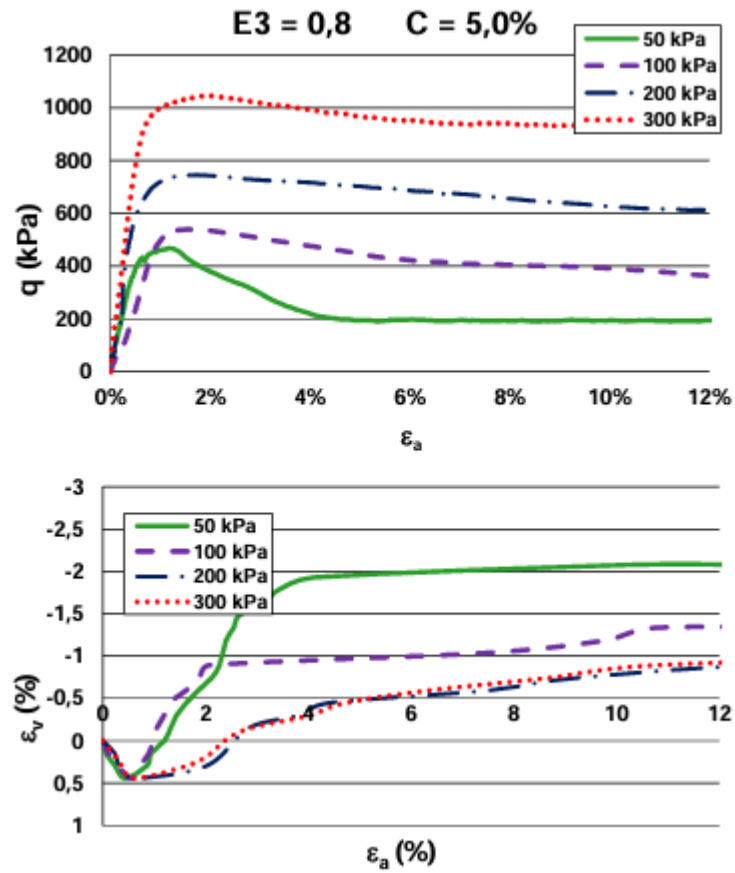


Fonte: Cruz (2008)

Fontoura (2015), por meio de ensaios triaxiais drenados, estudou uma areia de Natal (RN), caracterizada como média e uniforme, com adição de 2,5%, 5% e 7 de cimento CP V ARI. As amostras foram rompidas sob quatro tensões confinantes: 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa depois de 30 dias de cura. A autora observou que quanto maior o teor de cimento, maior a tensão desvio “ q ” de ruptura, crescendo linearmente e que os ensaios realizados em baixas tensões confinantes apresentaram ruptura com pequenas deformações, um pico de resistência bem definido seguido de queda acentuada e um comportamento compressivo inicial com comportamento expansivo pós ruptura.

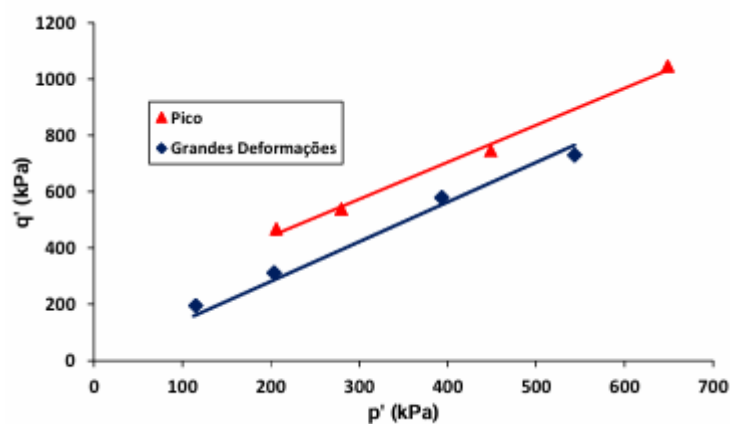
A Figura 11 apresenta um dos resultados das curvas de tensão-deformação obtidos por Fontoura (2015), da amostra com adição de 5% de cimento. Observou-se um comportamento rígido inicial, seguido de um pico de resistência bastante definido e uma queda de resistência no pós-pico. Quanto maior a tensão confinante, maior a resistência. Para todas as tensões confinantes, as amostras com $C = 5,0\%$ e $E3 = 0,8$ apresentaram um comportamento inicialmente compressivo (ε_v negativo) até próximo da ruptura, seguido por um comportamento expansivo (dilatância), sendo que quanto menor a tensão confinante, maior a expansibilidade das amostras. A Figura 12 apresenta as envoltórias de pico e de grandes deformações. Para $E3=0,8$ e $C=5,0\%$, a coesão de pico é de 87,3 kPa e o ângulo de atrito de pico é de $32,6^\circ$. O estudo concluiu que a coesão aumenta significativamente com o aumento do teor de cimento e que o ângulo de atrito (Φ') não sofre variação significativa para os teores de cimento e índices de vazios estudado.

Figura 11 – Curvas de tensão-deformação e variação volumétrica do ensaio triaxial para $E_3 = 0,8$ e $C=5\%$



Fonte: Fontoura (2015)

Figura 12 – Envoltórias para $E_3 = 0,8$ e $C=5\%$

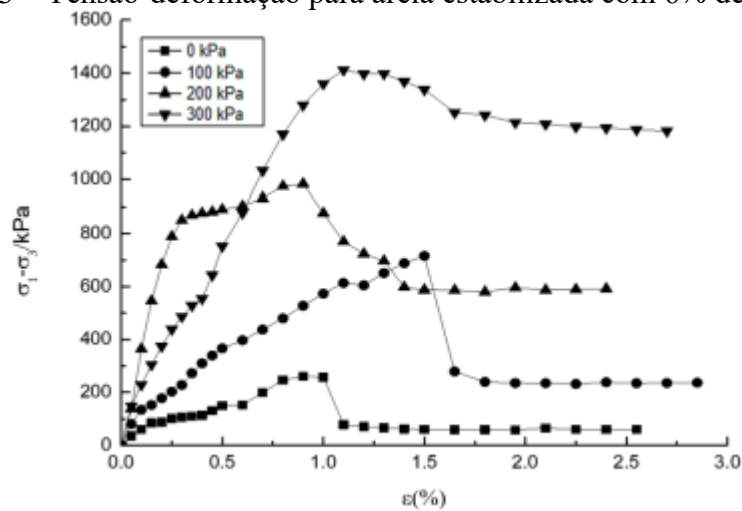


Fonte: Fontoura (2015)

Cui *et al.* (2023) investigaram o impacto da adição de 4%, 6% e 8% de cimento no desempenho de uma areia eólica estabilizada, incluindo o comportamento tensão-deformação, a resistência de pico, e a formação de produtos de hidratação como C-S-H depois de 14 dias de

cura. Os autores observaram que a microestrutura da areia eólica estabilizada com cimento se tornou mais densa à medida que o teor de cimento aumenta. Da Figura 13, observou-se que quanto maior a tensão confinante, maior a tensão desvio, atingindo valores de pico de cerca de 700 kPa para a confinante de 100 kPa e cerca de 1000 kPa para a confinante de 200 kPa. Em relação aos parâmetros de resistência, para 6% de cimento e teor de umidade de 7%, foram encontrados ângulos de atrito de 31,45°, 34,61° e 36,74° e coesões de 82,71 kPa, 126,44 kPa e 164,53 kPa.

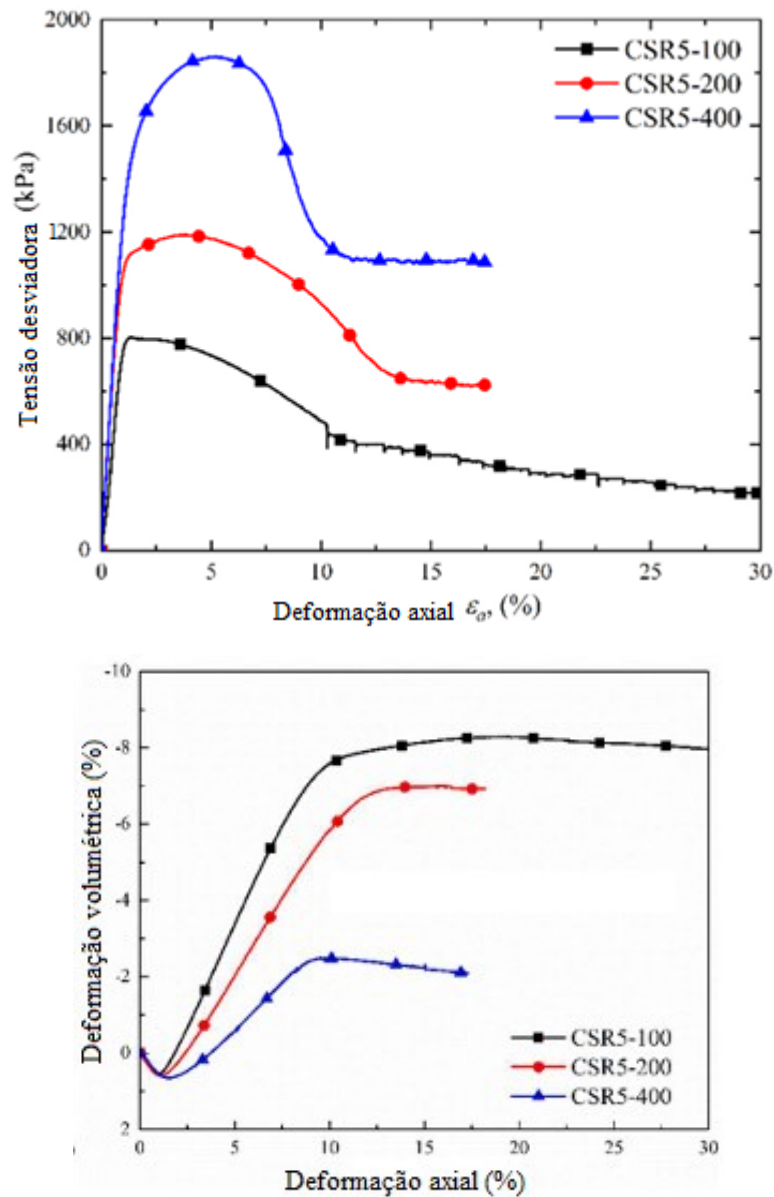
Figura 13 – Tensão-deformação para areia estabilizada com 6% de cimento



Fonte: Cui *et al.* (2023)

Os resultados dos ensaios triaxiais CID de Lin *et al.* (2024), em uma areia cimentada, comprovam que quanto maiores o teor de cimento e a tensão de confinamento, maior a resistência ao cisalhamento. Analisando a Figura 14, para a tensão confinante de 100 kPa, a resistência de pico é de cerca de 800 kPa, para a confinante de 200 kPa, cerca de 1200 kPa e para confinamento de 400 kPa, a resistência máxima é de aproximadamente 1900 kPa. As curvas também mostram que a rigidez do material (representada pela inclinação inicial da curva tensão-deformação) também aumenta com o incremento da pressão de confinamento. Em relação à deformação volumétrica, todas as amostras mostram uma fase de compressão inicial seguida por dilatação e da mesma forma que o teor de cimento, o aumento da tensão de confinamento suprime a dilatação volumétrica. Isso é consistente com o fato de que maior confinamento aumenta a resistência de pico e a rigidez do material, pois a pressão externa restringe fisicamente a capacidade das partículas de areia e das ligações de cimento de se expandirem e se rearranjarem, levando a um comportamento mais compressivo e menos frágil.

Figura 14 – Tensão desviadora e deformação volumétrica para adição de 5% de cimento nas tensões confinantes de 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa



Fonte: Adaptado de Lin *et al.* (2024)

No geral, conforme todos os trabalhos apontados verificaram, fica evidente que a adição de cimento promove rigidez e coesão ao solo, e o aumento do teor proporciona um ganho significativo na resistência, mas também leva a uma ruptura mais abrupta, característica de solos granulares densos.

2.1.3 Estimativa dos parâmetros de resistência de areias cimentadas

A título de comparação com os resultados obtidos nos ensaios triaxiais, é interessante avaliar a estimativa dos parâmetros de resistência por meio de formulações empíricas, de forma que possibilite o uso do método em situações em que o tempo para realização dos ensaios é escasso, por exemplo.

Uma areia cimentada apresenta dois componentes de resistência, um devido ao surgimento de coesão advinda do cimento e outro devido ao atrito entre as partículas. Uma vez que a resistência à compressão simples é uma medida do grau de cimentação, a resistência ao cisalhamento no ensaio triaxial pode ser expressa pelo ângulo de atrito e pela coesão. Diante disso, é de interesse estabelecer uma relação entre os parâmetros de resistência e a resistência à compressão simples (Schnaid; Prietto; Consoli, 2001).

Consoli (2014) desenvolveu um método alternativo para estimar os parâmetros da envoltória de ruptura Mohr-Coulomb de solos artificialmente cimentados a partir dos resultados de resistência à compressão simples (q_u) e à tração por compressão diametral (q_t).

Usando as tensões principais do ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral na ruptura, Consoli *et al.* (2014) apresentaram as equações (5) e (6), levando em consideração que:

- a tensão principal mínima efetiva (σ'_3) para o ensaio de compressão simples é $\sigma'_{3u} = 0$;
- a tensão principal máxima efetiva (σ'_1) para o ensaio de compressão simples é $\sigma'_{1u} = q_u$;
- a tensão principal mínima efetiva (σ'_3) para o ensaio de tração por compressão diametral é $\sigma'_{3t} = q_t$;
- a tensão principal máxima efetiva (σ'_1) para o ensaio de tração por compressão diametral é $\sigma'_{1t} = -3q_t$.

$$\phi' = \sin^{-1} \left(\frac{q_u - 4q_t}{q_u - 2q_t} \right) \quad (5)$$

$$c' = \frac{q_u \left[1 - \left(\frac{q_u - 4q_t}{q_u - 2q_t} \right) \right]}{2 \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{q_u - 4q_t}{q_u - 2q_t} \right) \right]} \quad (6)$$

Conforme estudos anteriores de Consoli *et al.* (2010, 2012; 2013), a razão q_v/q_u resulta num escalar (ξ) para a mistura solo-cimento, independente da relação porosidade/cimento. Portanto, substituindo o escalar (ξ) nas equações (5) e (6), os parâmetros ϕ' e c' podem ser expressos conforme as equações (7) e (8).

$$\phi' = \sin^{-1} \left(\frac{1 - 4\xi}{1 - 2\xi} \right) \quad (7)$$

$$c' = \frac{q_u \left[1 - \left(\frac{1 - 4\xi}{1 - 2\xi} \right) \right]}{2 \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{1 - 4\xi}{1 - 2\xi} \right) \right]} \quad (8)$$

Tendo em vista a dificuldade de encontrar mais trabalhos que aplicaram o método em areia cimentada, buscaram-se outras referências com tipos de solos diferentes. Varela (2024) aplicou o método Consoli (2014) em sua pesquisa, que avaliou o efeito da adição de cimento em um resíduo de mineração de bauxita. Comparando os resultados dos ensaios triaxiais realizados e a aplicação do método, o autor verificou que o método subestimou o ângulo de atrito interno em 21,44% (de 47,95° para 37,67%) e superestimou o intercepto coesivo em 77,17% (de 94,12 kPa para 412,34 kPa).

Pode-se validar o uso do método para estimativa do ângulo de atrito, cujo valor se aproxima do calculado no ensaio triaxial. Entretanto, uma possível limitação do método é o valor superestimado para a coesão.

2.2 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NAS REAÇÕES CIMENTÍCIAS

À medida que o tamanho das partículas alcança dimensões atômicas, características físicas e químicas do material podem sofrer mudanças drásticas e apresentar propriedades únicas (Callister, 2012). As nanopartículas referem-se a materiais com pelo menos uma de suas dimensões de cerca de 1 a 100 nanômetros (NNI, 2007). Sua propriedade mais atrativa refere-se à alta área específica das nanopartículas, aumentando sua capacidade de reação e permitindo que as nanopartículas interajam muito ativamente com as outras partículas da matriz do solo.

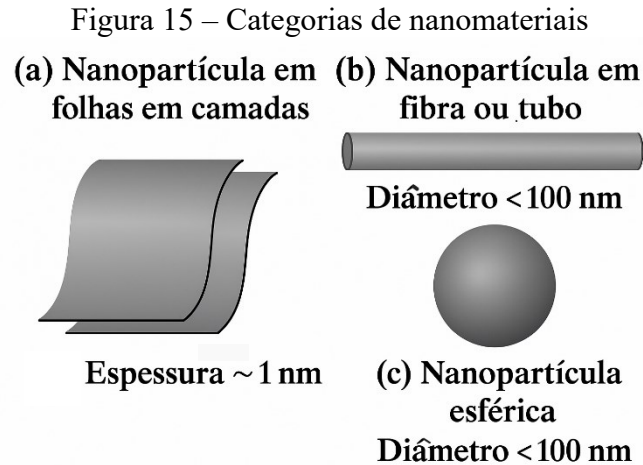
Huang e Wang (2016) apontam que os nanomateriais têm a capacidade de gerar aumentos expressivos na resistência do solo, tanto a nível macro como micro. A resistência do solo, particularmente sob carga dinâmica, como se verifica na pavimentação, é

significativamente influenciada pela pressão da água dos poros na sua composição, como um meio trifásico com grãos de solo, água e ar. Macroscopicamente, os nanomateriais reforçam o esqueleto do solo aumentando a coesão entre os grãos e modificam o fluido dos poros, possibilitando uma capacidade de suporte de carga maior, uma redução da deformabilidade e uma maior resistência ao cisalhamento. Microscopicamente, em decorrência da sua alta área de superfície específica, os nanomateriais promovem uma interação entre as partículas mais forte, alterando a reologia da suspensão. Estas alterações afetam o comportamento do solo, incluindo a plasticidade e as propriedades do fluido dos poros, melhorando, também, a resistência do solo.

As nanopartículas não são agentes cimentícios tradicionais, embora, quando introduzidas no solo, reduzam o espaço interpartículas e criem uma matriz de esqueleto do solo mais forte e mais rígida. Quando incorporadas em materiais cimentícios, as nanopartículas podem acelerar a cinética de hidratação, melhorar o desenvolvimento da microestrutura e diminuir o volume de vazios na matriz (Korpa; Kowald; Trettin, 2008; Ghazy; Bassuoni; Shalaby, 2016). Em comparação com os métodos tradicionais de injeção de calda de cimento, as nanopartículas promovem a melhoria do solo com menos perturbação do solo, de uma forma mais econômica e sustentável. Em compósitos cimentícios, nanopartículas de SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 e nanotubos de carbono são comumente aplicadas para estabilização do solo (Bahmani *et al.*, 2014)

Os nanomateriais podem ser divididos em três categorias de acordo com sua morfologia devido às dimensões das nanopartículas dispersas, conforme mostrado abaixo e ilustrado na Figura 15 :

- Nanopartículas de duas dimensões, em forma de folhas e lâminas: nanoargila, nanofolhas de grafeno (a);
- Fibras de uma dimensão: nanotubos de carbono (b);
- Nanopartículas tridimensionais, formato esférico: nanosílica, nanoalumina (c).



Fonte: Adaptado de Fu *et al.* (2019)

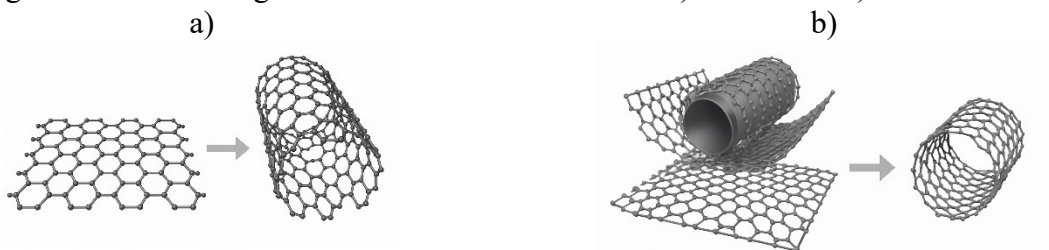
Nas seções seguintes, serão apresentados alguns nanomateriais e suas diferentes aplicações na estabilização de solos por meio de trabalhos encontrados na literatura.

2.2.1 Nanomateriais usados na estabilização de solos

2.2.1.1 Nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono (CNT) são feitos de grafeno, uma folha superfina de carbono (grafite), que é o material mais forte do mundo. A Figura 16 ilustra o processo de criação dos nanotubos de carbono a partir da folha de grafeno. Quando o grafeno é enrolado num tubo, forma um *Single-Wall Carbon nanotube* (SWCNT) (Chong, 2003). No contexto dos nanotubos de carbono de paredes múltiplas, ou *Multi-Wall Carbon nanotubes* (MWCNT), suas características atrativas os tornam promissores para aplicações em sistemas de cimentação.

Figura 16 – Folha de grafeno e nanotubo de carbono. a) SWCNT e b) MWCNT.

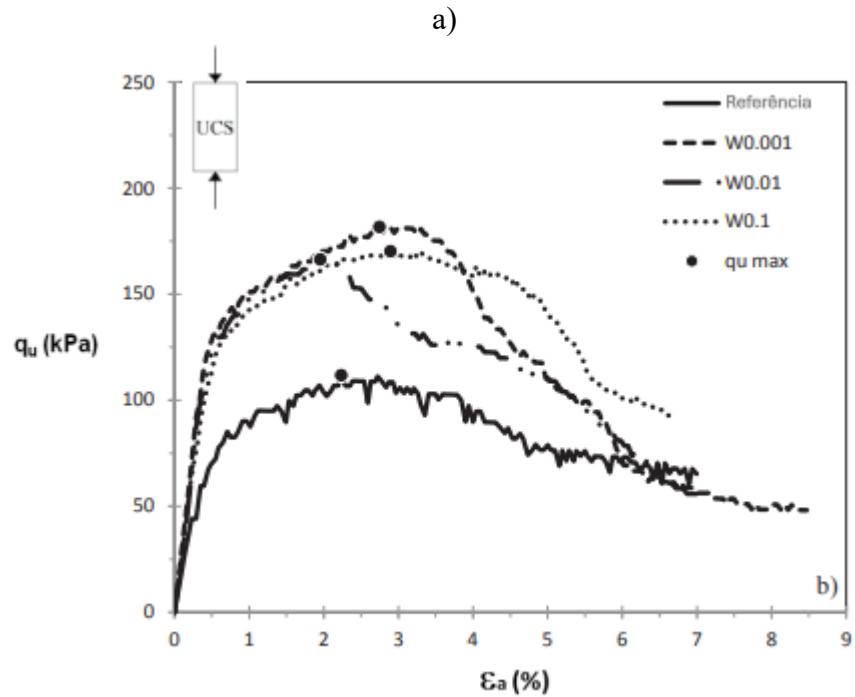


Fonte: Rafael (2017)

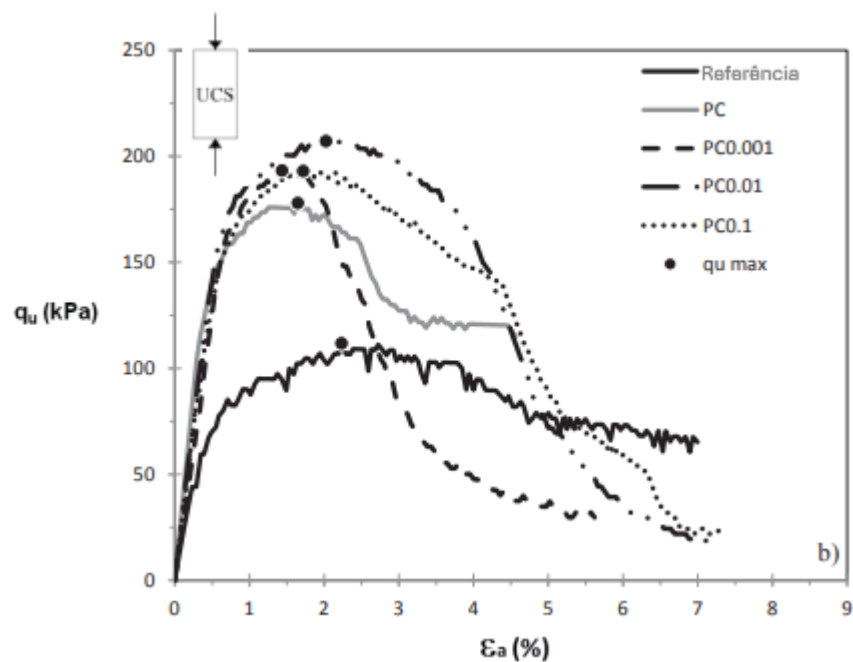
A elevada área de superfície dos MWCNTs e sua alta resistência mecânica e módulo de elasticidade contribuem para um comportamento elástico que pode reforçar a estrutura do solo. No entanto, a limitação do uso de nanotubos de carbono é decorrente da sua tendência natural de se agregarem, o que compromete suas boas propriedades. Correia *et al.* (2015) apontaram que surfactantes ou a aplicação de energia ultrassônica estão sendo explorados para superar essa propensão à aglomeração. Essas abordagens visam dispersar eficientemente os nanotubos, garantindo uma distribuição homogênea no solo e maximizando os efeitos positivos.

Correia *et al.* (2015) misturaram solo siltoso com cimento Portland e adicionaram uma dispersão de MWCNTs em três quantidades para avaliar o desempenho mecânico do solo estabilizado. Para isto, foram adicionados 0,001 g, 0,01 g e 0,1 g de MWCNTs a um surfactante à base de policarboxilato, responsável por promover a dispersão das partículas. Os corpos de prova foram curados por 7 dias em imersão e os ensaios de resistência à compressão simples avaliaram o desempenho mecânico do procedimento de estabilização química. Os resultados revelaram um comportamento mais dúctil do que os ensaios de referência, indicando uma alteração nas propriedades mecânicas do solo. A Figura 17 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras em que os nanotubos foram dispersos apenas em água (a) e as amostras em que a dispersão foi com uso de surfactante (b). A partir da Figura 17 a) observa-se que o maior aumento da resistência foi da amostra com adição de 0,001g de MWCNT (ensaio W0.001) com uma média de incremento de 47,9% em relação ao ensaio de referência. Para os ensaios com surfactante (b), o maior aumento de resistência verificado foi de 77,1%, da amostra com adição de 0,01g de MWCNT.

Figura 17 – Resultados dos ensaios de compressão simples. a) apenas água. b) com surfactante



b)



Fonte: Adaptado de Correia *et al.* (2015)

Os resultados indicam que o potencial de melhoria é maior quando utilizada uma dispersão dos MWCNTs de maior qualidade, uma vez que o maior desempenho foi observado na menor concentração de incorporação de MWNCTs. Visto isso, justifica-se a utilização de um surfactante para otimizar a dispersão dos nanotubos de carbono.

No entanto, é importante observar que, apesar do aumento da ductilidade, houve uma diminuição na resistência das amostras à compressão simples. Essa observação destaca a complexidade da interação entre as nanopartículas e a matriz do solo, ressaltando a importância de um entendimento aprofundado para otimizar o uso desses materiais inovadores em sistemas de cimentação.

2.2.1.2 Nanoargila

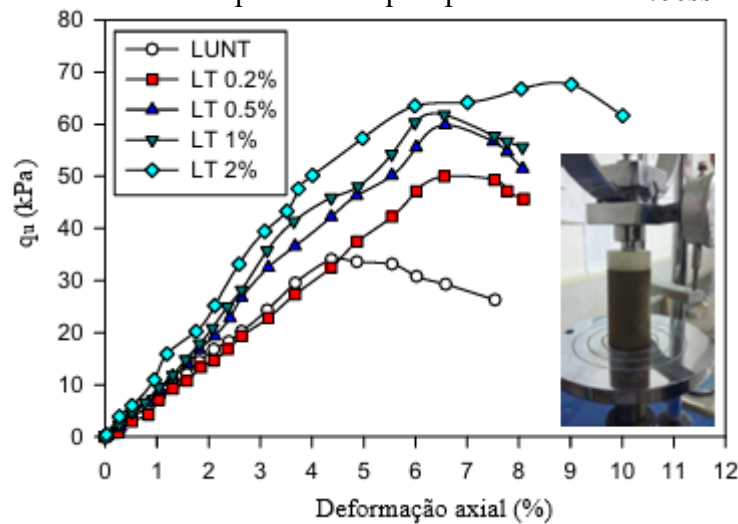
A nanoargila é constituída por diversas camadas de silicatos minerais, como montmorilonita, bentonita, caulinita etc. Ela é produzida a partir de argilas naturais submetidas a técnicas que extraem nanomateriais (Tabarsa *et al.*, 2018). A nanoargila apresenta uma área de superfície específica extremamente elevada, podendo atingir valores em torno de 750 m²/g, conforme relatado por Iranpour e Haddad (2016). Essa alta área superficial está associada à maior capacidade de retenção de água ao redor das partículas, o que contribui para o acúmulo de água nos nanoporos e, conseqüentemente, para a redução da densidade aparente do material. Comparativamente, a nanoargila possui uma área de superfície superior à do nanocobre, da nanoalumina e da nanosílica, destacando-se entre os nanomateriais quanto ao potencial de interação com a matriz do solo.

Abbasi *et al.* (2018) investigaram o tratamento de argilas de baixa plasticidade e alta plasticidade adicionando diferentes teores de nanoargila. Os autores observaram a redução considerável do potencial de dispersividade – que caracteriza os solos suscetíveis à erosão por fenômeno químico - dos dois tipos de solo e, a adição de 1% de nanoargila foi considerado o teor mais efetivo.

Ali Zomorodian *et al.* (2017) promoveram uma investigação experimental conduzida em uma argila arenosa de baixa plasticidade não contaminada e outra contaminada por querosene para analisar as melhorias na resistência e na rigidez obtidas com a adição de nanoargila e nanosílica. Embora o estudo não envolva aglomerantes tradicionais cimentantes, os autores consideraram períodos de cura variados, uma vez que, as reações entre as partículas evoluem com o tempo. Os resultados revelaram melhorias significativas na resistência e na rigidez do solo com adições de nanopartículas que variaram de 0,5% a 2,5% do peso do solo. Uma melhoria mais significativa na resistência do solo não contaminado foi obtida com a adição de 1% de nanoargila ou 1,5% de nanosílica. Além disso, em comparação com a nanosílica, a nanoargila apresentou um requisito ideal de menor % em peso para o solo limpo e contaminado, indicando sua melhor eficácia como agente estabilizador neste caso.

Tabarsa *et al.* (2018) prepararam corpos de prova de solo de *loess* - um depósito terrestre de poeira eólica composto por partículas do tamanho de silte - com adição de nanoargila nos teores de 0,2%, 0,5%, 1% e 2% do peso seco do solo. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples são apresentados na Figura 18, em que se observa que a resistência do solo sem adição foi praticamente dobrada na mistura com teor de 2% de nanoargila. Além disso, a deformação na ruptura também aumentou proporcionalmente à quantidade de nanoargila adicionada. Na legenda da figura LUNT (*untreated loess soil*) se refere ao solo sem adição de nanoargila e LT (*treated loess soil*) ao solo com adição de nanoargila.

Figura 18 – Resistência à compressão simples para mistura de *loess* com nanoargila



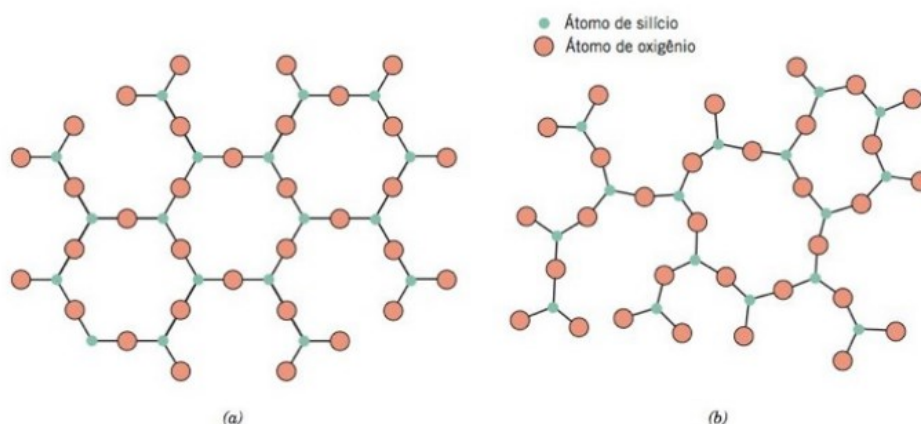
Fonte: Adaptado de Tabarsa *et al.* (2018)

2.2.1.3 Nanosílica

O dióxido de silício, de fórmula química SiO_2 , possui como unidade estrutural básica o tetraedro de SiO_4 e pode ser encontrado nos estados amorfo e cristalino, conforme mostra a Figura 19. Um material amorfo possui estruturas atômicas ou relativamente complexas distribuídas de forma aleatória e desordenada. A sílica amorfa resulta da ação de condições naturais ou artificiais sobre o dióxido de silício (Callister, 2012). Na sílica cristalina, os átomos de oxigênio e silício se agrupam de forma que cada cristal corresponde à uma molécula gigante de SiO_2 . A sílica cristalina pode ser encontrada como quartzo, cristobalita e tridimita. A sílica amorfa, por sua vez, é formada por sólidos genéricos sem ordenação espacial atômica e resulta

de ações naturais ou artificiais sobre o dióxido de silício (Da S. Gomes; Carlene R. Furtado; C. De Souza, 2018).

Figura 19 – Esquemas bidimensionais para a estrutura do (a) dióxido de silício cristalino e (b) dióxido de silício não cristalino (amorfo).

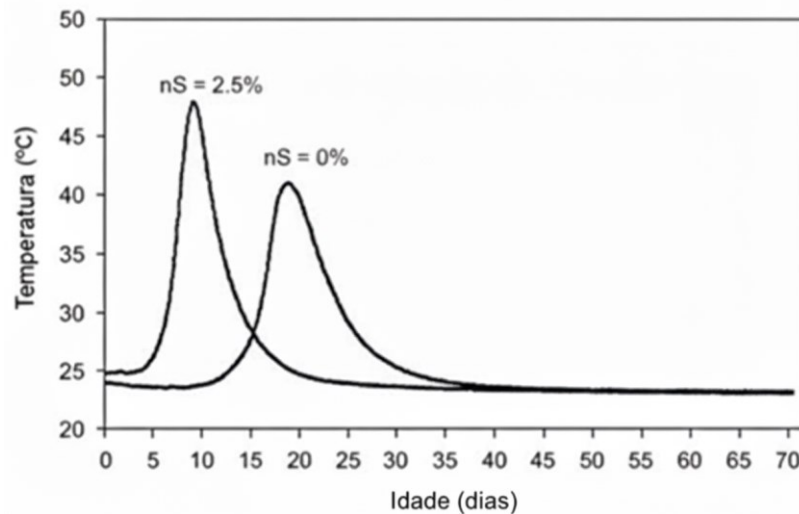


Fonte: Callister (2012)

A nanosílica é composta por uma porcentagem superior a 99% de partículas muito pequenas de dióxido de silício (SiO_2), geralmente variando de 7 a 22 nanômetros, unidas por ligações covalentes de hidrogênio. Seu potencial uso em solos vem da grande quantidade de íons de silício na sua estrutura de forma amorfa, permitindo reações pozolânicas (Wang *et al.*, 2020). Esse tipo de nanomaterial possui alta energia superficial e pode acelerar a hidratação do cimento, por isso é muito utilizado na estabilização química (Bahmani *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2019). A utilização de nanosílica (SiO_2 cristalino) reduz o volume de cimento e completa a curva de granulometria na zona dos tamanhos menores, evidenciando a estabilização granulométrica, além da química (Lopez Gayarre *et al.*, 2021). Diferentes aplicações de nanosílica têm sido estudadas, principalmente em materiais cimentícios, uma vez que é capaz de melhorar suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

A nanosílica é capaz de acelerar as reações químicas durante a etapa de hidratação, pois conforme observado por Senff *et al.* (2009), diminui o tempo para atingir a temperatura máxima para início das reações de hidratação, como se pode verificar na Figura 20, em que a nanosílica é apresentada conforme a sigla “nS”. A rápida hidratação gera mais produtos cimentantes em menos tempo, aumentando rapidamente a viscosidade da pasta e reduz o tempo de pega, o tempo de duração do período dormente e, conseqüentemente, o tempo necessário para que o pico de calor da hidratação seja atingido (Flores, 2017).

Figura 20 – Influência da nanosílica sobre a temperatura de hidratação



Fonte: Adaptado de Senff *et al.* (2009)

Durante a etapa inicial de hidratação, forma-se uma grande quantidade de cristais de hidróxido de cálcio. Quando se incorpora a nanosílica ao sistema cimentício, ela participa das reações pozolânicas, reage com o hidróxido de cálcio e evita o crescimento excessivo de cristais. Esse fenômeno produz um gel de silicato de cálcio hidratado (C—S—H), tornando a estrutura da matriz cimentícia mais densa. Em virtude de seu tamanho nanométrico e elevada área superficial, a nanosílica tem capacidade de preenchimento, ocupando os poros no gel de silicato de cálcio hidratado. Como resultado, é criada uma estrutura mais densa na matriz de cimento, o que leva ao aumento da resistência à compressão não confinada (Li *et al.*, 2006, apud Choobbasti; Vafaei; Kutanaei, 2018).

A aplicação da nanosílica como um modificador de material cimentício vem se tornando mais popular do que modificadores convencionais, como a cinza volante e cinza da casca de arroz (Choobbasti; Vafaei; Soleimani Kutanaei, 2018). Diversos estudos avaliaram o efeito da adição de nanosílica no comportamento mecânico de solos argilosos, residuais e também arenosos, alvo desta pesquisa.

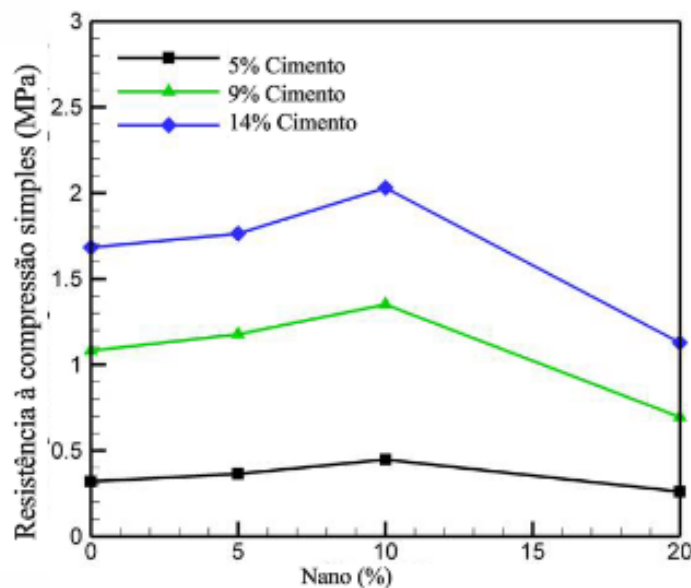
Trabalhos experimentais mostraram que a adição de 0,7% de nanosílica apresentou um aumento de 56% na resistência à compressão para um solo coesivo e 0,4% de nanosílica aumentou a resistência à compressão simples em 80% para um solo residual tratado com cimento (Bahmani *et al.*, 2014; Changizi; Haddad, 2016). Salvatore *et al.* (2020), com o objetivo de prevenir a liquefação em areias, utilizaram calda de nano-silicato e obtiveram resultados satisfatórios, pois a nanosílica forma um enchimento para a areia. A nanosílica

também pode aumentar o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e o teor de umidade ótimo (OMC), como demonstrado por Fattahi Masrour *et al.* (2021).

Seyedi Gelsefidi e Mamaghanian (2013) investigaram o efeito da adição de 1%, 3% e 5% em massa de nanosílica na estabilização de um solo argiloso de baixa plasticidade misturado com 5% em massa de cal. Os resultados indicaram que a incorporação de nanosílica nessas proporções levou a um aumento de até três vezes (mistura de solo e cal atingiu 605 kPa enquanto a mistura de solo e cal com adição de nanosílica atingiu 1824 kPa) na resistência à compressão simples (UCS) da mistura solo-cal, após 28 dias de cura. A combinação de 3% de nanosílica com 5% de cal foi considerada o traço ótimo.

Choobbasti, Vafaei e Kutanaei (2015) investigaram o efeito do cimento e da nanosílica nas propriedades mecânicas (compactação e resistência à compressão simples) de uma areia. Eles utilizaram três teores de cimento (5%, 9% e 14% do peso seco da areia) juntamente com quatro teores de nanosílica (0%, 5%, 10% e 15% do peso seco do cimento). Os corpos de prova foram curados por 7 dias e, os autores não informaram se houve imersão. Observando a Figura 21, o aumento do teor de nanosílica até 10% do peso do cimento aumentou significativamente a resistência à compressão simples das amostras. Acima disso, os autores observaram diminuição da resistência, portanto concluíram que o teor ótimo de nanosílica para a estabilização de areia cimentada foi de 10% do peso do cimento.

Figura 21 – Resistência à compressão simples em função da adição de nanosílica

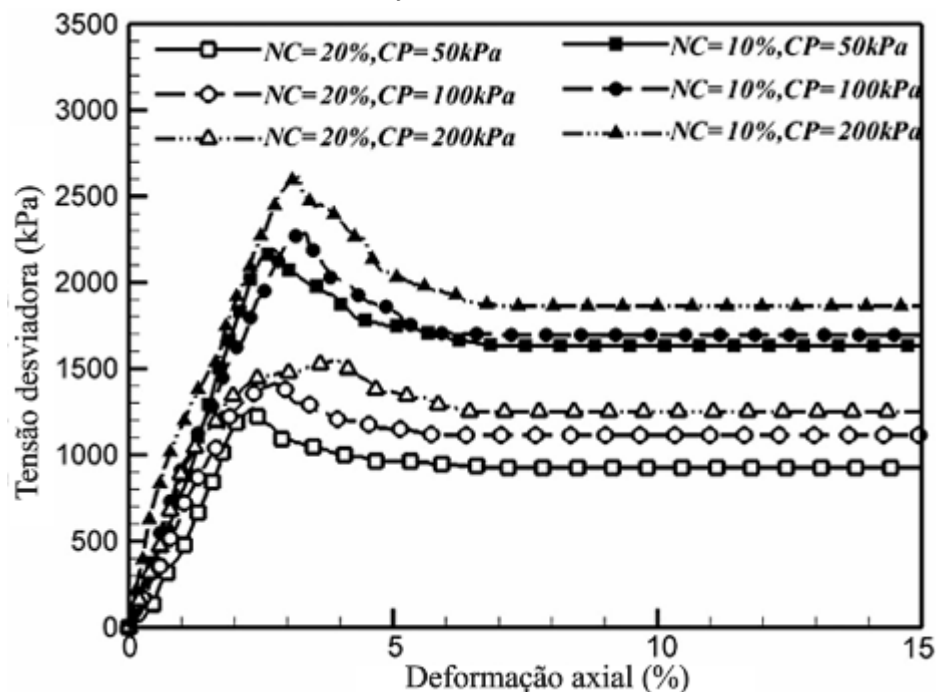


Fonte: Adaptado de Choobbasti, Vafaei e Kutanaei (2015)

Choobbasti, Vafaei e Kutanaei (2018) complementaram sua pesquisa com ensaios triaxiais estáticos e cíclicos utilizando teores de cimento de 5%, 9% e 14% (peso seco) da areia e teores de nanosílica de 0%, 5%, 10% e 20% (peso seco) do cimento (*cement content* - CC, representando o teor de cimento no gráfico). Os corpos de prova foram curados por 7 dias e colocados em um forno de 50°C para dissipar a água e atingir um peso constante. Os resultados apontaram que a adição de nanosílica contribui para a redução do comportamento frágil, promovendo um desempenho mais dúctil e que as propriedades de resistência ao cisalhamento, incluindo o ângulo de atrito interno e a coesão, aumentam com o aumento da porcentagem de nanosílica até o teor ótimo de 10%.

Observando os resultados dos ensaios triaxiais estáticos, apresentados na Figura 22, verifica-se que a tensão desviadora atinge o pico com teor ótimo (maior resistência atingida) de nanosílica de 10% e teores superiores de nanosílica (*nanosilica content* - NC, representando o teor de nanosílica no gráfico) causam um decréscimo na resistência. Estes resultados são compatíveis com os obtidos no ensaio de resistência à compressão simples.

Figura 22 – Curvas tensão-deformação dos ensaios triaxiais para 5% de cimento com 10% e 20% de adição de nanosílica em areia

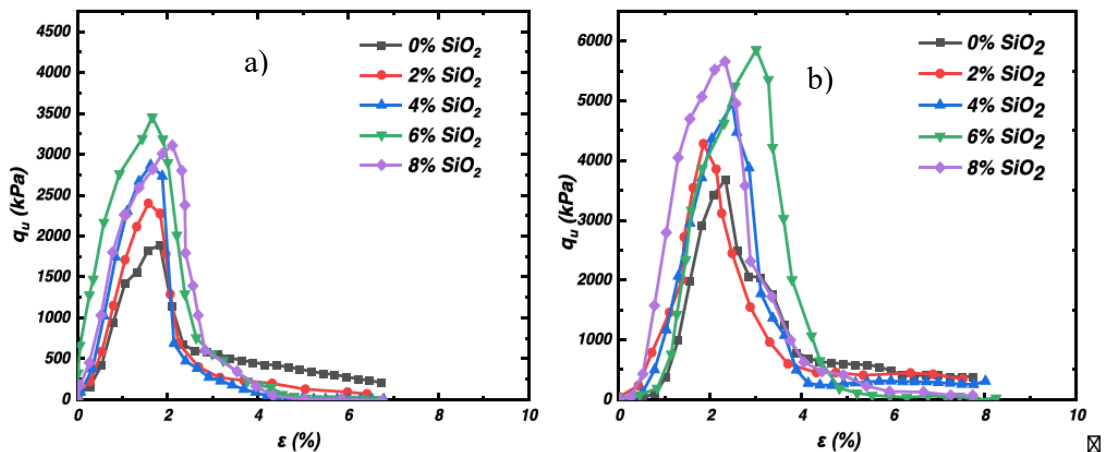


Fonte: Adaptado de Choobbasti, Vafaei e Kutanaei (2018)

Avaliando o desenvolvimento de resistência à compressão simples e ao cisalhamento em uma areia siltosa estabilizada com cimento com adição de nanosílica, Liu *et al.* (2023) variaram teores de cimento de 3%, 5%, 10% e 15% do peso de solo seco, para os quais foram

adicionados 2%, 4%, 6% e 8% de nanosílica do peso de cimento. A nanosílica estudada tinha uma massa específica de $2,6 \text{ g/cm}^3$ e área de superfície específica de $160 \pm 25 \text{ m}^2/\text{g}$. As curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão axial evidenciaram que a tensão axial aumentou rapidamente com o acréscimo de deformação, atingindo um pico entre 2% e 4%, seguido de uma queda e estabilização em um patamar inferior. Para os teores de cimento mais baixos (3% e 5%), observou-se um aumento progressivo na resistência à compressão simples à medida que se incrementou o teor de nanosílica até 8%, corroborando os resultados obtidos por Choobbasti *et al.* (2018). Por outro lado, ao ser adicionado um teor mais alto de cimento (10% e 15%), a resistência apresentou um comportamento não linear: aumentou inicialmente com a adição de nanosílica, atingindo um valor máximo com 6% de adição, e posteriormente diminuiu, como se observa na Figura 23.

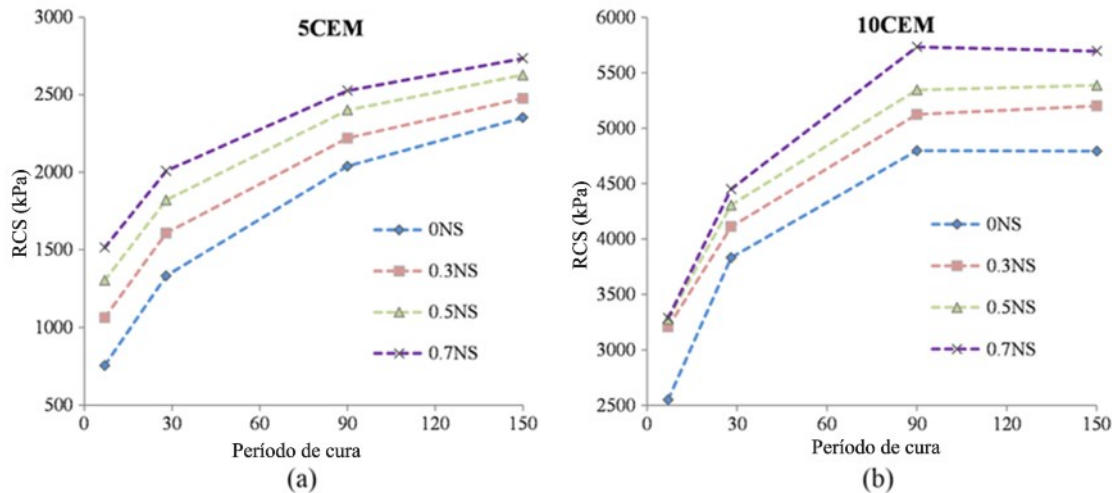
Figura 23 – Curvas tensão-deformação das amostras com adição de 10% (a) e 15% (b) de cimento



Fonte: Liu *et al.* (2023)

Aksu *et al.* (2023) realizaram ensaios de compressão simples em uma areia com a adição de cimento nos teores de 5% e 10% do peso seco da areia e nanosílica nos teores de 0,3%, 0,5% e 0,7% do peso seco da areia. As taxas de melhoria da adição de 0,7% de nanosílica foram de 1,5 vezes e 1,16 vezes para as misturas de 5% e 10% de cimento, respectivamente. A Figura 24 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples para a mistura de areia com 5% de cimento (a) e 10 % de cimento (b) comparando o efeito dos diferentes teores de nanosílica adicionados. Observa-se que o maior ganho de resistência acontece entre 7 e 28 dias de cura e que a adição de 0,7% de nanosílica dobrou a resistência (de 750 kPa para 1500 kPa) comparada à mistura de apenas areia e cimento no sétimo dia de cura.

Figura 24 – Resistência à compressão simples para os teores de nanosílica em função do período de cura



Fonte: Adaptado de Aksu *et al.* (2023)

Aksu *et al.* (2023) também investigaram o efeito do tamanho das partículas de nanosílica, comparando partículas de 15 nm e 60 nm. Para as comparações, foram utilizadas amostras de areia com 5% de cimento e 0,7% de nanosílica. As partículas de nanosílica de 15 nm proporcionaram maior resistência do que as de 60 nm. Para um período de cura de 7 dias, as amostras com nanosílica de 15 nm atingiram uma resistência de 1514 kPa e de 2008 kPa para 28 dias de cura. As amostras com nanosílica de 60 nm, por sua vez, apresentaram resistência de 1150 kPa para 7 dias de cura e de 1574 kPa para 28 dias de cura.

Além disso, o estudo de Aksu *et al.* (2023) verificou se um aumento na quantidade de partículas de nanosílica de 60 nm (para 1,5% do peso seco do solo) poderia superar a resistência obtida com as partículas de 15 nm. No entanto, a resistência de amostras com 1,5% de nanosílica de 60 nm foi de 1380 kPa após 7 dias e 1714 kPa após 28 dias de cura. Isso não superou as resistências alcançadas com 0,7% de nanosílica de 15 nm. Com tais análises, os pesquisadores concluíram que as partículas de nanosílica de 15 nm representaram o tamanho de partícula mais eficaz para a pesquisa e confirmaram que o tamanho das partículas de nanosílica também influencia sua eficácia na melhoria de propriedades geomecânicas, juntamente com a quantidade de material adicionado ao solo.

2.2.2 Microsílica usada na estabilização de solos

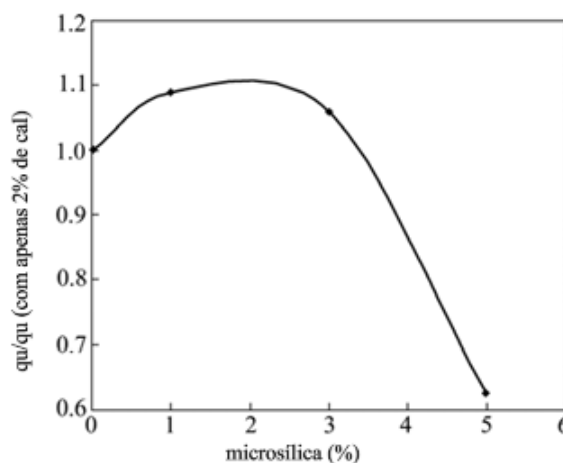
Muito utilizada como aditivo do concreto, a microsílica, também chamada de sílica ativa, é um material pozzolânico muito fino, composto por sílica amorfa produzida durante a

produção de silício metálico ou ligas de ferro sílico. Suas partículas são geralmente esféricas, com cerca de 0,15 micrômetros de diâmetro e 100 vezes menores que as partículas do cimento. Sua alta área de superfície melhora a trabalhabilidade da mistura e proporciona uma maior superfície de contato para as reações químicas (Türköz; Umu; Öztürk, 2021). Suas propriedades melhoram a coesão do concreto fresco além de aumentar a resistência à compressão, à abrasão, à erosão, ao congelamento e reduz a permeabilidade (Luther, 1990).

Ainda que seja aplicada com mais frequência como aditivo do concreto, a microsílica também vem sendo estudada para uso na estabilização de solos. Diversos trabalhos avaliaram o efeito da adição de microsílica a solos argilosos estabilizados com cal e também solos arenosos estabilizados com cal ou cimento.

Karimi *et al.* (2011) e Moayed *et al.* (2012) estudaram a estabilização de areias siltosas com cal e microsílica. A adição de microsílica e cal em areia siltosa causa uma reação entre o dióxido de silício (SiO_2) da microsílica e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) da cal, formando cristais de silicato de cálcio, um material duro e insolúvel. Esse processo aumenta os parâmetros de resistência do solo. Os resultados mostraram que a adição de microsílica-cal ao solo de areia siltosa aumenta o CBR e reduz o inchamento. Moyaed *et al.* (2012) realizaram ensaios de compressão simples após um período de cura de 7 dias, sem menção sobre imersão dos corpos de prova. Conforme resultados observados na Figura 25, os autores verificaram que para obter aumento da resistência à compressão simples, o valor ótimo foi de adição de 2% de cal e, de acordo com os dados da pesquisa, indicaram a adoção de 3% de microsílica como valor ideal para o material estudado. Os autores concluíram que o material residual de microsílica pode ser utilizado com sucesso para melhorar a resistência do solo de areia siltosa.

Figura 25 – Efeito da microsílica na resistência à compressão simples com adição de 2% de cal.

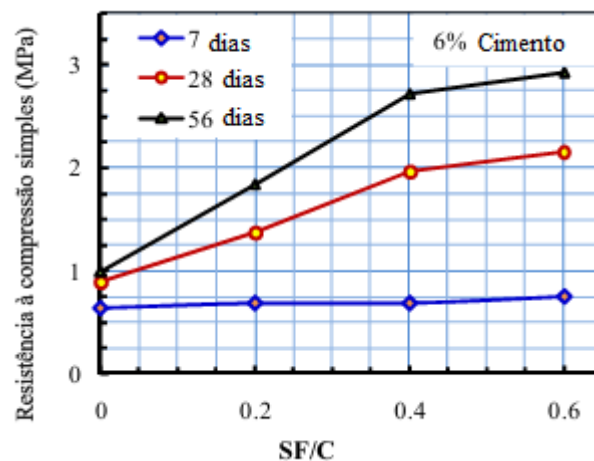


Fonte: Adaptado de Moayed *et al.* (2012)

Rahman e Ahmed (2017) estudaram o potencial da microsilica na estabilização de cimento e areia de duna para bases e sub-bases de estradas. Utilizando 0%, 6%, 9% e 12% de cimento do peso seco da areia com proporções de microsilica/cimento (SF/C) de 0, 0,2, 0,4 e 0,6, eles realizaram ensaios de compressão simples e CBR, além da análise granulométrica, ensaio de compactação, ensaio de durabilidade por ciclos de umedecimento e secagem e determinação de expansão (*swell*).

Os resultados dos ensaios de Rahman e Ahmed (2017) mostraram que todas as propriedades analisadas pelos ensaios foram melhoradas com a adição de cimento e microsilica. Verificou-se aumento expressivo da resistência à compressão simples com o uso de microsilica, por exemplo, a mistura com 6% de cimento do peso seco da areia e 1,2% de microsilica do peso seco da areia (referente à relação de 0,2) teve incremento de quase 8% (atingindo 680 kPa) e mais de 50% (atingindo 1370 kPa) de resistência em 7 e 28 dias, respectivamente, conforme se observa na Figura 26. O CBR passou de 143% na mistura de areia com cimento para 286% na mistura com adição de microsilica na relação microsilica/cimento de 0,6. Além disso, verificou-se uma maior compactação com a adição da microsilica, redução da perda de massa após 12 ciclos de umedecimento e secagem e nenhum inchamento foi observado nas amostras estabilizadas. Do ponto de vista da eficiência e da economia, a relação ótima microsilica/cimento foi de 0,20.

Figura 26 – Efeito da relação microsilica/cimento na resistência à compressão simples



Fonte: Adaptado de Rahman e Ahmed (2017)

Alireza Abbasnejad, Ata Rezaei (2023) investigaram o efeito da microsilica na resistência e nas características físicas da areia fina estabilizada com cimento e microsilica. Amostras de areia fina com três proporções diferentes de cimento (2%, 4% e 6% do peso do

solo) e quatro proporções diferentes de microsilica (0%, 0,5%, 1% e 1,5% do peso do solo) foram curadas por 1 e 7 dias e depois submetidas a ensaios de compressão e de resistência à compressão uniaxial. Os autores não mencionam se houve imersão dos corpos de prova. Os resultados indicam que, com o aumento da quantidade de cimento e microsilica, o teor de umidade ótima aumenta e o peso específico da mistura de areia, cimento e microsilica aumenta com a adição destes materiais até uma certa quantidade, mas depois começa a diminuir. Com o aumento da microsilica até 20% do peso do cimento, a resistência à compressão uniaxial da amostra de areia com diferentes proporções de cimento aumenta. Observa-se também que em ambos os tempos de cura para diferentes teores de cimento, com o aumento da quantidade de microsilica, a deformação relativa da ruptura aumenta.

2.2.3 Comparação da aplicação de microsilica e nanosilica

A microsilica e a nanosilica são dois tipos de aditivos com a mesma estrutura atômica porém diferentes tamanhos de partículas e vem sendo cada vez mais aplicadas na estabilização de solos. A maior diferença entre a microsilica e a nanosilica refere-se à área de superfície específica, que é maior nas nanopartículas (Ahmadi; Shafiee, 2019).

São escassos estudos na literatura que comparam a aplicação de microsilica e nanosilica em uma areia. A maioria dos autores que investigou esta vertente trabalhou com solos argilosos. Visto essa deficiência, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar os efeitos das partículas micro e nano de sílica em uma areia cimentada.

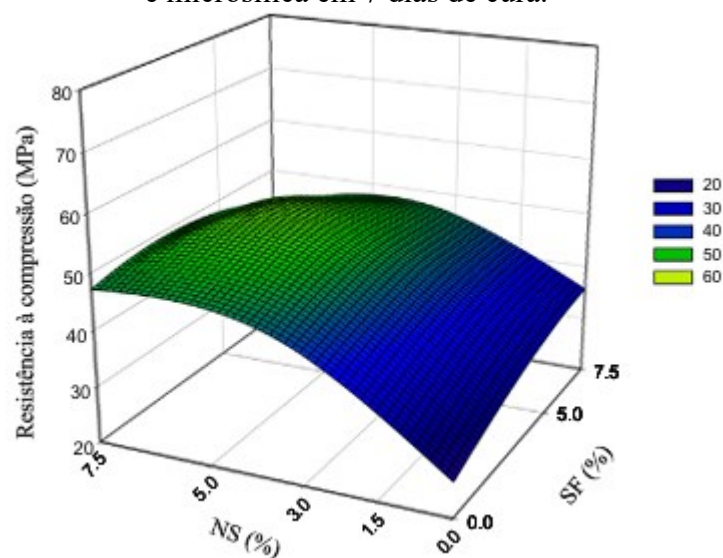
Ahmadi e Shafiee (2019) compararam os efeitos da adição de microsilica e nanosilica nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso. As porcentagens dos aditivos foram limitadas a 6%, e as amostras foram testadas após cura de 28 dias. Foram medidas variações nos limites de consistência, condições de compactação das amostras e resistência à compressão simples e ao cisalhamento não drenado do solo para cada mistura. Os resultados dos testes de compressão simples demonstraram que a nanosilica teve um efeito mais proeminente em porcentagens inferiores a 2% do peso seco da argila na resistência à compressão e no módulo de elasticidade do solo. A adição de nanomateriais aumentou a resistência das amostras, aproximando-se daquela obtida com microsilica estabilizada. As amostras com nanosilica mostraram um aumento na resistência em porcentagens inferiores a 1% do nanomaterial, enquanto a microsilica seguiu uma tendência relativamente estável. A adição de ambos aditivos reduziu a densidade máxima seca em até 5% e mostrou um maior teor de umidade ótimo. A adição de mais de 2% de nanosilica resultou em aumento no limite de liquidez e no índice de plasticidade

do solo, enquanto a microsilica reduziu levemente esses parâmetros. Ambos os materiais desempenharam um papel significativo na redução da porosidade, uma vez que ao penetrar nos poros da argila, as partículas nano e micro aumentam a integridade do solo. Também foi observada melhora da coesão entre partículas, embora o padrão de preenchimento dos poros e de envolvimento de partículas pelos dois materiais tenha sido diferente. Essa diferença foi especialmente influente em termos de absorção de água pela amostra.

O congelamento dos solos é um fenômeno que afeta negativamente as estruturas dos edifícios. Com o objetivo de encontrar um método capaz de reduzir esse problema, Zieba *et al.* (2019) estudaram a influência da adição de microsilica (MS) e nanosilica (NS) em solos suscetíveis à geada. Os testes foram realizados com três variantes: solo puro, solo com 5% de MS e solo com 5% de NS. Os resultados mostraram uma redução da ocorrência de lentes de gelo no solo quando se adicionou microsilica, e não se observou nenhum processo de congelamento com a adição de nanosilica. Ambos os estabilizadores reduzem o grau de congelamento da mistura de solo.

Nili e Ehsani (2015) estudaram o efeito de adição de nanosilica (apresentada como “NS” na Figura 27) nos teores de 0%, 1,5%, 3%, 5% e 7,5% e de microsilica (apresentada como “SF”, *silica fume*, na Figura 27) nos teores de 0%, 5% e 7,5% do peso seco do cimento nas propriedades de resistência do concreto. Os resultados apontaram que o uso da nanosilica teve um efeito 10 vezes maior na resistência à compressão em relação ao uso da sílica ativa, nos teores de 3 e 5% para formação da pasta de cimento (Figura 27).

Figura 27 – Resistência à compressão da pasta de cimento em função dos teores de nanosilica e microsilica em 7 dias de cura.



Fonte: Adaptado de Nili e Ehsani (2015)

2.2.4 Comentários finais

A revisão da literatura apresentada permitiu compreender, de forma ampla, os fundamentos teóricos e os avanços recentes relacionados à estabilização de solos com cimento, com ênfase no comportamento de areias cimentadas e na influência do tamanho das partículas dos materiais empregados como aditivos. A técnica de solo-cimento mostrou-se consolidada como uma alternativa eficaz para o aumento da resistência e da rigidez de solos granulares, sendo especialmente aplicável em obras de infraestrutura e pavimentação. Nesse contexto, os parâmetros de resistência ao cisalhamento, como coesão aparente e ângulo de atrito interno, destacam-se como indicadores essenciais para avaliar o desempenho mecânico das misturas.

Além disso, a caracterização do comportamento das areias cimentadas evidenciou que fatores como a porosidade, o teor de cimento e o tempo de cura exercem influência direta sobre a resistência desenvolvida. Entretanto, os estudos mais recentes vêm apontando para a importância de se considerar também o papel de adições minerais, especialmente aquelas com granulometrias reduzidas, na otimização dessas propriedades.

A inserção de materiais como a microsilica e a nanosilica tem se mostrado uma estratégia promissora, tanto pela possibilidade de promover reações pozolânicas que potencializam a formação de produtos cimentantes, quanto pela contribuição física dessas partículas finas na densificação da matriz do solo estabilizado. Trabalhos experimentais discutidos neste capítulo indicam que o uso combinado de cimento e nanosilica e microsilica pode resultar em misturas com desempenho mecânico superior, mesmo com teores reduzidos de cimento, o que representa um avanço importante em termos de sustentabilidade e eficiência técnica.

Dessa forma, a literatura fundamenta a proposta deste trabalho, que busca avaliar, sob uma perspectiva experimental, o efeito da adição de dióxido de silício micro e nanométrico no comportamento mecânico e microestrutural de uma areia estabilizada com cimento, considerando a obtenção de um material alternativo por meio de moagem, a fim de explorar diferentes aditivos além dos já consolidados na literatura. A partir dessa base teórica, parte-se para a investigação dos efeitos reais de aditivos de pequenos tamanhos granulométricos no desempenho das misturas, conforme apresentado nos capítulos seguintes.

3 MATERIAIS, MÉTODOS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os materiais, procedimentos metodológicos e o planejamento experimental adotados para realizar o presente trabalho, de modo a atingir os objetivos traçados.

3.1 MATERIAIS

Este item descreve os materiais utilizados na pesquisa e o modo como foram obtidos.

3.1.1 Areia

O solo utilizado para a estabilização nesta pesquisa é uma areia de granulometria média fina, da região de Florianópolis-SC, amplamente utilizada em obras da região. A Figura 28 exibe o local de coleta da areia. A caracterização do solo se encontra no item 4.1.

Figura 28 – Areia no local de coleta



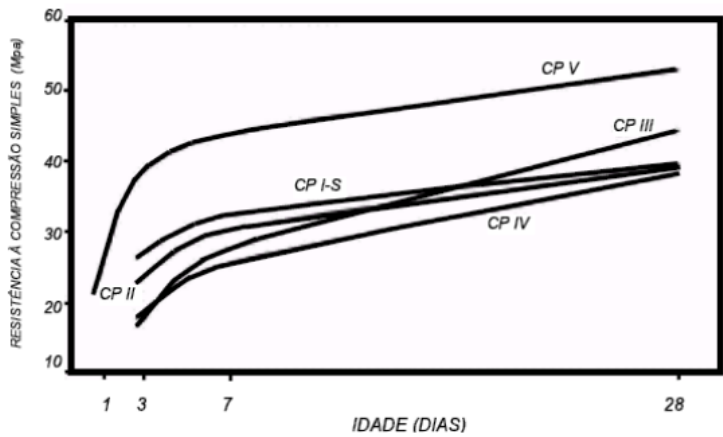
Fonte: Autora (2025)

3.1.2 Cimento Portland de alta resistência inicial CP V -ARI

Foi escolhido como agente cimentante o cimento Portland CP V – ARI, uma vez que este desenvolve resistência rapidamente após o início da cura e também por não conter adições

em sua composição. Conforme a Figura 29 apresenta, com apenas 7 dias de cura o CP V – ARI já atinge cerca de 80% da resistência obtida ao final do período de 28 dias.

Figura 29 – Evolução média da resistência à compressão dos tipos de cimento.



Fonte: ABCP (2002)

Foi utilizado o cimento da marca Itambé, cuja massa específica média é de 3,07 g/cm³, constante no site do fabricante. As Tabela 2 e Tabela 3 apresentam as propriedades químicas e físicas do cimento fornecidas pelo fabricante, dentro das faixas estabelecidas na NBR 16697:2018.

Tabela 2 – Propriedades químicas do cimento CP-ARI Itambé

	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda Fogo (%)	CaO livre (%)
Média	4,40	18,66	3,13	61,96	3,92	2,77	3,51	1,85
Desvio Padrão	0,02	0,12	0,05	0,62	0,36	0,07	0,28	0,11
Mínimo	4,35	18,41	3,06	61,05	3,50	2,65	3,10	1,68
Máximo	4,46	18,80	3,24	62,66	4,43	2,85	4,01	1,99

Fonte: Relatórios de Ensaio – Cimento Itambé (Jul/2024)

Tabela 3 – Propriedades físicas do cimento CP-ARI Itambé

	Tempo de pega		#200 (%)	#325 (%)	Resistência à compressão simples			
	Início (min)	Fim (min)			1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
Média	147	204	0,14	0,60	25,4	38,4	44,4	52,2
Desvio Padrão	10	12	0,05	0,15	0,6	1,0	1,0	0,8
Mínimo	51	180	0,08	0,40	24,4	37,3	43,1	51,2
Máximo	53	225	0,20	0,90	26,3	40,5	45,9	53,4

Fonte: Relatórios de Ensaio – Cimento Itambé (Jul/2024)

3.1.3 Água destilada

A água destilada foi utilizada nos processos experimentais, uma vez que garante que o material não seja contaminado.

3.1.4 Dióxido de Silício no tamanho micrométrico (MS)

O dióxido de silício, que foi utilizado em granulometrias distintas nesta pesquisa, foi adquirido da empresa Ecografe Inteligência Energética. O material se apresenta na forma de pó, na coloração branca, composto por quartzo-SiO₂, conforme foi verificado por meio de ensaios DRX. Em sua forma natural ele está com distribuição granulométrica na escala micro, portanto para obter dióxido de silício no tamanho nanométrico, foi feito um processo de moagem, conforme descrito no item 3.1.5.1. Ao longo deste trabalho, o dióxido utilizado em sua forma pura adquirida do fornecedor será mencionado como “dióxido de silício micrométrico”, com sigla de abreviação “MS”, enquanto o pó que passou pelo processo de moagem será mencionado como “dióxido de silício nanométrico”, com sigla de abreviação “NS”. A Figura 30 exibe a amostra em sua forma pura, conforme recebida pelo fornecedor.

Figura 30 – Amostra do dióxido de silício puro



Fonte: Autora (2025)

3.1.5 Dióxido de Silício no tamanho nanométrico (NS)

Os itens a seguir descrevem o processo de obtenção da granulometria nanométrica para o dióxido de silício.

3.1.5.1 Moagem e caracterização do dióxido de silício

Para a moagem do pó de dióxido de silício, foi utilizado o Moinho Vibratório de Bolas de Alta Energia Modelo 8000D 230V/50hz (SPEX), apresentado na Figura 31 e disponível no Laboratório de Síntese e Caracterização de nanoMateriais (LSCnM) do Departamento de Física da UFSC. O uso da moagem mecânica, denominada mecanoquímica (do termo em inglês “*mechanochemistry*”), tem grande apelo ambiental e energético, pois trata-se de uma técnica que dispensa uso de grandes quantidades de energia e/ou solventes (Liu *et al.*, 2022). Além de auxiliar na superação da dificuldade de obtenção de nanosílica comercial, um material ainda escasso e de alto custo no Brasil. Portanto, a alternativa encontrada para a presente pesquisa foi moer o pó de dióxido de silício comercial a fim de obter um material com domínios cristalinos (cristalitos) na escala nanométrica. Essa estratégia, além de sustentável, possibilita uma comparação mais apurada da influência das amostras nas escalas micro e nano, pois, salvo contaminações pelos meios de moagem, a composição do SiO₂ é a mesma.

Figura 31 – Moinho Vibratório de Bolas de Alta Energia Modelo 8000D 230V/50hz



Fonte: Site do LSCnM

Para a moagem do material foram realizados testes com potes de inox e alumina, mas identificou-se perda da massa do pote de alumina, o que inviabilizou o seu uso. Assim, optou-se pelo uso de dois potes (com capacidade de 65 ml) de inox e esferas de aço inox. Cada pote foi preenchido com 6 esferas de ½” de diâmetro, conforme mostra a Figura 32. Um parâmetro importante na moagem é o fator denominado de *Ball to Powder Ratio* (BPR), que indica a razão entre a massa das bolas e do pó a ser moído. O BPR utilizado na moagem foi de 10:1, mais comumente adotado (Zakeri; Ramezani; Nazari, 2012). Outro parâmetro importante é o volume

ocupado pelas bolas e pelo pó, uma vez que o pote muito cheio não permite as bolas se moverem e transferirem energia mecânica ao pó, enquanto que muito vazio faz com que as bolas colidam muito com as paredes internas do pote e gerem mais contaminação por parte dos meios de moagem. Por limitação de funcionamento por um período constante do moinho, foram realizados 7 ciclos de moagem a fim de se obter 10g de dióxido de silício moído ao final de cada ciclo, totalizando 70g. Para cada ciclo, a massa de bolas foi de 49,5g e a massa de pó foi de 4,95g.

Figura 32 – Pote de aço inox utilizado para a moagem do SiO_2



Fonte: Autora (2025)

O processo de moagem foi realizado durante 45 minutos para cada ciclo. Ao final de cada ciclo, foi recolhida uma pequena quantidade de amostra de cada pote para ser submetida ao ensaio de difração de raios X, com o intuito de verificar a redução do tamanho dos cristalitos a escala nanométrica. A Tabela 4 traz detalhes das coletas de amostras moídas, sendo que ao final dos 45 minutos, a amostra recolhida equivale à totalidade do pó restante no pote. O rendimento de 110% indica que a massa recolhida ao final da moagem foi maior do que a massa de pó inicial, o que sugere contaminação de ferro por desgaste das bolas durante a moagem.

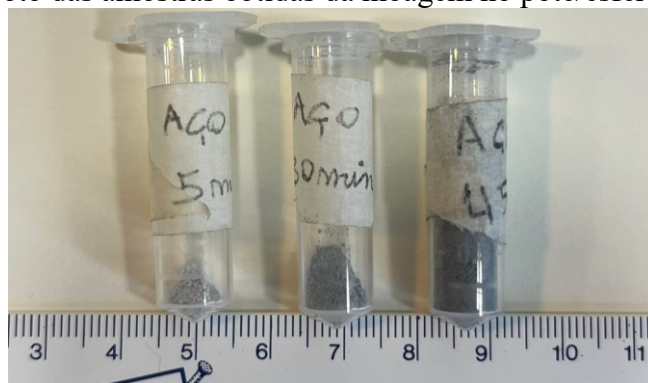
Tabela 4 – Massa das amostras coletadas por período de moagem.

Pote	Tempo de moagem	Amostra coletada
Aço inox	5 min	172 mg
	30 min	102 mg
	45 min	2360 mg
Rendimento		110%

Fonte: Autora (2025)

As fotos das amostras moídas por 5, 30 e 45 minutos no pote de aço inox são apresentadas na Figura 33 na sequência da esquerda para a direita. Fica evidente que houve contaminação por ferro, pois a coloração do pó tornou-se cinza, com maior intensidade após cada período de moagem. A porcentagem de contaminação foi avaliada posteriormente.

Figura 33 – Foto das amostras obtidas da moagem no pote/esferas de aço inox.



Fonte: Autora (2025)

3.2 MÉTODOS

Este item aborda os principais métodos e procedimentos utilizados para a realização dos diferentes tipos de ensaios de laboratório que visam caracterizar os comportamentos físico, químico e mecânico dos materiais. A Tabela 5 apresenta de forma resumida os ensaios que foram realizados durante a pesquisa.

Tabela 5 – Ensaios a serem realizados

	Ensaios	Material
Caracterização física	Granulometria por peneiramento	Areia
	Granulometria a laser	Areia, cimento e dióxido de silício
	Massa específica real dos grãos	Areia
	Compactação Proctor	Areia
Caracterização (micro)estrutural morfológica e química	Difração de raios X Análise Rietveld	Dióxido de silício: micro e nano
	Microscopia eletrônica de varredura	Misturas estabilizadas
	Ensaio BET	Dióxido de silício: micro e nano
Ensaios mecânicos	Compressão simples	Misturas estabilizadas
	Compressão diametral	Misturas estabilizadas
	Compressão triaxial	Misturas estabilizadas

Fonte: Autora (2025)

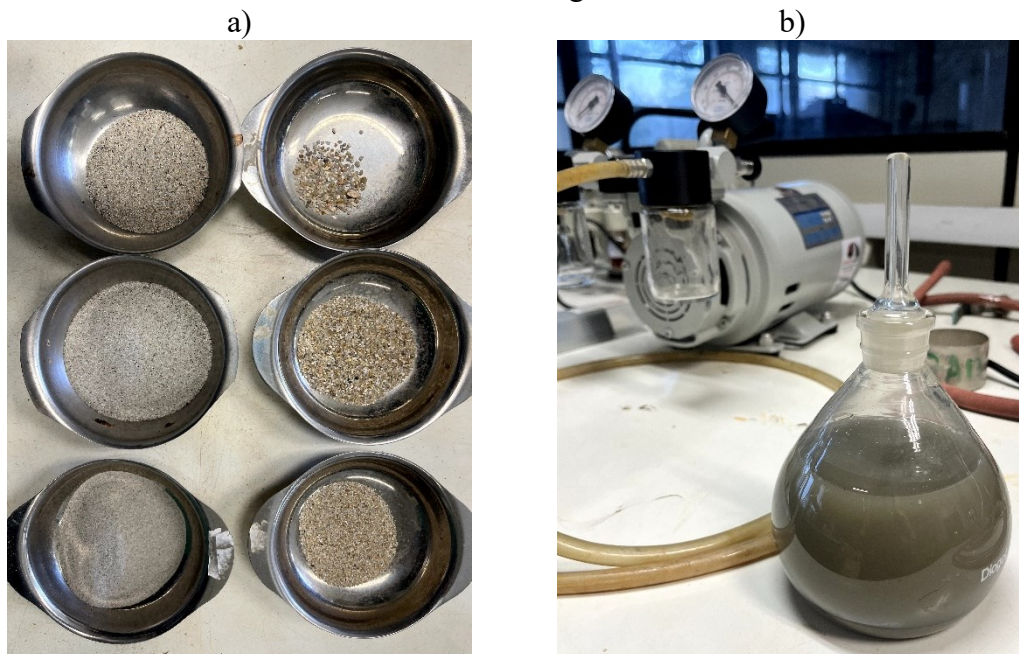
3.2.1 Caracterização física dos materiais

Os ensaios de caracterização física foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) e no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Para a caracterização física do solo foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, ensaio de compactação e teor de umidade ótima. A NBR 6457/2024 foi utilizada para preparação das amostras e determinação do teor de umidade. Os ensaios de granulometria (Figura 34a) foram realizados de acordo com a NBR 7181/2016 e os ensaios de massa específica real dos grãos (Figura 34b) seguiram a NBR 6458/2016. Por fim, os ensaios de compactação foram realizados conforme a NBR 7182/2016, adotando-se uma energia normal com o uso de cilindro pequeno de 1000 cm³ e soquete pequeno (26 golpes por camada e 3 camadas), com reaproveitamento de material.

Foi feita a granulometria a laser no pó de dióxido de silício antes e depois da moagem, na areia e no cimento, as quais foram realizadas no Laboratório de Aplicações de Nanomateriais em Construções (NANOTEC) da UFSC.

Figura 34 – Ensaio de caracterização da areia: a) análise granulométrica. b) massa específica real dos grãos.



Fonte: Autora (2025)

3.2.2 Caracterização (micro)estrutural das partículas de dióxido de silício

Os ensaios de caracterização estrutural (cristalográfica) e microestrutural (tamanho médio de cristalitos e microdeformação) foram realizados no Laboratório Multiusuário de Difração de Raios X (LDRX) localizado no Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.2.2.1 Ensaio de difração de raios X (DRX)

A técnica de difração de raios X foi utilizada para identificar e quantificar as fases cristalinas presentes e, ainda, determinar a microestrutura (o tamanho médio de cristalito e microdeformação) das amostras antes e depois da moagem, denominadas sílica microcristalina e sílica nanocristalina, respectivamente.

As amostras foram depositadas na forma de pó em um porta-amostra de Silício monocristalino (chamado de Si “zerobackground”). O equipamento utilizado foi um Difrátômetro de raios X modelo X’Pert Pro, equipado com um tubo de cobre ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) e um detector linear de estado sólido ultra-rápido (*X’celerator*). A Figura 35 apresenta o processo de preparação de amostras e a Figura 36 mostra como as amostras são posicionadas na torre de porta-amostras e como esta é alocada no equipamento.

Figura 35 – Preparação das amostras para ensaio DRX usando porta-amostras de Si “zerobackground”.



Fonte: Autora (2025)

Figura 36 – Amostras prontas para o ensaio. a) alocadas na torre de porta-amostras e b) torre alocada no difratômetro de raios X.



Fonte: Autora (2025)

3.2.2.1 *Análise Rietveld*

A partir da Lei de Bragg, que é a base fundamental da técnica de DRX, é possível interpretar os padrões de difração obtidos experimentalmente, convertendo os ângulos obtidos nos respectivos espaçamentos entre planos cristalinos responsáveis pelos picos observados, permitindo sua comparação com os dados dos padrões de difração. A análise das posições dos picos deve ser feita em conjunto com as intensidades relativas, uma vez que estas são influenciadas pelos tipos de átomos presentes na célula unitária. Assim, materiais com composições distintas, mas com estrutura cristalina semelhante (isoestruturais), apresentarão picos de Bragg nas mesmas posições, porém com intensidades relativas diferentes (Farias, 2011).

As análises de dados de DRX foram realizadas usando o método Rietveld implementado no pacote de software TOPAS. Os arquivos de difração de pó (PDF) do ICDD (*International Center for Diffraction Data*) e os arquivos de informações cristalográficas (CIF) do banco de dados de estrutura cristalina inorgânica (ICSD) foram utilizados na modelagem inicial. A qualidade dos ajustes foi monitorada pelos parâmetros de concordância R- perfil ponderado Rwp e “Goodness of Fit” GOF.

3.2.3 Análise da área superficial do dióxido de silício

Foi feita a análise da área de superfície específica do dióxido de silício nas duas granulometrias, utilizando o modelo BET (*Brunauer-Emmett-Teller*). A análise BET baseia-se na adsorção física de moléculas de gás (geralmente nitrogênio, N₂) na superfície do material sólido. O método calcula a área da superfície da amostra medindo a quantidade de gás adsorvido em diferentes pressões, usando a teoria BET para determinar a área da superfície correspondente à formação de uma monocamada de gás adsorvido (Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). A análise foi feita no Laboratório de Catálise e Fenômenos Interfaciais (LACFI) do Departamento de Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.2.4 Ensaios de resistência

Neste item serão apresentadas informações referentes ao delineamento experimental, quantidade de corpos de prova moldados, detalhes de moldagem e ensaios executados.

3.2.4.1 Delineamento experimental

O programa experimental foi definido para a realização dos ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e compressão triaxial. Foram definidas, portanto, quatro variáveis: controladas, fixadas, de resposta e de ruído, as quais são especificadas nas Tabela 6 a Tabela 9.

Tabela 6 – Variáveis controladas

Variáveis controladas	Unidade	Níveis	Material substituído
Teor de material cimentante	%	1%, 3%, 5%	Solo
Teor de dióxido de silício micrométrico (MS)	%	0%, 5%, 10%, 20%	Cimento
Teor de dióxido de silício nanométrico (NS)	%	0%, 5%, 10%, 20%	Cimento

Fonte: Autora (2025)

Tabela 7 – Variáveis fixadas

Variáveis fixadas	Unidade	Níveis
Tipo de material cimentante	-	CP V - ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial
Tipo de areia	-	Areia média

Peso específico aparente seco da areia	kN/m ³	16,4
Tempo de cura	dias	7
Fonte: Autora (2025)		

Tabela 8 – Variáveis de resposta

Variáveis de resposta	Unidade	Níveis
Resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral e à compressão triaxial	kPa	Avaliar o acréscimo de resistência em função do teor de cimento, MS e NS na areia
Fonte: Autora (2025)		

Tabela 9 – Variáveis de ruído

Variáveis de ruído	Medidas de controle
Equipamento e operador	Equipamento e operador únicos
Homogeneidade da areia	Uso de amostra única
Homogeneidade do cimento	Uso de amostra única
Homogeneidade do MS	Uso de amostra única
Homogeneidade do NS	Uso de amostra única
Fonte: Autora (2025)	

O peso específico seco da areia foi fixado no valor de 16,4 kN/m³, máximo resultante do ensaio de compactação na energia proctor normal. Os experimentos foram conduzidos em apenas um valor de peso específico, pois não é objetivo deste trabalho o estudo da influência da porosidade na resistência da mistura final.

Os teores de cimento foram escolhidos a partir dos estudos da aplicação da nanosílica na estabilização de solos encontrados na literatura. Portanto foram utilizados teores de 1%, 3% e 5% de cimento CP V - ARI nas misturas.

Como o cimento Portland CP V – ARI atinge altas resistências já nos primeiros dias após a aplicação, o tempo de cura escolhido foi de 7 dias, além de que o cimento não possui adições e portanto facilita a análise dos resultados.

Os teores de dióxido de silício MS e NS de 5%, 10% e 20% do peso seco de cimento foram utilizados nas misturas levando em consideração resultados anteriores apresentados na literatura, como Choobbasti, Vafaei e Kutanaei (2015, 2018) e que obtiveram 10% do peso seco de cimento como o teor ótimo de substituição por materiais nanométricos. Importante a análise com teores inferiores e superiores ao teor ótimo, que corresponde ao teor que proporcionou a

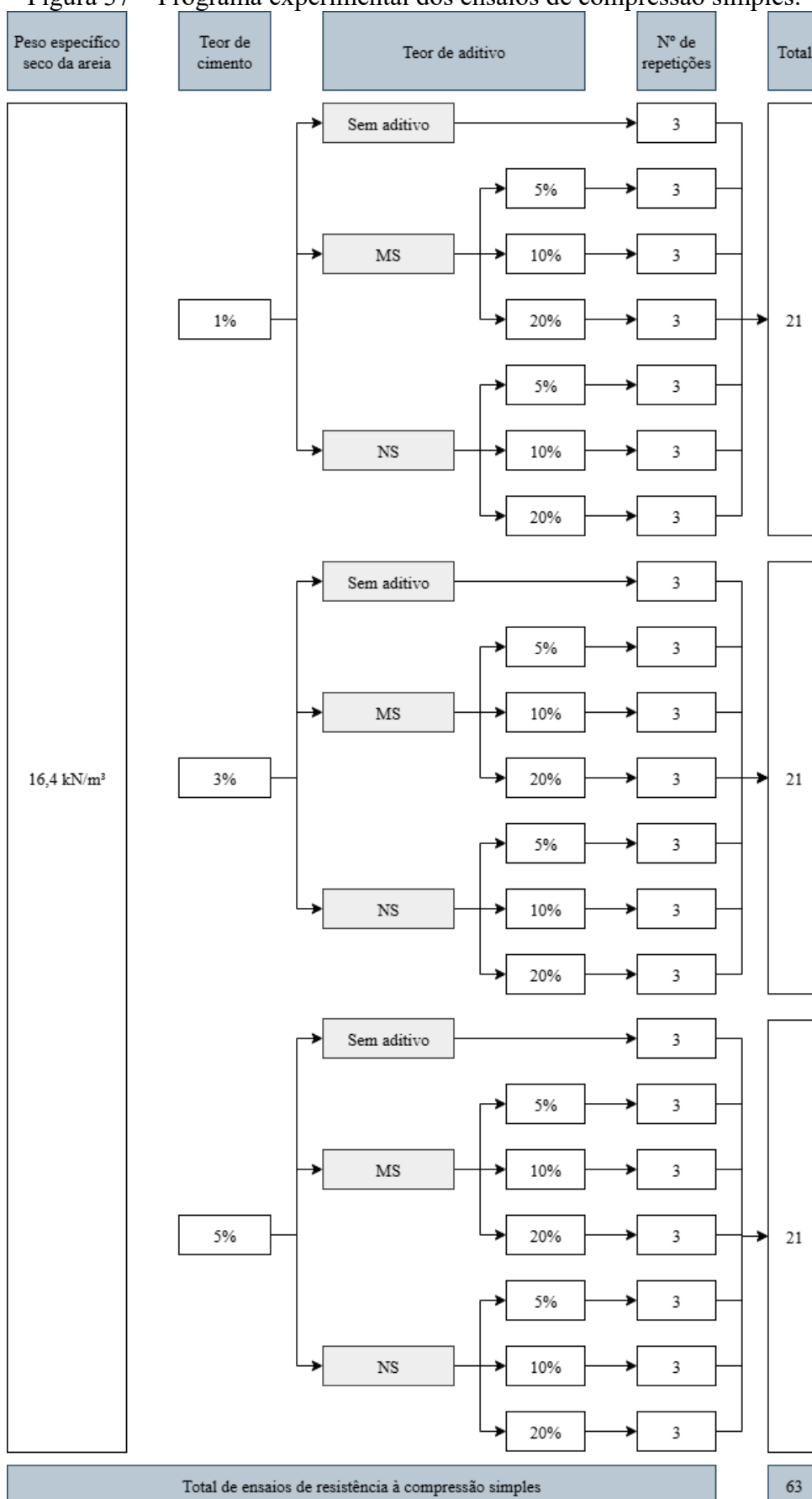
maior resistência atingida, para investigação dos efeitos de adições insuficientes e em excesso de nanomaterial e micromaterial.

Os ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFSC no campus de Florianópolis, enquanto que os ensaios de resistência à compressão triaxial foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UDESC, no campus de Joinville.

Para os ensaios de resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral e à compressão triaxial, os corpos de prova foram moldados e compactados em triplicatas (3 corpos de prova). Foram moldados, no total, 135 corpos de prova, sendo 63 destes para o ensaio de compressão simples, 63 para o ensaio de tração por compressão diametral e 9 para o ensaio triaxial, conforme apresentam as Figura 37, Figura 38 e Figura 39, respectivamente. No sexto dia de cura, os corpos de prova foram colocados em imersão por 24h para aproximar à condição de saturação e evitar possíveis problemas relacionados a medidas de sucção. Tanto os ensaios de compressão simples como os de tração, foram realizados para as três porcentagens de cimento e aditivo, enquanto que para os ensaios triaxiais, foram escolhidos os teores considerados ótimos de cimento e de micro e nanomaterial. No esquema apresentado aparece o teor de 5% de cimento como ótimo e para o dióxido de silício micro e nano, o teor de 10% do peso seco de cimento, valores em concordância com estudos prévios da literatura e que foram validados no decorrer da pesquisa. Os ensaios triaxiais foram do tipo consolidado isotropicamente drenado, para simular as condições de campo da areia.

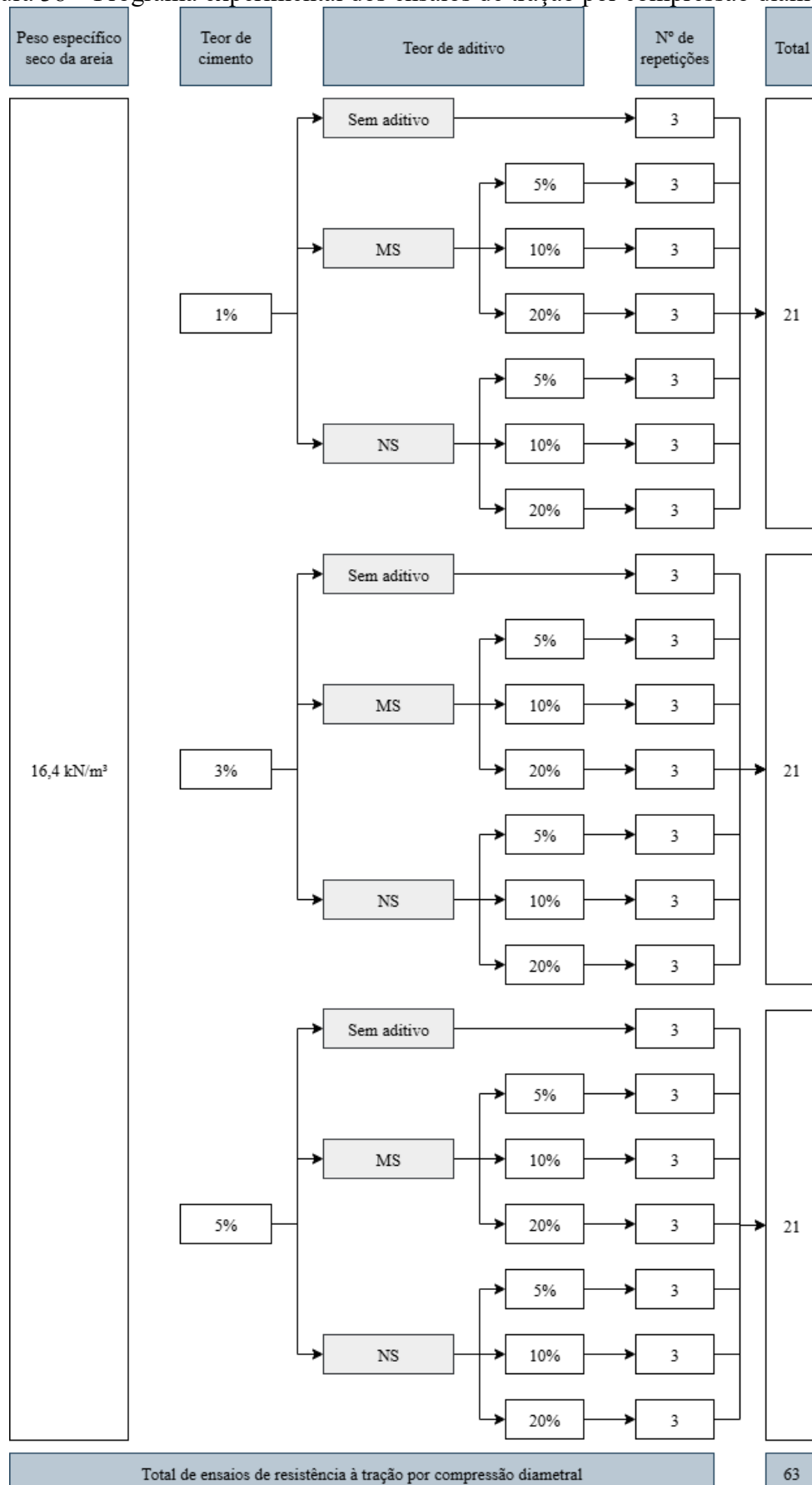
Após a realização dos ensaios de compressão simples, decidiu-se, ainda, pela realização de alguns ensaios adicionais com um teor maior de dióxido de silício no tamanho micrométrico, a fim de verificar o impacto no aumento da resistência. Para isso, a planilha de dosagem foi alterada para que o teor de dióxido de silício substituísse o peso seco da areia em vez do cimento, portanto foram escolhidos os teores de 5% de cimento do peso seco da areia e 10% de MS do peso seco da areia. Os resultados se encontram no item 4.2.5.

Figura 37 – Programa experimental dos ensaios de compressão simples.



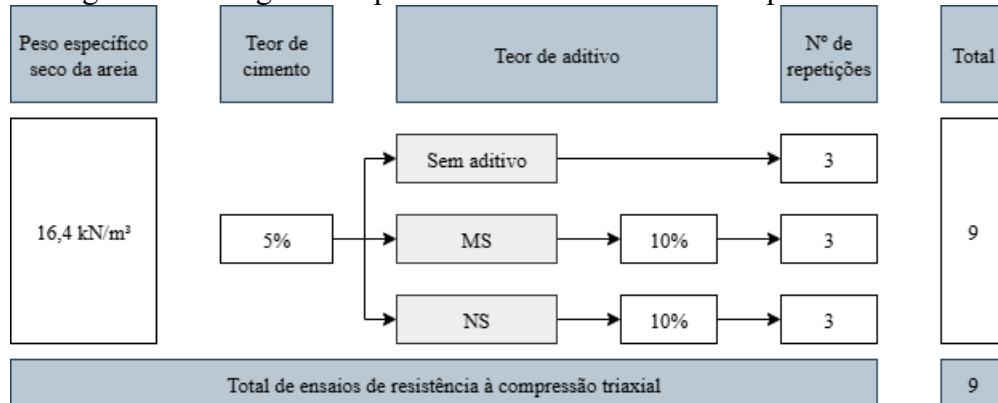
Fonte: Autora (2025)

Figura 38 – Programa experimental dos ensaios de tração por compressão diametral.



Fonte: Autora (2025)

Figura 39 – Programa experimental dos ensaios de compressão triaxial



Fonte: Autora (2025)

3.2.4.2 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova seguiu a norma ABNT NBR 12024. Os materiais foram preparados e pesados conforme a dosagem estabelecida.

Para cada combinação de teor de cimento e MS/NS, foram feitos três corpos de prova (triplicata). Todos os corpos de prova foram moldados considerando peso específico da areia de 16,4 kN/m³ e umidade ótima de 14%, obtidos no ensaio de compactação.

O processo de moldagem dos corpos de prova se iniciou com a pesagem individual da areia (que foi peneirada na peneira #16), do cimento, do dióxido de silício e da água. Primeiramente foram misturados por cerca de 5 minutos (para garantir a homogeneização) os materiais secos finos, conforme mostra a Figura 40 (cimento e dióxido de silício, quando usado) e depois adicionados e misturados por cerca de mais 5 minutos com a areia até atingir aspecto homogêneo (Figura 41a). Por fim, adicionou-se a água destilada e misturou-se por cerca de 2 minutos ou até se obter uma mistura homogênea (Figura 41b). Tal procedimento é fundamental para garantir a hidratação completa e uniforme de todas as partículas da mistura.

Figura 40 – Mistura do cimento com a) MS e b) NS



Fonte: Autora (2025)

Figura 41 – a) mistura do cimento + aditivo com a areia e b) mistura final com água



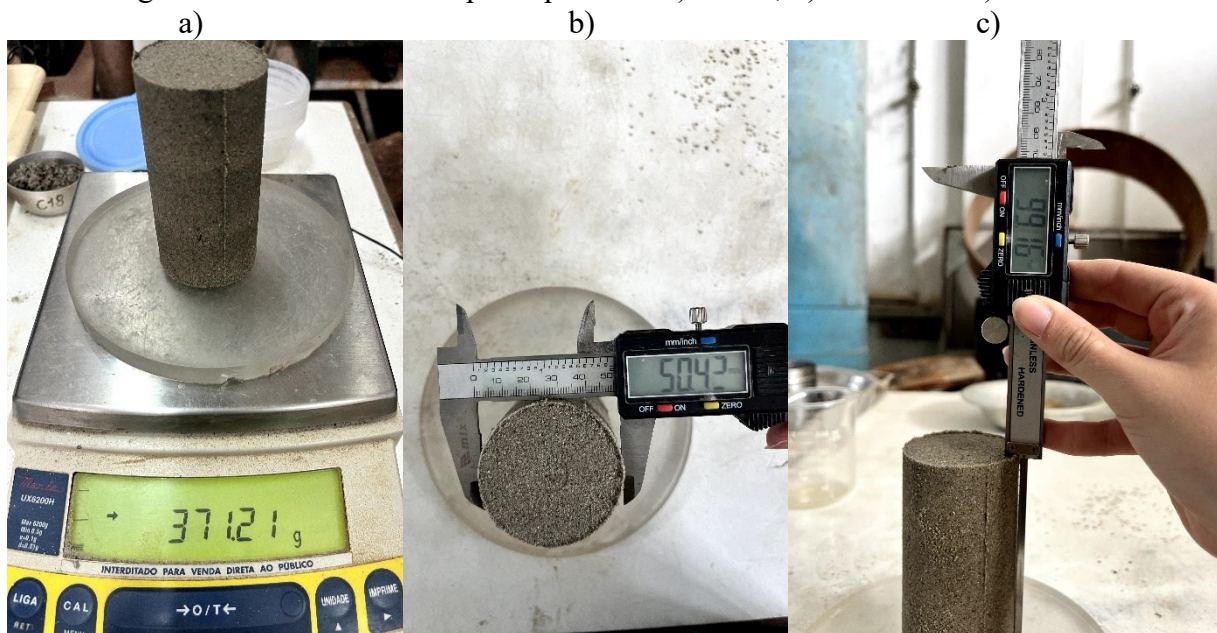
Fonte: Autora (2025)

Preparada a mistura, uma amostra foi retirada, colocada em uma cápsula e levada à estufa para determinação do teor de umidade, enquanto o restante da massa foi dividido em três parcelas e cada uma delas armazenada em um pote hermético, para evitar perda de umidade até a etapa da compactação. O molde usado foi do tipo cilíndrico tripartido de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, lubrificado com óleo a fim de minimizar o atrito e a adesão do material à superfície interna do molde. O molde preenchido pela primeira camada, foi levado à prensa hidráulica manual para a compactação da mistura, resultando em uma camada compactada de aproximadamente 3,33 cm. Ao final da compactação de cada camada, esta foi escarificada com uma faca antes da inserção da próxima camada de mistura a ser compactada, até que as três camadas de mistura formem o corpo de prova.

Finalizada a compactação, o corpo de prova foi desmoldado, pesado em uma balança digital com resolução de 0,01g e três medidas de altura e três de diâmetro foram feitas com um paquímetro digital, como se observa na Figura 42. A massa, o diâmetro médio e a altura média foram utilizados para o cálculo dos índices físicos do corpo de prova e para o cálculo da resistência. Foram considerados adequados os corpos de prova que atendiam aos três seguintes critérios:

- Grau de compactação dentro da faixa entre 99% e 101%;
- O desvio de umidade entre o valor medido e o valor alvo entre -0,5% e 0,5%;
- O diâmetro está entre 5 cm +- 0,1 cm e a altura está entre 10 cm +- 0,5 cm.

Figura 42 – Medidas do corpo de prova de a) massa; b) diâmetro e c) altura.



Fonte: Autora (2025)

Retiradas as medidas, os corpos de prova foram colocados com cuidado dentro de um saco plástico para evitar perda de umidade e foi levado à câmara úmida, onde ocorreu o processo de cura. No 6º dia de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e do saco plástico e submergidos em água por 24h (Figura 43) antes do rompimento nos ensaios de compressão.

Figura 43 – Corpos de prova em imersão por 24h



Fonte: Autora (2025)

Os corpos de prova dos ensaios de compressão simples e diametral foram identificados conforme a seguinte nomenclatura: CS/CDX_XCi_XMS/NS_2024XXXX. A definição do nome levou em consideração o tipo de ensaio (CS – compressão simples ou CD compressão diametral), seguido do número do CP (X), do teor de cimento utilizado (1Ci, 3Ci ou 5Ci), do teor de aditivo e granulometria do mesmo (por exemplo 5MS para 5% de dióxido de silício em tamanho micro ou 20NS para 20% de dióxido de silício em tamanho nano), quando utilizado e, da data de moldagem. Por exemplo, o corpo de prova de número 68 para compressão simples, de areia e com teor de 5% cimento, moldado no dia 19 de novembro de 2024, foi nomeado como CS68_5Ci_20241119; o corpo de prova de número 26 para compressão diametral, de areia com teor de 1% de cimento e 5% de dióxido de silício em tamanho micro, moldado no dia 11 de outubro de 2024 foi nomeado como CD26_1Ci_5MS_20241011.

3.2.4.3 Ensaio de resistência à compressão simples

Seguindo os procedimentos da NBR 12025/2012, os corpos de prova foram levados à ruptura em uma prensa de um anel dinamométrico de 5 kN a uma velocidade de carregamento de 1 mm/min. O corpo de prova foi posicionado de forma que seu eixo vertical ficasse alinhado com o eixo vertical da máquina. Foi utilizado um *top cap* para distribuir, uniformemente, a tensão aplicada no momento do ensaio, como se pode observar na Figura 44.

Como critério de aceitação para o ensaio, foi seguida a recomendação da NBR 12253, em que as resistências individuais de três corpos de prova não devem se afastar mais de 10% da resistência média do conjunto.

Para o cálculo da resistência à compressão simples, foi utilizada a Equação (9), que relaciona a carga de ruptura com a área transversal do corpo de prova.

$$q_u = \frac{F}{A_c} \quad (9)$$

Em que,

- q_u = resistência à compressão simples, em kPa;
- F = carga de ruptura corrigida pela equação do anel dinamométrico, em kN;
- A_c = área do corpo de prova, em cm².

Figura 44 – Plano de ruptura do corpo de prova



Fonte: Autora (2025)

3.2.4.4 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Seguindo as instruções da NBR 7222/2011, os corpos de prova foram posicionados entre duas tiras de aço para garantir o alinhamento no sentido longitudinal, conforme exposto na Figura 45. A prensa e velocidade utilizadas no ensaio foram as mesmas apresentadas para o ensaio de compressão simples.

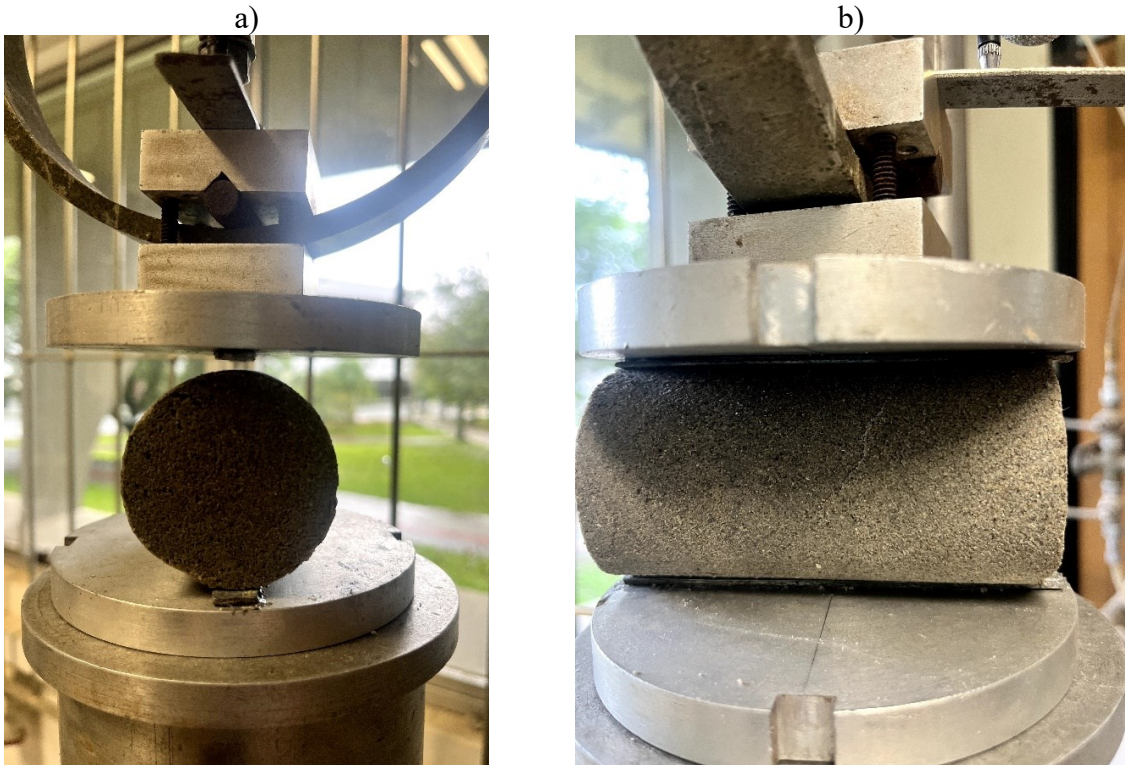
Para o cálculo da resistência à tração, foi utilizada a Equação (10), que relaciona a carga de ruptura com a área transversal do corpo de prova.

$$q_t = \frac{2F}{\pi dl} \quad (10)$$

Em que,

- q_t = resistência à tração, em kPa;
- F = carga de ruptura corrigida pela equação do anel dinamométrico, em kN;
- d = diâmetro do corpo de prova, em mm.
- l = comprimento do corpo de prova (altura), em mm.

Figura 45 – Ensaio de compressão diametral: a) visão frontal e b) visão lateral



3.2.4.5 Ensaio de compressão triaxial

O ensaio triaxial foi realizado na condição drenada, utilizando o equipamento da marca Owntec, conforme ilustrado na Figura 46. Os procedimentos de moldagem dos corpos de prova foram os mesmos adotados os corpos de prova dos ensaios de compressão. A única diferença é que o corpo de prova não foi imerso em água antes do rompimento, sendo o processo de saturação realizado por contrapressão, no interior da câmara triaxial. A execução do ensaio triaxial seguiu as diretrizes da norma ASTM d7181-2020.

Figura 46 – Equipamento utilizado para os ensaios triaxiais



Fonte: Autora (2025)

Primeiramente, o corpo de prova envolto em uma membrana de látex de 0,5 mm para impedir o contato do corpo de prova com o fluido, foi instalado na câmara, a qual foi preenchida por água desaerada para a aplicação da tensão confinante. A prensa foi ajustada subindo a câmara triaxial até o pistão encostar na célula de carga, com uma folga de 2 mm.

O ensaio se iniciou com a saturação, em que foi aplicada uma contrapressão até a obtenção de um parâmetro B (Skempton, 1954) próximo a 1, que indica que o solo está saturado. A Tabela 10 apresenta os parâmetros B atingidos em cada mistura. Em seguida, a tensão confinante foi elevada até a obtenção da tensão efetiva de ensaio, caracterizando a fase de adensamento, a qual foi finalizada quando a variação de volume do corpo de prova se tornou constante.

Tabela 10 – Parâmetro B de Skempton para cada mistura

TC (kPa)	Apenas cimento	MS	NS
50	0,93	1,06	0,94
100	0,95	1,06	0,96
200	0,97	1,06	0,96

Fonte: Autora (2025)

Por fim, ocorreu a fase de cisalhamento, em que a tensão axial foi aplicada a uma taxa suficientemente lenta, de 0,02 mm/min, de forma a garantir a drenagem contínua da água, até que um dos critérios de ruptura fosse atingido.

Para esta pesquisa, foram utilizadas três tensões confinantes (50 kPa, 100 kPa e 200 kPa) para cada uma das misturas de corpo de prova definidas no item 3.2.4.1 (5% de cimento, 5% de cimento + 10% de dióxido de silício micrométrico e 5% de cimento + 10% de dióxido de silício nanométrico), totalizando 9 ensaios triaxiais. Ao final dos ensaios, foi possível obter as envoltórias de ruptura para cada corpo de prova, apresentadas no capítulo de resultados.

3.2.5 Caracterização morfológica das misturas

Para caracterizar a morfologia das misturas, foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos produtos hidratados, pelo uso da adição de cimento e dióxido de silício, nas superfícies de ruptura dos corpos de prova. A microscopia foi realizada no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC. Para isso, foram escolhidas amostras de fragmentos obtidos pós a ruptura nos ensaios de resistência à compressão simples de três teores diferentes de aditivo:

- Amostra 1: CP CS21_5Ci_20240814, com adição de 5% de cimento;
- Amostra 2: CP CS37_5Ci_10MS_20240903, com adição de 5% de cimento e 10% de dióxido de silício micrométrico;
- Amostra 3: CP CS62_5Ci_10NS_20240923, com adição de 5% de cimento e 10% de dióxido de silício nanométrico.

Cada uma das amostras foi ampliada em 30x, 100x, 500x, 2000x, 5000x, 10000x e 20000x, a fim de analisar sua morfologia e os produtos das reações de cimentação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados durante a pesquisa, tanto para caracterização física, microestrutural, morfológica e química, quanto os ensaios de resistência.

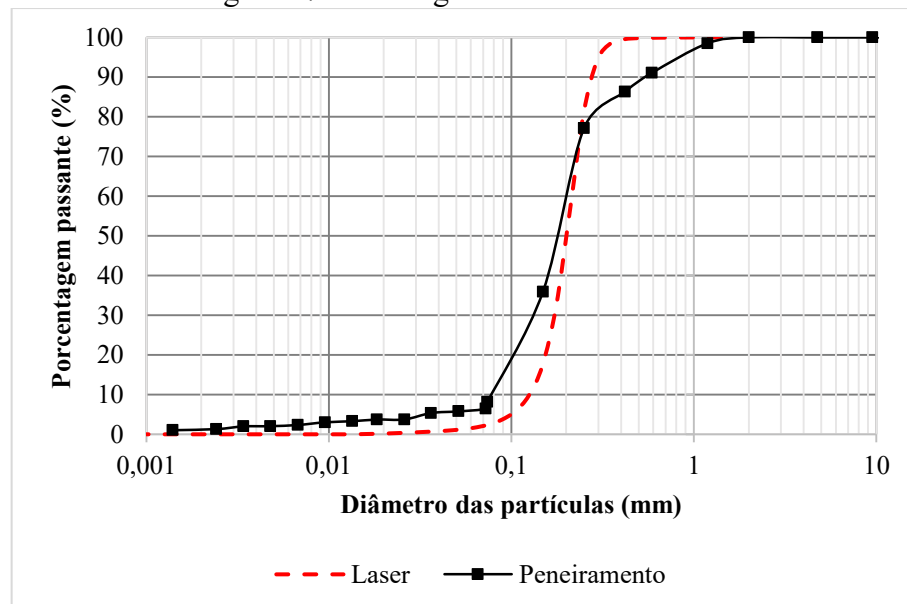
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados por tipo de material utilizado na pesquisa.

4.1.1 Areia

A Figura 47 compara as curvas granulométricas da areia obtidas por meio de granulometria por sedimentação e difração a laser. Observa-se predominância de partículas com tamanho de areia fina a média, com diâmetro entre 0,1 e 1 mm e a declividade das curvas caracteriza a areia como uniforme.

Figura 47 - Curva granulométrica da areia



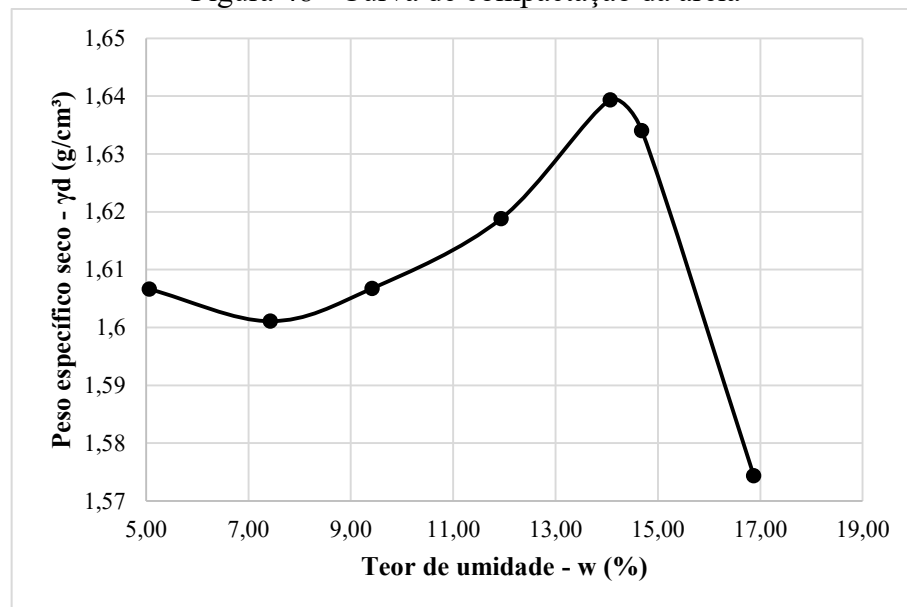
Fonte: Autora (2025)

Conforme Lambe e Whitman (1951), a uniformidade dos solos pode ser expressa pelo coeficiente de uniformidade C_u . O coeficiente obtido para a areia pela granulometria por peneiramento foi de $C_u = 2,5$, portanto a areia é classificada como uniforme.

A partir da curva granulométrica por peneiramento, retira-se o diâmetro efetivo $D_{10} = 0,08$ mm e o diâmetro médio $D_{50} = 0,19$ mm.

A massa específica dos grãos encontrada para a areia é de $2,61$ g/cm³. A Figura 48 apresenta a curva de compactação, a qual resultou em uma umidade ótima de $14,07\%$ e um peso específico de $16,4$ kN/m³. A partir do ensaio de compactação foi definido o teor de umidade ótima da areia e o peso específico que foram adotados nas moldagens dos corpos de prova.

Figura 48 - Curva de compactação da areia



Fonte: Autora (2025)

Comparando com a areia de Osório, conhecida por ser uma areia uniforme e estável e amplamente estudada por diversos trabalhos da literatura, como Cruz (2008), pode-se concluir que a areia desta pesquisa apresenta comportamento semelhante. A Tabela 11 compila as propriedades da areia deste estudo em comparação com as propriedades da areia de Osório.

Tabela 11 – Comparação entre areia de Florianópolis e areia de Osório – Baseado em Cruz (2008)

Índices físicos	Areia de Florianópolis	Areia de Osório
Densidade real dos grãos - G_s	2,61	2,65
Coeficiente de uniformidade - C_u	2,5	2,11

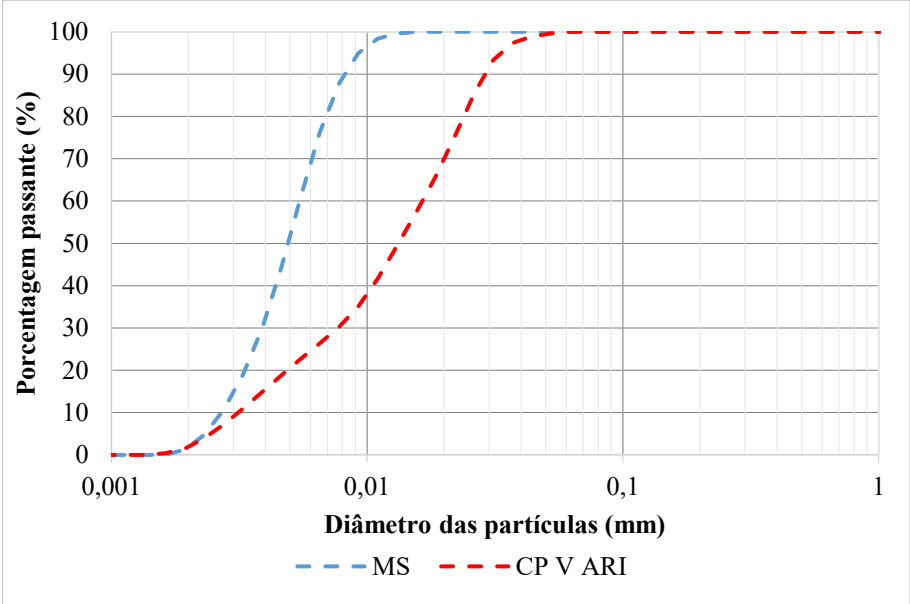
Diâmetro efetivo - D ₁₀ (mm)	0,08	0,9
Diâmetro médio - D ₅₀ (mm)	0,19	0,17

Fonte: Cruz (2008) e Autora (2025)

4.1.2 Cimento CP V ARI e Dióxido de silício

Para uma comparação dos tamanhos dos materiais finos, a Figura 49 apresenta as curvas granulométricas, obtidas por laser, do cimento CP V ARI e do dióxido de silício micrométrico. Predominam partículas de cimento com diâmetros na faixa de 0,002 a 0,04 mm e retira-se o diâmetro efetivo $D_{10} = 0,003$ mm e o diâmetro médio $D_{50} = 0,014$ mm. Tais características indicam um material muito fino, favorecendo a hidratação rápida e o ganho inicial de resistência. Já para o dióxido de silício micrométrico (MS), o tamanho das partículas varia de 0,29 a 15 micrômetros. O granulômetro não foi capaz de identificar partículas na escala nanométrica, portanto o tamanho do cristalito do dióxido de silício moído foi avaliado pelo DRX.

Figura 49 – Comparação da curva granulométrica dos dióxidos de silício e cimento

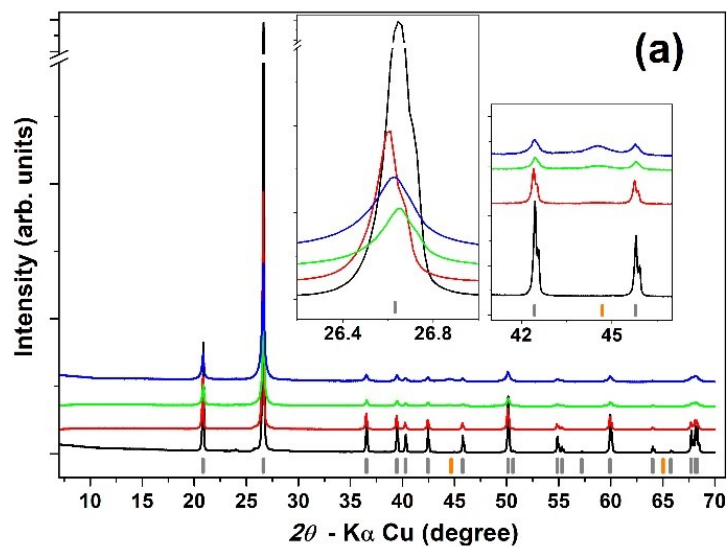


Fonte: Autora (2025)

Para uma análise mais detalhada da estrutura, o dióxido de silício foi avaliado por meio de ensaios de difração de raios X da forma como foi obtido na indústria e também após o processo de moagem. A Figura 50 mostra os padrões de DRX das amostras, onde é possível verificar que a grande maioria dos picos de Bragg observados pertencem à fase trigonal

(hexagonal) do α -quartzo (SiO_2). É possível identificar os picos de Bragg referentes à fase cristalina cúbica do α -Fe, mais nítido para o tempo de 45 min. (traço azul), o que indica contaminação do pote de inox utilizado na moagem. É evidente também o alargamento dos picos de Bragg, que caracteriza a diminuição do tamanho dos cristalitos e/ou aumento de desordem na rede cristalina (chamada de microdeformação).

Figura 50 – Padrões de difração de raios X das amostras moídas com conjunto (pote e esferas) de aço inox. Traços pretos representam o padrão de DRX da amostra de partida (mMS). Traços coloridos representam padrões das amostras moídas por 5 min (vermelho), 30 min (verde) e 45 min (azul). Os símbolos (barras verticais) representam as posições dos picos de Bragg das fases cristalinas do α -quartzo (cinza) e do α -Fe (laranja).



Fonte: Prof. C.E.M. Campos (LDRX-UFSC)

Em relação ao tamanho das partículas, pode-se observar na Tabela 12, que a moagem foi efetiva, pois já após 30 minutos foram atingidos tamanhos médios de cristalito menores que 100 nm, o que caracteriza um nanomaterial. Percebe-se que houve pequena contaminação por ferro na moagem em função do pote de inox. Esta contaminação foi de cerca de 3 % em massa, quantidade esta que, se acredita, não deva influenciar nas propriedades do material durante o processo de estabilização. Os dados da Tabela 12 demonstram que o tamanho das partículas efetivamente diminuiu com a moagem, diferenciando o material original do moído, fato que não foi possível de identificar adequadamente por meio das granulometrias a laser.

Tabela 12 – Resumo da análise Rietveld dos resultados obtidos por difração de raios X.
Global R-Values: Rwp 9.98 e GOF 6.77

Data da análise	Amostra	Classificação da sílica	Tamanho médio de cristalito (nm)	Composição
28/02/2024	SiO ₂ puro antes de moer	MS	421	100% α -quartzo
28/02/2024	SiO ₂ moído no aço 5 min	MS	118	99.4 % α -quartzo (SiO ₂)
			4,5	0.6 % Fe
28/02/2024	SiO ₂ moído no aço 30 min	NS	42	98 % α -quartzo (SiO ₂)
			7	2 % Fe
28/02/2024	SiO ₂ moído no aço 45 min	NS	32	97 % α -quartzo (SiO ₂)
			8	3 % Fe

Fonte: Autora (2025)

O dióxido de silício também foi submetido à análise BET, para verificação da área de superfície específica do material, resultando em um valor de 1,624 m²/g para o dióxido de silício original e de 14,568 m²/g para o dióxido de silício moído. Os resultados indicam que o dióxido de silício obtido após a moagem de 45 minutos possui uma área de superfície específica cerca de 10 vezes maior que a do dióxido de silício no estado puro, demonstrando a efetividade da moagem. No entanto, outros trabalhos utilizaram nanosílica com área de superfície de 160 m²/g (Liu *et al.*, 2023), 190-250 m²/g (Chen *et al.*, 2023), 300 m²/g (Wang *et al.*, 2020), valores estes muito superiores ao obtido através da técnica adotada neste trabalho. Desta forma, o dióxido de silício moído desta pesquisa, apesar de se apresentar no tamanho nanométrico, não é classificado como a nanosílica encontrada no mercado, ponto que motivou a escolha da nomeação do material estudado na pesquisa como “dióxido de silício nanométrico” e não “nanosílica”.

4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples são apresentados de forma condensada em tabelas seguidos das respectivas curvas de análise da resistência. Primeiro serão apresentados os resultados relativos aos corpos de prova de areia e cimento, depois os resultados das misturas com dióxido de silício nos tamanhos micro e nanométricos, respectivamente. Por fim, foi feita uma análise comparativa entre os três tipos de mistura.

4.2.1 Mistura de areia e cimento

A Tabela 13 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão simples dos nove corpos de prova rompidos para a mistura de areia e cimento nos teores de 1%, 3%, 5% do peso seco da areia. São apresentados os teores de umidade e massa específica, resistência individual de cada corpo de prova, média e desvio padrão da resistência por teor de cimento.

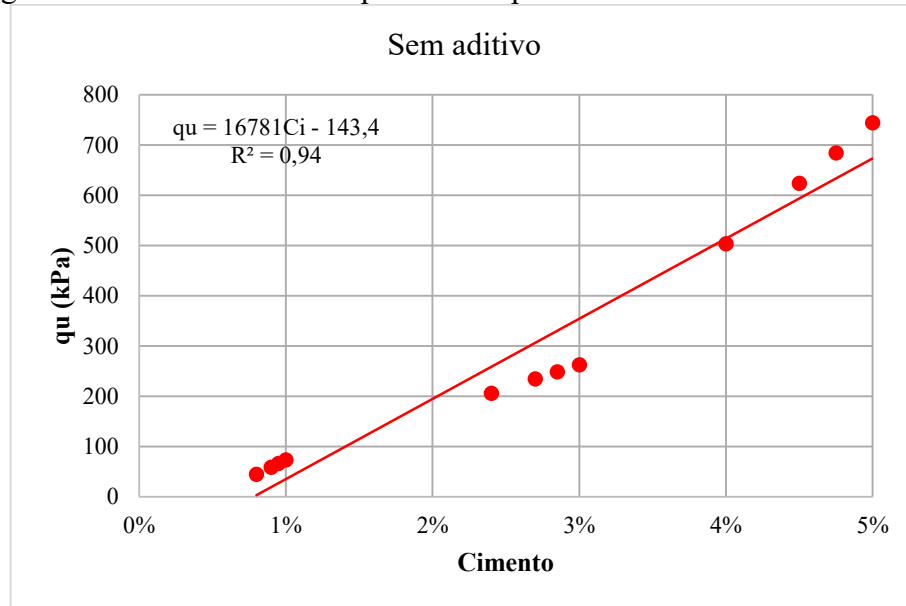
Tabela 13 – Resultado do ensaio de compressão simples para a mistura de areia e cimento

Nome CP	Cimento (%)	w (%)	ρ_s	q_u (kPa)	Média (kPa)	Desvio padrão (kPa)
CS7_1Ci_20240808	1	14,1	1,64	82,58	73,11	7,04
CS8_1Ci_20240808	1	14,1	1,62	65,68		
CS22_1Ci_20240814	1	14,0	1,63	71,07		
CS9_3Ci_20240809	3	14,0	1,63	284,63	262,61	16,82
CS10_3Ci_20240809	3	14,0	1,63	243,82		
CS23_3Ci_20240816	3	13,6	1,64	259,39		
CS1_5Ci_20240726	5	13,5	1,64	729,07	744,33	11,06
CS1'_5Ci_20240814	5	14,2	1,63	749,02		
CS20_5Ci_20240814	5	14,2	1,63	754,90		

Fonte: Autora (2025)

A Figura 51 apresenta o ajuste linear da curva de variação da resistência em função do teor de cimento. Observando os resultados da tabela e da figura, a resistência aumentou com o aumento do teor de cimento atingindo seu valor máximo com adição de 5% de cimento, que atingiu uma resistência média de 744,33 kPa, cerca de 10 vezes maior que a adição de 1% de cimento (média de 73,11 kPa). O $R^2 = 0,94$ indica forte correlação positiva entre o teor de cimento e a resistência.

Figura 51 – Resistência à compressão simples da mistura de areia e cimento



Fonte: Autora (2025)

Em comparação com estudos da literatura, considerando adição de 5% de cimento em areias, Foppa (2005) obteve q_u por volta de 920 kPa para um peso específico de 1,73 g/cm³, valor um pouco superior ao desta pesquisa (744 kPa para um peso específico de 1,64 g/cm³). No trabalho de Fontoura (2015), cuja cura foi de 30 dias, para uma umidade de 12%, os corpos de prova atingiram q_u média de 1077 kPa, cerca de 300 kPa superior ao valor desta pesquisa. As diferenças entre os resultados provavelmente advêm dos teores de umidade adotados, peso específico e a influência que o período de cura tem sobre a resistência.

4.2.2 Mistura de areia, cimento e dióxido de silício micrométrico

A Tabela 14 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão simples dos 27 corpos de prova rompidos para a mistura de areia e cimento nos teores de 1%, 3%, 5% do peso seco da areia com substituição do cimento pelos teores de 5%, 10% e 20% de dióxido de silício micrométrico. São apresentados os teores de umidade e massa específica, resistência individual de cada corpo de prova e média da resistência para grupos de triplicatas com mesmo teor de cimento e dióxido de silício (MS).

Tabela 14 - Resultado do ensaio de compressão simples para a mistura de areia e cimento com dióxido de silício micrométrico

Nome CP	Cimento (%)	Aditivo (%)	w (%)	ρ_s (g/cm³)	q_u (kPa)	Média (kPa)	Desvio padrão (kPa)
CS11_1Ci_5MS_20240812	1	MS	5	13,8	1,63	69,56	
CS12_1Ci_5MS_20240812	1	MS	5	13,9	1,63	73,26	68,60
CS33_1Ci_5MS_20240903	1	MS	5	14,2	1,63	62,98	4,25
CS13_1Ci_10MS_20240812	1	MS	10	14,1	1,63	60,48	
CS14_1Ci_10MS_20240812	1	MS	10	14,1	1,63	68,95	64,98
CS34_1Ci_10MS_20240903	1	MS	10	14,1	1,63	65,52	3,48
CS15_1Ci_20MS_20240813	1	MS	20	13,8	1,63	60,94	
CS16_1Ci_20MS_20240813	1	MS	20	13,9	1,62	54,62	60,07
CS17_1Ci_20MS_20240813	1	MS	20	13,9	1,63	64,65	4,14
CS24_3Ci_5MS_20240821	3	MS	5	14,6	1,62	245,11	
CS25_3Ci_5MS_20240821	3	MS	5	14,5	1,63	242,79	246,03
CS26_3Ci_5MS_20240821	3	MS	5	14,5	1,62	250,21	3,10
CS48_3Ci_10MS_20240916	3	MS	10	14,3	1,63	264,22	
CS49_3Ci_10MS_20240916	3	MS	10	14,0	1,63	217,76	249,16
CS50_3Ci_10MS_20240916	3	MS	10	13,9	1,64	265,48	22,20
CS55_3Ci_20MS_20240917	3	MS	20	14,2	1,63	184,60	
CS56_3Ci_20MS_20240917	3	MS	20	14,0	1,63	218,53	210,68
CS59_3Ci_20MS_20240923	3	MS	20	13,8	1,64	228,91	18,92
CS3_5Ci_5MS_20240813	5	MS	5	14,0	1,63	630,03	
CS18'_5Ci_5MS_20241112	5	MS	5	13,9	1,64	633,01	639,42
CS19'_5Ci_5MS_20241112	5	MS	5	13,9	1,64	655,21	11,23
CS4_5Ci_10MS_20240806	5	MS	10	13,8	1,63	627,41	
CS36_5Ci_10MS_20240903	5	MS	10	14,2	1,63	539,87	592,13
CS37_5Ci_10MS_20240903	5	MS	10	14,2	1,63	609,12	37,71
CS5_5Ci_20MS_20240806	5	MS	20	13,9	1,64	577,00	
CS38_5Ci_20MS_20240904	5	MS	20	14,2	1,63	556,64	539,63
CS39_5Ci_20MS_20240904	5	MS	20	14,5	1,63	485,25	39,34

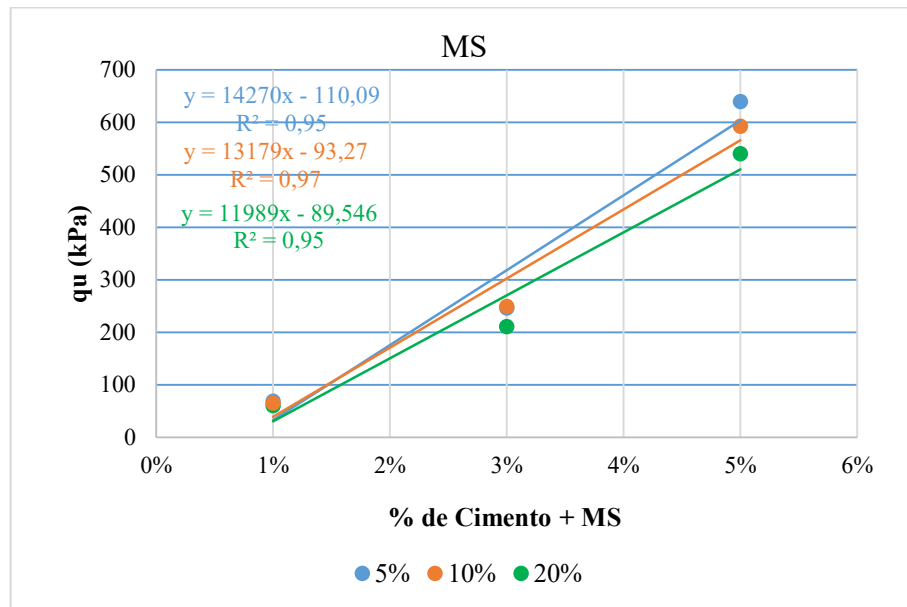
Fonte: Autora (2025)

Observa-se que para a mistura de 1% de cimento com adição de MS, o aumento do teor de aditivo causou redução na resistência, indicando que para baixos teores de cimento, a substituição por MS pode prejudicar a formação de ligações cimentantes suficientes. Para 3% de cimento, o aumento do teor de MS provocou aumento na resistência até 10% de MS e depois

decreceu com a adição de 20% de MS. O maior aumento na resistência (639,42 kPa) ocorreu com a maior quantidade de cimento (5%) e, assim como ocorreu com 1% de cimento, houve decréscimo na resistência com o aumento da substituição de MS.

A Figura 52 apresenta o ajuste linear das curvas de resistência à compressão simples de acordo com o teor de cimento e MS adicionados. O eixo das abscissas apresenta o teor da mistura de cimento com substituição do dióxido de silício. Observa-se semelhança no comportamento das curvas com adição de 5% e 10% de MS até o teor de 3% de cimento, após isso, a mistura com menos MS atinge maiores resistências.

Figura 52 - Resistência à compressão simples da mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício micrométrico



Fonte: Autora (2025)

Em comparação com o estudo de Rahman e Ahmed (2017), considerando adição de 6% de cimento do peso seco da areia e 1,2% de microsilica do peso seco da areia, obtiveram q_u por volta de 680 kPa, cerca de 14% maior que o valor encontrado nesta pesquisa, que considerou adição de 5% de cimento do peso seco da areia e 10% de MS do peso seco de cimento, que equivale a 0,5% do peso seco do solo. Portanto, pode-se dizer que os resultados de resistência obtidos nesta pesquisa se aproximam de outros estudos da literatura, sabendo que são materiais semelhantes.

4.2.3 Mistura de areia, cimento e dióxido de silício nanométrico

A Tabela 15 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão simples dos 27 corpos de prova rompidos para a mistura de areia e cimento nos teores de 1%, 3%, 5% do peso seco da areia com substituição do cimento pelos teores de 5%, 10% e 20% de dióxido de silício nanométrico. São apresentados os teores de umidade e massa específica, resistência individual de cada corpo de prova e média da resistência para grupos de triplicatas com mesmo teor de cimento e dióxido de silício (NS).

Tabela 15 - Resultado do ensaio de compressão simples para a mistura de areia e cimento com dióxido de silício nanométrico

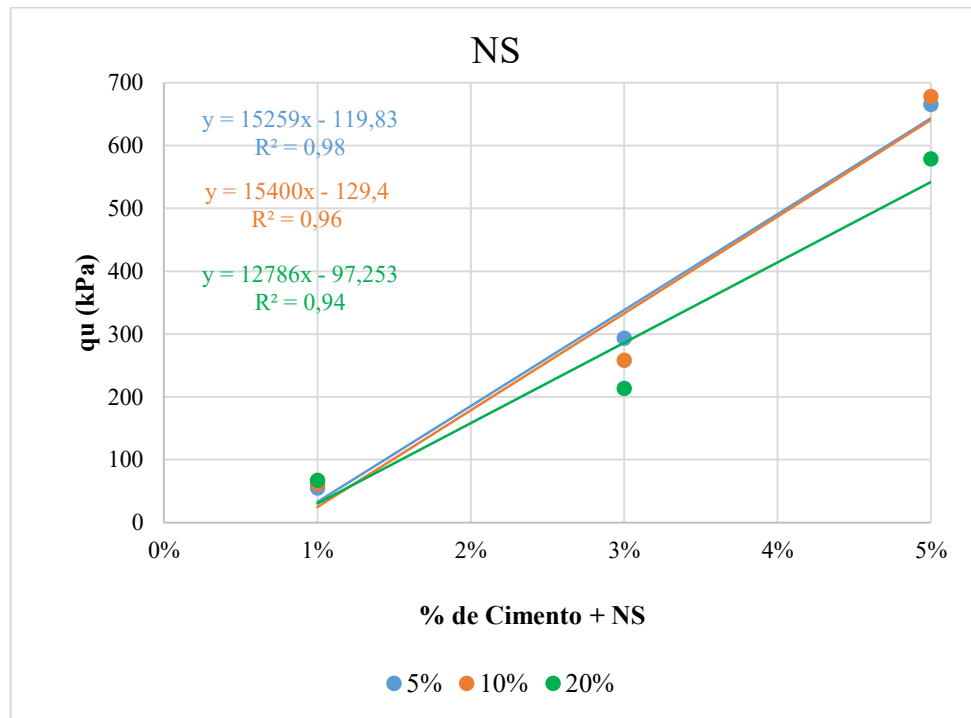
Nome CP	Cimento (%)	Aditivo (%)	w (%)	ρ_s (g/cm ³)	q_u (kPa)	Média (kPa)	Desvio padrão (kPa)
CS27_1Ci_5NS_20240821	1	NS	5	14,5	1,63	69,00	
CS28_1Ci_5NS_20240821	1	NS	5	14,2	1,63	47,47	54,99
CS29_1Ci_5NS_20240821	1	NS	5	14,5	1,62	48,51	9,91
CS30_1Ci_10NS_20240827	1	NS	10	14,1	1,62	73,63	
CS31_1Ci_10NS_20240827	1	NS	10	14,2	1,63	62,16	61,75
CS32_1Ci_10NS_20240827	1	NS	10	14,2	1,64	49,46	9,87
CS40_1Ci_20NS_20240904	1	NS	20	14,9	1,62	76,30	
CS41_1Ci_20NS_20240904	1	NS	20	14,4	1,62	64,61	67,09
CS42_1Ci_20NS_20240913	1	NS	20	14,1	1,63	60,38	6,73
CS43_3Ci_5NS_20240913	3	NS	5	14,5	1,62	294,28	
CS44_3Ci_5NS_20240913	3	NS	5	14,5	1,63	302,73	293,47
CS45_3Ci_5NS_20240913	3	NS	5	15,1	1,61	283,40	7,91
CS46_3Ci_10NS_20240913	3	NS	10	14,2	1,63	309,87	
CS47_3Ci_10NS_20240913	3	NS	10	14,3	1,63	194,09	258,28
CS60_3Ci_10NS_20240923	3	NS	10	14,3	1,63	270,89	48,10
CS51_3Ci_20NS_20240916	3	NS	20	14,0	1,63	207,40	
CS52_3Ci_20NS_20240916	3	NS	20	14,0	1,63	144,05	213,37
CS61_3Ci_20NS_20240923	3	NS	20	14,2	1,63	288,66	59,19
CS53_5Ci_5NS_20240916	5	NS	5	13,9	1,64	649,67	
CS57_5Ci_5NS_20240917	5	NS	5	14,3	1,63	637,77	665,36
CS58_5Ci_5NS_20240917	5	NS	5	14,0	1,63	708,64	30,99
CS54_5Ci_10NS_20240916	5	NS	10	14,6	1,63	623,79	677,74
							40,01

CS62_5Ci_10NS_20240923	5	NS	10	14,2	1,63	719,47		
CS63_5Ci_10NS_20240923	5	NS	10	14,2	1,63	689,96		
CS2_5Ci_20NS_20240726	5	NS	20	13,8	1,64	600,17		
CS6_5Ci_20NS_20240806	5	NS	20	13,8	1,64	560,46	578,55	16,40
CS35_5Ci_20NS_20240903	5	NS	20	13,9	1,63	575,02		

Fonte: Autora (2025)

Observando a tabela e a Figura 53, percebe-se que as misturas contendo teor mais baixo de cimento (1%) atingiram resistências menores, que aumentaram proporcionalmente à porcentagem de NS adicionado. Este comportamento pode ser atribuído à insuficiência de produtos de hidratação do cimento com esse teor menor. O teor de cimento de 3% resultou em um aumento da resistência, principalmente para a substituição de 5% por NS, e, adicionando mais NS, houve decréscimo na resistência. Nas misturas com teor de 5% de cimento, o valor ótimo de substituição de NS foi 10%. A adição de NS nesse grupo evidenciou que a presença de uma maior quantidade de cimento favorece a interação entre os produtos de hidratação e o dióxido de silício. Ao substituir 20% do cimento com a NS, houve decréscimo na resistência. Analisando os ajustes lineares das curvas, os teores de 5% e 10% de NS apresentaram retas bastante semelhantes. Os valores de R^2 possivelmente diminuíram devido à maior dificuldade de se atingir uma mistura adequada quando há adição de maior quantidade de material fino (maior teor de NS).

Figura 53 - Resistência à compressão simples da mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício nanométrico



Fonte: Autora (2025)

O estudo de Liu *et al.* (2023), considerando adição de 5% de cimento do peso seco da areia e 8% de nanosílica do peso seco do cimento, obteve q_u de 978,63 kPa. O valor encontrado nesta pesquisa, que considerou adição de 5% de cimento do peso seco da areia e 10% de NS do peso seco de cimento, foi de 677,74 kPa. Sabendo que o dióxido de silício possui uma área de superfície cerca de 10 vezes menor que a área da superfície da nanosílica comercial avaliada por Liu *et al.* (2023) e que a nanosílica pode conter material amorfo, pode-se dizer que os resultados de resistência obtidos nesta pesquisa foram satisfatórios.

4.2.4 Comparação do desempenho das três misturas

Ao adicionar o dióxido de silício como substituição parcial do cimento, a quantidade real de cimento diminui, pois o dióxido de silício entra em substituição ao cimento e não como um acréscimo. Por exemplo, a mistura de 5% de cimento com 10% de MS tem uma porcentagem de cimento efetiva de 4,5% e 0,5% de MS. Para um entendimento mais claro, foi elaborada a Tabela 16.

Tabela 16 - Teor real de cimento com SiO₂

Cimento total (%)	SiO ₂ (%)	Cimento real (%)	Total mistura (Cimento + SiO ₂)
1	5	0,95	1
1	10	0,9	1
1	20	0,8	1
3	5	2,85	3
3	10	2,7	3
3	20	2,4	3
5	5	4,75	5
5	10	4,5	5
5	20	4	5

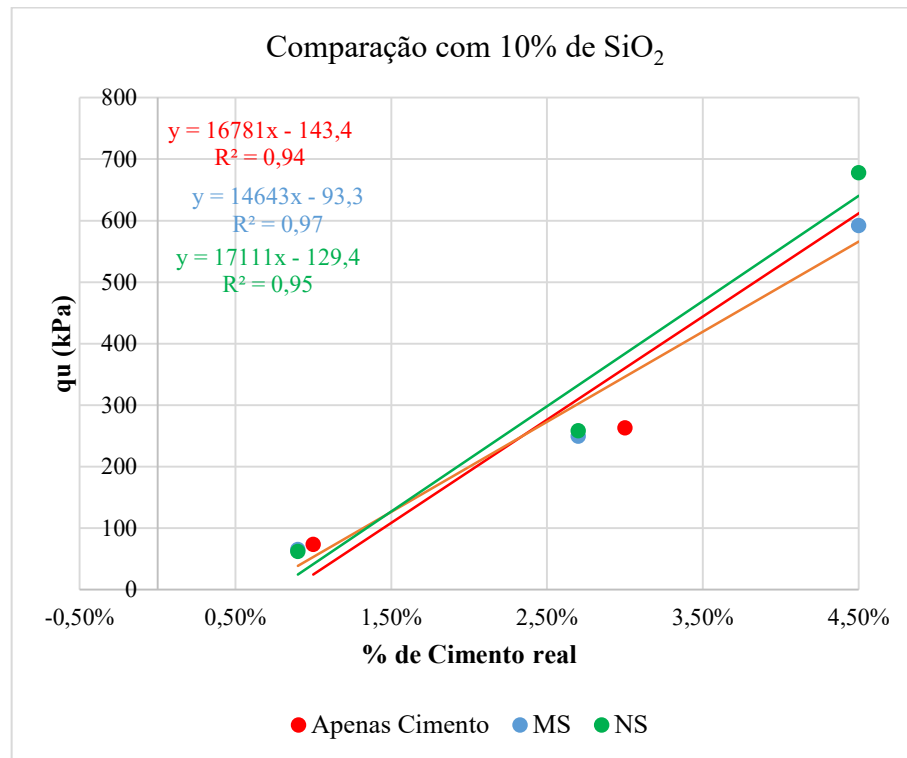
Fonte: Autora (2025)

Visto isso, para que as comparações entre as misturas com ou sem adição de dióxido de silício fossem justas, foi considerado o teor real de cimento. Por meio de interpolações lineares, estimaram-se os valores de resistência para os teores de cimento real da mistura de areia e cimento. Desta forma, fica evidente na comparação entre os três tipos de mistura, que a adição de dióxido de silício nanométrico permite o alcance de valores mais altos de resistência à compressão simples. Foi escolhido para ser detalhado o teor real de cimento de 4,5%, uma vez que corresponde às adições de 10% de dióxido de silício, considerado o valor ótimo, visto resultados da literatura e das amostras com NS. Para isso, traçou-se o gráfico exposto na Figura 54, que compara as três misturas e tem o objetivo de evidenciar as diferenças para o teor de cimento real. São elencadas, então, as seguintes conclusões:

- A mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício nanométrico atingiu as maiores resistências, com uma média de 677,74 kPa;
- A mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício micrométrico atingiu uma média de resistências de 592,13 kPa;
- A mistura de apenas areia e cimento atingiu uma resistência de aproximadamente 623,90 kPa.

Portanto, conclui-se que o dióxido de silício nanométrico (NS) é mais eficiente que o micrométrico (MS) para o ensaio de resistência à compressão simples realizado em uma mistura de areia com adição total de 5% de cimento (4,5% de cimento real) e 10% de dióxido de silício.

Figura 54 - Comparação dos resultados de resistência à compressão simples dos três tipos de mistura – cimento real



Fonte: Autora (2025)

4.2.5 Análise extra – adição MS substituindo o solo

Conforme explicado no item de delineamento experimental da metodologia, foram realizados alguns ensaios adicionais de compressão simples com um teor maior de dióxido de silício no tamanho micrométrico, a fim de verificar o impacto no aumento da resistência. A mistura analisada foi composta por areia, adição de 5% de cimento do peso seco da areia e adição de 10% de MS do peso seco da areia. A resistência média dos corpos de prova resultou em 755,5 kPa. Em comparação com a mistura do escopo da pesquisa, em que o dióxido de silício substitui o cimento e alcançou 592,13 kPa, verificou-se um aumento de cerca de 28%. Portanto, comprova-se a hipótese de que quando adicionado em maior quantidade, o dióxido de silício proporciona o alcance de resistências mais altas.

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados dos ensaios de resistência à tração são apresentados de forma condensada em tabelas seguidos das respectivas curvas de análise da resistência. Primeiro serão apresentados os resultados relativos aos corpos de prova de areia e cimento, depois os resultados

das misturas com dióxido de silício nos tamanhos micro e nanométrico, respectivamente. Por fim, é feita uma análise comparativa entre os três tipos de mistura.

4.3.1 Mistura de areia e cimento

A Tabela 17 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos nove corpos de prova rompidos para a mistura de areia e cimento nos teores de 1%, 3%, 5% do peso seco da areia. São apresentados os teores de umidade e massa específica, resistência individual de cada corpo de prova e média da resistência por teor de cimento.

Tabela 17 - Resultado do ensaio de compressão diametral para a mistura de areia e cimento

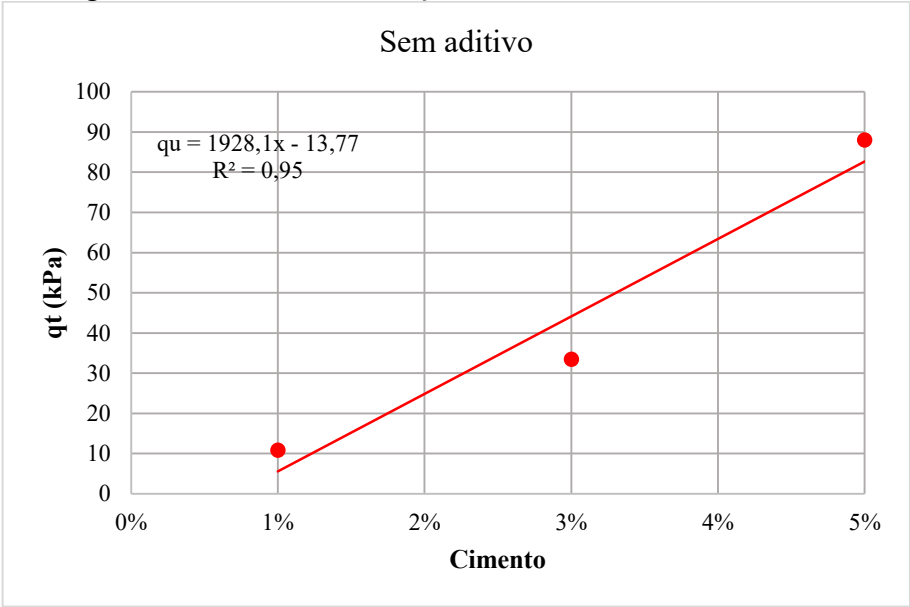
Nome CP	Cimento (%)	w (%)	ρ_s	q_t (kPa)	Média (kPa)	Desvio padrão (kPa)
CD1_1Ci_20241002	1	14,1	1,62	13,28	10,85	2,11
CD2_1Ci_20241002	1	14,1	1,63	11,14		
CD7_1Ci_20241002	1	14,1	1,63	8,13		
CD3_3Ci_20241002	3	14,2	1,63	38,81	33,41	3,99
CD4_3Ci_20241002	3	14,2	1,63	29,31		
CD8_3Ci_20241004	3	13,6	1,64	32,11		
CD5_5Ci_20241002	5	14,3	1,62	106,04	87,97	15,04
CD6_5Ci_20241002	5	14,0	1,63	88,66		
CD9_5Ci_20241004	5	13,5	1,64	69,22		

Fonte: Autora (2025)

Analisando os resultados expostos na Tabela 17 e na curva da Figura 55, o ganho de resistência à tração aumenta com o aumento do teor de cimento, ainda que em uma proporção menor que o aumento da resistência à compressão simples. A resistência média à tração para o teor de 1% de cimento passou de 10,85 kPa para 33,41 kPa para o teor de 3% de cimento, representando um aumento de 208% e teve um aumento de 163% com o teor de 5%, atingindo 87,97 kPa. O $R^2 = 0,95$ indica forte correlação positiva entre o teor de cimento e a resistência.

Ao comparar o ganho de resistência à tração com o de resistência à compressão, verificou-se que para o teor de 1% de cimento, a resistência à tração atingiu valores equivalente a 15% da resistência à compressão para o teor de 1%, 13% para o teor de 3% e 12% para o teor de 5%. Essa relação está dentro da faixa esperada, conforme resultados obtidos por Consoli *et al.* (2010) para a areia de Osório.

Figura 55 - Resistência à tração da mistura de areia e cimento



Fonte: Autora (2025)

4.3.2 Mistura de areia, cimento e dióxido de silício micrométrico

A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos 27 corpos de prova rompidos para a mistura de areia e cimento nos teores de 1%, 3%, 5% do peso seco da areia com substituição do cimento pelos teores de 5%, 10% e 20% de dióxido de silício micrométrico. São apresentados os teores de umidade e massa específica, resistência individual de cada corpo de prova e média da resistência para grupos de triplicatas com mesmo teor de cimento e dióxido de silício (MS).

Tabela 18 - Resultado do ensaio de compressão diametral para a mistura de areia e cimento com dióxido de silício micrométrico

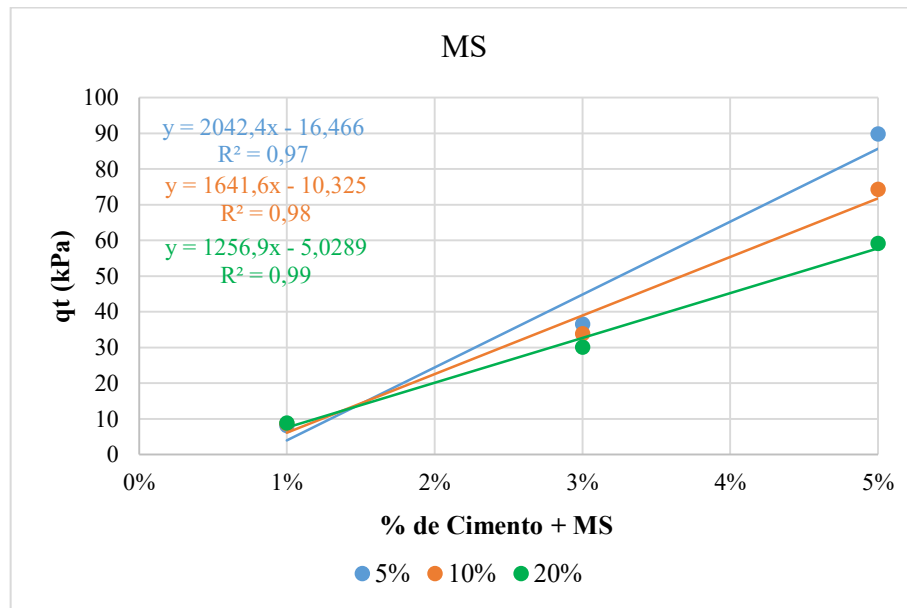
Nome CP	Cimento (%)	Aditivo (%)	w (%)	ρs (g/cm³)	qt (kPa)	Média (kPa)	Desvio padrão (kPa)
CD26_1Ci_5MS_20241011	1	MS	5	14,1	1,63	7,11	
CD27_1Ci_5MS_20241011	1	MS	5	14,4	1,62	9,54	1,04
CD30_1Ci_5MS_20241014	1	MS	5	13,6	1,64	7,63	
CD34_1Ci_10MS_20241015	1	MS	10	14,3	1,63	8,32	
CD35_1Ci_10MS_20241015	1	MS	10	13,9	1,63	7,86	0,82
CD36_1Ci_10MS_20241015	1	MS	10	14,1	1,63	9,78	
CD40_1Ci_20MS_20241016	1	MS	20	14,1	1,63	9,62	
CD41_1Ci_20MS_20241016	1	MS	20	13,9	1,63	8,09	0,62

CD45_1Ci_20MS_20241018	1	MS	20	13,6	1,63	8,85		
CD46_3Ci_5MS_20241018	3	MS	5	13,9	1,63	35,11		
CD47_3Ci_5MS_20241022	3	MS	5	14,0	1,63	39,43	36,54	2,04
CD48_3Ci_5MS_20241022	3	MS	5	14,0	1,63	35,08		
CD52_3Ci_10MS_20241023	3	MS	10	14,2	1,63	36,57		
CD53_3Ci_10MS_20241023	3	MS	10	14,2	1,63	31,73	33,80	2,04
CD54_3Ci_10MS_20241023	3	MS	10	14,3	1,63	33,09		
CD58_3Ci_20MS_20241025	3	MS	20	14,1	1,63	32,97		
CD59_3Ci_20MS_20241025	3	MS	20	13,9	1,63	28,06	30,05	2,11
CD60_3Ci_20MS_20241025	3	MS	20	13,9	1,63	29,12		
CD10_5Ci_5MS_20241004	5	MS	5	14,1	1,63	101,85		
CD11_5Ci_5MS_20241004	5	MS	5	13,9	1,63	86,84	89,78	8,9
CD16_5Ci_5MS_20241007	5	MS	5	13,8	1,63	80,66		
CD12_5Ci_10MS_20241007	5	MS	10	14,0	1,63	72,05		
CD13_5Ci_10MS_20241007	5	MS	10	13,8	1,64	73,44	74,32	2,3
CD17_5Ci_10MS_20241008	5	MS	10	13,8	1,63	77,48		
CD14_5Ci_20MS_20241007	5	MS	20	14,0	1,63	63,00		
CD15_5Ci_20MS_20241007	5	MS	20	13,8	1,63	58,55	59,13	2,95
CD18_5Ci_20MS_20241008	5	MS	20	13,6	1,64	55,84		

Fonte: Autora (2025)

Observa-se, a partir da tabela e dos ajustes lineares das curvas apresentados na Figura 56, que para a mistura de 1% de cimento com adição de MS, ainda que as médias sejam bem próximas, o aumento do teor de aditivo causou aumento pouco expressivo na resistência à tração, ao contrário do observado para a resistência à compressão. Para 3% de cimento, o maior valor de resistência corresponde a uma substituição de 5% por MS (36,54 kPa), cerca de 4 vezes maior que a resistência atingida para 1% de cimento. Para 5% de cimento, os valores de q_t aumentaram expressivamente em relação aos teores mais baixos de cimento, atingindo a maior resistência observada, de 89,78 kPa. Nos teores de 3% e 5% de cimento, o aumento do teor de dióxido de silício causou redução na resistência à tração, indicando que ainda que tenha contribuído para a formação de produtos pozolânicos, reduziu a quantidade de cimento efetivo e prejudicou a resistência à tração.

Figura 56 - Resistência à tração da mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício micrométrico



Fonte: Autora (2025)

Para verificação da relação entre os ensaios, os resultados de resistência à tração atingiram de 11% a 15% da resistência à compressão simples, portanto a adição do dióxido de silício micrométrico mantém a proporção que é observada na adição de apenas cimento.

4.3.3 Mistura de areia, cimento e dióxido de silício nanométrico

A Tabela 19 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos 27 corpos de prova rompidos para a mistura de areia e cimento nos teores de 1%, 3%, 5% do peso seco da areia com substituição do cimento pelos teores de 5%, 10% e 20% de dióxido de silício nanométrico. São apresentados os teores de umidade e massa específica, resistência individual de cada corpo de prova e média da resistência para grupos de triplicatas com mesmo teor de cimento e dióxido de silício (NS).

Tabela 19 - Resultado do ensaio de compressão diametral para a mistura de areia e cimento com dióxido de silício nanométrico

Nome CP	Cimento (%)	Aditivo (%)	w (%)	ρ_s (g/cm³)	qt (kPa)	Média qt (kPa)	Desvio padrão (kPa)
CD31_1Ci_5NS_20241014	1	NS	5	14,0	1,63	9,30	0,21
CD32_1Ci_5NS_20241014	1	NS	5	14,0	1,63	9,26	

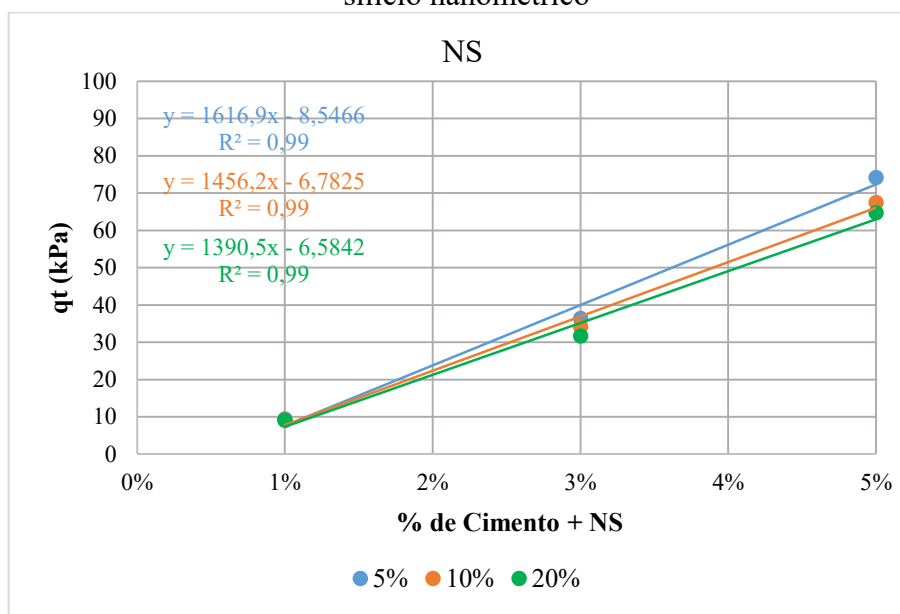
CD33_1Ci_5NS_20241015	1	NS	5	13,6	1,64	9,72		
CD37_1Ci_10NS_20241015	1	NS	10	14,2	1,63	9,32		
CD38_1Ci_10NS_20241015	1	NS	10	14,2	1,63	9,83	9,16	0,62
CD39_1Ci_10NS_20241016	1	NS	10	13,8	1,63	8,33		
CD42_1Ci_20NS_20241016	1	NS	20	14,2	1,63	6,90		
CD43_1Ci_20NS_20241016	1	NS	20	14,1	1,63	8,55	9,05	2,00
CD44_1Ci_20NS_20241018	1	NS	20	13,2	1,65	11,71		
CD49_3Ci_5NS_20241022	3	NS	5	14,4	1,63	37,16		
CD50_3Ci_5NS_20241022	3	NS	5	14,4	1,63	33,58	36,35	2,01
CD51_3Ci_5NS_20241022	3	NS	5	14,3	1,62	38,30		
CD55_3Ci_10NS_20241023	3	NS	10	14,2	1,63	33,12		
CD56_3Ci_10NS_20241023	3	NS	10	14,1	1,63	35,68	34,14	1,11
CD57_3Ci_10NS_20241023	3	NS	10	14,1	1,63	33,62		
CD61_3Ci_20NS_20241025	3	NS	20	14,1	1,63	33,87		
CD62_3Ci_20NS_20241025	3	NS	20	14,1	1,63	30,83	31,67	1,57
CD63_3Ci_20NS_20241025	3	NS	20	13,9	1,63	30,31		
CD19_5i_5NS_20241008	5	NS	5	13,8	1,64	76,86		
CD20_5i_5NS_20241008	5	NS	5	13,7	1,64	71,54	74,10	2,18
CD21_5Ci_5NS_20241009	5	NS	5	13,9	1,63	73,91		
CD22_5Ci_10NS_20241011	5	NS	10	14,3	1,63	64,33		
CD23_5Ci_10NS_20241011	5	NS	10	14,1	1,63	70,89	67,41	2,69
CD28_5Ci_10NS_20241014	5	NS	10	13,3	1,64	67,00		
CD24_5Ci_20NS_20241011	5	NS	20	14,2	1,63	58,03		
CD25_5Ci_20NS_20241011	5	NS	20	14,1	1,63	50,75	64,67	14,84
CD29_5Ci_20NS_20241014	5	NS	20	13,9	1,63	85,23		

Fonte: Autora (2025)

Observando os valores apresentados na tabela, juntamente com uma análise dos ajustes lineares da Figura 57, verificou-se que para a mistura de 1% de cimento com adição de NS, ao contrário do comportamento da MS, o aumento do teor de aditivo causou redução na resistência à tração. Para 3% de cimento, o comportamento seguiu a tendência de quanto menor a substituição pelo dióxido de silício, maior a resistência. Para 5% de cimento, os valores de *qt* atingiram a maior resistência observada, de 74,10 kPa, para 5% de NS, teores acima disso também provocaram queda na resistência. Percebeu-se que substituições com maior quantidade de dióxido de silício provocam quedas graduais da resistência à tração, o que pode ser interpretado que mesmo com um potencial reativo da NS, a redução do cimento impacta mais

na resistência do que os benefícios do aditivo. Para as três misturas, foram obtidos valores de R^2 bastante próximos de 1, caracterizando forte correlação entre a adição de NS e o aumento da resistência à tração.

Figura 57 - Resistência à tração da mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício nanométrico



Fonte: Autora (2025)

Para verificação da relação entre os ensaios, os resultados de resistência à tração atingiram de 11% a 17% da resistência à compressão simples, portanto a adição do dióxido de silício nanométrico atinge valores maiores do que a relação observada apenas com a adição de cimento.

4.3.4 Comparação do desempenho das três misturas

Seguindo o mesmo princípio destacado na comparação das misturas do ensaio de compressão simples, serão avaliadas as curvas do cimento real. Visto isso, foi escolhido o teor ótimo de 5% de adição de dióxido de silício para os ensaios de resistência à tração, cuja comparação é apresentada na Figura 58.

Para teores de 1% e 3%, as duas granulometrias do dióxido de silício se comportam de maneira semelhante, atingindo valores próximos de resistência à tração. Já para o teor de 5% de cimento, ao contrário do observado para a resistência à compressão simples, para a tração o

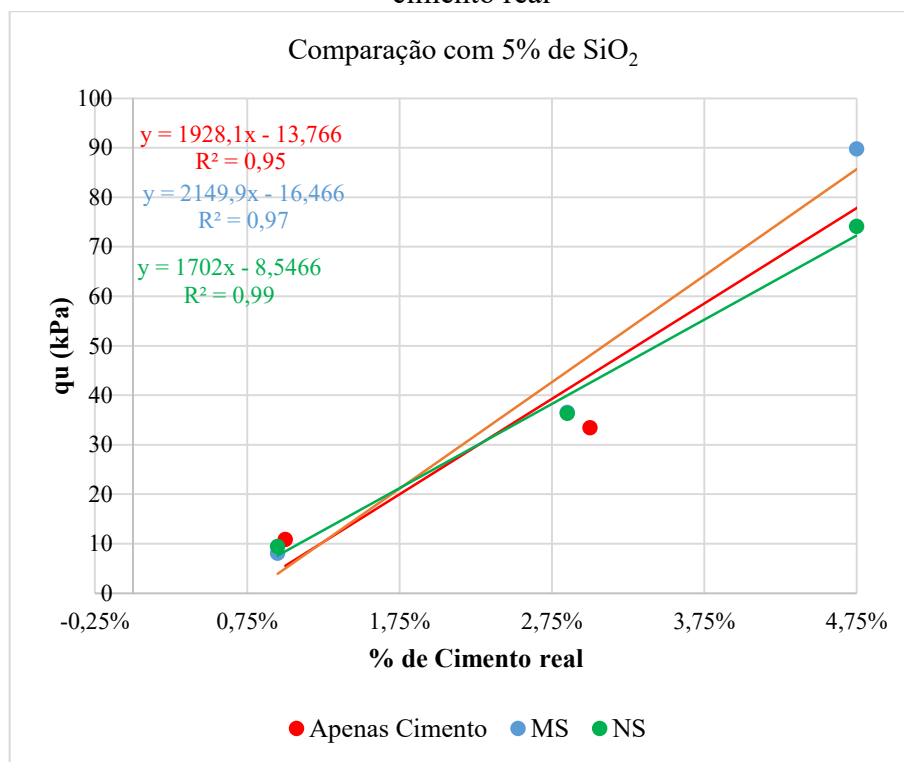
dióxido de silício micrométrico proporcionou o maior ganho de resistência, cerca de 21% maior que a resistência atingida pelo dióxido de silício nanométrico.

Desta forma, fica evidente na comparação entre os três tipos de mistura, que a adição de dióxido de silício nanométrico permite o alcance de valores mais altos de resistência à compressão simples. Observando a Figura 58, para o teor real de 4,75% de cimento:

- A mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício micrométrico atingiu uma média de resistências de 89,78 kPa;
- A mistura de areia e cimento com adição de dióxido de silício nanométrico atingiu as maiores resistências, com uma média de 74,10 kPa;
- A mistura de apenas areia e cimento atingiu uma resistência de 81,15 kPa.

Portanto, conclui-se que o dióxido de silício micrométrico (MS) é mais eficiente que o nanométrico (NS) quando se avalia o ganho de resistência à tração.

Figura 58 - Comparação dos resultados de resistência à tração dos três tipos de mistura – cimento real



Fonte: Autora (2025)

4.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

Os resultados dos ensaios triaxiais são apresentados na forma de gráficos das curvas de tensão x deformação axial (q x ε_a), deformação volumétrica x deformação axial (ε_v x ε_a), as trajetórias de tensões no espaço s x t (notação de Lambe e Whitman, 1969) e as envoltórias de ruptura com os círculos de Mohr. Primeiro serão apresentados os resultados relativos aos corpos de prova de areia e 5% de cimento, depois os resultados das misturas com 10% de dióxido de silício nos tamanhos micro e nanométricos, respectivamente. Por fim, é feita uma análise comparativa entre os três tipos de mistura.

4.4.1 Mistura de areia e cimento

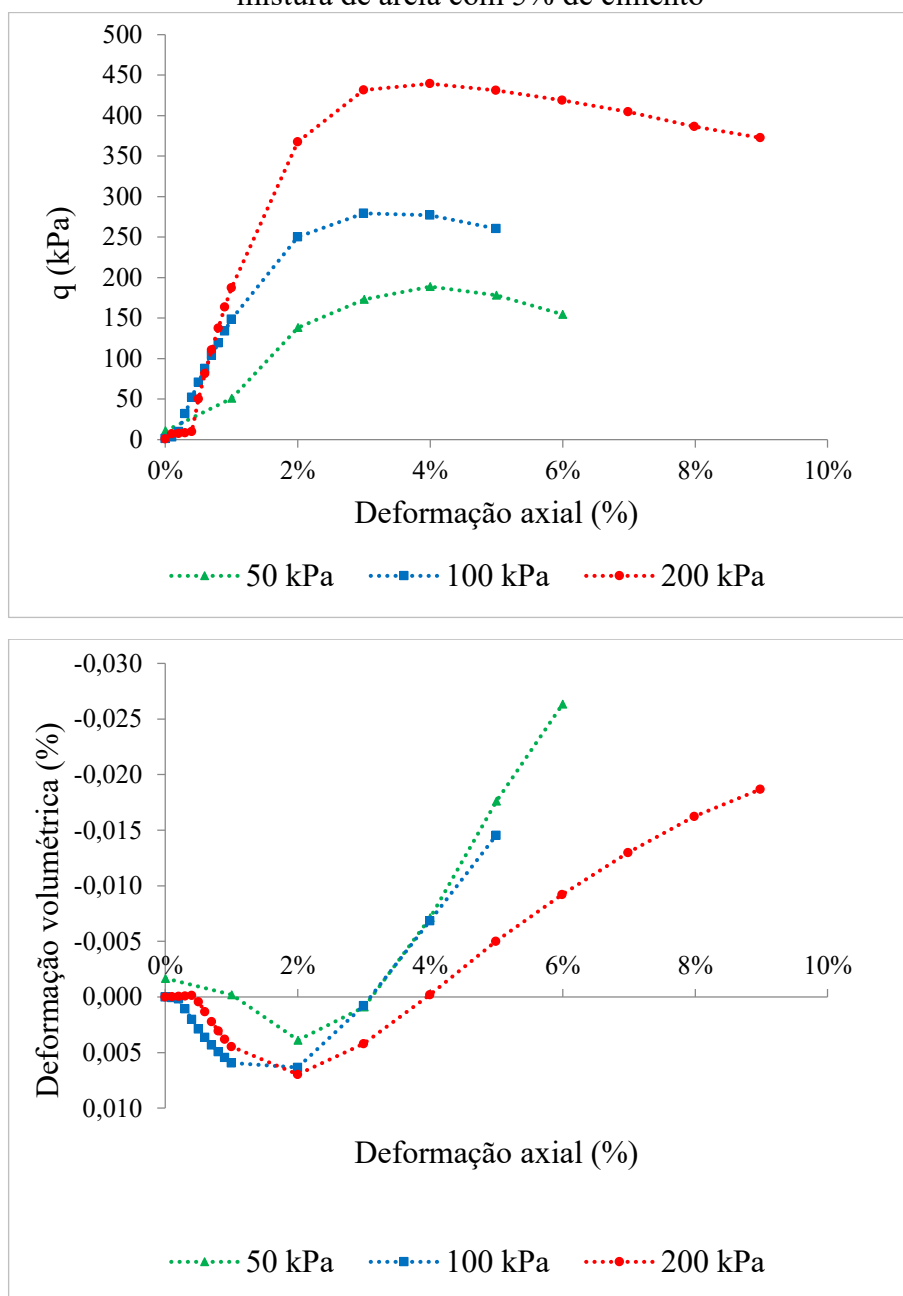
4.4.1.1 *Análise do comportamento de tensão-deformação*

Observando as curvas de tensão-deformação, a resistência ao cisalhamento aumentou com o aumento da tensão confinante. Para a tensão de confinamento de 50 kPa, a resistência de pico atingida foi de 188,9 kPa, seguida de uma queda mais acentuada da resistência. Para a tensão confinante de 100 kPa, o pico atingiu 279,32 kPa e a resistência decresceu até uma deformação axial de cerca de 5%. Para a tensão confinante de 200 kPa, a resistência máxima foi de 439,36 kPa, seguida de uma queda que se prolongou até quase 10% de deformação axial. Portanto, ao aumentar a tensão confinante, o pico decresceu e o aumento volumétrico é menor.

Analisando a variação do volume em relação à deformação axial, percebe-se que para as três tensões confinantes, a amostra apresentou caráter compressivo inicialmente, seguido de uma expansão. Quanto maior a tensão confinante, maior a compressão observada, ao contrário do que se observa na expansão.

O comportamento das curvas apresentadas na Figura 59 é característico de areias mais densas, em que há tendência da formação de um pico e a deformação volumétrica se caracteriza por uma compressão inicial, até cerca de 2% de deformação axial, seguida de expansão, que inicia juntamente com o decréscimo da resistência. Tal comportamento é compatível para uma mistura de areia e cimento, visto que a adição de cimento gera uma estrutura mais rígida e coesa entre os grãos e cria uma matriz com menos vazios.

Figura 59 – Tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial - mistura de areia com 5% de cimento

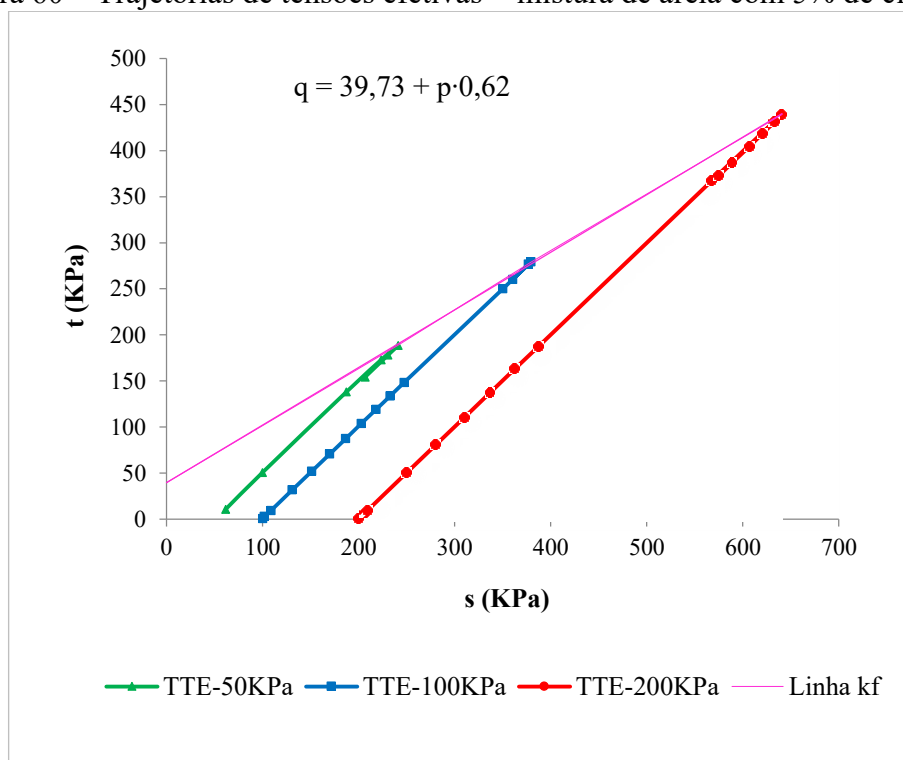


Fonte: Autora (2025)

A Figura 60 apresenta a trajetória de tensões, que define o caminhamento das tensões em um ponto, auxiliando a entender o processo de carregamento e comportamento da mistura. Unindo os pontos de resistência máxima (pico) para cada uma das tensões confinantes, encontra-se a linha k_f , cuja equação (11), evidenciada no gráfico, retorna os valores do intercepto coesivo (a) e do ângulo de atrito efetivo ($\alpha'f$). Para a mistura de areia e cimento, foi encontrado um intercepto coesivo de 39,73 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 32° .

$$q = a + p \tan(\alpha_f) \quad (11)$$

Figura 60 – Trajetórias de tensões efetivas - mistura de areia com 5% de cimento



Fonte: Autora (2025)

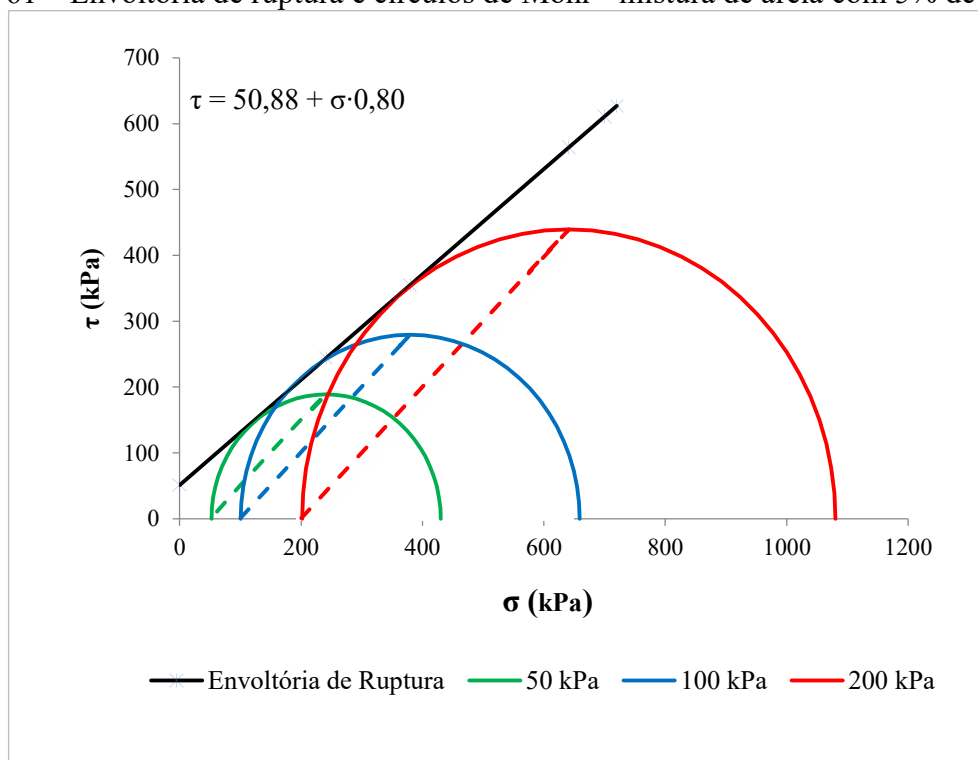
Comparando a mistura de areia e 5% de cimento de Fontoura (2015), que obteve resistências ao cisalhamento de 468 kPa para uma tensão confinante de 50 kPa, 539 kPa para confinante de 100 kPa e 746 kPa para confinante de 200 kPa, valores superiores aos encontrados nesta pesquisa, provavelmente devido aos tempos de cura diferentes.

4.4.1.2 Parâmetros de resistência de pico

A partir da análise dos círculos de Mohr e da envoltória de ruptura apresentados na Figura 61, pode-se retirar do gráfico e da equação da envoltória o valor dos parâmetros de resistência da mistura. Portanto, para a mistura de areia e 5% de cimento, foi encontrada uma coesão efetiva de 50,88 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 38,66°. A equação da envoltória (12) é evidenciada no gráfico.

$$\tau = c' + \sigma \tan(\phi') \quad (12)$$

Figura 61 – Envoltória de ruptura e círculos de Mohr - mistura de areia com 5% de cimento



Fonte: Autora (2025)

Comparando os resultados encontrados nesta pesquisa com o trabalho de Fontoura (2015), que obteve ângulos de atrito de 39,1°, 32,7° e 32,6° e coesões de 122,5 kPa, 115,8 kPa e 87,3 kPa para uma areia fina com adição de 5% de cimento para diferentes índices de vazios, percebe-se que o ângulo de atrito de 38,66° é um valor bastante coerente e que a coesão de 50,88 kPa provavelmente é menor provavelmente devido aos tempos de cura e índice de vazios diferentes dos estudos.

4.4.1.2.1 Estimativa método Consoli (2014)

Conforme descrito no item 2.1.3, Consoli (2014) desenvolveu um método que permite estimar os parâmetros de resistência a partir dos resultados das resistência à compressão e tração. Com fins de comparação e validação, o método foi aplicado nas equações (5 e (6. Substituindo os valores de q_u e q_t respectivamente pelas resistências à compressão e à tração obtidas nos ensaios, foram estimados os seguintes valores para ϕ' e c' .

$$\phi' = 43,7^\circ$$

$$c' = 159,3 \text{ kPa}$$

Comparando os valores estimados com os resultados obtidos por meio do ensaio triaxial, percebe-se uma divergência explícita entre os valores de coesão, a qual também foi verificada no trabalho de Varela (2024). O valor estimado de 159,3 kPa é 213% maior que a coesão de 50,88 kPa obtida no ensaio triaxial. Já para o ângulo de atrito, o método se mostrou mais coerente e resultou em um ϕ' estimado de 43,7°, cerca de 13% de aumento em relação ao ângulo de atrito de 38,66° obtido no ensaio triaxial.

4.4.2 Mistura de areia, cimento e dióxido de silício micrométrico

4.4.2.1 *Análise do comportamento de tensão-deformação*

Observando as curvas de tensão-deformação, a resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da tensão confinante, indicando mobilização progressiva de atrito. Para a tensão de confinamento de 50 kPa, a resistência de pico atingida foi de 196,12 kPa, seguida de uma queda mais acentuada até 5% de deformação axial. Para a tensão confinante de 100 kPa, o pico foi atingido a uma resistência de 339,37 kPa, seguido de queda e estabilização até 10% de deformação axial. Para a tensão confinante de 200 kPa, a máxima resistência atingida foi de 493,85 kPa, seguida de uma queda até 7% de deformação axial.

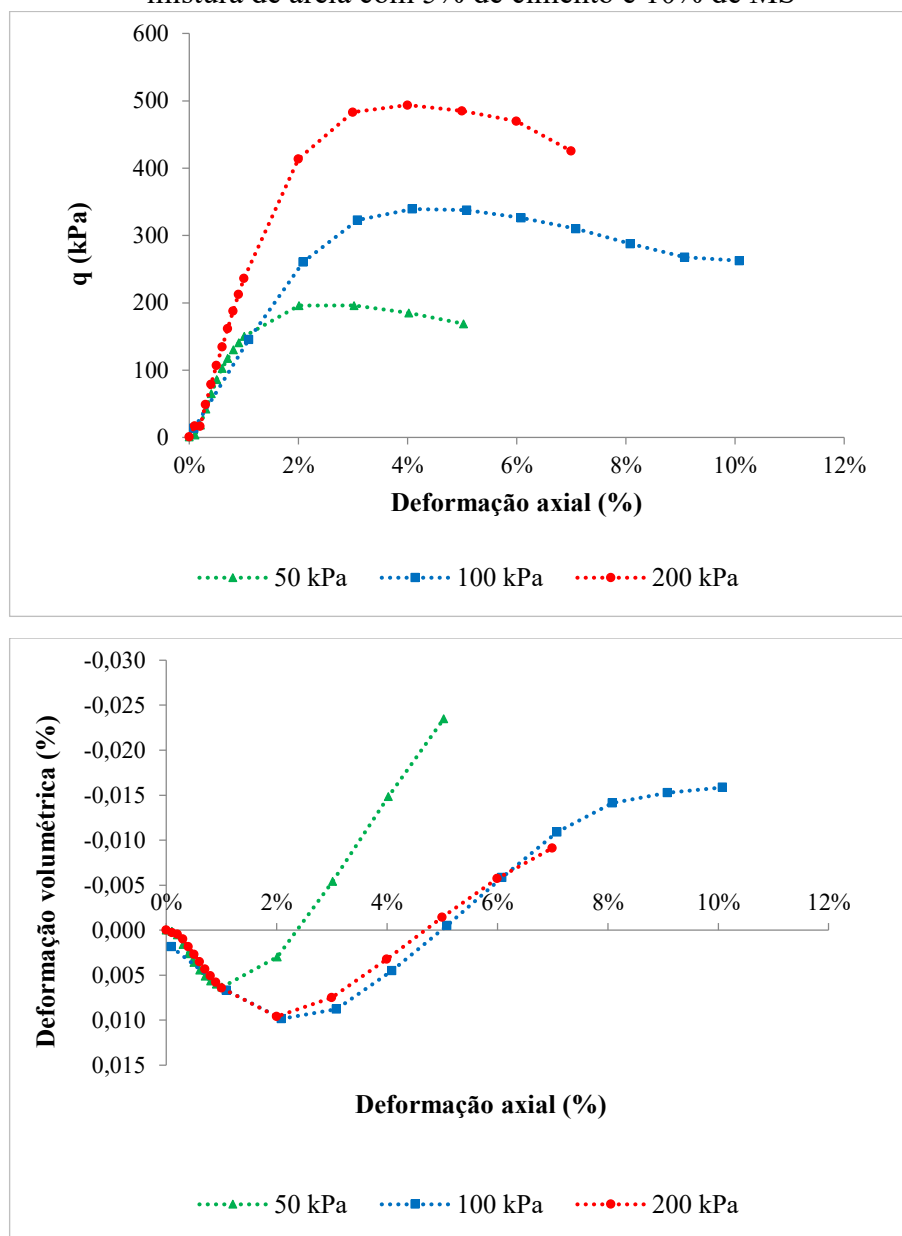
Analisando a variação do volume em relação à deformação axial, percebe-se que para as três tensões confinantes, a amostra apresentou caráter compressivo inicialmente, seguido de uma expansão. Quanto maior a tensão confinante, maior a compressão observada, ao contrário do que se observa na expansão.

O comportamento das curvas apresentadas na Figura 62 é característico de areias mais densas, em que há tendência da formação de um pico e a deformação volumétrica se caracteriza por uma compressão inicial, até cerca de 1,5% para a confinante de 50 kPa e até 2% de deformação axial para as confinantes maiores, seguida de expansão. O incremento na tensão confinante reduziu o potencial expansivo, reduzindo assim a tendência de pico das curvas. Tal comportamento é compatível para uma mistura de areia e cimento, visto que a adição de cimento gera uma estrutura mais rígida e coesa entre os grãos, aumenta a densidade da mistura e cria uma matriz com menos vazios. A adição de dióxido de silício teve os seguintes impactos:

- No gráfico de tensão-deformação, a amostra de tensão confinante de 200 kPa deformou menos que a amostra de 100 kPa para atingir a ruptura;

- No gráfico de variação de volume, em que o comportamento da amostra sob tensão confinante de 100 kPa passou a ser semelhante ao da tensão de 200 kPa.

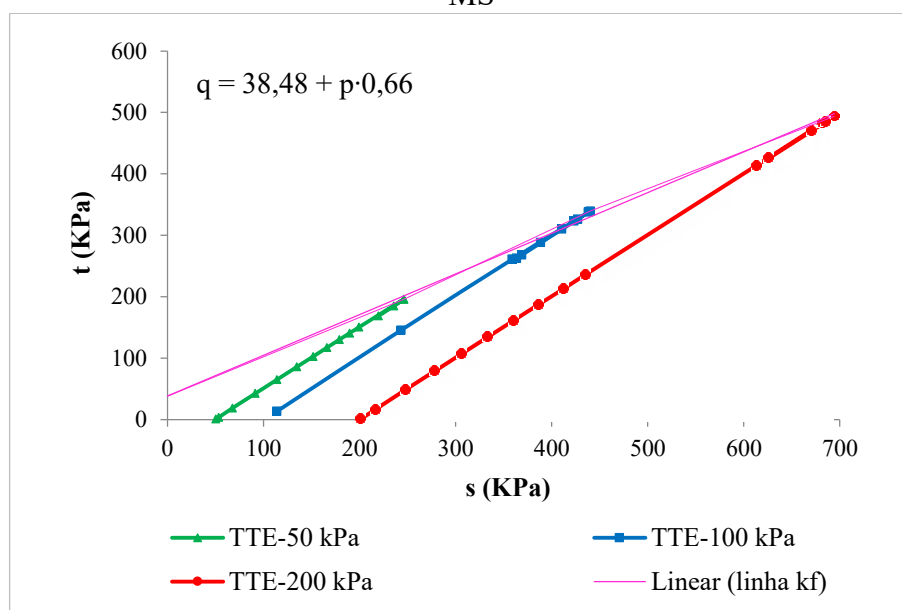
Figura 62 – Tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial da mistura de areia com 5% de cimento e 10% de MS



Fonte: Autora (2025)

A Figura 63 apresenta a trajetória de tensões, em que, para a mistura de areia, cimento e dióxido de silício micrométrico, foi encontrado um intercepto coesivo de 38,48 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 33,5°.

Figura 63 – Trajetórias de tensões efetivas - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de MS

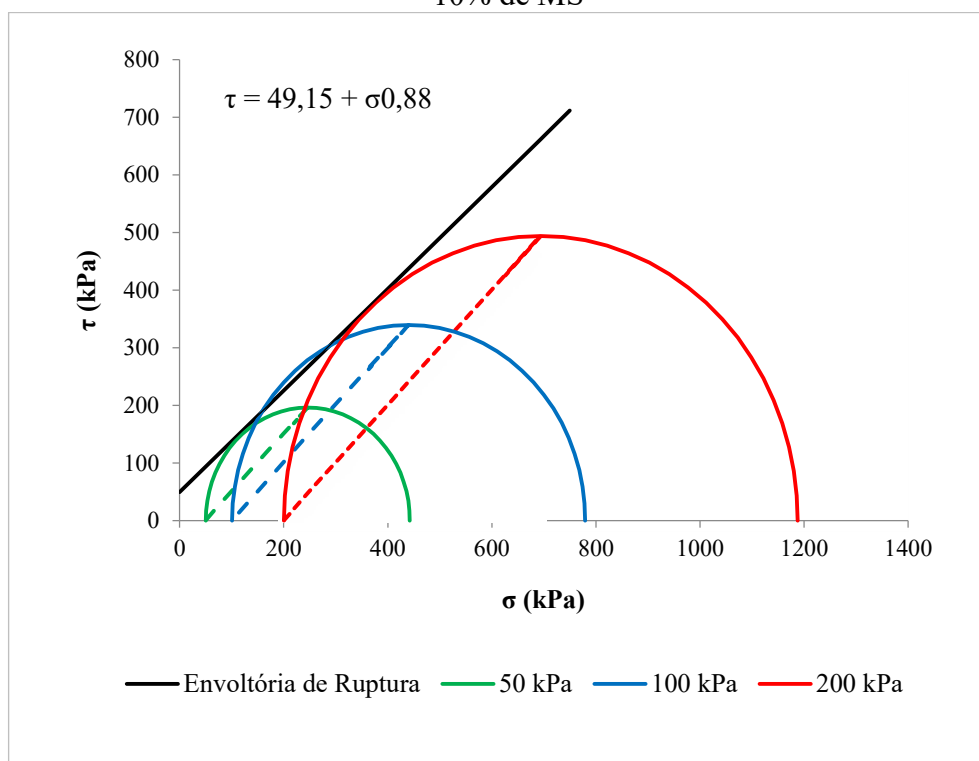


Fonte: Autora (2025)

4.4.2.2 Parâmetros de resistência de pico

A partir da análise dos círculos de Mohr e da envoltória de ruptura apresentados na Figura 64, para a mistura de areia e 5% de cimento com adição de dióxido de silício micrométrico, foi encontrada uma coesão efetiva de 49,15 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 41,45°. A equação da envoltória (12) é evidenciada no gráfico.

Figura 64 – Envoltória de ruptura e círculos de Mohr - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de MS



Fonte: Autora (2025)

4.4.2.2.1 Estimativa método Consoli (2014)

Com fins de comparação e validação, o método foi aplicado nas equações (5) e (6). Substituindo os valores de q_u e q_t respectivamente pelas resistências à compressão e à tração obtidas nos ensaios, foram estimados os seguintes valores para ϕ' e c' .

$$\phi' = 41,7^\circ$$

$$c' = 132,8 \text{ kPa}$$

Comparando os valores estimados com os resultados obtidos por meio do ensaio triaxial, percebe-se uma divergência explícita entre os valores de coesão. O valor estimado de 132,8 kPa é 170% maior que a coesão de 49,15 kPa obtida no ensaio triaxial. Já para o ângulo de atrito, o método se mostrou bastante coerente e resultou em um ϕ' estimado de 41,7°, apenas 1% de aumento em relação ao ângulo de atrito de 41,45° obtido no ensaio triaxial.

4.4.3 Mistura de areia, cimento e dióxido de silício nanométrico

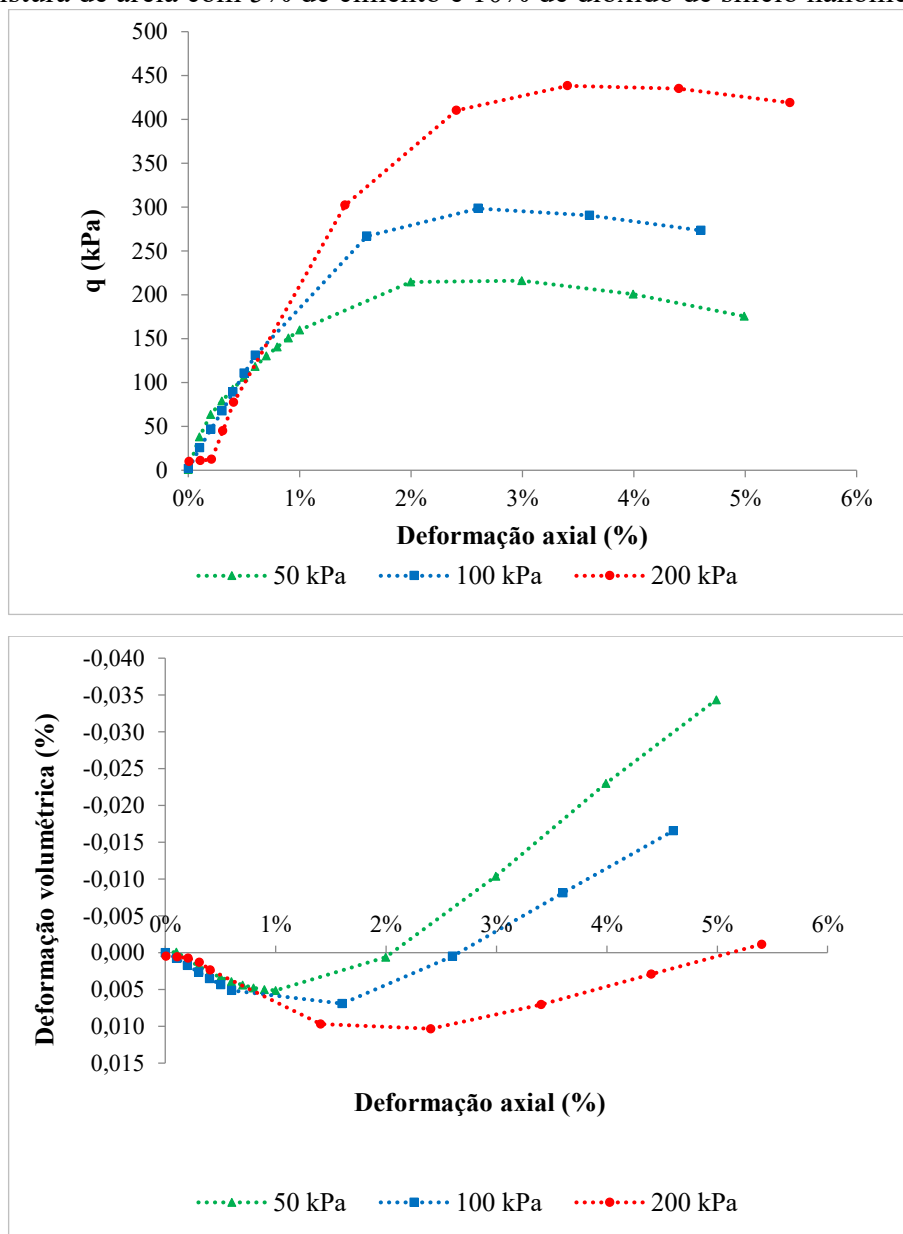
4.4.3.1 *Análise do comportamento de tensão-deformação*

Observando as curvas de tensão-deformação, apresentadas na Figura 65, a resistência ao cisalhamento aumentou com o aumento da tensão confinante. Para a tensão de confinamento de 50 kPa, a resistência de pico atingida foi de 216 kPa, seguida de uma queda mais acentuada da resistência até 5% de deformação axial. Para a tensão confinante de 100 kPa, o pico atingiu 298,32 kPa e a resistência decresceu até uma deformação axial de cerca de 4,5%. Para a tensão confinante de 200 kPa, a resistência máxima foi de 438,19 kPa, seguida de uma queda que se prolongou até 3,5% de deformação axial. Portanto, ao aumentar a tensão confinante, o pico decresceu e o aumento volumétrico foi menor.

Analisando a variação do volume em relação à deformação axial, percebe-se que para as três tensões confinantes, a amostra apresentou caráter compressivo inicialmente, seguido de uma expansão. Quanto maior a tensão confinante, maior a compressão observada, ao contrário do que se observa na expansão. Para a tensão confinante de 50 kPa, houve compressão até cerca de 1% de deformação axial, seguida de uma dilatância mais pronunciada, com aumento volumétrico chegando a 0,035%. A amostra sob tensão confinante de 100 kPa, comprimiu até cerca de 1,5% e depois expandiu até 0,02% de aumento volumétrico. Por fim, para a tensão confinante de 200 kPa, observou-se caráter compressivo até pouco menos de 1,5% de deformação axial, seguido de uma dilatância mais contida.

O comportamento das curvas apresentadas na Figura 65 se caracteriza como mais coesivo e dúctil, em que não há tendência da formação de um pico, aproximando-se da estabilização ao atingir a tensão máxima, principalmente na maior tensão confinante. Tal comportamento é compatível para uma mistura de areia e cimento e dióxido de silício, visto que a adição de cimento gerou uma estrutura mais rígida e a adição de NS tornou aumentou a coesão e criou uma matriz com menos vazios.

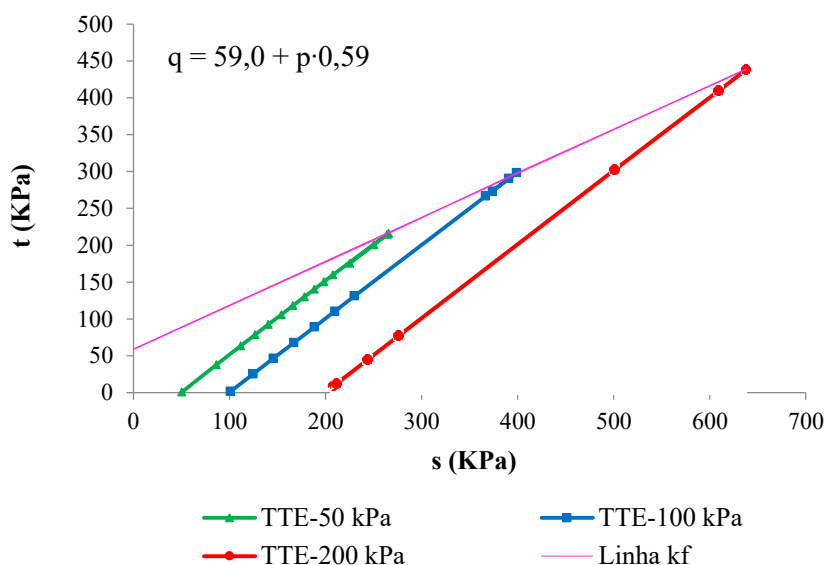
Figura 65 – Tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de dióxido de silício nanométrico



Fonte: Autora (2025)

A Figura 66 apresenta a trajetória de tensões, Para a mistura de areia, cimento e dióxido de silício nanométrico, foi encontrado um intercepto coesivo de 59,07 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 30,77°.

Figura 66 – Trajetórias de tensões efetivas - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de NS



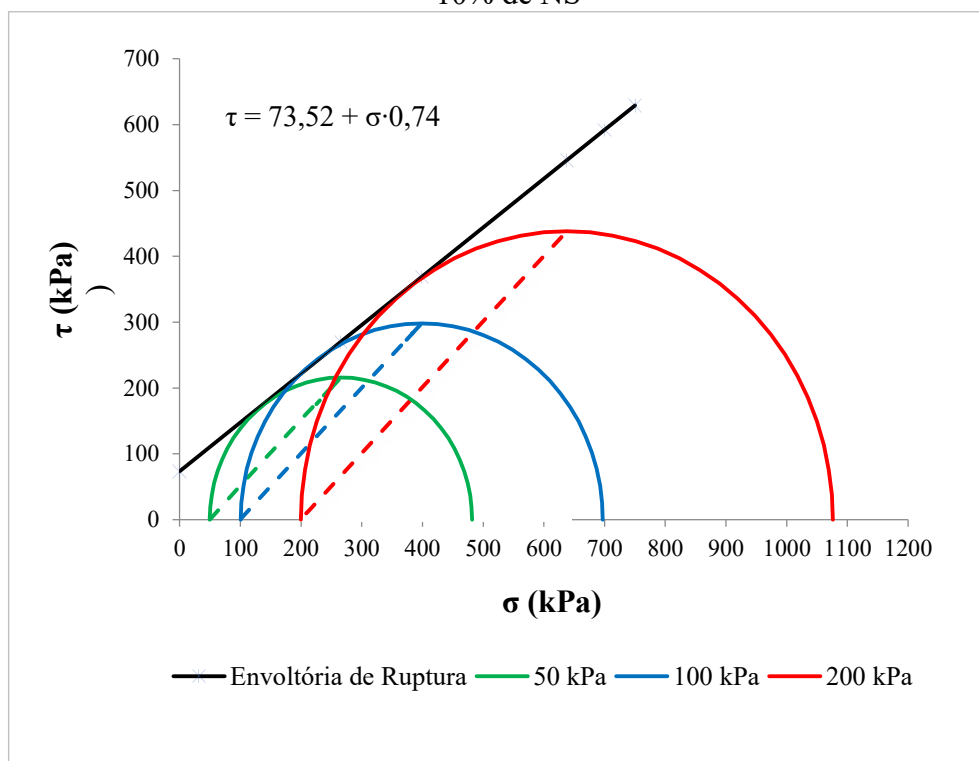
Fonte: Autora (2025)

Similarmente a observações estudadas na literatura (Choobbasti; Vafaei; Soleimani Kutanaei, 2018), um aumento no teor de dióxido de silício nanométrico tornou a mistura de areia cimentada mais dúctil. Os valores de resistência encontrados por Choobbasti, Vafaei e Soleimani Kutanaei (2018) para uma areia com adição de 5% de cimento e 10% de nanosílica foram de 2179 kPa para tensão confinante de 50 kPa, 2287 kPa para confinante de 100 kPa e 2604 kPa para 200 kPa. Ressalta-se que na literatura foi considerada a adição de nanosílica obtida no mercado, que pode contar com contribuição de material amorfo e que possui área de superfície específica cerca de 10 vezes maior que a do dióxido de silício nanométrico, o que explica os valores de resistência superiores aos obtidos nesta pesquisa.

4.4.3.2 Parâmetros de resistência

A partir da análise dos círculos de Mohr e da envoltória de ruptura apresentados na Figura 67, para a mistura de areia e 5% de cimento com adição de dióxido de silício nanométrico, foi encontrada uma coesão efetiva de 73,52 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 36,54°. A equação da envoltória (12) é evidenciada no gráfico.

Figura 67 – Envoltória de ruptura e círculos de Mohr - mistura de areia com 5% de cimento e 10% de NS



Fonte: Autora (2025)

4.4.3.2.1 Estimativa método Consoli

Com fins de comparação e validação, o método foi aplicado nas equações (5) e (6). Substituindo os valores de q_u e q_t respectivamente pelas resistências à compressão e à tração obtidas nos ensaios, foram estimados os seguintes valores para ϕ' e c' .

$$\phi' = 48,7^\circ$$

$$c' = 127,6 \text{ kPa}$$

Comparando os valores estimados com os resultados obtidos por meio do ensaio triaxial, percebe-se uma divergência explícita entre os valores de coesão. O valor estimado de 127,6 kPa é 170% maior que a coesão de 73,52 kPa obtida no ensaio triaxial. Já para o ângulo de atrito, o método resultou em um ϕ' estimado de 48,7°, cerca de 33% de aumento em relação ao ângulo de atrito de 36,54° obtido no ensaio triaxial.

4.4.4 Comparação do desempenho das três misturas

Comparando o desempenho da mistura de areia e cimento com o desempenho das misturas de areia, cimento e dióxido de silício, nas diferentes granulometrias, foi possível observar os impactos dos aditivos na resistência ao cisalhamento. A Tabela 20 compila os resultados dos ensaios triaxiais por tensão confinante para cada uma das misturas.

Tabela 20 – Comparação dos resultados dos ensaios triaxiais

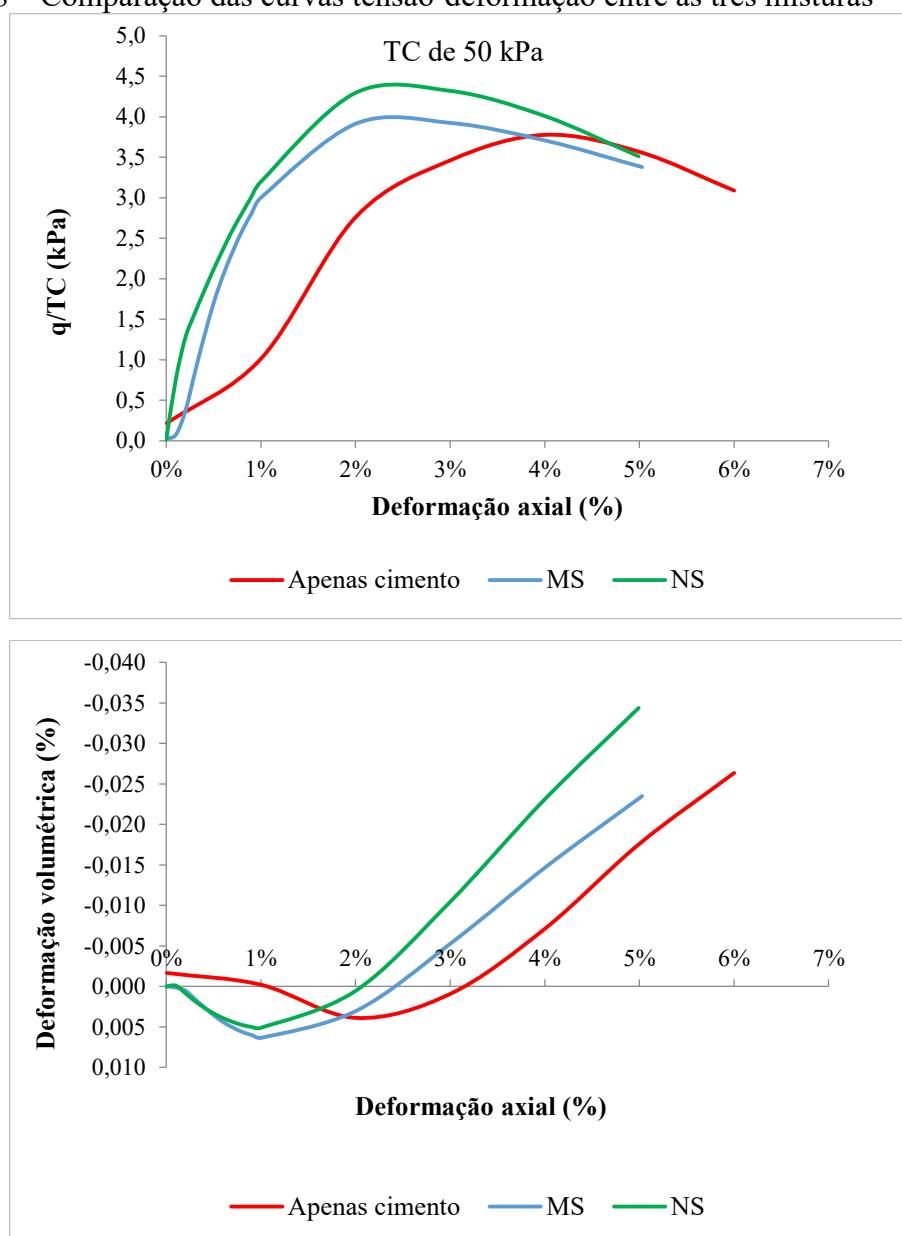
	Apenas cimento		MS	NS
	TC (kPa)	q máx (kPa)	q máx (kPa)	q máx (kPa)
Relação tensão deformação	50	188,9	196,12	216
	100	279,32	339,37	298,32
	200	439,36	493,85	438,19
Parâmetros de resistência	ϕ'	38,66°	41,45°	36,54°
	c'	50,88 kPa	49,15 kPa	73,52 kPa

Fonte: Autora (2025)

As Figura 68, Figura 69 e Figura 70 apresentam a comparação das resistências ao cisalhamento, normalizadas pelas tensões confinantes, entre as três misturas separadas por cada uma das tensões confinantes. As misturas com adição de dióxido de silício atingiram picos de resistência mais altos na maioria das tensões confinantes e quanto maior o confinamento, maior a resistência observada.

Para um confinamento de 50 kPa, a adição de MS e NS proporcionaram respectivos incrementos de 4% e 14% da resistência ao cisalhamento em relação aos valores da mistura apenas com cimento. As três misturas apresentaram comportamento compressivo seguido de expansão, sendo que a adição de dióxido de silício tornou as misturas mais rígidas com maior intertravamento entre as partículas, favorecendo a dilatância em tensões confinantes baixas.

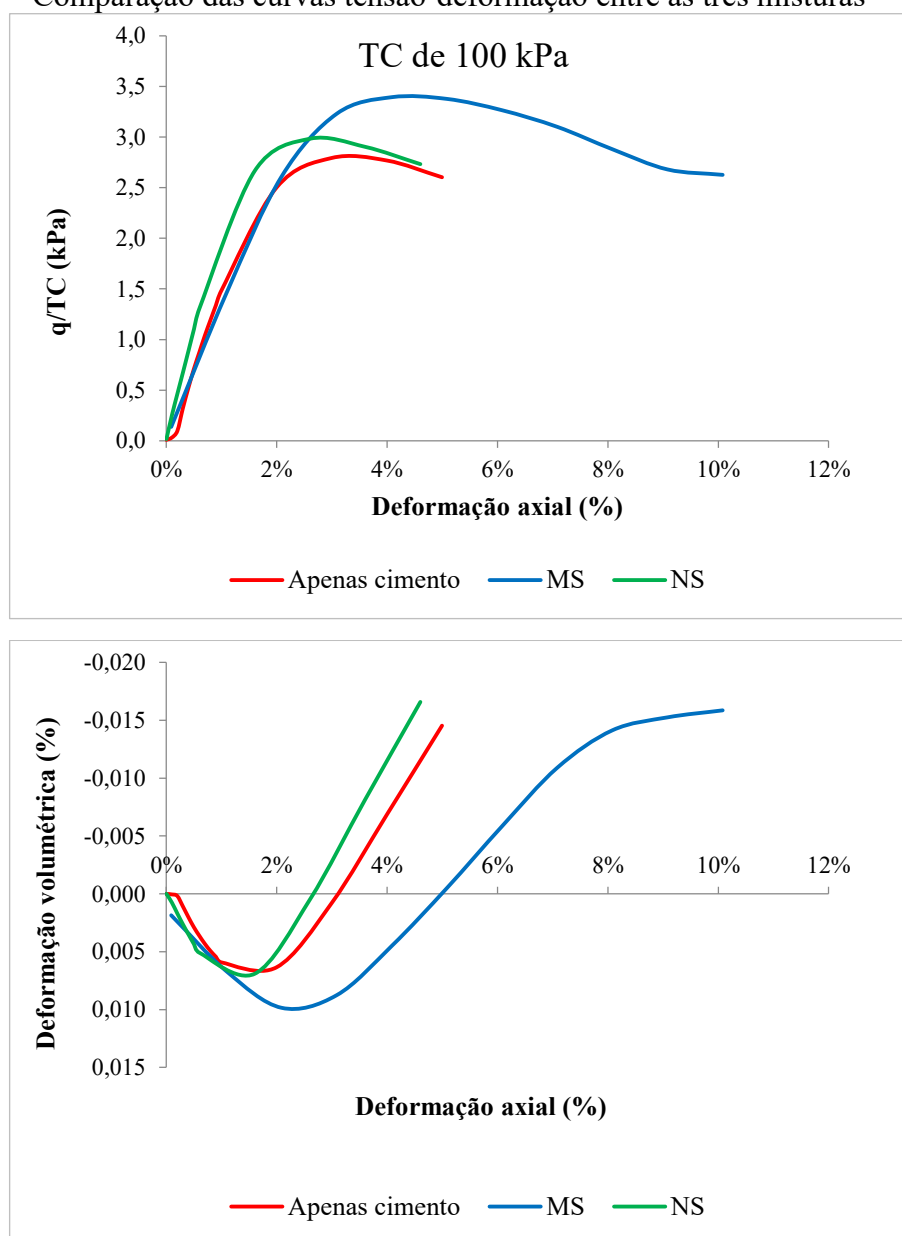
Figura 68 – Comparação das curvas tensão-deformação entre as três misturas – TC 50 kPa



Fonte: Autora (2025)

Para a tensão de 100 kPa, o aumento proporcionado pelo MS foi o mais expressivo, de 21% enquanto que a adição de NS incrementou a resistência em 7%. Todas as misturas apresentaram maior capacidade de suportar deformações axiais antes da ruptura.

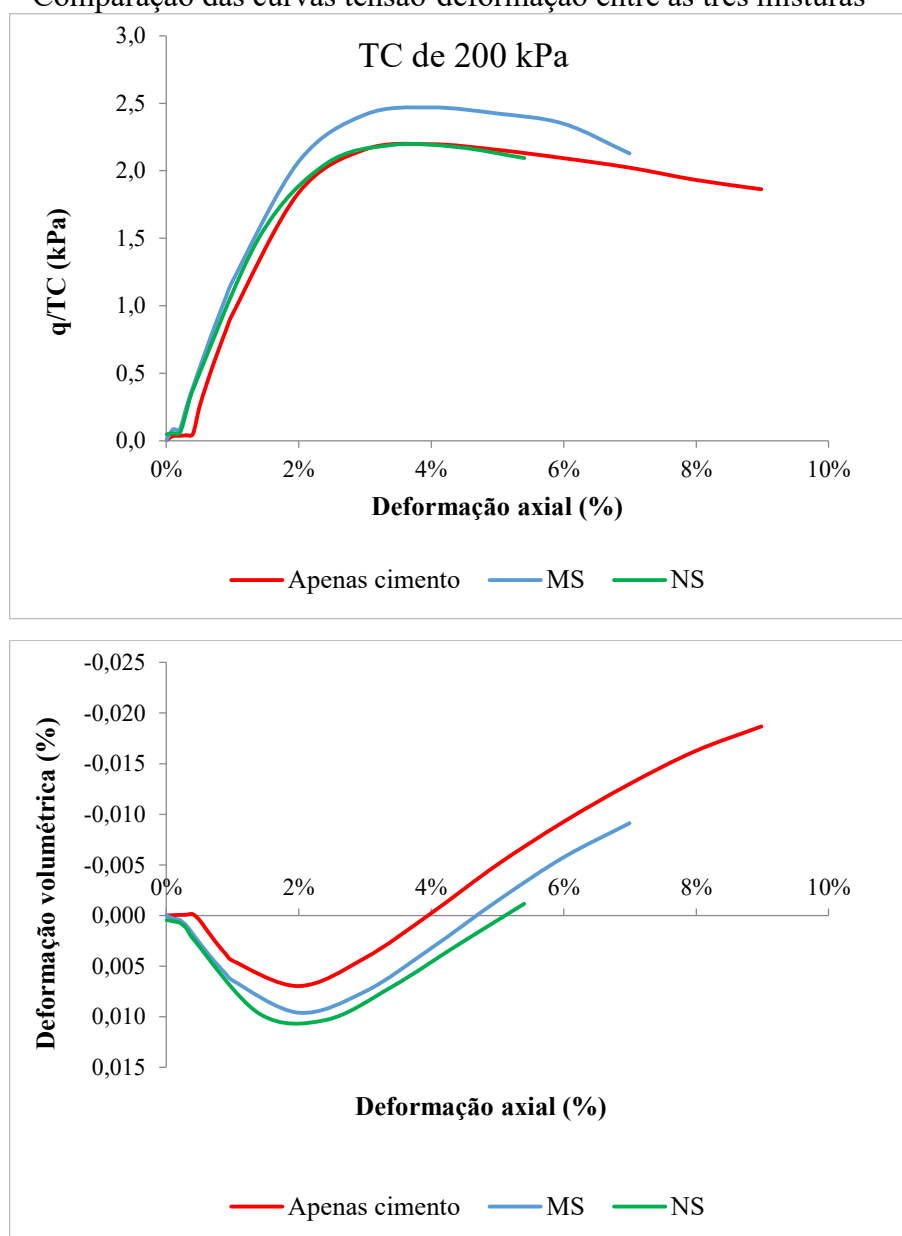
Figura 69 – Comparação das curvas tensão-deformação entre as três misturas – TC 100 kPa



Fonte: Autora (2025)

Por fim, para a tensão de 200 kPa, o MS aumentou em 12% e o NS atingiu o pico de resistência praticamente no mesmo valor para a mistura sem dióxido de silício. Observa-se que com o aumento da tensão confinante, o efeito da adição de dióxido de silício se torna mais evidente, pois para os dois tamanhos houve limitação da dilatação, indicando maior coesão e resistência à deformação.

Figura 70 – Comparação das curvas tensão-deformação entre as três misturas – TC 200 kPa



Fonte: Autora (2025)

É visível o comportamento distinto da variação volumétrica entre os três casos. A mistura com NS sofreu deformações axiais menores que as outras misturas e houve redução da expansão, corroborando a consistência da mistura observada durante o processo de moldagem dos corpos de prova, em que a mistura com o dióxido de silício nanométrico apresentou aspecto mais elástico.

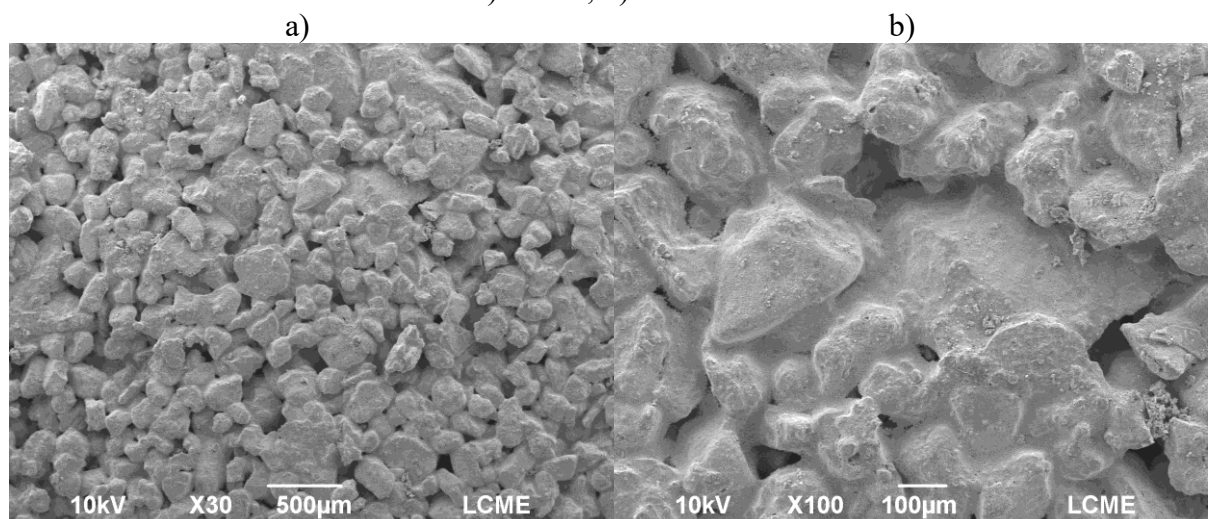
4.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS MISTURAS

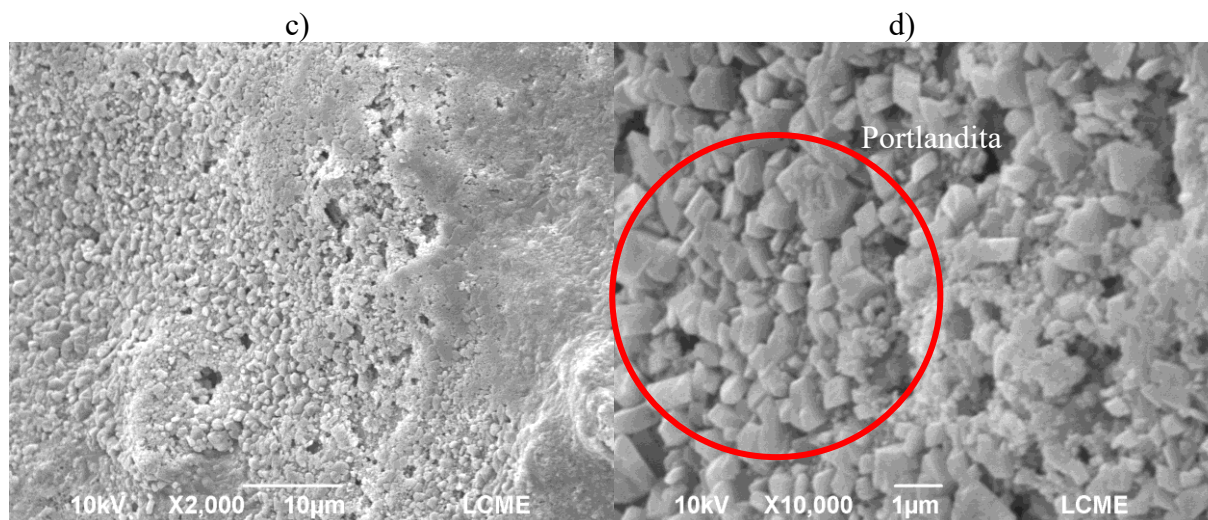
Foram realizadas microscopias de varredura eletrônica (MEV) em fragmentos de corpos de prova selecionados para representar o estudo. Os fragmentos foram coletados após ensaios de compressão simples. Os resultados das imagens realizadas são apresentados nas figuras dos itens relativos a cada amostra.

4.5.1 Amostra 1 (5% de cimento – CP 21)

Observando as ampliações de 30x (a) e 100x (b) da Figura 71, observa-se a granulometria da areia, com maioria dos grãos uniformes e indícios de formação da matriz cimentícia e vazios distribuídos na matriz. Na ampliação de 2000x (Figura 71c) é possível identificar a formação de portlandita, que são estruturas cristalinas de hidróxido de cálcio (CH), assim como fissuras e microvazios, indicando possíveis caminhos da ruptura. A ampliação de 10000x (Figura 71d) proporcionou um maior detalhamento das áreas densas e compactas típicas da formação de portlandita em placas e gel CSH, que é responsável pela resistência mecânica, assim como cristais aciculares e lamelares, indicando uma hidratação ativa.

Figura 71 – Imagens MEV da mistura de areia e cimento nas ampliações de a) 30x; b) 100x, c) 2000x; d) 10000x.



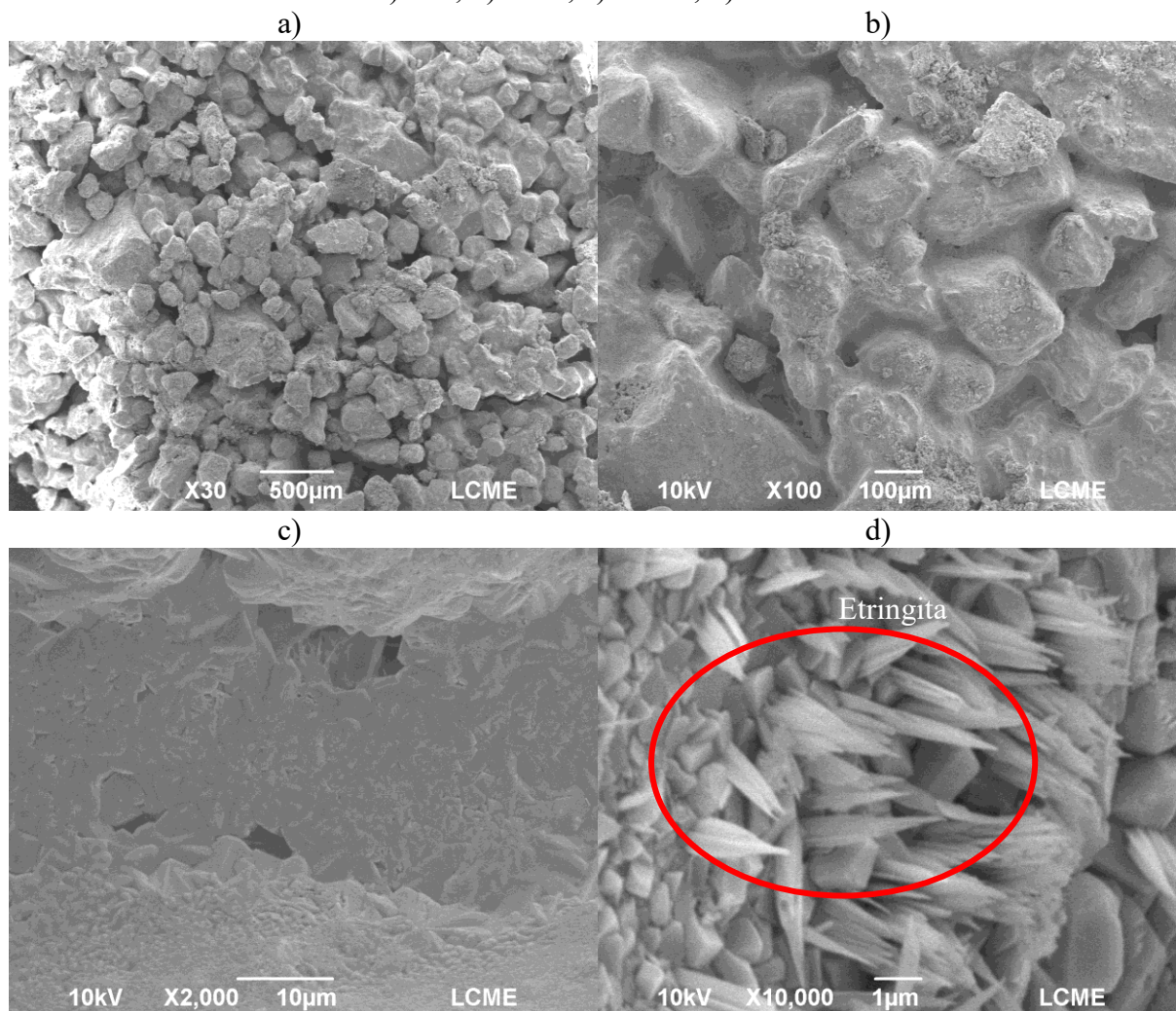


Fonte: Autora (2025)

4.5.2 Amostra 2 (5% de cimento e 10% de MS – CP 37)

Observando as ampliações de 30x (a) e 100x (b) da Figura 72, observa-se uma melhor compactação visual e uma microestrutura mais homogênea, indicando que a matriz apresenta menos vazios comparando com a amostra sem MS. Na ampliação de 2000x (Figura 72c), observa-se uma quantidade menor de cristais de hidróxido de cálcio em comparação com a amostra 1, o que pode indicar consumo parcial do CSH pelas reações pozolânicas promovidas pelo dióxido de silício. A ampliação de 10000x (Figura 72d) evidencia uma cristalização intensa, com uma grande quantidade de cristais aciculares alongados, em forma de agulha, formação característica da etringita, produto das primeiras idades de hidratação do cimento. Ao redor dos cristais, observa-se a matriz de silicato de cálcio hidratado.

Figura 72 – Imagens MEV da mistura de areia e cimento com adição de MS nas ampliações de a) 30x; b) 100x, c) 2000x; d) 10000x.

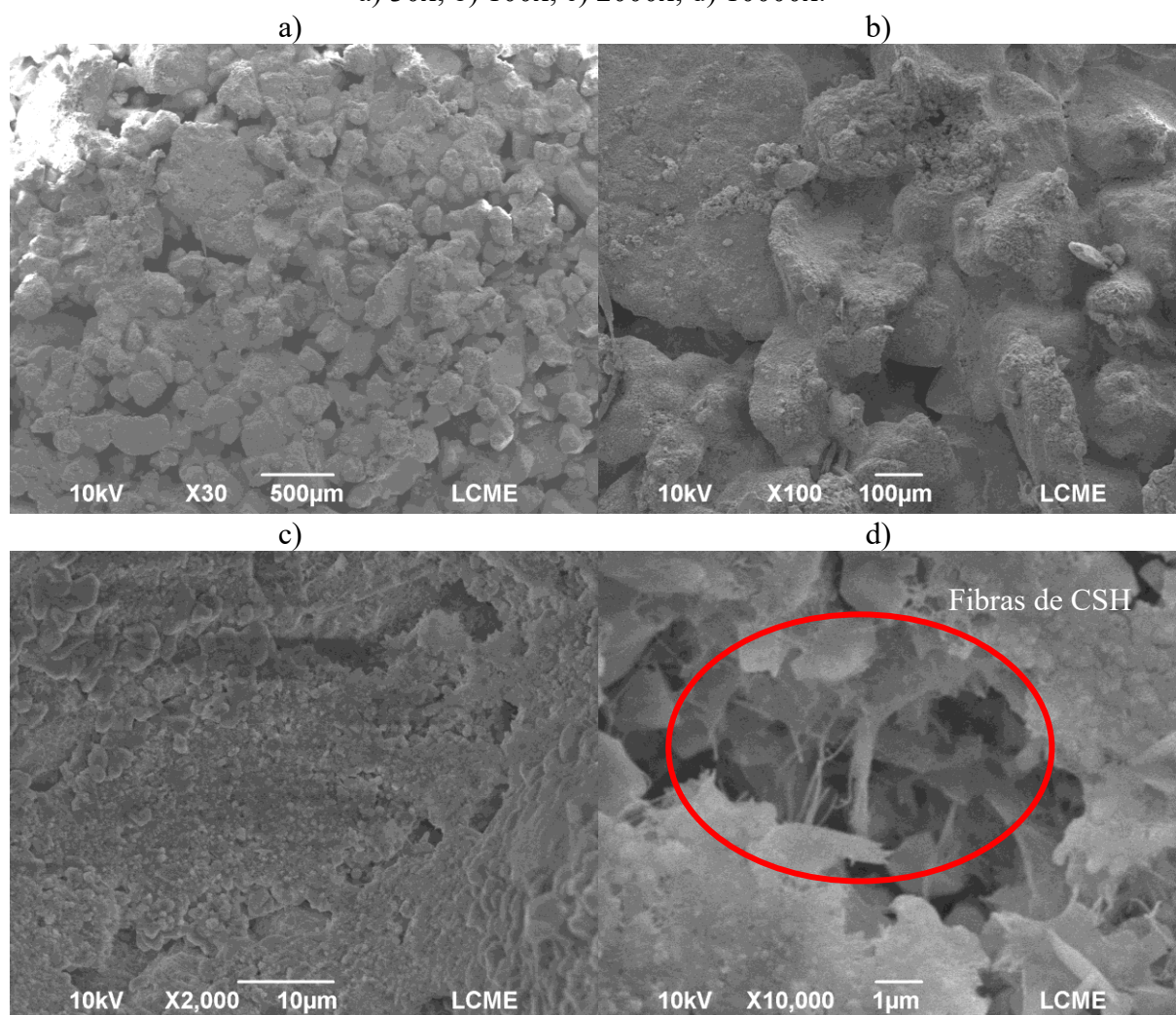


Fonte: Autora (2025)

4.5.3 Amostra 3 (5% de cimento e 10% de NS – CP 62)

Observando as ampliações de 30x (a) e 100x (b) da Figura 73, observa-se que a mistura se comportou menos cristalina. Na ampliação de 2000x (Figura 73c) é possível identificar a formação da matriz cimentícia com uma textura mais compactada, típica de um gel de CSH bem formado. A ampliação de 10000x (Figura 73d) é bastante diferente da observada na adição de MS, pois se caracteriza por uma rede extremamente fina, densa e interconectada de fibras de CSH, com uma morfologia de gel. Essa diferença ocorre pela maior área de superfície do dióxido de silício nanométrico, que consome o hidróxido de cálcio mais rapidamente e favorece a formação do gel de CSH mais denso, em vez de grandes cristais de etringita. Outra diferença em relação ao dióxido de silício micrométrico é que com a adição de NS, é possível identificar todos os produtos hidratados: etringita, portlandita e o CSH, formando uma matriz bem densa.

Figura 73 – Imagens MEV da mistura de areia e cimento com adição de NS nas ampliações de a) 30x; b) 100x, c) 2000x; d) 10000x.



Fonte: Autora (2025)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são levantadas as conclusões obtidas das análises dos resultados dos ensaios e são sugeridas pesquisas futuras.

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo investigar o potencial de partículas de dióxido de silício, em escalas micro e nanométrica, como aditivos na estabilização de areias cimentadas, buscando compreender se sua introdução pode viabilizar a redução do teor de cimento necessário para atingir resistências adequadas. A proposta fundamenta-se na hipótese de que partículas com elevada área superficial possam atuar tanto fisicamente, preenchendo poros e otimizando a compactação da matriz, quanto quimicamente, por meio de reações pozolânicas com os produtos da hidratação do cimento.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples demonstraram que a adição de dióxido de silício promoveu aumentos na resistência mecânica, mesmo em amostras com apenas 5% de cimento, especialmente quando utilizada a sílica em escala nanométrica. O teor ótimo encontrado para o dióxido de silício micrométrico foi de 5% e de 10% para o nanométrico, esse último com incremento de 8,6% em relação à mistura de areia e cimento e de 14,4% em relação à mistura com dióxido de silício micrométrico.

Complementando a análise, os ensaios triaxiais de compressão isotrópica drenada (CID) permitiram a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivo, indicando o impacto direto das diferentes adições no comportamento geotécnico das misturas. Para a amostra com apenas cimento, obteve-se coesão de 50,88 kPa e ângulo de atrito de 38,66°. Na amostra com dióxido de silício micrométrico, observou-se redução na coesão, para 49,15 kPa e ângulo de atrito de 41,45°, sugerindo uma melhoria nas condições de atrito granular. Já na mistura com dióxido de silício nanométrico, os resultados apontaram para coesão significativamente elevada (73,52 kPa) e ângulo de atrito de 36,54°, indicando maior ligação entre partículas, ainda que com menor contribuição do atrito interno.

A adição de dióxido de silício favorece o intertravamento e a rigidez da matriz solo-cimento. Em baixas tensões confinantes, verificou-se maior dilatância, pois a estrutura tem liberdade de expansão, porém em tensões confinantes mais altas, o efeito da adição de SiO_2 atuou limitando a dilatância e proporcionando ganho de resistência, rigidez e coesão, tornando a mistura mais dúctil.

Paralelamente, as análises microestruturais por MEV revelaram uma matriz cimentícia mais densa, com menor presença de vazios e indícios da formação de géis de C-S-H, sugerindo que além do efeito físico de empacotamento, há também indícios de interação química entre o aditivo e os compostos hidratados.

Esses dados demonstram que o comportamento tensão-deformação das misturas pode ser otimizado por meio da escolha adequada do tipo de aditivo, e que mesmo com baixo teor de cimento é possível obter desempenho mecânico compatível com exigências de obras geotécnicas, como pavimentação e fundações rasas.

A abordagem integrada entre ensaios mecânicos, parâmetros de resistência e caracterização microestrutural permitiu uma análise abrangente do potencial dos aditivos estudados, contribuindo com subsídios técnicos relevantes para a otimização da estabilização de solos e para a redução do consumo de cimento, o que se alinha a práticas mais sustentáveis na engenharia civil. Reconhece-se, no entanto, que a investigação foi limitada a um tempo de cura de 7 dias, e que estudos complementares com maiores períodos de hidratação e diferentes teores de aditivo são necessários para consolidar e aprimorar as hipóteses aqui levantadas.

Conclui-se, portanto, que o uso de dióxido de silício micro e nanométrico, em conjunto com cimento, é uma estratégia promissora para otimizar a estabilização de solos alternativamente aos aditivos já consolidados, que por muitas vezes, acabam sendo escassos e inacessíveis no Brasil.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando as conclusões, sugere-se que os seguintes temas sejam abordados em trabalhos futuros envolvendo adição de partículas de tamanhos pequenos para a estabilização de solos:

- Utilizar um teor maior do dióxido de silício estudado, substituindo o solo em vez do cimento, conforme análises prévias realizadas;
- Testar outros períodos de cura e tensões confinantes maiores;
- Testar a aplicação do dióxido de silício em outro tipo de solo, uma argila estabilizada com cal.
- Realizar uma análise econômica para comparação do custo benefício do dióxido de silício da pesquisa e da nanosílica comercial;

- Utilizar nanosílica do mercado como o aditivo na mistura de areia e cimento, a fim de gerar comparativos com os trabalhos apresentados no referencial teórico.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Tests for Soils: D 7181-20**, ASTM, Philadelphia.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458:2016: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2016: Solo - Análise granulométrica**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:2011: Resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos - concreto e argamassa**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025:2012: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:2016: Solo-cimento - Ensaio de compactação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458:2016: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2016: Solo - Análise granulométrica**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018: Cimento Portland - Requisitos**, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:2024: Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2024.

ABBASI, Nader; FARJAD, Arash; SEPEHRI, Saloome. The Use of Nanoclay Particles for Stabilization of Dispersive Clayey Soils. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 36, n. 1, p. 327–335, fev. 2018.

AHMADI, Hadi; SHAFIEE, Omid. Experimental comparative study on the performance of nano-SiO₂ and microsilica in stabilization of clay. **The European Physical Journal Plus**, v. 134, n. 9, p. 459, set. 2019.

ALI ZOMORODIAN, S. M. *et al.* Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives. **Applied Clay Science**, v. 140, p. 140–147, maio 2017.

ALIREZA ABBASNEJAD, ATA REZAEI, Fard. Experimental Investigation of the Effect of Microsilica on the Uniaxial Compressive Strength and Rupture Strain of Fine Sand. **Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology**, v. 44, n. 4, p. 6690–6699, 16 out. 2023.

ANISUR RAHMAN, M.; AHMED, Ali. Use of Silica Fume in Stabilizing Cement-Dune Sand for Highway Materials. **American Journal of Civil Engineering**, v. 5, n. 1, p. 41, 2017.

BAHMANI, Sayed Hessam *et al.* Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 350–359, ago. 2014.

CHANGIZI, Foad; HADDAD, Abdolhosein. Effect of Nano-SiO₂ on the Geotechnical Properties of Cohesive Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 34, n. 2, p. 725–733, abr. 2016.

CHONG, Ken P. NANO SCIENCE AND ENGINEERING IN MECHANICS AND MATERIALS. 2003.

CHOOBBASTI, Asskar Janalizadeh; VAFAEI, Ali; KUTANAEI, Saman Soleimani. Mechanical Properties of Sandy Soil Improved with Cement and Nanosilica. **Open Engineering**, v. 5, n. 1, 6 fev. 2015.

CHOOBBASTI, Asskar Janalizadeh; VAFAEI, Ali; SOLEIMANI KUTANAEI, Saman. Static and Cyclic Triaxial Behavior of Cemented Sand with Nanosilica. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 10, p. 04018269, out. 2018.

CLOUGH, G. Wayne *et al.* Cemented Sands under Static Loading. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 107, n. 6, p. 799–817, jun. 1981.

CONSOLI, N. C. *et al.* Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. **Géotechnique**, v. 62, n. 2, p. 177–183, fev. 2012.

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 5, p. 759–763, maio 2010.

CONSOLI, Nilo Cesar. A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils. **Engineering Geology**, v. 169, p. 61–68, fev. 2014.

CONSOLI, Nilo Cesar; RIZZATTI DE MORAES, Rafael; FESTUGATO, Lucas. Variables controlling strength of fibre-reinforced cemented soils. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, v. 166, n. 4, p. 221–232, nov. 2013.

CORREIA, António Alberto S.; CASALEIRO, Pedro D. F.; RASTEIRO, Maria Graça B. V. Applying Multiwall Carbon Nanotubes for Soil Stabilization. **Procedia Engineering**, v. 102, p. 1766–1775, 2015.

CRUZ, Rodrigo Caberlon. **INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FUNDAMENTAIS NA RIGIDEZ, RESISTÊNCIA E DILATÂNCIA DE UMA AREIA ARTIFICIALMENTE CIMENTADA**. Doutorado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

CUI, Qiang *et al.* Experimental Investigation on the Strength and Microscopic Properties of Cement-Stabilized Aeolian Sand. **Buildings**, v. 13, n. 2, p. 395, 1 fev. 2023.

DA S. GOMES, Luana; CARLENE R. FURTADO, Antonia; C. DE SOUZA, Marcos. Silica and its Peculiarities. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 4, p. 1018–1038, 2018.

FARIAS, Stephane Bandeira Pedro de. **Síntese, Caracterização e Avaliação do Grau de Cristalinidade de Compostos Tipo Hidrotalcita**. Juiz de Fora, 2011.

FATTAHI MASROUR, Farimah *et al.* Effect of Nanosilica on the Macro- and Microbehavior of Dispersive Clays. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 12, p. 04021349, dez. 2021.

FLORES, Yemcy Calcina. **INCORPORAÇÃO DE ADITIVOS MINERAIS COMERCIAIS E PRODUZIDOS POR MOAGEM OTIMIZADA NAS DIFERENTES ESCALAS DE TAMANHO E NATUREZA EM PASTAS VISANDO APLICAÇÃO NA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**. 2017.

FLOSS, Márcio Felipe. **PARÂMETROS DE CONTROLE DA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DE SOLOS GRANULARES ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS**. [S.l.: S.n.].

FONTOURA, Tahyara Barbalho. **COMPORTAMENTO TENSÃO - DEFORMAÇÃO E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UMA AREIA DE DUNA CIMENTADA ARTIFICIALMENTE**. [S.l.: S.n.].

FOPPA, Diego. **ANÁLISE DE VARIÁVEIS-CHAVE NO CONTROLE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

FU, Shaoyun *et al.* Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. **Nano Materials Science**, v. 1, n. 1, p. 2–30, mar. 2019.

GHAZY, A.; BASSUONI, M. T.; SHALABY, A. Nano-Modified Fly Ash Concrete: A Repair Option for Concrete Pavements. **ACI Materials Journal**, 2016.

HE, Ziming *et al.* Effect of wollastonite microfibers as cement replacement on the properties of cementitious composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 119920, nov. 2020.

HUANG, Yu; WANG, Lin. Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 6, p. 497, mar. 2016.

IRANPOUR, Behnam; HADDAD, Abdolhosein. The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment. **Engineering Geology**, v. 205, p. 40–53, abr. 2016.

KARIMI, Masoud *et al.* Stabilization of Silty Sand Soils with lime and Microsilica Admixture in presence of Sulfates. *In: PAN-AME CGS GEOTECHNICAL CONFERENCE. Anais...* Toronto, Canada: 2011.

KARUMANCHI, Meeravali *et al.* Improvement of consistency limits, specific gravities, and permeability characteristics of soft soil with nanomaterial: Nanoclay. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 232–238, 2020.

KORPA, A.; KOWALD, T.; TRETTIN, R. Hydration behaviour, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale pozzolanic additives. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 7, p. 955–962, jul. 2008.

LIN, Wenli *et al.* Macro-micro mechanical behavior of saturated cemented sands during drained triaxial shearing. **Construction and Building Materials**, v. 434, p. 136787, jul. 2024.

LIU, Chunhui *et al.* Assessment of strength development of soil stabilized with cement and nano SiO₂. **Construction and Building Materials**, v. 409, p. 133889, dez. 2023.

LOPEZ GAYARRE, F. *et al.* Waste for aggregates in ultrahigh performance concrete (UHPC). *In: Waste and Byproducts in Cement-Based Materials. [S.l.]*: Elsevier, 2021. p. 29–51.

MARQUES, Sérgio Filipe Veloso. **Comportamento de uma Areia Artificialmente Cimentada até Altas Tensões de Confinamento**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

MENDES, Thiago Melanda. **EFEITO DA NANOSSÍLICA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS DE ULTRA ALTA RESISTÊNCIA**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

MOAYED, R. Z.; IZADI, E.; HEIDARI, S. Stabilization of saline silty sand using lime and micro silica. **Journal of Central South University**, v. 19, n. 10, p. 3006–3011, out. 2012.

MOH, Za-Chi Eh. Reactions of Soil Minerals With Cement and Chemicals. 1965.

MOON, Sung-Woo *et al.* Effect of fine particles on strength and stiffness of cement treated sand. **Granular Matter**, v. 22, n. 1, fev. 2020.

NICHOLSON, Peter. **Soil improvement and ground modification methods**. Oxford, England Waltham, Massachusetts: BH, 2015.

NILI, Mahmoud; EHSANI, Ahmad. Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume. **Materials & Design**, v. 75, p. 174–183, jun. 2015.

P. P., Abhilash *et al.* Effect of nano-silica in concrete; a review. **Construction and Building Materials**, v. 278, p. 122347, abr. 2021.

PHANIKUMAR, B. R.; M, Jagapathi Raju; E, Ramanjaneya Raju. Silica fume stabilization of an expansive clay subgrade and the effect of silica fume-stabilised soil cushion on its CBR. **Geomechanics and Geoengineering**, v. 15, n. 1, p. 64–77, 2 jan. 2020.

PRIETTO, Pedro D. M. **Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

SALVATORE, Erminio *et al.* Experimental Evidence of the Effectiveness and Applicability of Colloidal Nanosilica Grouting for Liquefaction Mitigation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 146, n. 10, p. 04020108, out. 2020.

SCHNAID, Fernando; PRIETTO, Pedro D. M.; CONSOLI, Nilo C. Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 10, p. 857–868, out. 2001.

SENFF, Luciano *et al.* Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2487–2491, jul. 2009.

SEYEDI GELSEFIDI SEYED ALIREZA; MAMAGHANIAN JABER. Stabilization of a Weak Low Plasticity Clay Soil Using Nanomaterial. *In: Advances in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. [S.l.]: IOS Press, 2013.

SINGH, Pratyasha; KUMAR DASH, Hemanta; SAMANTARAY, Sandeep. Effect of silica fume on engineering properties of expansive soil. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 5035–5040, 2020.

TABARSA, Alireza *et al.* Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay – A sustainable material for construction. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 454–463, jan. 2018.

TÜRKÖZ, Murat; UMU, Seyfettin Umut; ÖZTÜRK, Ogan. Effect of Silica Fume as a Waste Material for Sustainable Environment on the Stabilization and Dynamic Behavior of Dispersive Soil. **Sustainability**, v. 13, n. 8, p. 4321, 13 abr. 2021.

VARELA, Gilson Gabriel Teixeira. **COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA MELHORADO COM CIMENTO PORTLAND**. Mestrado—Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2024.

WANG, Jinbang *et al.* Effect of nano-silica on chemical and volume shrinkage of cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118529, jun. 2020.

ZAKERI, Mohamad; RAMEZANI, Mohammad; NAZARI, Ali. Effect of ball to powder weight ratio on the mechanochemical synthesis of MoSi₂-TiC nanocomposite powder. **Materials Research**, v. 15, n. 6, p. 891–897, 4 set. 2012.

ZHAO, Mingzhi *et al.* State-of-the-Art of Colloidal Silica-Based Soil Liquefaction Mitigation: An Emerging Technique for Ground Improvement. **Applied Sciences**, v. 10, n. 1, p. 15, 18 dez. 2019.

ZIEBA, Zofia *et al.* Influence of Micro and Nanosilica on the Frost–Heave Process. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 471, p. 042020, 23 fev. 2019.