

Retração, fluência e propriedades mecânicas de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre clínquer

LUÍSA ARAÚJO RODRIGUES - MESTRA - <https://orcid.org/0000-0002-7474-2811> - (luisaaraujorodrigues@gmail.com) – CTNano/UFMG

JOSÉ MÁRCIO FONSECA CALIXTO - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0003-2828-0967> ;

LUIZ ORLANDO LADEIRA - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0002-4935-6070> ;

TARCIZO DA CRUZ C. DE SOUZA - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0001-6437-0009> – CTNano/UFMG – EcoCarbono Consultoria e Desenvolvimento

ADRIANA GUERRA GUMIERI - DOUTORA, PROFª – UFMG

RESUMO

O CONCRETO É UM COMPÓSITO TRIFÁSICO E SE APRESENTA NANOESTRUTURADO. OS PROCESSOS QUE OCORREM EM NANOESCALA INTERFEREM DIRETAMENTE EM SEU DESEMPENHO. NESTE TRABALHO FOI AVALIADO O COMPORTAMENTO DE CONCRETOS DO TIPO BOMBEADO PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO (NTC) SINTETIZADOS DIRETAMENTE SOBRE O CLÍNQUER. O CIMENTO CP V - ARI FOI SUBSTITUÍDO EM PARTE PELO CLÍNQUER NANOESTRUTURADO, RESULTANDO EM 0,2% E 0,4% DE NTC EM RELAÇÃO À MASSA DE CIMENTO ANIDRO. OS DESEMPENHOS DESSES CONCRETOS FORAM COMPARADOS COM UM CONCRETO DE REFERÊNCIA, SEM A INCORPORAÇÃO DO CLÍNQUER NANOESTRUTURADO. À AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS MOSTROU QUE OS MELHORES DESEMPENHOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS FORAM OBTIDOS NOS CONCRETOS CONTENDO 0,2% DE NTC. NOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO POR SECAGEM E FLUÊNCIA BÁSICA, A INCORPORAÇÃO DE NTC MOSTROU-SE PROMISSORA RESULTANDO EM VALORES DE 9% E 14% MENORES

-aos 90 dias, respectivamente, para o teor de 0,4% de NTC.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO, CLÍNQUER NANOESTRUTURADO, NANOTUBOS DE CARBONO, DESEMPENHO MECÂNICO, RETRAÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

A nanotecnologia já era apontada, desde 2005, como a próxima revolução industrial por Sanchez e Sobolev (2010). Nesse contexto, o concreto pode ser compreendido como um compósito nanoestruturado, cujos desempenhos re-

sultam de processos que se estendem da nano à macroescala.

Nanotubos de carbono (NTC) vêm sendo investigados por suas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, inclusive no setor da construção. Embora estudos sobre NTC em pastas e argamassas sejam numerosos, suas aplicações em concretos são incipientes, em parte pela problemática da dispersão. Para contornar esse problema, pesquisadores do CTNano/UFMG desenvolveram NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer, produzindo um clínquer nanoestruturado (Ladeira *et al.*, 2016).

Este trabalho avalia o comportamento de concretos nos quais parte do cimento foi substituída por um ligante alternativo, o clínquer nanoestruturado com NTC, usando duas proporções e comparando-as a um concreto de referência.

2. MATERIAIS

Os materiais utilizados (areia, agregado graúdo, cimento e aditivo) foram adquiridos em Goiânia e caracterizados no

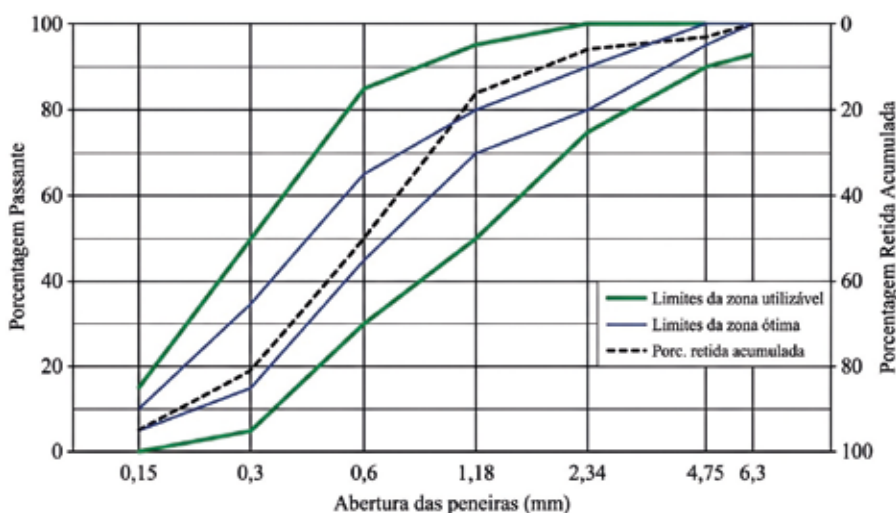


FIGURA 1

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA MÉDIA UTILIZADA NO ESTUDO

FONTE: DADOS DA PESQUISA

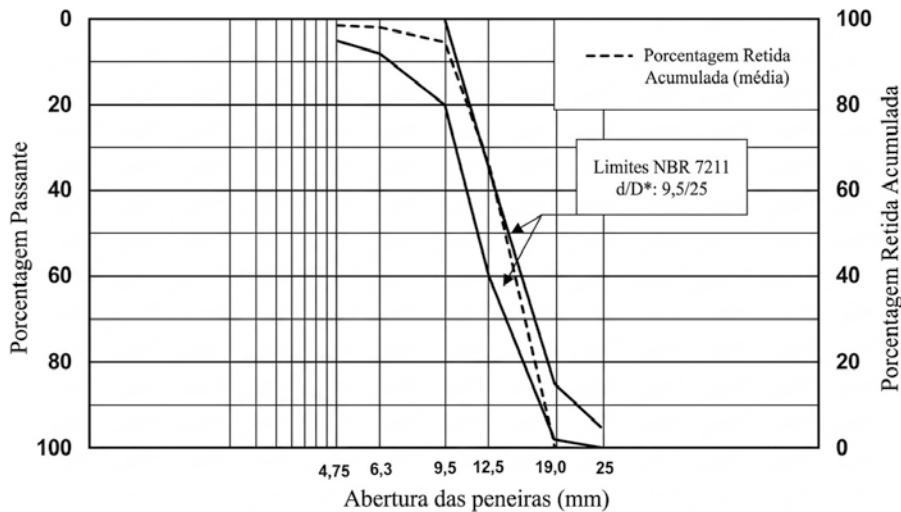


FIGURA 2

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO NO ESTUDO

FONTE: DADOS DA PESQUISA

Laboratório da ELETROBRAS Furnas, de acordo com as normas da ABNT.

Uma areia natural quartzosa (originada na região de Goiânia), classificada como média e distribuição granulométrica representada pela Figura 1, foi utilizada como agregado miúdo.

O agregado graúdo utilizado, cuja curva granulométrica é apresentada na Figura 2, foi a brita de origem litológica granítica, proveniente da região de Goiânia.

O cimento Portland utilizado foi do tipo CPV-ARI (marca Cauê - InterCement) com finura Blaine de 4.710 cm²/g e massa específica de 3,05 g/cm³. Considerando os óxidos presentes, as fases cristalinas presentes

(considerando o método de Bogue) foram, aproximadamente: C₃S: 61%; C₂S: 11%; C₃A: 7% e C₄AF: 8%. A perda ao fogo foi de aproximadamente 6,8% e os teores de SO₃, MgO foram de 2,8% e 1,2%, respectivamente.

Como aditivo plastificante, utilizou-se o superplastificante ViscoCrete®-6900 (Sika®).

O clínquer nanoestruturado foi produzido no Centro de Nanomateriais e Grafeno - CTNano/UFGM, utilizando a metodologia patenteada por Ladeira et al. (2016). As características do material são apresentadas na Tabela 1.

A microscopia eletrônica de varredura

(MEV), mostrada na Figura 3, revela que as partículas de clínquer estão recobertas pelas nanoestruturas. Avaliando as estruturas de carbono pela técnica de microscopia eletrônica de transmissão (MET), verificaram-se nanotubos e nanofibras de carbono, com diâmetro médio de 26 nm.

3. MÉTODOS

3.1 Dosagens avaliadas

A dosagem dos concretos foi realizada objetivando um concreto de classe S160 e resistência média à compressão de 40 MPa aos 28 dias. Considerando a relação a/c de 0,45, o traço em massa em 1:4,514 e a quantidade de aditivo (superplastificante) em 0,4% em relação à massa total de material cimentício (cimento + clínquer nanoestruturado), foi definido o concreto de referência (CREF). A partir dele, foram produzidos dois traços contendo NTC, com a quantidade de aditivo e de agregado ajustadas em função das umidades dos agregados.

Os teores de NTC em relação à massa total de ligantes anidros foram de 0,2% e 0,4%, sendo respectivamente os traços (CNTC0,2) e (CNTC0,4). Nestes últimos, as quantidades de aditivo superplastificante e de agregados foram ajustadas em função da umidade desses últimos.

Na Tabela 2, estão apresentadas as composições dos traços utilizados no estudo, bem como os resultados das avaliações no estado fresco.

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS DO CLÍNQUER NANOESTRUTURADO PRODUZIDO NO CTNANO/UFGM

Ficha técnica do clínquer nanoestruturado	
Lote	CNT00120
Forma	Pó
Diâmetro dos NTC	16 - 85 nm
Teor de NTC	15 ± 2 %
Processo de síntese	Batelada - rotativo por CVD
Morfologia dos NTC	Paredes múltiplas e nanofibras

FONTE: DADOS DA PESQUISA

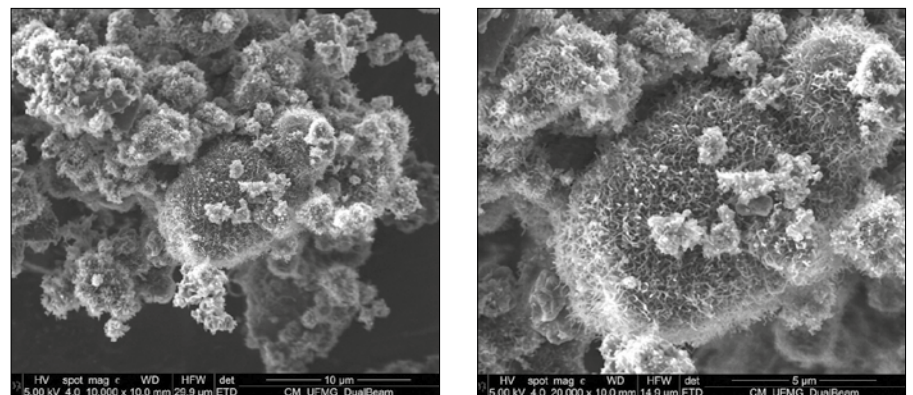


FIGURA 3

IMAGENS DE MEV DO CLÍNQUER NANOESTRUTURADO UTILIZADO NO ESTUDO

FONTE: DADOS DA PESQUISA

TABELA 2

COMPOSIÇÕES DOS TRAÇOS FABRICADOS E PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

Concreto	CREF	CNTCO,2	CNTCO,4
Porcentagem de NTC em massa (%)	0	0,2	0,4
Dados de composição (Kg/m ³)	Cimento	400	394,67
	Clínquer nanoestruturado	0	5,33
	NTC	0	0,8
	Água	180	181
	Areia Natural	738	745
	Brita 19 mm	1066	1076
	Aditivo superplastificante	1,6	1,613
Propriedades do concreto	Abatimento (cm)	21	21
	Ar incorporado (%)	2,85	2,34
	Massa unitária (Kg/m ³)	2395	2426

FONTE: DADOS DA PESQUISA

3.2 Produção dos concretos

Para cada traço, inicialmente foi realizada a mistura do cimento com a respectiva quantidade de clínquer nanoestruturado durante 10 minutos, em betoneira. Após, foram produzidos os concretos de referência e os concretos contendo 0,2% e 0,4% de NTC, empregados nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão. As bateladas dos concretos para os ensaios de retração, fluência e teste de dano de rigidez foram produzidos posteriormente. As produções foram realizadas utilizando betoneira com capacidade de 600 litros.

3.3 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova para os ensaios no estado endurecido foram moldados

conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), utilizando vibrador de imersão para adensamento. Após 24 horas sob cobertura plástica na sala de dosagem, foram transferidos para cura em câmara úmida (23,5 °C e 97% de umidade), permanecendo até a data dos ensaios, sendo a quantidade apresentada na Tabela 3. Para os ensaios, os corpos de prova foram identificados, retificados e embalados com plástico para evitar perda de umidade.

Para a determinação das resistências à compressão, foram ensaiados seis corpos de prova para cada idade e traço: três oriundos exclusivamente para o ensaio de compressão e três do ensaio de módulo de elasticidade. A avaliação da resistência à compressão foi realizada conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando prensa servo hidráulica EMIC DL 100000. A avaliação para obtenção do módulo de elasticidade

foi realizada conforme a NBR 8522 (ABNT, 2021), utilizando o mesmo equipamento.

A avaliação da resistência à tração por compressão diametral foi realizada conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011). Já a avaliação da resistência à tração na flexão foi avaliada conforme o prescrito na 12142 (ABNT, 2010). Estas duas avaliações também foram realizadas utilizando a mesma prensa servo hidráulica, com as adaptações necessárias.

3.4 Retração autógena e por secagem

A retração em pastas de cimento, argamassas e concretos ocorre sem aplicação de carga e está principalmente relacionada à perda de água. A retração por secagem é uma contração irreversível causada pela variação de umidade, podendo ocorrer no estado fresco ou após o início do endurecimento (Equipe de Furnas, 1997). Como não há norma brasileira específica para ensaios de retração, adotou-se o procedimento descrito na Instrução de Trabalho de Furnas (FURNAS, 2015).

Para a preparação, foram posicionados extensômetros de corda vibrante alinhados ao eixo vertical dos moldes (Figura 4) dos corpos de prova. No ensaio de retração autógena, os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas, embalados com plástico filme e manta de borracha, e mantidos em ambiente a 23 ± 2 °C por 24 horas para estabilização térmica, momento da leitura inicial. Em seguida, registraram-se leituras diárias por sete dias e, posteriormente, pelo menos duas vezes por semana até 85 dias.

As medições foram realizadas em quatro momentos: (1) Após 24 horas (desforma e medida do comprimento inicial); (2) Imediatamente antes da data de início do ensaio, ainda na câmara úmida; (3) Imediatamente

TABELA 3

QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA MOLDADOS PARA OS RESPECTIVOS ENSAIOS REALIZADOS

Idade (dias)	Res. à compressão ¹	Módulo de elasticidade ¹	Res. à tração por comp. diametral ¹	Res. à tração na flexão ²	Retração autógena ²	Retração por secagem ³	Fluência ⁴	Dado de rigidez ¹
3	3	3	3	3	2	2	—	—
7	3	3	3	3	—	—	2	—
28	3	3	3	3	—	—	—	3

¹ CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS 100 x 200 MM; ² CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS 150 x 150 x 600 MM; ³ CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS 75 x 75 x 285 MM; ⁴ CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS 150 x 450 MM

FONTE: DADOS DA PESQUISA

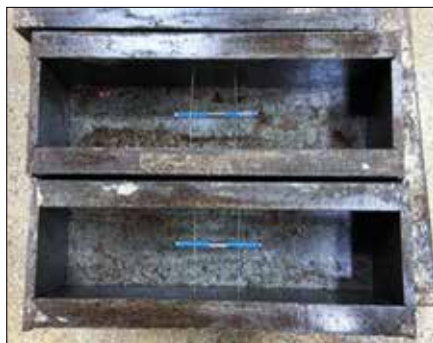


FIGURA 4

INDICAÇÃO DO POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS NO MOLDE PARA OS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE RETRAÇÃO AUTÓGENA

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

após a estocagem no ar, na câmara com umidade relativa de $50 \pm 4\%$; (4) Diariamente, até a estabilização das deformações.

Após as medições, as deformações de retração por secagem foram calculadas pela Equação 1. Nessa equação, ϵ representa a deformação de retração por secagem, corresponde à leitura do comprimento das barras após a desforma e imersão em água por 30 minutos, e ϵ à leitura obtida ao final



FIGURA 5

INDICAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO EXTENSÔMETRO NO MOLDE PARA OS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE FLUÊNCIA

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

da cura úmida e dos períodos de armazenagem em câmara com $50 \pm 4\%$ de umidade relativa do ar.

$$[1] \quad \epsilon = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100$$

3.5 Fluência básica

O ensaio de fluência foi realizado conforme os procedimentos da NBR 8224 (ABNT, 2012), utilizando extensômetros elétricos instalados no eixo vertical dos corpos de prova, como ilustrado na Figura 5.

O cálculo da deformação por fluência básica foi realizado por meio da Equação 2. Nessa equação, representa a deformação por fluência, a deformação total dos corpos de prova carregados na idade considerada, a deformação imediata medida na aplicação da carga e a deformação média dos corpos de prova não carregados, correspondente à deformação autóloga.

$$[2] \quad \epsilon_{cc} = \epsilon_t - \epsilon_i - \epsilon_s$$

3.6 Teste de dano de rigidez

O teste de dano de rigidez ou *Stiffness Damage Test (SDT)*, foi utilizado para avaliar a integridade dos concretos na idade de 28 dias. Para o ensaio os corpos de prova, foram posicionados no equipamento e submetidos a cinco carregamentos cíclicos, com taxa de $0,10 \text{ MPa/s}$. A carga máxima aplicada foi o valor de 40% da resistência à compressão do concreto aos 28 dias (Hasparyk e Sanchez, 2021).

A partir do ensaio foram determinados: dano de rigidez (SDI) e deformação plástica (PDI), que foram calculados pelas Equações 3 e 4 (Sanchez *et al.*, 2014). Nessas

equações, SI é a energia de deformação irreversível (área do primeiro ciclo de carregamento), SII é a energia de deformação elástica, DI é a deformação plástica no primeiro ciclo de carregamento e DII é a deformação plástica nos demais ciclos.

$$[3] \quad SDI = \frac{SI}{SI + SII}$$

$$[4] \quad DI = \frac{DI}{DI + DII}$$

Os resultados são apresentados em gráfico, como ilustrado na Figura 6.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à compressão

Com relação ao comportamento mecânico na resistência à compressão, a Figura 7 apresenta os valores médios (com os respectivos desvios) de resistência dos concretos nas idades de 3, 7 e 28 dias. Observa-se aumento progressivo da resistência à compressão com o avanço da idade para todas as composições analisadas. Aos 28 dias, o traço CNTCO,2 apresentou a maior resistência média ($46,38 \text{ MPa}$), correspondente a um incremento de $9,86\%$ em relação ao concreto de referência (CREF), enquanto o traço CNTCO,4 apresentou resistência

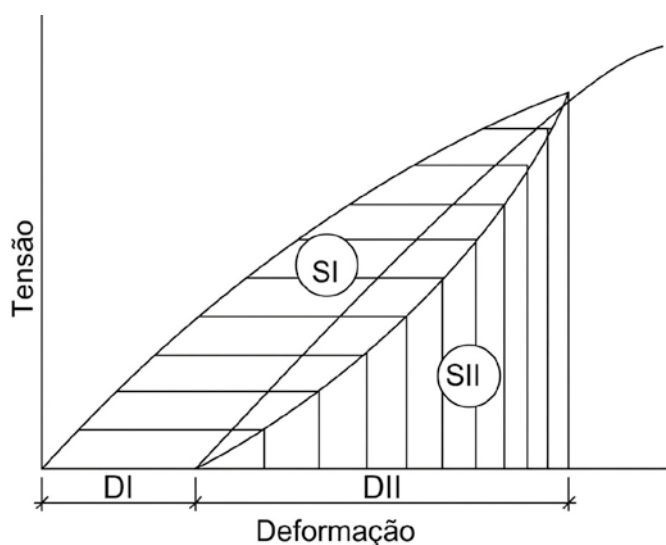


FIGURA 6

REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS UTILIZADAS NA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO ÍNDICE DE RIGIDEZ

FONTE: SANCHEZ ET AL. (2017)

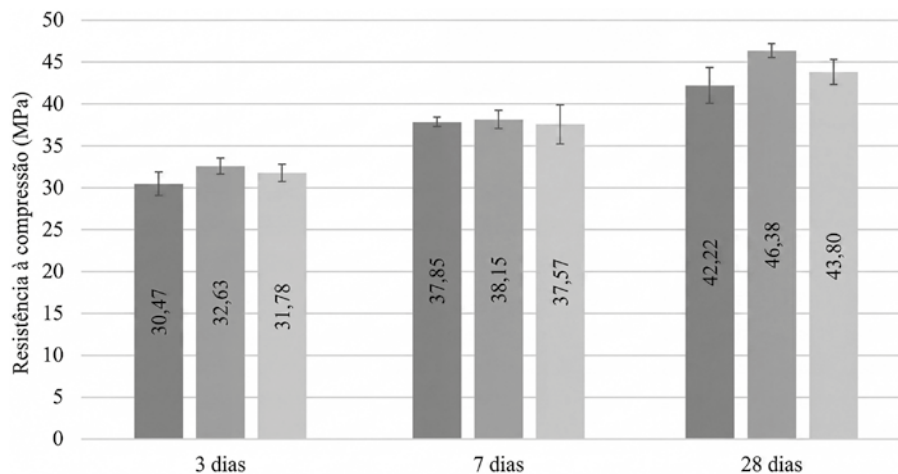


FIGURA 7

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS, POR IDADE

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

média de 43,80 MPa, representando aumento de 3,42% em relação ao CREF. Em relação à variabilidade dos resultados, os desvios padrão variaram entre 0,45 e 2,12 MPa, e os coeficientes de variação permaneceram inferiores a 6% em todas as idades analisadas, indicando adequada uniformidade e repetibilidade experimental.

A resistência média à compressão especificada de 40 MPa aos 28 dias foi obtida em todos os concretos. Análise estatística foi realizada por meio de ANOVA, considerando idade e concentração de

NTC como fatores. Os resultados indicaram efeito de ambos e da interação entre eles ($p < 0,05$), mostrando que a resistência aumentou com a idade e que o traço CNTCO,2 apresentou desempenho superior, enquanto o CNTCO,4 não diferiu do concreto de CREF. O aumento de resistência à compressão nos concretos contendo NTC pode ser atribuído ao preenchimento de vazios ou à diminuição da zona de transição entre o concreto e o agregado (Madhavi *et al.*, 2013; Tonder e Mafokoane, 2014).

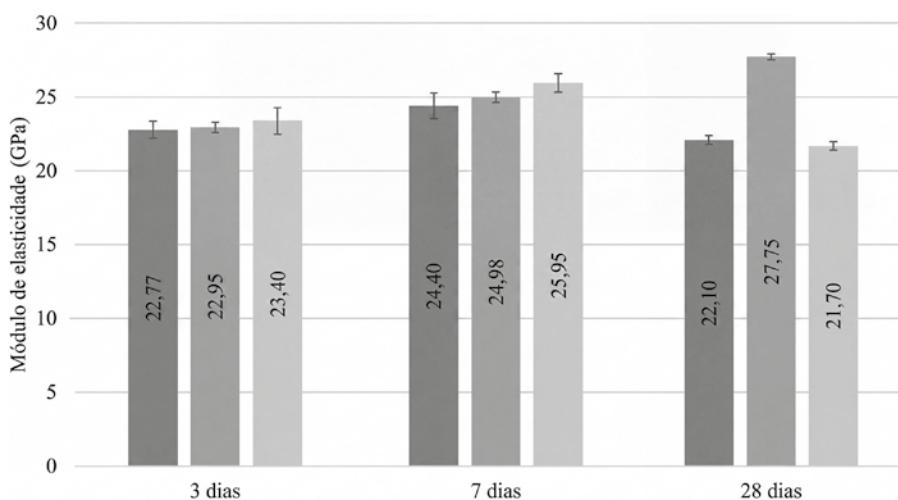


FIGURA 8

RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS, POR IDADE

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

4.3 Módulo de elasticidade

A Figura 8 apresenta os valores médios (com os respectivos desvios) do módulo de elasticidade dos concretos analisados, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Observa-se tendência de aumento dos valores médios entre 3 e 7 dias para todos os concretos avaliados. Aos 28 dias, o traço CNTCO,2 apresentou o maior módulo de elasticidade médio (27,75 GPa), representando incremento de 25,57% em relação ao concreto de referência (CREF). Por outro lado, o traço CNTCO,4 apresentou valor médio de 21,70 GPa, correspondente a uma redução de 1,81% em relação ao CREF. Em relação à dispersão dos resultados, os desvios padrão variaram entre 0,21 e 0,89 GPa, enquanto os coeficientes de variação permaneceram inferiores a 4% em todas as idades analisadas, indicando adequada repetibilidade experimental.

Com base em análise estatística ANOVA, pôde-se concluir que não ocorreram ganhos significativos para o módulo de elasticidade. Esse comportamento foi esperado, já que o principal fator que influencia esta propriedade é o agregado (Hawreen e Bogas, 2019; Jung *et al.*, 2022).

4.4 Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 9 apresenta os valores médios (com os respectivos desvios) de resistência à tração por compressão diametral dos concretos avaliados nas idades de 3, 7 e 28 dias. De maneira geral, observou-se aumento da resistência com o avanço da idade para todas as composições analisadas. Aos 7 dias, o traço CNTCO,2 apresentou o maior valor médio (3,95 MPa), correspondente a um incremento de 13,53% em relação ao concreto de referência (CREF). Entretanto, aos 28 dias, os traços com adição apresentaram valores inferiores ao CREF, com reduções de 1,54% para o CNTCO,2 e 5,58% para o CNTCO,4. Em relação à dispersão dos resultados, os desvios padrão variaram entre 0,01 e 0,13 MPa, enquanto os coeficientes de variação permaneceram inferiores a 4% em todas as idades analisadas, indicando boa uniformidade e adequada repetibilidade experimental.

A análise estatística por ANOVA indicou que a incorporação do clínquer nanoestruturado não promoveu efeito significativo sobre a resistência à tração por compressão diametral, sendo observada influência estatisticamente relevante apenas do fator idade do concreto.

4.5 Resistência à tração na flexão

A Figura 10 apresenta os valores médios (com os respectivos desvios) de resistência à tração na flexão dos concretos avaliados nas idades de 3, 7 e 28 dias. Observa-se aumento da resistência à tração com o avanço da idade para todas as composições analisadas. O traço CNTC0,2 apresentou os maiores valores médios em todas as idades, destacando-se aos 3 dias, com incremento de 20,42% em relação ao concreto de referência (CREF), e aos 28 dias, com aumento de 8,97%. O traço CNTC0,4 apresentou comportamento semelhante ao CREF, com pequeno incremento aos 3 e 28 dias e redução de 9,34% aos 7 dias. Em relação à variabilidade dos resultados, os desvios padrão variaram entre 0,05 e 0,18 MPa, enquanto os coeficientes de variação permaneceram inferiores a 6% em todas as idades analisadas, indicando adequada uniformidade e repetibilidade experimental.

A análise estatística, realizada por meio do teste de Kruskal-Wallis, em função da não homogeneidade das variâncias entre os grupos, evidenciou que a concentração de NTC não exerceu influência significativa sobre o parâmetro, sendo diferença estatisticamente relevante apenas em função da idade do concreto.

4.6 Retração autógena

O gráfico da Figura 11 mostra o comparativo das curvas das médias de retração autógena dos concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4. A maior deformação autógena ocorreu no CNTC0,2 e a menor no CREF. Porém, até a idade de 22 dias, a deformação para o concreto CREF foi maior do que a deformação para CNTC0,4. Após esta data, a deformação passa a se estabilizar e CREF passa a ter os menores valores. Ao final do ensaio, o CNTC0,2 e o CNTC0,4 tiveram aumentos

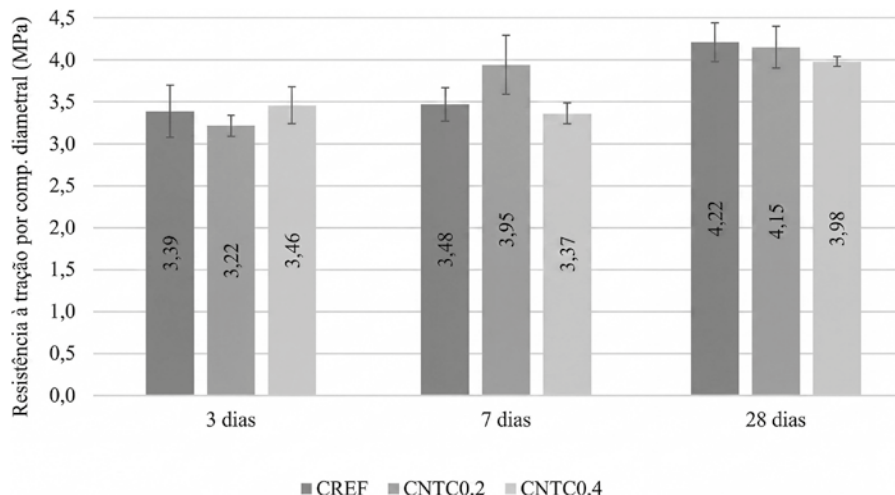


FIGURA 9

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS, POR IDADE

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

de 20,2% e 9,2%, respectivamente, em relação ao CREF.

O aumento pode ser atribuído ao efeito de nucleação causado pela incorporação de NTC. A nucleação possibilita a formação de um maior número de produtos de hidratação cujo volume total é menor do que a soma dos volumes das moléculas constituintes, causando a retração (Jung et al.,2022).

4.7 Retração por secagem

A Figura 12 mostra o gráfico comparativo das retrações por secagem dos concretos. As curvas estão apresentadas com as deformações médias das equações logarítmicas. O ensaio iniciou 28 dias após a fabricação dos concretos, sendo então a idade zero correspondente a esta idade. As magnitudes das deformações de

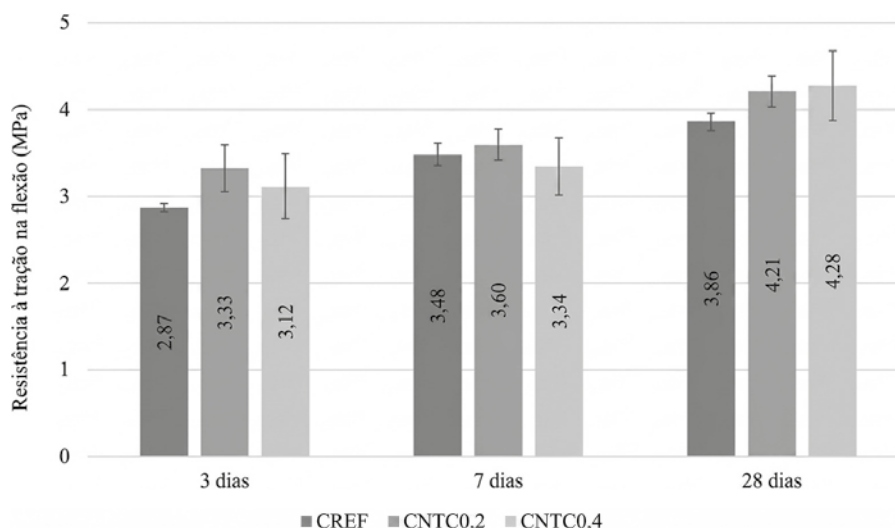


FIGURA 10

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS CONCRETOS, POR IDADE

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

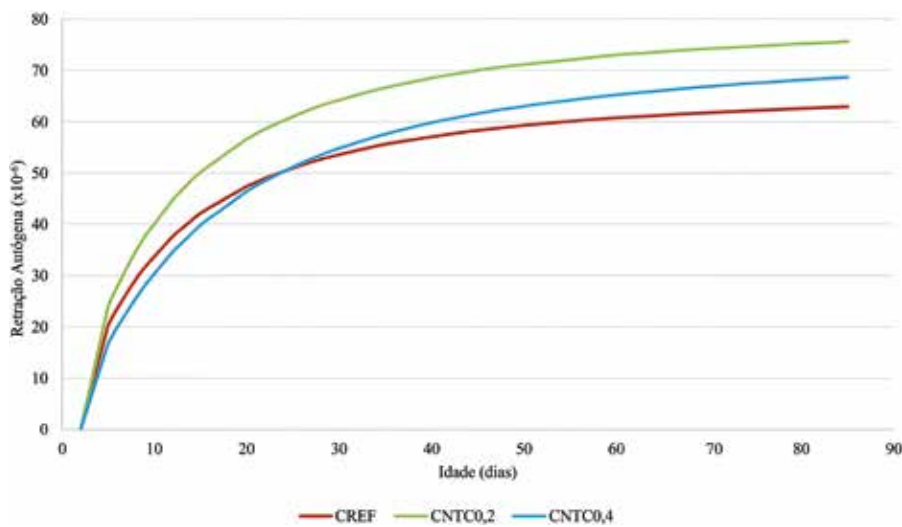


FIGURA 11

RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO AUTÓGENA REALIZADOS NOS CONCRETOS, EM FUNÇÃO DO TEMPO

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

retração por secagem foram maiores que a das deformações por retração autóloga, independentemente da presença dos NTC.

A maior deformação ocorreu no CREF, enquanto as deformações de CNTC0,2 e CNTC0,4 atingiram valores de aproximadamente 10% menores.

A redução da retração pode ocorrer

pelo preenchimento de vazios e efeitos de nucleação e de ponte causados pelo NTC. Além disso, estes efeitos causados pelos NTC podem funcionar como barreiras para a água dentro do concreto, impedindo sua movimentação e, conseqüentemente, reduzindo a retração por secagem do concreto (Hawreen e Bogas, 2019).

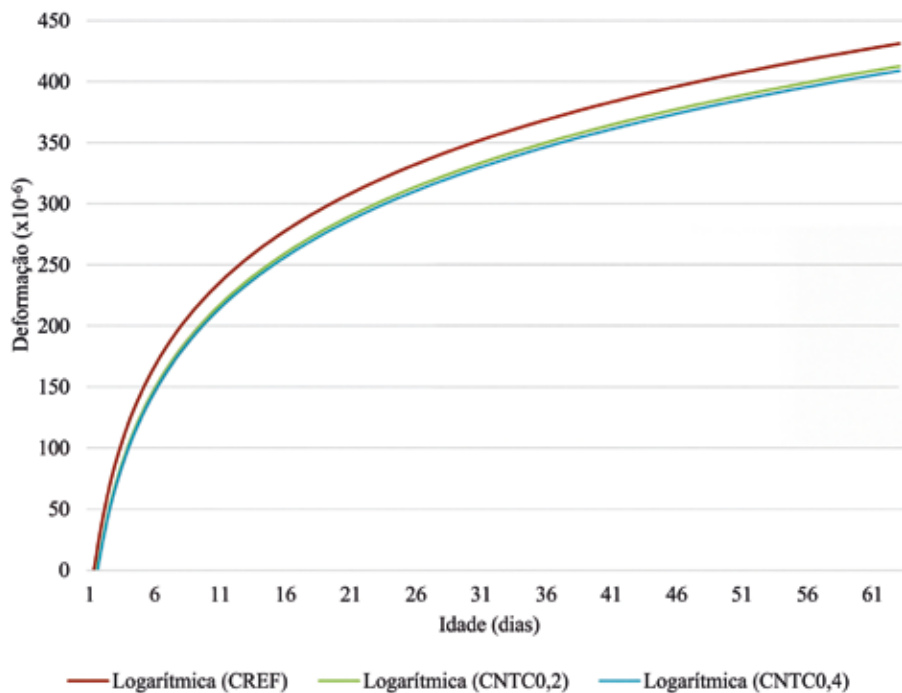


FIGURA 12

RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM REALIZADOS NOS CONCRETOS, EM FUNÇÃO DO TEMPO (COMPARATIVO DAS CURVAS LOGARÍTMICAS)

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

4.8 Fluência básica

A Figura 13 mostra o gráfico comparativo da fluência básica ao longo do tempo para os concretos. A idade zero apresentada no gráfico corresponde à idade em que foi aplicado o carregamento de longa duração (7 dias após a fabricação).

Pelos valores, foi possível calcular o coeficiente de fluência através da Equação 10 e prever o valor desse coeficiente ao longo do tempo, onde ϵ_c é a deformação total do concreto no tempo t , ϵ_{c0} é o coeficiente de fluência básica e ϵ_{ci} é a deformação inicial quando da aplicação da carga. A Tabela 4 apresenta valores do coeficiente de fluência básica para os concretos estudados em função do tempo.

$$[5] \quad \varphi(t) = \frac{\epsilon_c \text{ total } (t)}{\epsilon_c \text{ inicial}} - 1$$

A análise dos dados demonstra que a incorporação do clínquer nanoestruturado ao concreto reduziu, comparado com CREF, significativamente o coeficiente de fluência a longo prazo, com diminuições de 20% e 25% para os teores de 0,2% e 0,4% de NTC, respectivamente. Essa redução implica menor acréscimo das deformações de fluência, o que pode trazer melhorias importantes como menores deformações. No concreto protendido, por exemplo, a menor deformação resulta em maior força residual de protensão, reduzindo a necessidade de cabos ou cordoalhas.

Do ponto de vista do comportamento mecânico na microestrutura, a retração e a fluência estão relacionadas à deformação da pasta de cimento, enquanto os agregados limitam essas variações dimensionais. A incorporação do clínquer nanoestruturado modifica essa dinâmica, melhorando a estrutura interna da matriz cimentícia e reduzindo a propagação de microfissuras.

Estudos anteriores (Ahmad e Zhou, 2023; Hawreen e Bogas, 2019) corroboram esses efeitos, apontando a ação dos NTC tanto como elementos de preenchimento quanto como pontes que restringem fissuras.

4.9 Teste de dano de rigidez

A Tabela 5 mostra o resumo dos resultados obtidos para as avaliações de PDI e SDI. O nível de dano em um concreto frente

a reações expansivas, de acordo com valores de SDI e PDI, pode ser classificado conforme mostra a Tabela 6, que foi adaptada de Sanchez *et al.* (2017).

Os valores de PDI e SDI não variaram significativamente com a incorporação de NTC, mostrando que o clínquer nanoestruturado não causou impactos significativos na rigidez dos concretos, ficando os concretos classificados como minimamente danificados.

Segundo o índice de não linearidade na curva tensão-deformação, quando as curvaturas se mostram mais retilíneas, os concretos tendem a ser mais íntegros. Curvas com formatos mais côncavos tendem a demonstrar algum dano interno ou menor qualidade interna da matriz do concreto (Chrip *et al.*,1993).

A Figura 14 mostra os resultados do teste de dano de rigidez para os concretos aos 28 dias. Não foi observado em nenhum dos concretos, curva de carregamento/descarregamento com formato côncavo que indicasse dano.

Analisando os gráficos, foi possível observar que em todos os ciclos a menor deformação ocorreu no concreto CNTC0,2. Também foi possível observar que o concreto contendo 0,4% de NTC apresentou maior deformação em todos os ciclos.

5. CONCLUSÕES

Na bibliografia sempre é mencionada a dificuldade na dispersão de nanotubos de carbono (NTC) no concreto, prejudicando o desempenho no estado fresco e endurecido. O presente trabalho mostrou que o efeito pode ser minimizado ou eliminado através da utilização do ligante alternativo, o clínquer nanoestruturado com NTC. As avaliações permitiram atestar que a trabalhabilidade dos concretos com NTC nos teores de 0,2% e 0,4% não foi afetada com os materiais empregados e dosagens adotadas.

Com o teor de 0,2% de NTC, ocorreu ligeiro aumento da resistência à compres-

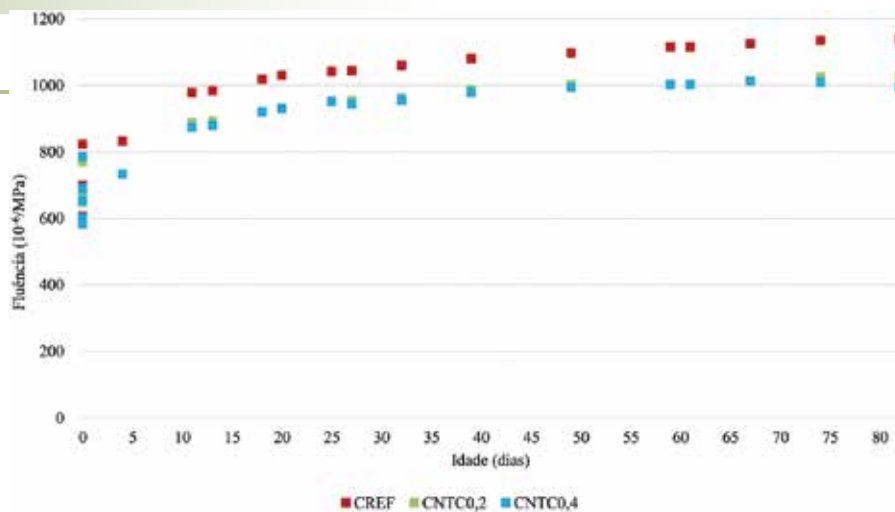


FIGURA 13

RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUÊNCIA BÁSICA DOS CONCRETOS EM FUNÇÃO DO TEMPO (COMPARATIVO DE MÉDIAS)

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

TABELA 4

VALORES DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA BÁSICA DOS CONCRETOS ESTUDADOS AO LONGO DO TEMPO

Concretos	Idades				
	1 ano	3 anos	5 anos	10 anos	20 anos
CREF	0,930	1,069	1,133	1,220	1,308
CNTC0,2	0,755	0,876	0,933	1,010	1,086
CNTC0,4	0,723	0,839	0,893	0,966	1,040

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

são em relação ao concreto de referência, em todas as idades. Para o módulo de elasticidade, ocorreram aumentos dos valores com o a idade e da quantidade de NTC, com exceção dos 28 dias, que apresentou uma discrepância no resultado. Na avaliação de resistência à tração por compressão diametral, foi possível verificar que o clínquer com NTC melhorou a propriedade. Enquanto aos 7 dias, o CNTC0,2 apresentou resultado melhor que o CREF, aos 3 e aos 28 dias, o concreto CNTC0,2 apresentou valor menor para a resistência à tração por compressão diametral em rela-

ção ao CREF. Na avaliação de resistência à tração na flexão, verificou-se que, aos 3 e aos 28 dias, a adição do clínquer com NTC apresentou melhores resultados. Aos 7 dias, a melhoria aconteceu apenas para o CNTC0,2. Com a adição do clínquer nanoestruturado, ocorreram reduções significativas na retração por secagem e fluência. Na retração por secagem, a redução foi de 12% nas primeiras idades e 5% nas idades finais e, na fluência, a redução foi de 12% nas primeiras idades e até 13% nas idades finais,

TABELA 5

RESUMO DOS RESULTADOS DE PDI E SDI DOS CONCRETOS AOS 28 DIAS

Parâmetros	CREF	CNTC0,2	CNTC0,4
PDI médio	0,09	0,09	0,10
SDI médio	0,21	0,21	0,23

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

TABELA 6

CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE DANO DO CONCRETO

Classificação do nível de dano do concreto	SDI	PDI
Insignificante	0,06 - 0,16	0,03 - 0,12
Mínimo	0,11 - 0,25	0,10 - 0,23
Moderado	0,15 - 0,31	0,13 - 0,27
Alto	0,19 - 0,32	0,17 - 0,29
Muito alto	0,22 - 0,36	0,21 - 0,31

FONTE: ADAPTADO DE SANCHEZ *et al.* (2017)

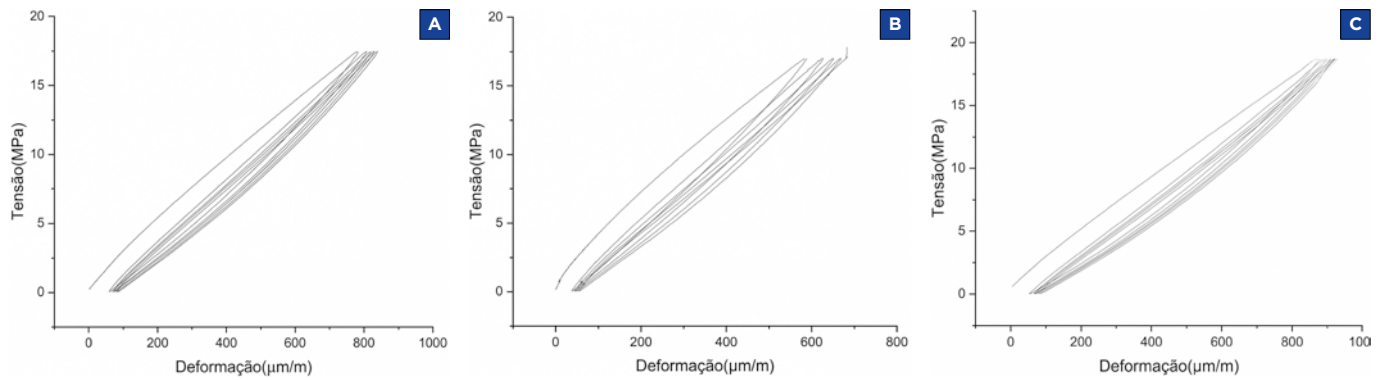


FIGURA 14

RESULTADO DO TESTE DE DANO DE RIGIDEZ (SDT) AOS 28 DIAS PARA: A) CREF; B) CNTCO,2; C) CNTCO,4

FONTE: RESULTADOS DA PESQUISA

ambas comparando o CREF com o CNTCO,4.

A análise do coeficiente de fluência confirma que o clínquer nanoestruturado com NTC propiciou redução da deformação

devido à fluência. Esses resultados revelam que a incorporação deste ligante alternativo pode ser capaz de melhorar a microestrutura da pasta através do efeito filer e de nucleação. Através do efeito ponte, os ma-

teriais nanométricos controlam a propagação e o desenvolvimento de microfissuras. O teste de dano de rigidez mostrou que a incorporação do ligante não prejudicou o desempenho frente a esta análise. ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2021.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência á tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010
- [6] AHMAD, J.; ZHOU, Z. Properties of concrete with addition carbon nanotubes: A review. *Construction and Building Materials*, v.393, 2023.
- [7] CHRISP, T. M.; WALDRON, P.; WOOD, J. G. M. Development of a non-destructive test to quantify damage in deteriorated concrete. *Magazine of Concrete Research*, Sheffield, v. 45, p. 247-256, dez. 1993.
- [8] EQUIPE DE FURNAS, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico; *Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades*. São Paulo, Pini, 1997.
- [9] FURNAS. Instrução de Trabalho - MC - Métodos Construtivos: concreto - determinação da variação autóloga. IT.MC.201, Revisão 00. Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica. Rio de Janeiro, 2015. 7 p.
- [10] HASPARYK, N. P.; SANCHEZ, L. SDT - Método de ensaio para a determinação do índice de dano de rigidez (SDI) e índice de deformação plástica (PDI) em concretos: instrução técnica ITDSBE001. Furnas, Goiânia, 2021.
- [11] HAWREEN, A.; BOGAS, J.A. Creep, shrinkage and mechanical properties of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 70-81, 2019.
- [12] JUNG, M.; PARK, J.; HONG, S.; MOON, J. The critical incorporation concentration (CIC) of dispersed carbon nanotubes for tailoring multifunctional properties of ultra-high performance concrete (UHPC). *Journal of Materials Research and Technology*, v. 17, p. 3361-3370, 2022.
- [13] LADEIRA, L. O.; SILVA, E. E.; OLIVEIRA, S.; LACERDA, R. G.; FERLAUTO, A. S.; ÁVILA, E. S.; LORENÇON, E. 2016. Large scale production of carbon nanotubes in Portland cement. US Patent, 9085487 B2.
- [14] MADHAVI, T. C.; PAVITHRA, P.; SINGH, S. B.; RAJ, S. B. V.; PAUL, S. Effect of multiwalled carbon nanotubes on mechanical properties of concrete. *International Journal of Scientific Research*, v. 2, p. 166-168, 2013.
- [15] SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete - A review, *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 2060-2071, 2010.
- [16] SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. *Cement and Concrete Research*. v. 93, p.17-31, 2017.
- [17] TONDER, P. e MAFOKOANE, T. Effects of multi-walled carbon nanotubes on strength and interfacial transition zone of concrete. *Construction Materials and Structures*, p. 718-727, 2014.