

# AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS COM A ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA (RSL) – PARTE 1

## Evaluation of the rheological behavior of cement-based material with the addition of carbon nanotubes: a Systematic Literature Review (RSL) - Part 1

Bárbara Gomes Martins<sup>1</sup>, Andrielli Morais de Oliveira<sup>2</sup>, Oswaldo Cascudo<sup>3</sup>



### PALAVRAS CHAVE:

Reologia;  
Tensão de escoamento;  
Taxa de cisalhamento;  
Matriz cimentícia;  
Nanotubo de carbono.

### KEYWORDS:

Rheology;  
Yield Strength;  
Shear rate;  
Cement-based material;  
Carbon nanotube.

**RESUMO:** A reologia do concreto afeta seu processo de mistura, manuseio, transporte, bombeamento, moldagem, adensamento, acabamento e qualidade da superfície após o endurecimento. A incorporação de nanomateriais nos compósitos cimentícios, como os nanotubos de carbono (NTC), pode influenciar os parâmetros do estado fresco. Contudo, ainda existem poucos trabalhos e uma grande variedade de resultados envolvendo parâmetros reológicos de matrizes cimentícias reforçadas com NTC. Este artigo visa levantar os principais parâmetros reológicos de matrizes cimentícias incorporadas com NTC através de uma revisão sistemática da literatura (Parte 1). Os dados bibliométricos foram apresentados na Parte 2. Compreender como os diferentes componentes e aditivos interagem e influenciam o comportamento reológico permite a criação de matrizes com propriedades avançadas. Muitos estudos mostraram que a tensão de escoamento e a viscosidade dos compósitos cimentícios com NTC mostraram uma tendência linear na primeira hora de hidratação. Ainda, o reforço com NTC aumentou gradativamente a tensão de escoamento e a viscosidade das pastas de cimento em parte das pesquisas. Isso se deve, principalmente, à alta superfície específica do NTC. Ao mesmo tempo, outros autores apontaram esse efeito ser reduzido ou até anulado através do uso de aditivos superplastificantes, como concretos autonivelantes, argamassas de alta aderência e materiais de reparo com características específicas.

**ABSTRACT:** The rheology of concrete affects its mixing, handling, transport, pumping, molding, compaction, finishing, and surface quality after hardening. The incorporation of nanomaterials in cementitious composites, such as carbon nanotubes (NTC), can influence the fresh state parameters. However, there are still few works and a wide range of results involving rheological parameters of cementitious matrices reinforced with NTC. This paper aims to survey the main rheological parameters of cementitious matrices incorporated with NTC through a systematic review of the literature (Part 1). The bibliometric data were presented in Part 2. Understanding how the different components and additives interact and influence the rheological behavior allows the creation of matrices with advanced properties. Many studies have shown that the yield stress and viscosity of cementitious composites with NTC showed a linear trend in the first hour of hydration. Also, the reinforcement with NTC gradually increased the yield stress and viscosity of cement pastes in part of the research. This is mainly due to the high specific surface area of NTC. At the same time, other authors have pointed out that this effect can be reduced or even annulled through the use of superplasticizer additives, such as self-leveling concretes, high adhesion mortars and repair materials with specific characteristics.

\* Contato com os autores:

<sup>1</sup> e-mail: [barbara\\_gomes16@discente.ufg.br](mailto:barbara_gomes16@discente.ufg.br) ( B. G. MARTINS )

Engenheira Civil, mestra, Doutoranda no curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GECON) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Universidade Federal de Goiás (UFG)

<sup>2</sup> e-mail: [andriellimorais@ufg.br](mailto:andriellimorais@ufg.br) ( A. M. OLIVEIRA )

Engenheira Civil, doutora, Prof.<sup>a</sup> do Curso de Engenharia Civil e do curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GECON) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Universidade Federal de Goiás (UFG)

<sup>3</sup> e-mail: [ocascudo@ufg.br](mailto:ocascudo@ufg.br) ( O. CASCUDO )

Engenheiro Civil, doutor, Prof. do Curso de Engenharia Civil e do curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GECON) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Universidade Federal de Goiás (UFG)

Publicado em 30 de junho de 2023

## 1. INTRODUÇÃO

As propriedades no estado fresco do concreto têm impacto direto no seu desempenho durante a vida útil, pois muitas dessas propriedades irão influenciar seu comportamento no estado endurecido. A reologia do concreto afeta seu processo de mistura, manuseio, transporte, bombeamento, moldagem, adensamento, acabamento e qualidade da superfície após o endurecimento. A facilidade com que o concreto é processado é um aspecto extremamente importante para o sucesso de sua utilização na construção de estruturas, resultando em economia, excelente desempenho e durabilidade a longo prazo.

O concreto pode ser considerado como um material multi-escala, no qual partículas sólidas (agregado graúdo) estão suspensas em uma matriz de argamassa, enquanto a matriz de argamassa pode ser vista como uma suspensão de partículas de areia em uma matriz mais fina formada por água e aglomerante (pasta de cimento). Dessa forma, os estudos reológicos são realizados por pesquisadores em diferentes escalas a fim de prever o seu comportamento durante os processos necessários e garantir sua qualidade ao alcançar seu estado endurecido.

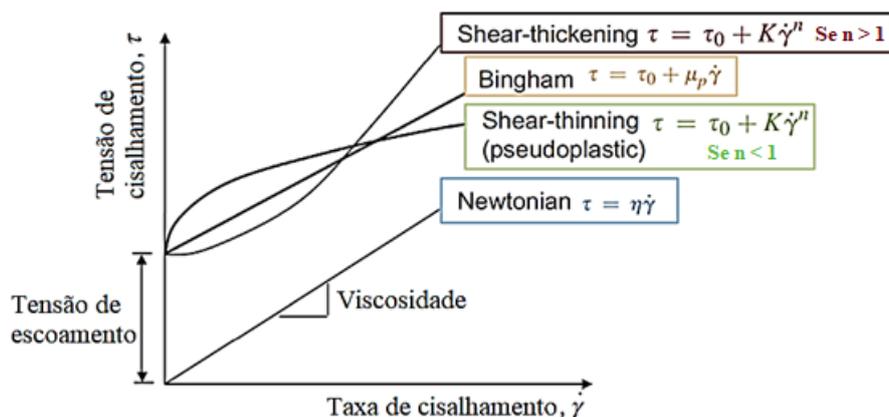
Yahia, Mantellato e Flatt (2016) afirmam que a reologia é uma ciência na interseção da mecânica dos sólidos e dos fluidos que é usada em diferentes indústrias e, por exemplo, durante o processamento de produtos médicos, alimentícios e de cuidados pessoais. A reologia lida mais especificamente com a relação entre tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento e tempo.

Kostrzanowska-Siedlarz (2020) relata que a tensão de escoamento é um fator essencial para compreensão da trabalhabilidade da matriz cimentícia, pois determina o início do fluxo da mistura, auxiliando na execução correta dos processos tecnológicos. Quanto menor a tensão de escoamento, melhor a trabalhabilidade da mistura, e quanto menor a viscosidade plástica da mistura, maior sua vazão e, portanto, a trabalhabilidade.

A respeito da representação gráfica do comportamento de um fluido ao fluxo, dada pela curva de fluxo, pode-se perceber como a tensão cisalhante varia em função da taxa de cisalhamento, e esta define o comportamento reológico dos fluidos viscosos, sendo a equação matemática entre estas duas variáveis conhecida como equação de fluxo (MACHADO, 2002). Os modelos mais comuns para descrever a curva de fluxo dos materiais é mostrada na Figura 1, na qual a equação da curva de fluxo é descrita ao lado de cada modelo.

É sabido que o concreto precisa de um esforço mínimo para iniciar o seu fluxo, ou seja, uma tensão mínima inicial (também chamada de tensão crítica) para começar a fluir. Isso indica que há uma tensão de escoamento inicial, fato que não permite que sua curva de fluxo inicie na origem, como ocorre num fluido Newtoniano e, sendo assim, o concreto não pode ser descrito por uma única constante porque é um fluido não-Newtoniano, o qual é mais representado pelo modelo de Bingham e o de Herschel-Bulkley, que leva em consideração o comportamento pseudoplástico de suspensões concentradas (REIS, 2008).

Como pôde ser observado na Figura 1, o modelo de Bingham se comporta de forma linear, como os Newtonianos, com origem na tensão de escoamento e é definido por dois parâmetros fundamentais, nomeadamente tensão de escoamento e viscosidade plástica. Já outros dois modelos descritos por Herschel-Bulkley (*shear-thinning* e *shear-thickening*) levam em conta o seu comportamento de fluido dilatante ( $n > 1$ ), apresentando acréscimo na viscosidade conforme a taxa de cisalhamento é aumentada, e fluido pseudoplástico ( $n < 1$ ), com decréscimo na viscosidade conforme a taxa de cisalhamento é aumentada.



**FIGURA 1:** Gráfico de diferentes comportamentos reológicos e os casos de afinamento por cisalhamento (*shear-thinning*) e espessamento por cisalhamento (*shear-thickening*).

**FONTE:** Adaptado de Yahia, Mantellato e Flatt (2016).

Com o avanço da tecnologia e o empenho crescente em desenvolver estruturas de concreto mais duráveis e de melhor desempenho, diversas pesquisas têm sido feitas fazendo-se uso de diversos materiais incorporados nas matrizes cimentícias em várias escalas. Gleize (2010) ressalta que o refino da estrutura dos materiais ou a incorporação de nano objetos permite o aumento das superfícies de contato e a reatividade, o que gera várias vantagens em termos de reforço e de eficiência das matrizes cimentícias.

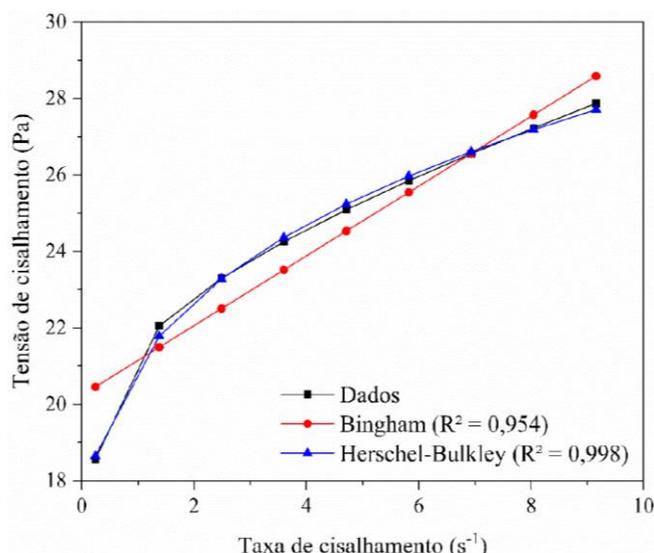
Segundo Solis, Moreno e Arjona (2012), pesquisas realizadas nas áreas de cimento e nanotecnologia têm demonstrado que algumas adições de nanocompósitos ao cimento permitem modificações importantes na sua microestrutura, o que por sua vez proporciona a produção de concretos mais resistentes, menos porosos e mais duráveis. Ainda, segundo Gleize (2010), outra característica que pode ser desenvolvida em estudos nesta escala procede-se à criação de sistemas e sensores que monitorem o comportamento e a performance dos materiais, para que possam se adaptar frente às mudanças do ambiente (vidros autolimpantes e concretos fotocatalíticos, por exemplo).

A incorporação de nanomateriais em compósitos cimentícios pode influenciar os parâmetros do estado fresco, como tensão de escoamento e viscosidade plástica. Dentro dessa categoria de nanomateriais encontram-se os nanotubos de carbono (NTC). Estes são estruturas de carbono que, depois de sintetizadas, obtêm forma de cilindros em escala nanométrica (MARCONDES et al., 2015).

Os trabalhos mais encontrados na literatura tratam de pastas de cimento, por ser mais simples que argamassa e concreto, gastando uma quantidade menor de material. Alguns trabalhos analisaram a influência dos NTC e /ou dos surfactantes utilizados na reologia de pastas (JIANG et al., 2018; REALES et al., 2018; SKRIPKIUNAS et al., 2018), mostrando que há uma tendência em aumentar os parâmetros reológicos, afetando a trabalhabilidade do concreto.

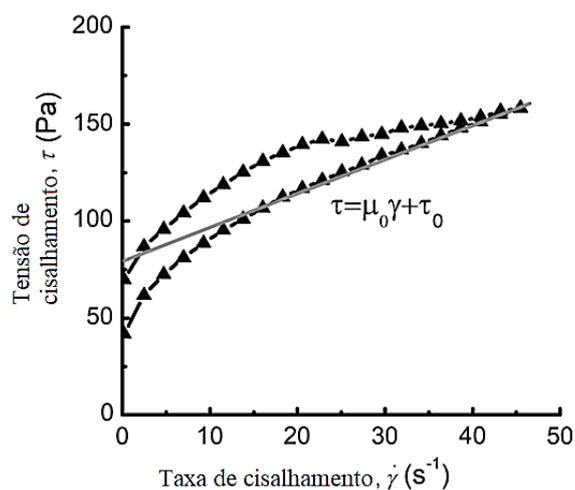
Vários trabalhos têm feito estudos reológicos a fim de determinar os modelos de fluxo das pastas de cimento, argamassas e concretos. É de fundamental importância que os estudos selecionem os modelos que melhor descrevem o comportamento ao fluxo das matrizes cimentícias desenvolvidas para que os parâmetros reológicos relatados sejam o mais confiável possível, a fim de compreender a influência dos nanomateriais incorporados nas matrizes. A Figura 2 mostra o estudo de modelo de fluxo feito por Silvestro (2022a) de pastas de cimento com adição de NTC, mostrando que a curva de fluxo da pasta de cimento ficou mais adequada utilizando o modelo de Herschel-Bulkley (também chamado de Bingham modificado).

Entretanto, outros autores, como Reales, Duda e Toledo Filho (2018), adequaram melhor ajustando os valores para o modelo de Bingham, mostrado na Figura 3. É válido ressaltar que alguns autores não relatam e/ou não mostram a curva de fluxo nos trabalhos, o que dificulta o levantamento e correlação de dados.



**FIGURA 2:** Tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento da pasta de cimento 0.1NTC\_APTES após 10 minutos de hidratação e ajuste dos dados com base dos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

**FONTE:** Silvestro (2022).



**FIGURA 3:** Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento de pastas com NTC.

**FONTE:** Adaptado de Reales, Duda e Toledo Filho (2018).

Os resultados experimentais de Jiang et al. (2018) indicam que as propriedades reológicas da pasta de cimento com NTC estão correlacionadas com os tipos e teores de NTC, relação a/c e teor de superplastificante. Os autores afirmam que a mistura química, do grupo dos superplastificantes (SP), como um tipo de surfactante pode dispersar a estrutura floculada do cimento agregado e das partículas de NTC. Além disso, o SP reduz a superfície de tensão do líquido e reduz a viscosidade plástica da pasta de cimento. Portanto, a adição de SP é, em muitos casos, essencial para obter fluidez adequada da pasta de cimento modificada com nanomaterial.

Contudo, ainda existem poucos trabalhos e uma grande variedade de resultados envolvendo parâmetros reológicos de matrizes cimentícias reforçadas com NTC. É possível que isso seja acarretado pela grande quantidade de variáveis encontradas na literatura, sendo elas: teor de NTC; tipo de NTC; funcionalização da superfície do NTC; tipo de cimento; tipo de dispersão; tipo de surfactante e seu teor; tempo e intervalo dos ensaios reológicos; tipo de reômetro e modelo de curva de fluxo.

Com o intuito de compreender melhor a utilização de NTC no estado fresco, o trabalho está dividido em duas partes. Este artigo visa levantar os principais parâmetros reológicos de matrizes cimentícias incorporadas com NTC através de uma revisão sistemática da literatura, trazendo a Parte 1 da pesquisa. Os dados bibliométricos foram apresentados na Parte 2.

## 2. METODOLOGIA DA REVISÃO SISTEMÁTICA

A Revisão Sistemática é definida como um estudo secundário, cujo propósito é mapear, avaliar criticamente, consolidar ou agregar resultados relevantes de estudos primários em relação a uma questão ou tópicos de pesquisa específico, de modo a resultar em um relatório coerente ou em uma síntese (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015).

A seleção da literatura utilizada como estudos primários foi realizada nas bases de dados internacionais: *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct* e *Engineering Village*, visto que, são amplamente utilizados para publicações científicas relevantes referente a área de estudo proposto.

A ferramenta de busca empregada nas bases de dados escolhidas utiliza de sistemas indexadores para efetuar buscas, com isso, definiu-se uma *string* de busca, que consiste em um conjunto de caracteres com os termos a serem averiguados. A *string* é composta por palavras-chaves, entre aspas, e operadores booleanos (*AND*, *OR*, *NOT*), usados para impor limitações à busca.

A *string* utilizada foi: ("concreto" ou "pasta de cimento" ou "pasta" ou "argamassa" ou "compósitos cimentícios" ou "cimento Portland") e ("NTC" ou "nanotubo de carbono") e "reologia"). Porém, devido a escolha das bases de dados serem internacionais, utilizou-se a *string* na língua inglesa: ("concrete" OR "cement paste" OR "paste" OR "mortar" OR "cementitious composites" OR "Portland cement") AND ("CNT" OR "carbon nanotube") AND "rheology". Permitiu-se que os termos que compõem a *string* estivessem presentes no título, nas palavras-chaves e no resumo dos artigos presentes nas bases escolhidas, retornando uma quantidade de estudos pertinente a busca. É válido ressaltar que não foi adotado período para seleção dos estudos. A Tabela 1 mostra os resultados de cada base.

**TABELA 1:** Artigos por bases de dados.

Bases de dados	Nº de artigos
Engineering Village	21
Scopus	50
Web of Science	22
Science Direct	16

**FONTE:** Autoria Própria.

Em seguida, foram excluídos os estudos duplicados nas bases, resultando em 59 trabalhos no total. Primeiramente, esses trabalhos foram avaliados através da leitura dos resumos, já dando início à pré-seleção dos artigos, para uma posterior análise completa do texto. Para isso, foram feitos alguns questionamentos, objetivos desta revisão, para seguir com a seleção ou exclusão de determinado artigo. São eles:

- Como o NTC influencia no comportamento reológico das matrizes cimentícias?
- Quais foram os modelos de curva de fluxo mais adequados para descrever as matrizes cimentícias incorporadas com NTC?
- Quais processos de dispersão e funcionalização foram mais adequados para reduzir os efeitos reológicos indesejados proporcionados pelo NTC?

Após avaliar os 59 trabalhos para inclusão ou exclusão nesta revisão, foram selecionados 19 artigos para análise do programa experimental e resultados dos parâmetros reológicos que respondessem a alguns dos questionamentos feitos. Essa etapa de seleção é detalhada na Parte 2 do artigo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na literatura são encontrados diversos estudos que tiveram como principais variáveis: teor de NTC; tipo de NTC; funcionalização da superfície do NTC; cimento; tipo de dispersão dos NTCs; tipo de surfactante e seu teor; tempo e intervalo dos ensaios; e tipo de reômetro e modelo de curva. Percebe-se que isso potencializa a variação das curvas de fluxo das composições propostas pelos autores, o que dificulta estabelecer um padrão para descrever os compósitos formados por pastas de cimento, pelas argamassas e pelos concretos.

A tendência avaliada em vários estudos é o aumento da viscosidade ao introduzir NTCs nas matrizes, o que geralmente é atribuído à grande superfície específica dos NTCs. Segundo Azevedo et al. (2021), os aumentos na tensão de escoamento e na viscosidade indicam que os NTCs reduzem a trabalhabilidade dos materiais à base de cimento no estado fresco, o que pode impactar negativamente na porosidade da matriz, pois dificulta a saída de ar e aumenta sua porosidade.

É importante ressaltar que os trabalhos relatados aqui abordam diferentes composições de matrizes cimentícias, pois existe um maior interesse por parte dos autores em mitigar o comportamento das matrizes utilizadas para determinado fim específico, como, por exemplo, pastas de cimento para poços petrolíferos, argamassas de reparo, concretos de alto desempenho etc.

Paula et al. (2014) desenvolveram pastas de cimento utilizando clínquer nanoestruturado para compreender o comportamento reológico durante seu uso em perfuração de poços petrolíferos. Os autores adotaram cimento de classe G e NTCs que foram sintetizados diretamente sobre o clínquer, descartando a necessidade de funcionalização da superfície. Esse processo foi dado por deposição química de vapor logo após a moagem do clínquer, utilizando resíduos da indústria siderúrgica como catalizador. Por esse motivo, além de se obter uma pasta de cimento reforçada com nanomaterial a base de carbono, trata-se ainda de um material com viés sustentável.

As pastas de cimento desenvolvidas tiveram teores, em relação a massa de cimento, de 0,1 e 0,3% de adição de NTC, os quais foram misturados com 0,2% de dispersante à base de polinaftaleno sulfonado. Para os ensaios reológicos foi utilizado um Viscosímetro Cilíndrico Coaxial fazendo-se controle da taxa de cisalhamento. Para se aproximar das condições características dos poços petrolíferos, também foi feito o teste de estabilidade (ou segregação de sólidos) das pastas para verificação do rebaixamento da amostra, em mm, e a diferença de densidade ( $\Delta\rho$ ) após 24 horas de cura.

A Tabela 2 mostra que a adição de NTC nanoestruturado no clínquer não trouxe alterações substanciais nas propriedades do estado fresco avaliadas. Os autores também realizaram ensaios mecânicos, nos quais também não constataram mudanças significativas.

**TABELA 2:** Tensão de escoamento ( $\tau_0$ ), viscosidade plástica ( $\eta_{pl}$ ), rebaixamento (reb.) e a diferença de densidade ( $\Delta\rho$ ) da pasta de cimento.

% NTC / massa de cimento	$\tau_0$ (Pa)	$\eta_{pl}$ (Pa·s)	reb. (mm)	$\Delta\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
0 (REF)	49,3	0,0788	0,0	0,032
0,1	44,0	0,0932	1,4	0,024
0,3	45,7	0,0888	2,0	0,039

FONTE: Adaptado Paula et al. (2014).

Souza et al. (2020) também analisaram pastas cimentícias com adição de clínquer nanoestruturado com NTC, nos teores de 0,15 e 0,3% de NTC e 0,2% de superplastificante policarboxilato a base de éter em relação a massa de cimento. Os autores avaliaram o comportamento reológicos nas curvas

de fluxo de forma ascendente e descendente com regressão polinomial ( $R^2$ ). A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios reológicos.

**TABELA 3:** Tensão de escoamento ( $\tau_0$ ), viscosidade plástica ( $\eta_{pl}$ ) e regressão polinomial das pastas de cimento, segundo o modelo modificado de Bingham.

% NTC / massa de cimento	$\tau_0$ (Pa)	$\eta_{pl}$ (Pa·s)	Modelo de curva	$R^2$
0 (REF)	6,365 ± 0,995	0,396 ± 0,054	Bingham modificado	0,984
0,15	5,528 ± 0,845	0,586 ± 0,046		0,994
0,3	6,548 ± 1,169	0,589 ± 0,064		0,985

FONTE: adaptado Souza et al. (2020).

É possível observar nos valores de tensão de escoamento, com seus respectivos desvios padrão, que os NTCs não alteraram o início do fluxo das pastas, diferente do que está apresentado na viscosidade plástica, para a qual observou-se um aumento entre a pasta referência em relação as duas pastas com NTCs. Jiang et al. (2018) afirma que os nanomateriais podem absorver água e contribuir para melhorar a coesão da pasta de cimento.

Skripiunas et al. (2018) estudaram pastas cimentícias com adição de um composto sólido, o qual possui concentração de 45% de NTC e 55% de carboximetilcelulose. As pastas de cimento para o estudo reológico foram feitas com dispersões desse composto com e sem o superplastificante policarboxilato a base de éter (PCE). Dessa forma, além da influência dos NTCs, pode-se também verificar o impacto do seu uso com e sem o aditivo.

As dispersões variaram no teor de 0,125, 0,25 e 0,5% em relação a massa de cimento e as pastas foram avaliadas com 5 e 120 minutos após sua preparação. Os resultados da Tabela 4 constam os valores sem uso do PCE e a Tabela 5 com seu uso. Em todos os casos foi observado que o NTC altera de maneira sutil a tensão de escoamento e a viscosidade plástica. Os fatores que tiveram impacto foi o tempo de hidratação, o qual nas pastas sem o PCE aumentou consideravelmente a tensão e a viscosidade (Tabela 4), enquanto o uso do PCE zerou a tensão de escoamento das pastas e o tempo de hidratação não gerou impacto (Tabela 5). Importante ressaltar que o melhor resultado está na pasta com o aditivo e a maior quantidade de NTC (0,5+PCE).

**TABELA 4:** Tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) e viscosidade plástica ( $\eta_{pl}$ ) das pastas de cimento sem policarboxilato a base de éter, segundo o modelo de Bingham.

% dispersão / massa de cimento	$\tau_0$ (Pa)		$\eta_{pl}$ (Pa·s)		Modelo de curva
	5 min.	120 min.	5 min.	120 min.	
0 (REF)	13,9	12,2	1,433	2,507	Bingham
0,125	11,71	5,934	1,569	2,568	
0,25	11,05	10,76	1,707	2,561	
0,5	9,636	10,95	1,857	2,536	

FONTE: adaptado Skripiunas et al. (2018).

**TABELA 5:** Tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) e viscosidade plástica ( $\eta_{pl}$ ) das pastas de cimento com policarboxilato a base de éter, segundo o modelo de Bingham.

% dispersão / massa de cimento	$\tau_0$ (Pa)		$\eta_{pl}$ (Pa·s)		Modelo de curva
	5 min.	120 min.	5 min.	120 min.	
0 (REF)	0	0	2,112	2,217	Bingham
0,125+PCE	0	0	1,991	2,039	
0,25+PCE	0	0	2,051	2,311	
0,5+PCE	0	0	1,903	2,160	

FONTE: adaptado Skripiunas et al. (2018).

MacLeod et al. (2020) avaliaram a reologia do concreto com adição de uma solução líquida pré-dispersa de NTC variando os teores de adição em 2,5, 5 e 10% fazendo uso de cimento Portland simples (C) e cimento de alta resistência inicial (ARI). Foram avaliados a tensão de escoamento estática e dinâmica, viscosidade plástica e o abatimento. Os resultados são apresentados na Tabela 6. Comparando o cimento tipo C com os diferentes teores de NTCs pode-se notar que, tanto a tensão para início do fluxo ( $\tau_0$ ) quando a tensão de fluxo contínuo ( $\tau_D$ ) reduziram conforme o aumento do teor de NTC nas amostras. O mesmo ocorre para as amostras de cimento ARI, com exceção do teor de 2,5% de NTC que se manteve praticamente indiferente. Com relação ao *slump*, todos os traços aumentaram gradualmente com o teor de NTC. Enquanto a viscosidade plástica reduziu nos teores de 2,5 e de 5% de NTC, enquanto aumentou ao atingir um teor de 10% de NTC nos dois cimentos. Isso mostrou que a trabalhabilidade do concreto, medida pelo ensaio de abatimento, é sensível à mistura de solução líquida pré-dispersa de NTC, mas não suficiente para alterar os parâmetros de fluxo avaliados pela reologia.

**TABELA 6:** Tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) estática e dinâmica, viscosidade plástica ( $\eta_{pl}$ ) e abatimento dos concretos, segundo o modelo de Bingham.

% solução / massa de cimento	$\tau$ (Pa)	$\eta_{pl}$ (Pa·s)	Slump (mm)	Modelo de curva
	Estática ( $\tau_0$ ) – Dinâmica ( $\tau_D$ )			
CO (REF)	3504 – 1016	14,3	110	Bingham
C5	1510 – 571	6,0	180	
C10	975 – 386	10,3	220	
ARI	2502 – 888	10,0	110	
ARI2,5	2612 – 911	9,8	135	
ARI5	1791 – 647	6,4	180	
ARI10	397 – 169	11,7	230	

FONTE: adaptado MacLeod et al. (2020).

Silvestro et al. (2022c) avaliaram pastas de cimento com NTC funcionalizados com 4 tipos diferentes de silanos: 3-aminopropiltriétoxissilano (APTES); aminoetilaminopropiltrimetoxissilano (AEAPTMS); 3-glicidoxipropiltrimetoxissilano (GPTMS); tetraetoxissilano (TEOS). Isso foi feito para apontar o silano mais eficaz para reduzir a tendência de aglomeração dos NTC. Para cada tipo, foi inserido 0,1% de teor na pasta em relação à massa de cimento, além da pasta referência e a pasta com 0,1% de NTC sem funcionalização. Os resultados mostraram que a incorporação dos NTCs não silanizados aumentou a tensão de escoamento dinâmica e a viscosidade em relação à pasta simples, mas que a silanização dos NTCs compensou o efeito negativo dos nanomateriais nas propriedades reológicas das pastas de cimento.

Silvestro et al. (2022b) avaliaram pastas de cimento reforçadas com NTC não funcionalizado e com NTC funcionalizado com silano (aminopropiltriétoxissilano – APTES). A silanização com APTES foi escolhida diante das melhores propriedades encontradas em Silvestro et al. (2022c). Foram realizados ensaios de mini-slump para verificação da trabalhabilidade e ensaios reológicos utilizando reômetro Haake MARS III (Thermo Fisher Scientific) de geometria tipo Vane, Figura 6, com intervalo de 10 minutos, durante 60 minutos, tendo início 10 minutos após o primeiro contato de água com o cimento.

Os principais resultados são mostrados na Tabela 7, na qual os dados reológicos foram estimados a partir dos gráficos, sendo informado valores do primeiro (10 min. de hidratação) e do último (60 min. de hidratação).

Com relação ao mini-slump é possível observar que a incorporação de NTC reduz a trabalhabilidade da matriz devido à grande superfície específica do NTC, impacto este reduzido pela funcionalização APTES. Os ensaios reológicos resultaram em curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento e viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento. As tensões de escoamento estático e

dinâmico aumentam com a incorporação de NTC, o que, novamente, tem efeito reduzido para as matrizes com NTC-APTES. De acordo com Silvestro (2022b), as matrizes com NTC e NTC-APTES não afetaram o comportamento das pastas. Esse resultado está em conformidade com os trabalhos de Roussel (2012) e Jiao et al. (2018), os quais exibiram comportamento pseudoplástico (shear-thinning) diante de baixas taxas de cisalhamento nas pastas de cimento estudadas, resultando em redução da viscosidade ao aumentar a taxa de cisalhamento.



**FIGURA 3:** Geometria tipo Vane utilizada nos ensaios reológicos.  
**FONTE:** Silvestro (2022a).

**TABELA 7:** Tensão de escoamento estático e dinâmico, viscosidade plástica e *mini-slump* da pasta de cimento estimadas pelo modelo de regressão de Herschel-Bulkley.

% NTC / massa de cimento	Tipo de funcionalização	$\tau$ (Pa)		$\eta_{pl}$ (Pa·s)	Mini-slump (mm)	Modelo de curva
		Estática ( $\tau_0$ )	Dinâmica ( $\tau_D$ )			
0 (REF)	-	4	3 – 7,5	0,8 - 1,9	125	Herschel-Bulkley
0,05 NTC	COOH	7	7 – 15	1,4 - 2,7	96	
0,05 NTC-APTES	COOH e APTES	10	6 - 15	1,5 - 2,55	113	
0,10 NTC	COOH	22	23 - 33	3 - 4,3	86	
0,10 NTC-APTES	COOH e APTES	18	16 – 22	2,8 - 4,0	100	

**FONTE:** adaptado de Silvestro (2022b).

Reales, Duda, e Toledo Filho (2018) desenvolveram pastas de cimento de cimento classe G (poços petrolíferos) adicionando uma solução aquosa comercial contendo NTC. Foram realizados ensaios reológicos utilizando reômetro de geometria tipo Vane durante 180 segundos. Os dados principais são apresentados na Tabela 8. Percebe-se que a dispersão aquosa comercial de NTC modificou todos os parâmetros reológicos das pastas, aumentando-os gradativamente conforme o teor de NTC é elevado. Segundo os autores, isso pode estar relacionado a dois fatores principais: a alta área superficial do MWCNT e o uso de tensoativos como agentes dispersantes na solução aquosa.

**TABELA 8:** Tensão de escoamento estático e dinâmico e viscosidade da pasta de cimento estimadas pelo modelo de regressão de Bingham.

% NTC / massa de cimento	$\tau_0$ (Pa)		$\eta_{pl}$ (Pa·s)	Modelo de curva
	Estática	Dinâmica		
0 (REF)	12	25	1,6	Bingham
0,01	12,5	30	1,55	
0,05	19	29	1,6	
0,15	73	75	1,9	
0,25	203	126	2,2	

**FONTE:** adaptado de Reales, Duda, e Toledo Filho (2018).

Zhang et al. (2022) estudaram a viscosidade de pastas de cimento de classe G (poços petrolíferos) com adição em relação à massa de cimento de NTC em 0,3%, 0,6% e 1%, os quais foram funcionalizados com COOH em 3,86%, com relação a/c de 0,44%. As pastas foram curadas a 80°C e tiveram viscosidade de 1,85 (REF), 1,85 (0,3% NTC), 1,75 (0,6% NTC) e 2,2 (1%). Com isso, os autores selecionaram o teor de 0,6% como dosagem ideal de NTC, que mostrou que as pastas se comportaram como fluidos pseudoplásticos (shear-thinning), afirmando que a reologia da pasta de cimento sob baixa taxa de cisalhamento é melhorada após a adição NTC.

Andrade Neto et al. (2021) avaliaram os parâmetros reológicos pelo modelo de Herschel-Bulkley de pastas com 0,05%, 0,075% e 0,1% de NTC em relação à massa de cimento. Para cada composição de pasta, além da referência, foi substituído 10% do cimento CP-II por metacaulim, a fim de mitigar os parâmetros reológicos ao misturar NTC com material cimentício suplementar. Todas as pastas com NTC aumentaram a viscosidade e tensão de escoamento em relação a pasta referência, contudo, as pastas com NTC e metacaulim apresentaram tensão de escoamento e viscosidade maiores do as pastas sem metacaulim. Os autores relatam que, além do NTC ter elevado superfície específica, o metacaulim também possui superfície específica maior que as partículas de cimento, o que demanda uma maior quantidade de água. Além disso, os autores mediram a consistência de argamassas com os mesmos teores das pastas e verificaram a redução de trabalhabilidade.

Kim, Choi e Chung (2021) fabricaram pastas de cimento com NTPC (nanotubo de carbono de parede simples), sendo o único trabalho que utilizou esse tipo de NTC nesta revisão. Os autores trabalharam com dois tipos de surfactante, sendo um incorporador de ar comercial (AEA) e outro desoxicolato de sódio (DOC). Para cada pasta foi adicionado um surfactante de cada tipo e outra com surfactante e NTPC, mais a pasta de referência, totalizando 5 misturas. Os parâmetros foram obtidos pela geometria Vane e são descritos na Tabela 9.

Quando as soluções de 0,1% (AEA) e 0,1% (DOC) foram adicionadas à pasta de cimento, a viscosidade plástica diminuiu e o limite de escoamento da pasta de cimento aumentou em comparação com a pasta de cimento simples. A porosidade da pasta de cimento também aumentou ligeiramente e isso se deve à presença de AEA e DOC não adsorvidos ao NTC. Quando NTC foi adicionado à solução de AEA e DOC, tanto a viscosidade plástica quanto a tensão de escoamento da pasta de cimento aumentaram (em comparação com 0%AEA e 0%DOC, respectivamente).

**TABELA 9:** Viscosidade e tensão de escoamento da pasta de cimento estimadas pelo modelo de regressão de Bingham.

% NTC / massa de cimento	$\tau_0$ (Pa)		$\eta_{pl}$ (Pa·s)	Modelo de curva
	Estática	Dinâmica		
0% (REF)	260	311,72	1,36	Bingham
0% (AEA)	255	301,18	0,75	
0,1% (AEA)	275	330,26	0,76	
0% (DOC)	300	350,14	0,93	
0,1% (DOC)	235	413,31	1,1	

FONTE: adaptado de Kim, Choi e Chung (2021).

Silvestro et al. (2021) avaliaram a amplitude no processo de dispersão de concretos com NTC incorporados. Os resultados são mostrados na Tabela 10. Segundo os autores, os resultados dos ensaios reológicos evidenciaram que o aumento do teor de NTC e da amplitude de ultrassom aumentou gradativamente o limite de escoamento estático e dinâmico, enquanto diminuiu a *mini-slump* da pasta. Isso se deve a maior superfície específica disponível dos NTC em elevadas amplitudes, a qual dispersa mais o nanomaterial.

Ma, Qian e Kawashima (2018) avaliaram o efeito de argilas de paligorsquita e NTC nas propriedades reológicas e endurecidas de pastas e argamassas de cimento incorporando cinzas volantes e escória de alto-forno. Foram avaliadas argamassas de cimento com NTC em 0,1% e argila de paligorsquita em 0,3%, junto e separado. Além disso, nessa mesma variação, a composição do aglomerante foi alterada, ficando 0,5 de cimento, 0,25 de cinza volante e 0,25 de escória de alto-forno. Os dados são apresentados na Tabela 11. Os autores também realizaram um diagrama que correlaciona todos os ensaios realizados, mostrado na Figura 4.

**TABELA 10:** V Tensão de escoamento estático e dinâmico, viscosidade e *mini-slump* da pasta de cimento estimadas pelo modelo de regressão de Herschel-Bulkley

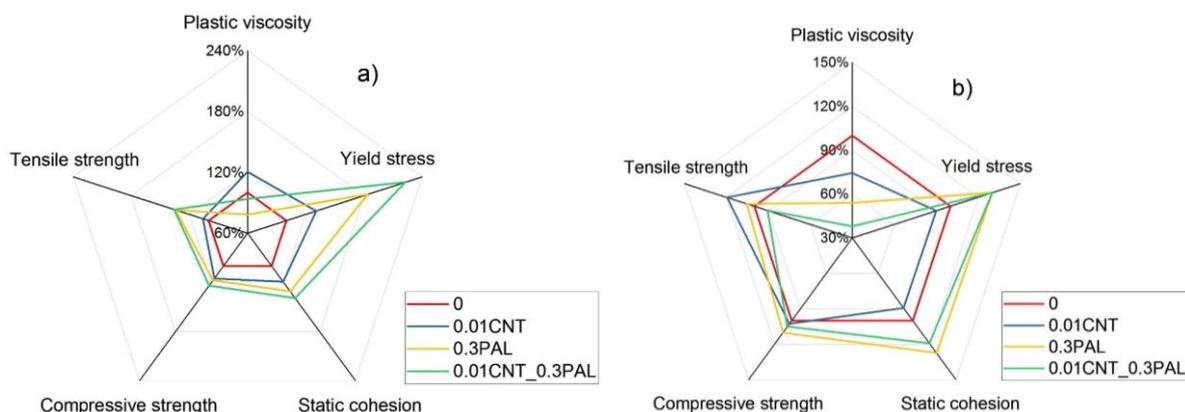
% NTC / massa de cimento	Amplitude da dispersão (%)	$\tau_0$ (Pa)		$\eta_{pl}$ (Pa·s)	Mini- slump (mm)	Modelo de curva
		Estática	Dinâmica			
REF	-	5,41	6,73	0,63	125	Herschel- Bulkley
0,05	0	8,73	10,86	0,67	107	
0,05	50	17,07	19,26	0,74	100	
0,05	80	16,16	18,16	0,71	95	
0,1	0	19,51	21,91	0,7	89	
0,1	50	24,16	25,35	0,72	78	
0,1	80	30,13	29,76	0,76	72	

FONTE: adaptado de Kim, Choi e Chung (2021).

**TABELA 11:** Tensão de escoamento dinâmico e viscosidade das pasta de cimento estimadas pelo modelo de regressão de Bingham.

% em relação a massa de cimento	$\tau_0$ (Pa)	$\eta_{pl}$ (Pa·s)	Modelo de curva
	Dinâmica		
REF	50	1,75	Bingham
NTC0,01	65	2,1	
PAL0,3	91	1,35	
NTC0,01-PAL0,3	110	1,65	
C50-CV25-E25	51	2,05	
C50-CV25-E25-NTC0,01	45	1,5	
C50-CV25-E25-PAL0,3	68	1,15	
C50-CV25-E25-NTC0,01-PAL0,3	65	0,75	

FONTE: adaptado de Ma, Qian e Kawashima (2018).



**FIGURA 4:** Resumo do efeito de argilas de paligorsquita e NTC em propriedades reológicas e propriedades endurecidas a) argamassa de cimento (100C) e b) argamassa de cimento de escória de alto-forno de cinzas volantes (50C25F25S).

FONTE: Ma, Qian e Kawashima (2018) (2018).

Diante dos parâmetros reológicos, os autores constataram que, embora o sistema cimentício e o sistema ternário exibissem parâmetros reológicos semelhantes, ou seja, tensão de escoamento, viscosidade plástica e coesão estática, a introdução de aditivos teve efeitos diferentes em cada sistema. As argilas de paligorsquita levaram a um aumento mais substancial na tensão de escoamento e coesão estática e na redução da viscosidade plástica no sistema de cimento em comparação com o sistema ternário. Os NTCs aumentaram todos os parâmetros reológicos medidos nas argamassas de cimento e diminuíram nas argamassas ternárias.

Além disso, eles concluíram que os resultados reológicos destacam a importância de considerar o sistema aglomerante ao utilizar materiais com propriedades de superfície excepcionais, que é o caso do NTC e argilas de paligorsquita.

Embora as argilas de paligorsquita sejam utilizadas principalmente para modificar a reologia, elas podem melhorar as propriedades mecânicas. Neste estudo, seu efeito foi comparável ou maior que o dos NTCs. Isso pode ser parcialmente atribuído à maior estabilidade da suspensão e boa capacidade de dispersão das argilas de paligorsquita.

Kostrzanowska-Siedlarz (2020) utilizou métodos estatísticos para descrever as propriedades reológicas de argamassas reforçadas com composto sólido de NTCs solúvel em água. O autor fez variação da relação a/c (em 0,4; 0,45; e 0,5%), do teor de NTC (em 0; 0,08; e 0,16%), do teor de aditivo superplastificante (0,55; 0,83 e 1,1%) e do tempo após a mistura (0; 30; e 60 min.), fazendo a interação dos resultados para verificar a influência de cada parâmetro de forma isolada. O autor constatou que, considerando todas as variáveis juntamente com o tempo, a tensão de escoamento foi mais impactada pela relação a/c, seguido pelo teor de superplastificante e, por último, a interação dos três (a/c, superplastificante e NTCs). O autor explica que, geralmente, as propriedades reológicas das argamassas mudam ao longo do tempo, aumentando a tensão de escoamento e a viscosidade plástica, e que essa influência é menor quando a relação a/c é maior. Diante dos resultados, não foi observado impacto significativo dos NTCs nas propriedades reológicas da argamassa.

Farooq et al. (2020) desenvolveram argamassas com NTCs nos teores de: 0,02; 0,04; 0,06; e 0,08% em relação à massa de cimento. A partir do teor de 0,06%, a tensão de escoamento aumenta gradativamente, mas que utilizando o teor de até 0,04%, essa tensão diminui. Enquanto isso, a viscosidade plástica aumenta sutilmente conforme o teor de adição de NTC cresce. Além disso, os autores fizeram a combinação de 0,04% de NTC com 0,04% de nano-plaquetas de grafite que, apesar de ter tido boas respostas com as propriedades mecânicas, apresentou tensão de escoamento maior do que as argamassas com 0,04% de NTC e menor em relação as argamassas com 0,06 e 0,08% de NTC, enquanto a viscosidade não teve alteração significativa. Isso indica uma possibilidade de combinação de nano-materiais a fim de maximizar os resultados.

Jiang et al. (2018) também desenvolveram pastas de cimento com adição de 0,1, 0,5 e 1,0% de NTC em relação à massa de cimento e 0,75% de aditivo superplastificante. Os resultados mostraram que a tensão de escoamento e a viscosidade aumentam gradualmente com os teores de NTC.

Leonavičius et al. (2018) utilizaram um composto sólido com NTCs (concentração de 55%) dispersas em carboxil-metilcelulose (concentração de 55%). Os autores definiram que a partir de 0,005% de teor de NTC, a viscosidade aumenta significativamente, podendo ter sido influenciado pela carboxil-metilcelulose, a qual tem propriedade de aumentar a viscosidade. Valores inferiores a 0,005% de NTC reduziram a viscosidade.

Tendo em vista uma abordagem geral de todos os trabalhos levantados, os NTC estão predominantemente influenciados pelos processos de dispersão em que são submetidos. Os tipos de aditivos e funcionalização da superfície utilizado para evitar a aglomeração dos NTCs afetam diretamente os resultados reológicos. Além desses aspectos principais, existe uma variedade de NTCs

apontados pela literatura aqui investigada, assim como os processos utilizados, tanto para dispersas os NTCs quanto para os ensaios reológicos.

De uma forma geral, os NTCs que compõem determinada mistura possuem elevada superfície específica e, quando bem dispersos, irão melhorar o desempenho mecânico e de durabilidade das matrizes cimentícias, principalmente, pelo efeito de enchimento da matriz. Porém, viu-se que quanto mais bem disperso, maior será a área de contato disponível para a água e os aditivos ali presentes. Além disso, os resultados dependem diretamente da taxa de cisalhamento aplicada durante o ensaio.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os diversos estudos encontrados apresentam muita dispersão em algumas propriedades devido ao grande número de variáveis (teor de NTC; tipo de NTC; funcionalização da superfície do NTC; cimento; tipo de dispersão; tipo de surfactante e seu teor; tempo e intervalo dos ensaios; tipo de reômetro e modelo de curva), assim como outras propriedades analisadas pelos trabalhos.

Compreender como os diferentes componentes e aditivos interagem e influenciam o comportamento reológico permite a criação de matrizes com propriedades avançadas, como concretos autonivelantes, argamassas de alta aderência, pastas para perfuração de poços petrolíferos e materiais de reparo com características específicas. A reologia também contribui para a otimização de processos produtivos, redução de custos e sustentabilidade.

De uma forma geral, muitos estudos mostraram que a tensão de escoamento e a viscosidade dos compósitos cimentícios com NTC mostraram uma tendência linear na primeira hora de hidratação. Ainda, o reforço com NTC aumentou gradativamente a tensão de escoamento e a viscosidade das pastas de cimento em parte das pesquisas. Isso se deve, principalmente, à alta superfície específica do NTC. Ao mesmo tempo, outros autores apontaram esse efeito ser reduzido ou até anulado através do uso de aditivos superplastificantes.

Ainda existe necessidade de mais estudos com intuito de melhor correlacionar as propriedades dos materiais com os processos utilizados para um melhor entendimento, pois investir no estudo reológico das matrizes cimentícias é fundamental para garantir a qualidade e o desempenho dos materiais utilizados na construção civil e em outras áreas relacionadas. É preciso elaborar pesquisas de grande volume de amostras variando os principais parâmetros aqui relatados para correlacionar os resultados e obter respostas isoladas da influência de cada parâmetro.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE NETO J.S., SANTOS T.A., PINTO S.A., DIAS C.M.R., RIBEIRO D.V. Effect of the combined use of carbon nanotubes (CNT) and metakaolin on the properties of cementitious matrices. **Construction & Building Materials**. Vol. 271. 2021.

AZEVEDO, N.H.; MATOS, P.R.; GLEIZE, P.J.P.; BETIOLI, A.M. Effect of thermal treatment of SiC nanowhiskers on rheological, hydration, mechanical and microstructure properties of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v.117, 2021.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design Science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

FAROOQ F., AKBAR A., KHUSHNOOD R.A., MUHAMMAD W.L.B., REHMAN S.K.U., JAVED M.F. Experimental investigation of hybrid carbon nanotubes and graphite nanoplatelets on rheology, shrinkage, mechanical, and microstructure of SCCM. **Materials**. Vol. 13, n. 230. 2020.

GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e Materiais de Construção. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Volume 2. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. 1719–1745 p.

JIANG S., SHAN B., OUYANG J., ZHANG W., YU X., LI P., HAN B. Rheological properties of cementitious composites with nano/fiber fillers. **Construction & Building Materials**. Vol. 158. p. 786 – 800. 2018.

JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q. Influences of shear-mixing rate and fly ash on rheological behavior of cement pastes under continuous mixing. **Construction and Building Materials**, v. 188. 2018. 170-177 p.

KIM J.-H., CHOI I.-J., CHUNG C.-W. Dispersion of single wall carbon nanotube using air entraining agent and its application to portland cement paste. **Construction & Building Materials**. Vol. 302. 2021.

KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ, A. Statistical methods for determining rheological parameters of mortars modified with multi-walled carbon nanotubes. **Construction & Building Materials**. Vol. 253. 2020.

LEONAVIČIUS D., PUNDIENĖ I., GIRSKAS G., PRANCKEVIČIENĖ J., KLIGYS M., KAIRYTĖ A. The effect of multi-walled carbon nanotubes on the rheological properties and hydration process of cement pastes. **Construction & Building Materials**. Vol. 189, p. 947-954. 2018.

MA S., QIAN Y., KAWASHIMA S. Performance-based study on the rheological and hardened properties of blended cement mortars incorporating palygorskite clays and carbon nanotubes. **Construction & Building Materials**. Vol. 171, p. 663-671. 2018.

MACHADO, J.C.V. **Reologia e escoamento de fluidos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 257 p.

MACLEOD A.J.N., FEHERVARI A., GATES W.P., GARCEZ E.O., ALDRIDGE L.P., COLLINS F. Enhancing fresh properties and strength of concrete with a pre-dispersed carbon nanotube liquid admixture. **Construction & Building Materials**. Vol. 248. 2020.

MARCONDES, C. G. N.; MEDEIROS, M. H. F.; MARQUES FILHO, J.; HELENE, P. Nanotubos de carbono em concreto de cimento portland: Influência da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água. **Alconpat**, v. 5, n. 2. Maio-Agosto, 96-113, 2015 p.

PAULA J.N., CALIXTO J.M., LADEIRA L.O., LUDVIG P., SOUZA T.C.C., ROCHA J.M., MELO A.A.V. Mechanical and rheological behavior of oil-well cement slurries produced with clinker containing carbon nanotubes. **Journal of Petroleum Science & Engineering**. Vol. 122. 2014. 274-279 p.

REALES O.A.M., DUDA P., TOLEDO FILHO R.D. Effect of a carbon nanotube/surfactant aqueous dispersion on the rheological and mechanical properties of portland cement pastes. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 30, n 10. 2018.

REALES O.A.M., JARAMILLO Y.P.A., BOTERO J.C.O., DELGADO C.A., QUINTERO J.H., TOLEDO FILHO R.D. Influence of MWCNT/surfactant dispersions on the rheology of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**. Vol. 107,. 2018. 101-109 p.

REIS, J. F. A. **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado**: Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008, 179 p.

ROUSSEL, N. **Understanding the rheology of concrete**. Woodhead Publishing, 2012.

SILVESTRO, L. **Incorporação de nanotubos de carbono funcionalizados com silano em pastas de cimento Portland**. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2022a, 190 p.

SILVESTRO L., LIMA G.T. S., RUVIARO A.S., MEZALIRA D.Z., GLEIZE P.J.P. Effect of Multiwalled Carbon Nanotube Functionalization with 3-Aminopropyltriethoxysilane on the Rheology and Early-Age Hydration of Portland Cement Pastes. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 34. 2022b.

SILVESTRO L., LIMA G.T. S., RUVIARO A.S., MATOS P.R., MEZALIRA D.Z., GLEIZE P.J.P. Evaluation of different organosilanes on multi-walled carbon nanotubes functionalization for application in cementitious composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 51. 2022c.

SILVESTRO L., RUVIARO A.S., LIMA G.T. S., MATOS P.R., AZEVEDO A.R.G, MONTEIRO S.N., GLEIZE P.J.P. Influence of ultrasonication of functionalized carbon nanotubes on the rheology, hydration, and compressive strength of portland cement pastes. **Materials**. Vol. 14. 2021.

SOLÍS R. G.; MORENO E. I.; ARJONA E. **Resistencia de concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c. Alconpat**, v. 2, n. 1, Janeiro-Abril, 21–29, 2012 p.

SOUZA T.C.C., PINTO G., CRUZ V.S., MOURA M., LADEIRA L.O., CALIXTO J.M. Evaluation of the rheological behavior, hydration process, and mechanical strength of Portland cement pastes produced with carbon nanotubes synthesized directly on clinker. **Construction & Building Materials**. 2020.

SKRIPKIUNAS G., KARPOVA E., BENDORAITIENE J., BARAUSKAS I. Rheological properties and flow behaviour of cement-based materials modified by carbon nanotubes and plasticising admixtures. **Fluids**. Vol. 5. 2020.

SKRIPKIUNAS G., KARPOVA E., BARAUSKAS I., BENDORAITIENE J., YAKOVLEV G. Rheological properties of cement pastes with multiwalled carbon nanotubes. **Advances in Materials Science and Engineering**. 2018. 13 p.

SKRIPKIUNAS G., YAKOVLEV G., KARPOVA E. The investigation of multi-walled carbon nanotubes dispersion and its influence on rheological properties of cement systems. **MATEC Web of Conferences**. 6<sup>o</sup> IPICSE. Vol. 251. 2018. Outubro. Moscow, Russia.

YAHIA, A.; MANTELLATO, S.; FLATT, R.J. **Concrete rheology: A basis for understanding chemical admixtures**, in: P.C. Aïtcin, R.J. Flatt (Eds.), *Science and Technology of Concrete Admixtures*, Elsevier, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2016. 97-127 p.

ZHANG J., QIU J., SHEN J., ZHANG M., JI H., YANG R. On the early behavior and microstructure of oil well cement paste incorporating with carbon nanotubes cured at a high temperature. **Construction & Building Materials**. Vol. 317. 2022.