

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL – PPGE

RAYSSA RENOVATO DOS REIS

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS LEVES COM NANOCELULOSE E EPS PARA
REVESTIMENTO DE EDIFICAÇÕES**

JOINVILLE

2022

RAYSSA RENOVATO DOS REIS

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS LEVES COM NANOCELULOSE E EPS PARA
REVESTIMENTO DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil do Centro de Ciências
Tecnológicas, da Universidade do
Estado de Santa Catarina como
requisito parcial à obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carmeane
Effting

JOINVILLE

2022

RAYSSA RENOVATO DOS REIS

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS LEVES COM NANOCELULOSE E EPS PARA
REVESTIMENTO DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil do Centro de Ciências
Tecnológicas, da Universidade do
Estado de Santa Catarina como
requisito parcial à obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Carmeane
Effting

BANCA EXAMINADORA

Dra. Carmeane Effting
UDESC

Membros:

Dra. Katiusca Wessler Miranda
UDESC

Dr. Adriano Michael Bernardin
UNESC

Joinville, 15 de Dezembro de 2022.

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Reis, Rayssa Renovato dos
DESEMPENHO DE ARGAMASSAS LEVES COM
NANOCELULOSE E EPS PARA REVESTIMENTO DE
EDIFICAÇÕES / Rayssa Renovato dos Reis. -- 2022.
131 p.

Orientadora: Carmeane Effting
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2022.

1. Argamassa Leve. 2. Nanocelulose. 3. Poliestireno
Expandido. 4. Microestrutura. I. Effting, Carmeane. II.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, por seus planos serem sempre maiores do que os meus sonhos.

À minha família, em especial meus pais, Leila e Laércio, por todo o apoio, pela paciência, pelo incentivo em tudo o que faço, por sempre acreditarem e me incentivarem a nunca desistir dos meus sonhos.

À minha orientadora, Profa. Dra. Carmeane Effting, pelo grande apoio no desenvolvimento, pelo direcionamento e orientação durante toda a produção desta pesquisa.

Aos meus amigos, os antigos e os que eu criei nessa caminhada de mestrado, por acreditarem e me incentivarem neste processo, o suporte de vocês foi essencial. Em especial à Ariane, Diego, Ícaro e Mauri, pelo apoio durante período de elaboração desta pesquisa.

Aos professores pelo conhecimento transmitido.

A todos os laboratoristas/bolsistas pela ajuda e suporte, especialmente ao Dr. Adilson Schackow, por toda a ajuda na pesquisa e prestatividade durante a realização dos ensaios em laboratório.

Aos programas de bolsas PROMOP e CAPES que me permitiram realizar esse trabalho com maior abrangência, possibilitando ampliar o conhecimento científico.

À Universidade do Estado de Santa Catarina e membros do Centro de Ciências Tecnológicas, pela oportunidade de desenvolver minha pesquisa, pelo aprendizado e colaboração na execução de ensaios.

E por fim, a todos aqueles que puderam contribuir direta e indiretamente para a realização desta pesquisa, meus sinceros agradecimentos!

“O importante é não parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão de existir.” (Albert Einstein)

RESUMO

Uma das opções para reduzir os prejuízos causados ao meio ambiente pelo setor da construção civil seria promover o uso de materiais que gerem menor impacto. Uma aplicação de solução sustentável e que promove certa otimização das propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios é a adição de nanocelulose, um material considerado biodegradável com propriedades que contribuem para tal aprimoração. Outro meio de diminuir os impactos causados por esse setor, é o uso de materiais leves, como o poliestireno expandido (EPS), o qual apresenta uma melhora na eficiência energética quando comparado ao convencional, além de ser uma alternativa sustentável, proporcionando uma destinação adequada para o resíduo de EPS. Em virtude disso, esse estudo tem como objetivo analisar o desempenho da aplicação desses materiais em argamassas de revestimentos. Foram produzidas argamassas leves com substituição do agregado miúdo pelo EPS (55% em volume) com adição da nanocelulose em 0,01%, 0,02% e 0,03% da massa do cimento, e comparadas com argamassa leve de referência (sem nanocelulose). Foram avaliadas as propriedades no estado fresco (índice de consistência, tempo de pega, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado), no estado endurecido (densidade de massa aparente, absorção de água e porosidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade, variação dimensional, condutividade térmica, absorção acústica e perda de transmissão), análise microestrutural (MEV, AFM e nanoindentação instrumentada) e análise estatística da influência da nanocelulose na argamassa leve. A nanocelulose promoveu alterações promissoras nas propriedades analisadas. Nos ensaios do estado fresco, devido a sua característica hidrofílica, a nanocelulose promoveu a redução da consistência da argamassa, mas proporcionou um aumento no tempo de pega. A mistura com 0,03% de nanocelulose alcançou os melhores resultados para as resistências mecânicas e absorção acústica, o que foi justificado pela sua microestrutura mais densa. A análise estatística confirmou que para resultados significativos o teor de nanocelulose deveria ser superior a 0,03%.

Palavras-chave: Argamassa leve; Nanocelulose; Poliestireno Expandido; Microestrutura.

ABSTRACT

One of the options to reduce the damage caused to the environment by the civil construction sector would be to promote the use of materials that generate less impact. One sustainable solution application that promotes some optimization of the mechanical properties of cementitious composites is the addition of nanocellulose, a material considered biodegradable with properties that contribute to such improvement. Another way to reduce the impacts caused by this sector is the use of lightweight materials, such as expanded polystyrene (EPS), that presents an improvement in energy efficiency when compared to conventional materials, besides being a sustainable alternative, providing an appropriate destination for EPS waste. Therefore, this study aims to analyze the performance of the use of these materials in mortar coatings. Light mortars were produced with replacement of fine aggregate by EPS (55% in volume) with addition of nanocellulose in 0.01%, 0.02% and 0.03% of cement mass, and compared with the reference light mortar (without nanocellulose). The properties in the fresh state (consistency index, setting time, water retention, bulk density, and incorporated air content), in the hardened state (bulk density, water absorption and porosity, flexural tensile strength, compressive strength, modulus of elasticity, dimensional change, thermal conductivity, sound absorption, and loss of transmission), microstructural analysis (SEM, AFM, and instrumented nanoindentation), and statistical analysis of the influence of nanocellulose on lightweight mortar were evaluated. The nanocellulose promoted promising changes in the analyzed properties. In the fresh state tests, due to its hydrophilic characteristic, the nanocellulose promoted the reduction of the consistency of the mortar, but provided an increase in the setting time. The mixture with 0.03% of nanocellulose achieved the best results for mechanical strength and sound absorption, which was justified by its denser microstructure. Statistical analysis confirmed that for significant results the nanocellulose content should be higher than 0.03%.

Keywords: Lightweight mortar; Nanocellulose; Expanded Polystyrene; Microstructure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diferentes alternativas de revestimentos de parede: (a) emboço + reboco + pintura (sistema mais antigo); (b) camada única + pintura; (c) revestimento decorativo (RDM).	38
Figura 2 - Imagem do MEV da morfologia do EPS.....	38
Figura 3 - Esquema de reação provável de polimerização de estireno.	39
Figura 4 - Comparação do teor de celulose derivado de diferentes recursos juntamente com a sua morfologia e cristalinidade.	41
Figura 5 - Esquema de uma célula vegetal	42
Figura 6 - Imagem do MEV e MFA, respectivamente, A e D para nanocristais de celulose, B e E para nanofibrilas de celulose e C e F para celulose bacteriana.....	43
Figura 7 – Difração de Raios X de (a) celulose; (b) nanocelulose produzida com concentração de 60% de ácido sulfúrico (c) nanocelulose B produzida com concentração de 50% de ácido sulfúrico.	43
Figura 8 - Espectros FTIR de (a) celulose; (b) nanocelulose produzida com concentração de 60% de ácido sulfúrico (c) nanocelulose B produzida com concentração de 50% de ácido sulfúrico.	44
Figura 9 - Efeitos da nanocelulose em materiais à base de cimento.	46
Figura 10 - Esquema de operação generalizada dos modos MFA oscilantes, mostrando a configuração instrumental.....	49
Figura 11 - Etapas do procedimento experimental.....	51
Figura 12 - Ensaio de caracterização dos materiais.	52
Figura 13 - Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco	53
Figura 14 - Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido	53
Figura 15 - Conglomerado de 10% de nanocelulose disperso em água.	57
Figura 16 - Misturas utilizadas para escolha da argamassa de referência.....	59
Figura 17 - Misturador mecânico.....	60
Figura 18 - Procedimento de dispersão da nanocelulose através do sonicador.	61
Figura 19 - Corpo de prova prismático	62
Figura 20 - Mesa de Consistência.....	63
Figura 21 - Aparelho de Vicat.....	64
Figura 22 - Funil Buchner	65

Figura 23 - Corpo de prova para análise de variação dimensional	70
Figura 24 - Tubo de impedância.....	72
Figura 25 – Vista superior da amostra da argamassa recoberta com ouro utilizada na análise do MEV.	73
Figura 26 - Corpo de prova no AFM.....	74
Figura 27 - Curva granulométrica da areia.	77
Figura 28 – Morfologia da nanocelulose obtida pelo MEV com resolução de 35000x.	78
Figura 29 - Morfologia da nanocelulose obtida pelo MEV com resolução de 50000x.	78
Figura 30 - Mapeamento dos pontos da análise do EDS.	79
Figura 31 - Gráficos dos componentes identificados na análise de EDS nos pontos da Figura 30.	80
Figura 32 - Espectro de FTIR da nanocelulose.	80
Figura 33 – Difratoograma de raios X da nanocelulose	81
Figura 34 - Abatimento das argamassas.....	83
Figura 35 - Argamassa AN003 após o ensaio de consistência.	83
Figura 36 - Variação dos tempos de pega das argamassas leves.	85
Figura 37 - Relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado.....	87
Figura 38 - Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias.	89
Figura 39 - Resistência à Compressão aos 28 dias.	90
Figura 40 - Condutividade térmica das argamassas leves.....	92
Figura 41 - Absorção acústica das amostras para baixas frequências.	94
Figura 42 - Absorção acústica das amostras para altas frequências.	95
Figura 43 - Perda de transmissão das amostras para baixas frequências.	96
Figura 44 - Perda de transmissão das amostras para altas frequências.....	96
Figura 45 - Imagem do MEV da AR com ampliação de 200x.....	97
Figura 46 - Imagem do MEV da AN003 com ampliação de 200x.....	98
Figura 47 - Imagem 3D da topografia da superfície da argamassa AR.....	99
Figura 48 - Imagem 3D da topografia da superfície da argamassa AN003.....	100
Figura 49 - Módulo de Young encontrado pela nanoindentação ao longo da matriz das argamassas.	101
Figura 50 - Dureza H encontrado pela nanoindentação ao longo da matriz das argamassas.	102

Figura 51 - Gráfico de resíduos dos resultados do índice de consistência das argamassas.....	105
Figura 52 - Gráfico de resíduos dos resultados das resistências à compressão das argamassas.....	105
Figura 53 - Gráfico de Dispersão do índice de consistência	107
Figura 54 - Gráfico de Dispersão da resistência à compressão	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros usados nos sistemas de certificação (LEED, BREEAM, Pearl e Green Globes)	21
Quadro 2 - Conjunto de Padrões Internacionais de sustentabilidade relacionados. .	23
Quadro 3 – Diretrizes estabelecida pela ISO 21930	24
Quadro 4 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.....	33
Quadro 5 – Limites de resistência de aderência à tração.	35
Quadro 6 - Requisitos estabelecidos pela NBR 13281 para argamassas de revestimentos.	36
Quadro 7 – Descrição da nomenclatura dos traços das argamassas.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cimentos Portland normatizados no Brasil.....	25
Tabela 2 - Classificação das argamassas.....	28
Tabela 3 - Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção	29
Tabela 4 - Principais requisitos e propriedades das argamassas para as diferentes funções.....	30
Tabela 5 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade.....	31
Tabela 6 - Composição química do cimento Portland	54
Tabela 7 - Composição preliminar das misturas para determinação da argamassa de referência.	59
Tabela 8 - Composição das argamassas	60
Tabela 9 - Caracterização da areia.	76
Tabela 10 - Ensaio de granulometria da areia.....	77
Tabela 11 - Tempo de pega das argmassas leves.....	84
Tabela 12 - Retenção de água das argamassas leves	85
Tabela 13 - Teor de ar incorporado e densidade de massa para cada mistura.	86
Tabela 14 - Resultados de Densidade de Massa Aparente, Massa Específica Real, Absorção de Água e Porosidade.....	88
Tabela 15 - Módulo de elasticidade das argamassas leves.....	91
Tabela 16 – Variação dimensional das argamassas.....	91
Tabela 17 - Rugosidade média, coeficiente Skewness e coeficiente Kurtosis das argamassas AR e AN003.	99
Tabela 18 – Estatística descritiva do índice de consistência e da resistência à compressão.....	103
Tabela 19 - Análise da variância da consistência.....	103
Tabela 20 - Análise da variância da resistência à compressão.....	104
Tabela 21 - Análise da homogeneidade dos resultados do índice de consistência.	104
Tabela 22 - Análise da homogeneidade dos resultados da resistência à compressão.	105
Tabela 23 - Teste Tukey para os resultados do índice de consistência e resistência à compressão.....	106
Tabela 24 – Valores dos coeficientes lineares e angulares para equação de regressão linear para as propriedades das argamassas e seu resultado ANOVA..	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAPEX	Associação Brasileira do Poliestireno Expandido
AC	Celulose de algas
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVC	Avaliação de ciclo de vida
BC	Celulose bacteriana
CMN	Comitê Mercosul de Normalização
CNC	Nanocristais de celulose
CNF	Nanofibrilas de celulose
CP	Cimento Portland
DRX	Difração de raio X
EDS	Espectrômetro de Energia Dispersiva
EPS	Poliestireno expandido
FTIR	Espectroscopia de infravermelho
FRX	Fluorescência de raios X
ISO	Organização Internacional de Normalização
GCCA	Global Cement and Concrete Association
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFA	Microscopia Força Atômica
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PVC	Policloreto de Polivinila
RDM	Revestimento decorativo monocamada
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
t-CNC	Nanocristais de tunicado de celulose
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
Ca (OH) ₂	Carbonato de cálcio (cal hidratada)
CaO	Óxido de cálcio (cal virgem)
CFC	Gás clorofluorocarboneto
CH	Hidróxido de cálcio
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
CO ₂	Dióxido de carbono (gás carbônico)
CSH	Silicato de cálcio hidratado
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
g	Gramas
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
g/dm ² . min ^{1/2}	Gramas por decímetro quadrado por raiz quadrada minuto
Hz	Hertz
kg/cm ³	Quilograma por centímetro cúbico
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
MgO	Óxido de Magnésio
min	Minuto
mm	Milímetro
mm ²	Milímetros quadrados
MPa	Mega Pascal
N	Newton
N/s	Newton por segundo
OH-	Hidroxila
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Trióxido de enxofre
W/m ²	Watt por metro quadrado
W/mK	Watt por metro por kelvin

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	O SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL	19
2.1.1	Impacto Ambiental	19
2.1.2	Sustentabilidade na construção civil	20
2.2	ARGAMASSA.....	24
2.2.1	Materiais Constituintes	25
2.2.1.1	<i>Cimento Portland.....</i>	25
2.2.1.2	<i>Areia</i>	26
2.2.1.3	<i>Cal.....</i>	27
2.2.1.4	<i>Água</i>	27
2.2.1.5	<i>Aditivos.....</i>	27
2.2.2	Tipos de Argamassas	28
2.2.3	Propriedades no Estado Fresco.....	31
2.2.4	Propriedades no Estado Endurecido.....	33
2.2.5	Argamassa de Revestimento.....	35
2.3	POLIESTIRENO EXPANDIDO	38
2.3.1	Aplicações na Construção Civil	39
2.4	NANOCELULOSE	40
2.4.1	Aplicações na Construção Civil	44
2.5	MICROESTRUTURA EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.....	47
2.5.1	Análises Microestruturais.....	48
3	METODOLOGIA	51
3.1	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	54
3.1.1	Cimento	54
3.1.2	Areia	54
3.1.3	Cal.....	56
3.1.4	Água	56

3.1.5	Aditivos	56
3.1.6	Poliestireno Expandido.....	57
3.1.7	Nanocelulose	57
3.2	DOSAGEM DAS ARGAMASSAS.....	58
3.3	PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS	60
3.4	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	62
3.4.1	Índice de Consistência.....	62
3.4.2	Tempo de Pega.....	63
3.4.3	Retenção de água.....	64
3.4.4	Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado.....	66
3.5	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	67
3.5.1	Densidade de Massa Aparente.....	67
3.5.2	Absorção de água e Porosidade	68
3.5.3	Resistência à Tração na Flexão	69
3.5.4	Resistência à Compressão	69
3.5.5	Módulo de Elasticidade.....	70
3.5.6	Variação Dimensional	70
3.5.7	Condutividade Térmica.....	71
3.5.8	Absorção Acústica e Perda de Transmissão	72
3.6	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	72
3.6.1	Microscopia Eletrônica de Varredura	73
3.6.2	Microscopia de Força Atômica.....	73
3.6.3	Nanoindentação Instrumentada.....	74
3.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	76
4.1.1	Areia	76
4.1.2	Nanocelulose	77
4.2	ENSAIO NO ESTADO FRESCO	82
4.2.1	Índice de Consistência.....	82
4.2.2	Tempo de Pega.....	84
4.2.3	Retenção de Água	85
4.2.4	Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado.....	86
4.3	ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO	87

4.3.1	Densidade de Massa Aparente, Massa Específica Real, Absorção de Água e Porosidade.....	87
4.3.2	Resistência à Tração na Flexão, Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade	88
4.3.3	Variação Dimensional	91
4.3.4	Condutividade Térmica.....	92
4.3.5	Absorção acústica e Perda de Transmissão	93
4.4	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	97
4.4.1	Microscopia Eletrônica de Varredura	97
4.4.2	Microscopia de Força Atômica.....	98
4.4.3	Nanoindentação Instrumentada.....	101
4.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	103
5	CONCLUSÕES	109
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
	REFERÊNCIAS.....	112

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o impacto ambiental está crescente no setor industrial da construção civil na última década, tendo como principal fator as mudanças climáticas causadas pela enorme emissão de gases poluentes na atmosfera. A produção de Cimento Portland (CP) é responsável por emitir 1 tonelada de gás carbônico (CO₂) por tonelada de CP produzido, o qual é contabilizado como 7 a 10% das emissões globais de CO₂ (MORADIKHOU; ESPARHAM; AVANAKI, 2020).

O relatório de *Getting The Numbers Right* mostrou que as empresas de cimento alcançaram uma redução de 19,2% de emissões de CO₂, além disso a eficiência energética melhorou em 18% e houve um aumento de 9,5 vezes maior do uso de combustíveis alternativos entre 1990 a 2018 (GCCA, 2020). No entanto, a demanda do cimento vem aumentando ao longo dos anos. De acordo com a projeção de consumo feita pelo SNIC (2019), a produção de cimento terá um aumento de pelo menos 75% entre 2014 a 2045, dependendo da demanda, esse acréscimo pode chegar a 126%.

Como o aumento do uso do cimento proporciona o aumento das emissões de gases poluentes, consequentemente, contribui para elevadas temperaturas do meio ambiente (SNIC, 2019). Neste contexto, um dos maiores desafios da sustentabilidade global é a redução do consumo de energia para promover o conforto térmico das edificações, devido à grande parte das edificações serem construídas com materiais de baixos níveis de isolamento térmico, pois a maioria dos imóveis utilizam alternativas simplistas como o uso de aparelhos de aquecimento e resfriamento para promover tal conforto (ASTE *et al.*, 2015).

Contudo, a necessidade de utilizar novas tecnologias para atender aos requisitos térmicos foi impulsionada pela regulamentação de sistema de certificações de edifícios, com isso tem aumentado a utilização de sistemas de isolamento térmico em estruturas de vedação (GOMES *et al.*, 2019). Conforme Becker, Effting e Schackow (2022), a aplicação de agregado leve em argamassa promove baixa condutividade térmica, auxiliando também no isolamento acústico, entretanto, seu uso pode causar desvantagens nas propriedades mecânicas do composto cimentício.

Sendo assim, a aplicação do poliestireno expandido (EPS) como substituto do agregado miúdo, além de ser biologicamente inerte e não tóxico, possui propriedades

interessantes, como, a baixa densidade, isolamento térmico, hidrofobicidade e resistência química quando exposto a ácidos (FERRÁNDIZ-MAS; GARCÍA-ALCOCEL, 2013).

E contribuindo para a crescente conscientização global sobre o uso de produtos mais ecológicos e substitutos dos materiais provenientes de petróleo, a nanocelulose surge como material verde que pode ser inserida na massa de cimento. Por ser derivada da celulose, o polímero natural mais abundante da Terra, possui notáveis qualidades físico-químicas, de biocompatibilidade e sustentabilidade (SUNASEE, 2021).

Neste sentido, este trabalho pretende avaliar o uso da nanocelulose em argamassas leves de EPS destinadas ao revestimento de edificações, determinando suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas e microestrutural, visando o desenvolvimento de um material ecoeficiente.

1.1 JUSTIFICATIVA

O aumento drástico da população resultou na crescente urbanização, provocando um maior consumo de recursos naturais e energia a fim de suprir toda demanda causada pelo processo de construção civil, conseqüentemente derivando mais emissões de gases poluentes, o que contribui para o aumento da temperatura e para a crise energética (MAHMOUDKELAYE *et al.*, 2018).

Conforme SNIC (2020), o acordo de Paris, negociado em 2015 na 21^a Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e ratificado pelo Brasil em 2016, tem em suas normativas o objetivo de limitar o aumento das temperaturas, neste século, em menos de 2 graus Celsius. Sendo assim, o acordo de Paris juntamente com o protocolo de Kyoto tem como objetivo estabelecer diretrizes para reduzir as emissões de CO₂ (ABU-JDAYIL *et al.*, 2019).

O aumento da eficiência energética dentro do setor da construção civil influencia diretamente na produção de gases do efeito estufa, tendo como peça chave, para melhor desempenho térmico, a envoltória das edificações feita de materiais isolantes, o que proporcionaria redução no consumo de energia para sistemas de climatização (SCHIAVONI *et al.*, 2016).

Uma das estratégias promissoras para reduzir e amenizar impactos ambientais é a construção de forma sustentável, sendo assim, a seleção de materiais que visam

menores prejuízos ao meio ambiente, proporcionando melhor uso dos recursos naturais (MATHIYAZHAGAN; GNANAVELBABU; PRABHURAJ, 2019). O uso de resíduos industriais como materiais na construção civil, seja como alternativa de substituição cimentícia ou de agregado, vem sendo implementada como uma vantagem na eficiência dos recursos (FERRÁNDIZ-MAS *et al.*, 2014).

O poliestireno expandido, por ser um material termoplástico e inerte, vem sendo utilizado para produzir compostos cimentícios com finalidade de reduzir a transmissão de calor (FERRÁNDIZ-MAS *et al.*, 2014). Além de ser um destino viável a sua dissolução em produtos da construção, devido ao seu subproduto causar a liberação de 57 substâncias químicas na sua combustão e também necessitar uma grande área, sendo assim inadequado o seu descarte em aterro sanitário (MILLING; MWASHA; MARTIN, 2020).

Contudo, o emprego do EPS como insumo, apesar de dispor de propriedades isolantes e de baixa densidade, tem a capacidade de reduzir as resistências mecânicas do composto cimentício (GARCÍA-ALCOCEL; FERRÁNDIZ-MAS, 2012).

Neste sentido, a nanocelulose, considerada um material de fonte renovável e biodegradável, é empregada como um aditivo de baixo impacto ambiental para otimizar as propriedades mecânicas de materiais à base de cimento (DHALI *et al.*, 2021). Além disso, a nanocelulose possui uma capacidade de isolamento térmico igual ao EPS, e com menor geração de resíduos, devido a celulose, seu produto matriz, apresentar tais características (SAHLOL *et al.*, 2021).

Segundo Barnat-Hunek *et al.* (2019), as argamassas leves com adição de nanocelulose possuem maior possibilidade de conseguir melhores propriedades de resistência e hidrofobização do que argamassas leves convencionais. Logo, o estudo do desempenho da nanocelulose adicionada à massa de cimento em argamassa leves é relevante por todo contexto sustentável e pela melhoria na sua capacidade mecânica e de isolamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho das argamassas leves de revestimento com o uso da nanocelulose adicionada ao cimento e a substituição parcial do agregado miúdo pelo EPS.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar as propriedades físicas e mecânicas no estado fresco e endurecido das argamassas desenvolvidas;
- b) Estudar a microestrutura da matriz cimentícia em contato com os agregados leves, bem como, a zona de transição da nanocelulose-cimento;
- c) Determinar o potencial de isolamento térmico da argamassa com nanocelulose;
- d) Analisar as características superficiais dos revestimentos por microscopia de força atômica (AFM) e ensaio de indentação;
- e) Através do ensaio de tubo de impedância, caracterizar o potencial de isolamento acústico da argamassa com nanocelulose e da argamassa de referência;
- f) Verificar se há mudança significativa nos resultados de índice de consistência e resistência à compressão da argamassa com nanocelulose, quando comparada com a argamassa de revestimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os conceitos referentes ao ramo da construção civil, seu impacto no meio ambiente e o desenvolvimento de produtos sustentáveis dentro desse setor. Posteriormente, são apresentados os conceitos sobre argamassa, além de estudos sobre análise microestrutural aplicada em compósitos cimentícios. Também, a definição e as propriedades dos materiais empregados no estudo: o poliestireno expandido e a nanocelulose. Por fim, a importância da microestrutura e ensaios que promovem a caracterização em escala nano e micro.

2.1 O SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Apesar da indústria da construção civil contribuir para a economia dos países em todo o mundo e estar ligada diretamente com geração de emprego, este setor enfrenta dificuldades para evoluir da manufatura tradicional para um nível de automação mais alto das suas atividades, o que favorece menor produtividade e alta fragmentação do processo de construção. Sendo esta última, responsável pelo aumento de geração de resíduos de construção e demolição (PESSOA *et al.*, 2021).

Araújo, Carneiro e Palha (2020) reafirmam a importância da construção civil para a economia, contudo ressaltam que esta é responsável pela utilização considerável dos recursos, consequentemente, por graves impactos ambientais. Os autores ainda ressaltam que o próprio setor tem a oportunidade de reduzir essas implicações insustentáveis por meio da minimização do consumo de material e energia, reutilização e reciclagem de materiais.

2.1.1 Impacto Ambiental

O aumento populacional promove o crescimento sem uma preparação ou organização do processo de urbanização (LI; LIU; SANG, 2012). Segundo Agudelo-Vera *et al.* (2011), mais da metade da população mundial vive em áreas urbanas, desta fração aumentará mais de 70% em 2050, o que contribui para esgotamento dos recursos naturais, promovendo um questionamento sobre sustentabilidade devido à rápida urbanização.

Segundo Mohamad *et al.* (2021), as práticas da construção civil ligadas à exploração de recursos naturais prejudicam o meio ambiente, favorecendo o

desequilíbrio ecológico e expando a um risco de esgotamento de recursos no futuro. Além disso, as fases de processamento da matéria-prima liberam poeira, ruídos e gases de efeito estufa, contribuindo para contaminação da natureza, consequentemente, intensificando as mudanças climáticas.

O setor da construção civil corresponde por 35% das emissões de CO₂, sendo 18% dessas emissões causadas pelo transporte e processamento de materiais. Já os resíduos gerados, nesta indústria, variam entre 45 e 65% dos resíduos do mundo. Desta forma, a construção civil é criticada por ser um dos setores que mais contribui negativamente para os aspectos relacionados ao meio ambiente, sendo responsável por consumir recursos renováveis e não renováveis, e também, de ser um dos maiores produtores de resíduos (LIMA *et al.*, 2021).

Neste sentido, o consumo de material e energia feito pela indústria da construção civil provoca impactos significativos no meio ambiente, como, poluição e resíduos. A construção de edifícios sustentáveis por meio de inserção de materiais sustentáveis é considerada a melhor chave para evitar tal degradação e esgotamento de recursos. E a seleção desses materiais de construção é uma atividade criteriosa que deve ser realizada no estágio inicial do projeto (SAHLOL *et al.*, 2021).

2.1.2 Sustentabilidade na construção civil

A melhora da ecoeficiência em materiais à base de cimento Portland está associada na introdução de materiais mais ecológicos, contudo, com propriedades mecânicas que agregam as estruturas, favorecendo os requisitos de sustentabilidade e de resiliência para infraestrutura do material (HISSEINE *et al.*, 2020).

Segundo Sandanayake *et al.* (2020), a introdução de diretrizes sustentáveis e avanços em Avaliações de Ciclo de Vida (ACV) favoreceu na criação de critérios mais rigorosos de sustentabilidade para materiais, sendo incorporados para seleção de fatores como disponibilidade local, comportamento do ciclo de vida, distância de transporte e custos do ciclo de vida, os quais são considerados para avaliar a sustentabilidade de materiais de construção alternativos.

Os materiais de construção são avaliados de acordo com a quantidade de resíduos enviados para aterro, quantidade de resíduos recicláveis, custo do ciclo de vida e índice de saúde e segurança. Além disso, são divididos em três parâmetros de seleção (ambiental, técnico e socioeconômico) que são classificados conforme seu

índice e nível de importância (SAHLOL *et al.*, 2021). O Quadro 1 mostra alguns parâmetros encontrados em sistemas de certificação ambiental.

Quadro 1 - Parâmetros usados nos sistemas de certificação (LEED, BREEAM, Pearl e Green Globes)

Reutilização de edifícios	Materiais fabricados no local
Gestão de resíduos de construção / gestão de resíduos operacionais / melhorar a construção e gestão de resíduos operacionais	Projetando para durabilidade e resiliência / uso de materiais de alta durabilidade
Reutilização de recursos / uso de materiais recuperados	Equipamentos internos (incluindo acabamentos e móveis)
Conteúdo reciclado / materiais reciclados	Uso de material leve
Materiais locais / regionais	Gerenciamento de resíduos orgânicos
Materiais rapidamente / facilmente renováveis	Pavimento modular e cobertura hardscape
Uso de elementos pré-fabricados	Gerenciamento de resíduos perigosos
Desconstrução, desmontagem e remontagem	Minimização o uso de materiais internos
Análise do custo do ciclo de vida (ACCV)	Eficiência de material
Materiais fabricados no local	Isolamento
Madeira certificada / eliminação de madeira tratada	Compra responsável de produtos de construção
Paisagismo duro e proteção de limites	Impactos do ciclo de vida

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Sahlol *et al.* (2021).

Leão *et al.* (2012) relatam que a aplicação de materiais tradicionais em escala nanométrica leva às modificações na estrutura, o que resultará em materiais com propriedades novas e melhores, com maior resistência, mais leves e de baixo custo. Segundo Hisseine *et al.* (2020), a nanoengenharia em materiais cimentícios surgiu recentemente como uma ferramenta avançada que permite o projeto de materiais com desempenho aprimorado.

Materiais de base biológica produzidos a partir de biomassa lignocelulósica são substitutos ideais para recursos petroquímicos por ser de baixo custo, neutra em carbono e renovável. Desta forma, proporcionando um futuro mais verde com a

redução da exploração de combustíveis fósseis, sendo um viés para sustentabilidade ambiental (XIE *et al.*, 2023).

Conforme Naji *et al.* (2014), métodos de construção, que utilizam estruturas e materiais leves padronizados, são aplicados devido alguns benefícios econômicos, estruturais e ambientais. Esses sistemas de construção são considerados limpos, rápidos e fáceis, além de precisarem de menos recursos de construção devido sua baixa densidade. Os autores ainda afirmam que essas características únicas de materiais leves resultam em cargas ambientais mais baixas e com maior resistência sísmica.

Segundo Pessoa *et al.* (2021), a aplicação de isolamento térmico é considerada como principal fator que minimiza a demanda de energia, principalmente, em edifícios que necessitam refrigeração, além disso, a espessura do material de isolamento deve ser otimizada para que melhore o custo-benefício do seu emprego. Neste sentido, os autores identificam três técnicas promissoras para mitigar as questões climáticas e melhorar o desempenho térmico das paredes de edifícios: aplicação de materiais de isolamento térmico nos vazios internos das camadas estruturais da parede impressa em 3D; imprimir camadas diferentes ao mesmo tempo e a partir de bicos de extrusão diferentes; ou alterar a composição da argamassa.

De acordo Abu-Jdayil *et al.* (2019), essa aplicação de isolamentos térmicos em construções residenciais e comerciais maximiza a eficiência dos sistemas de refrigeração e aquecimento, além de diminuir no custo de funcionamento e de processo de instalação desses equipamentos. Tais reduções das perdas de energia favorece em aspectos positivos ao meio ambiente, reduzindo a emissão de gases, logo, a opção mais eficaz em relação às alterações climáticas está na melhoria da eficiência energética através da otimização do isolamento das construções.

A seleção de materiais de isolamento térmico adequados favorece a promoção da sustentabilidade, devido ao desempenho térmico das paredes ter grande influência no consumo de energia dos edifícios, consequentemente, reduzindo a quantidade desta energia que utiliza combustíveis, contribuindo para redução das emissões de CO₂ (PESSOA *et al.*, 2021).

Schiavoni *et al.*, (2016) também afirmam que o consumo de energia do edifício depende fortemente das propriedades de sua envoltória. Contudo, os autores relatam que a escolha do material correto, a sua espessura e a sua posição são características

que influenciam na obtenção de boas propriedades de conforto térmico. Além disso, algumas habilidades são importantes para seleção deste material, como isolamento acústico, resistência ao fogo, impermeabilidade ao vapor de água, desempenho adequado ao longo de todo o ciclo de vida do edifício e seu impacto no meio ambiente.

Segundo Hill, Norton e Dibdiakova (2018), à medida que são utilizados materiais que promovem um melhor desempenho de isolamento dos edifícios, mais atenção deve ser incorporada na produção desses materiais, ou seja, analisar a energia e emissões de carbono causadas por sua fabricação. Os autores ainda ressaltam que para utilização e avaliação de forma sustentável dos recursos e do impacto das obras de construção no ambiente, deve-se verificar normativas de categoria do produto e sua declaração ambiental, promovendo a seleção criteriosa dos materiais de construção levando em consideração os impactos ambientais.

A relação entre as normativas internacionais para avaliação da sustentabilidade na construção civil é expressa no Quadro 2.

Quadro 2 - Conjunto de Padrões Internacionais de sustentabilidade relacionados.

	Aspectos Ambientais	Aspectos Econômicos	Aspectos Sociais
Fundamentos metodológicos	ISO 15392 ISO 21932 ISO 21929-1		
Edifícios	ISO 21931-1	---	---
Produtos de Construção	ISO 21930	---	---

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de ISO (2017).

A ISO 21930 (ISO, 2017) estabelece os princípios, especificações e requisitos para desenvolver uma declaração ambiental para produtos e serviços de construção, elementos de construção e sistemas técnicos integrados usados em qualquer tipo de obra de construção, ou seja, complementa o que é normatizado na ISO 14025, mas com exclusividade em produtos e serviços de construção. No Quadro 3 estão algumas diretrizes sobre a categoria principal para produtos e serviços de construção civil dispostos nesta norma.

Quadro 3 – Diretrizes estabelecida pela ISO 21930

(I)	Inclui as regras de cálculo da análise de inventário do ciclo de vida, os indicadores ambientais pré-determinados e os resultados da avaliação do impacto do ciclo de vida que são reportados na declaração ambiental do produto;
(II)	Descreve quais etapas do ciclo de vida que são consideradas em um determinado tipo de declaração ambiental do produto, quais processos devem ser incluídos nas etapas do ciclo de vida e como as etapas são subdivididas em módulos de informação;
(III)	Define regras para o desenvolvimento de cenários;
(IV)	Inclui as regras para relatar informações ambientais e técnicas relevantes que não são cobertas pela avaliação do ciclo de vida;
(V)	Define os elementos centrais a serem incluídos em uma declaração ambiental do produto;
(VI)	Estabelece a estrutura de um relatório de projeto;
(VII)	Define as condições em que os produtos de construção podem ser comparados, com base nas informações prestadas por declaração ambiental do produto;
(VIII)	Fornece requisitos e diretrizes sobre categoria de produto principal para subcategorias de produtos de construção;
(IX)	Inclui requisitos obrigatórios e inalteráveis para qualquer categoria de produto principal com base na norma ISO 21930.

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de ISO (2017).

2.2 ARGAMASSA

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define argamassa como uma mistura homogênea com características de aderência e endurecimento, composta por agregado miúdo, aglomerante inorgânico, água e com ou sem a presença de aditivos.

Segundo Recena (2012), as argamassas são elementos de um sistema e não um material, tendo como funções essenciais de: impermeabilizar o substrato de aplicação, proporcionar acabamento de qualidade ao parâmetro de revestimento, absorver as deformações que são projetadas na estrutura, regularizar e/ou proteger mecanicamente substratos constituídos por sistemas de impermeabilização ou isolamento termoacústico.

Para Lisboa, Alves e Melo (2017), a argamassa é um material de construção civil, obtida por uma mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo ter aditivos e adições de minerais. Esse material é caracterizado pela aderência e endurecimento, sendo utilizado como revestimento para reboco, revestimento de única camada para parede ou teto, contrapiso para

regulação de pisos, assentamento e reajustamento de revestimento de cerâmica ou pedra.

2.2.1 Materiais Constituintes

As argamassas comumente utilizadas em obras são constituídas de areia natural lavada, aglomerantes (Cimento Portland e cal hidratada) e água, podendo ou não conter aditivos dependendo da sua destinação (FIORITO, 2009).

2.2.1.1 Cimento Portland

De acordo com Ambrozewicz (2012), o cimento é um material pulverulento considerado como aglutinante hidráulico, devido sua característica de endurecer sob a ação da água, e após endurecido permanecer estável mesmo submetido novamente à ação da água.

O Cimento Portland (CP), conforme a NBR 11172 (ABNT, 1990), é um aglomerante artificial derivado do clínquer Portland e a adição de um ou mais sulfatos de cálcio. O CP é classificado conforme a sua composição química (Tabela 1).

Tabela 1 - Tipos de cimentos Portland normatizados no Brasil

Tipo	Sigla	Classe (MPa)	Conteúdo			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler Calcário
Comum	CPI	25,32,40	100	0		
Comum com adição	CPI-S	25,32,40	99-95	1-5		
Composto com escória	CPII-E	25,32,40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com pozolana	CPII-Z	25,32,40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com fíler	CPII-F	25,32,40	94-90	0	0	6-10
Alto-Forno	CPIII	25,32,40	65-25	35-70	0	0-5

Tipo	Sigla	Classe (MPa)	Conteúdo			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler Calcário
Pozolânico	CPIV	25,32	85-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência inicial	CPV-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a sulfatos	RS	25,32,40	(*)			
Baixo calor de hidratação	BC	25,32,40				
Branco estrutural	CPB	25,32,40	-	-	-	-

(*) A composição depende do tipo original do qual é derivado.

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de BAUER (2019).

2.2.1.2 Areia

Segundo Ambrozewicz (2012), a areia, agregado natural, é definida geologicamente como sedimento inconsolidado com limites de diâmetro entre 0,075 e 4,8 mm. As areias normalmente usadas como agregado miúdo na construção civil são constituídas principalmente por quartzos e extraída de leitos de rios e cavas (ALBUQUERQUE, 2000).

A areia empregada na argamassa influencia diretamente no composto final, onde sua granulometria determina o volume de vazios a ser preenchido pela pasta aglomerante. Além disso, afeta a capacidade de aderência, onde areias com grãos de maiores dimensões, ou seja, areias muito grossas prejudicam a trabalhabilidade, consequentemente a sua aplicação no substrato, reduzindo a extensão de aderência. De forma geral, quanto maior seu módulo de finura, mais trabalhável e maior sua resistência de aderência, logo, para bons resultados de aderência, a areia deve conter uma distribuição granulométrica continua (RECENA, 2012).

2.2.1.3 Cal

A cal, material pulverulento muito fino, promove a trabalhabilidade e retenção de água das argamassas. Na construção civil, é usada na forma de cal virgem (CaO) e cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). A cal virgem, substância bastante higroscópica e derivada da calcita (CaCO_3), deve seguir as diretrizes da NBR 6453 para ser aplicada na construção, já a cal hidratada, originada pela hidratação da cal virgem, é regulamentada pela NBR 7175 (BAUER, 2019).

E conforme Ambrozewicz (2012), o uso da cal, como aglomerante nas argamassas, favorece algumas propriedades do composto, sendo elas: maior plasticidade; maior retenção de água; maior incorporação da areia, ou seja, facilidade da pasta de cal encobrir os grãos de areia; maior resistência à compressão e capacidade de absorver deformações.

2.2.1.4 Água

De acordo com NM 137 (CMN, 1997), a água utilizada para amassamento e cura de argamassa deve seguir critérios físicos químicos a fim de estabelecer o mínimo de impurezas possível na mistura. E conforme a NBR 16072 (ABNT, 2012), a água utilizada para argamassa deve seguir as diretrizes estabelecidas na NBR 15900-1, caso a mesma não seja fornecida por uma rede pública de abastecimento de água.

A quantidade de água dentro da argamassa influencia diretamente em algumas propriedades, como, plasticidade que aumenta na medida que aumenta a água, no entanto, prejudica a resistência mecânica, e caso sua quantidade seja em excesso favorece para retração com intensa fissuração, comprometendo a aderência ao substrato (RECENA, 2012).

2.2.1.5 Aditivos

Os aditivos são empregados como materiais alternativos a fim de minimizar os possíveis problemas com a argamassa por meio de soluções técnicas, como por exemplo, o uso de agentes incorporadores de ar e aditivos superplastificantes, os quais têm sido utilizados para melhorar a trabalhabilidade das argamassas (GARCÍA-ALCOCEL; FERRÁNDIZ-MAS, 2012).

De acordo com Recena (2012), o uso de aditivos incorporadores de ar é destacado pela capacidade de proporcionar impermeabilização e redução de água nas argamassas, devido ao aumento da quantidade de ar presente na mistura, interrompendo o fluxo hidráulico responsável pelo desenvolvimento dos canais capilares.

Os superplastificantes, conhecidos como redutores de água de alta eficiência, são caracterizados pela capacidade de reduzir a água durante o amassamento da argamassa, promovendo uma maior trabalhabilidade (LISBOA; ALVES; MELO, 2017). Esses aditivos diferem entre si pela sua composição e pelo grau de dispersão e plasticidade que proporcionam para as misturas, geralmente são à base de éter-policarboxilato ou de polímeros de formaldeído-naftaleno sulfonado (BAUER, 2019).

2.2.2 Tipos de Argamassas

Os tipos de argamassas estão relacionados com suas funções, requisitos de desempenho, ou seja, com suas propriedades (LISBOA; ALVES; MELO, 2017). Conforme apresentado na Tabela 2, os tipos de argamassas são classificados por algumas características como composição, consistência, densidade e outros. Já a Tabela 3 mostra uma divisão quanto à aplicação da argamassa.

Tabela 2 - Classificação das argamassas

Critério de classificação	Denominação
Quanto à natureza	• Argamassa aérea; • Argamassa hidráulica.
Quanto ao aglomerante	• Argamassa de cal; • Argamassa de cimento; • Argamassa de cimento e cal; • Argamassa de gesso; • Argamassa de cal e gesso.
Quanto ao número de aglomerante	• Argamassa simples; • Argamassa mista.
Quanto à consistência da argamassa	• Argamassa seca • Argamassa plástica; • Argamassa fluída.
Quanto à plasticidade da argamassa	• Argamassa pobre ou magra; • Argamassa média ou cheia; • Argamassa rica ou gorda.

Critério de classificação	Denominação
Quanto à densidade de massa da argamassa	• Argamassa leve; • Argamassa normal; • Argamassa pesada.
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	• Argamassa preparada em obra; • Mistura semipronta para argamassas; • Argamassa industrializada; • Argamassa dosada em central.

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Carasek (2010).

Tabela 3 - Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção

Função	Tipos
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria); Argamassa de fixação (ou encunhamento) – alvenaria de vedação.
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de Chapisco; Argamassa de emboço; Argamassa de reboco; Argamassa de camada única; Argamassa para revestimento decorativo monocamada.
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso; Argamassa de alta resistência para piso.
Para revestimento cerâmico (paredes e pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante; Argamassa de rejuntamento.
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Carasek (2010).

Segundo BAUER (2019), as argamassas devem atender alguns requisitos em suas propriedades para satisfazer na sua aplicação, como, trabalhabilidade adequada, retenção de água, aderência com a superfície aplicada e resistência à compressão. As argamassas necessitam de algumas características únicas para cumprir sua função, além das já citadas, como: conter uma durabilidade compatível com a vida útil do empreendimento; absorver deformações geradas pela movimentação da estrutura ou de materiais que à compõem, ou seja, possuir um módulo de elasticidade baixo; ter estabilidade química frente aos agentes de deterioração e sem a ocorrência de alterações em seus constituintes representadas por reações retardadas (RECENA, 2012).

Lisboa, Alves e Melo (2017) ratificam que as habilidades primordiais para definir o desempenho das argamassas quanto à sua funcionalidade são: trabalhabilidade, aderência, resistência mecânica, capacidade de absorver deformações, retração e retenção de água. Carasek (2010) confirma o que foi dito anteriormente sobre as propriedades únicas de argamassa para cada aplicação ou finalidade. A Tabela 4 mostra essa relação das características da argamassa com sua função.

Tabela 4 - Principais requisitos e propriedades das argamassas para as diferentes funções

Tipo	Função	Propriedade
Argamassa de Assentamento de alvenaria (elevação)	- Unir as unidades de alvenaria e ajudá-las a residir aos esforços laterais; - Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos; - Absorver deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita; - Selar as juntas.	- Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e retenção de água); - Aderência; - Capacidade de absorver deformações; - Resistência mecânica.
Chapisco	- Garantir aderência entre a base e o revestimento de argamassa; - Contribui com a estanqueidade da vedação.	- Rugosidade; - Aderência.
Emboço e camada única	- Proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo; - Integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com diversas funções (estanqueidade, etc.); - Regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos.	- Trabalhabilidade (plasticidade e adesão inicial); - Baixa Retração; - Aderência; - Baixa permeabilidade à água; - Capacidade de absorver deformações; - Resistência mecânica.
Contrapiso	- Regularizar a superfície para receber acabamento (piso).	- Aderência; - Resistência mecânica.
Argamassa colante (assentamento de revestimento cerâmico)	- Colar a peça cerâmica ao substrato; - Absorver deformações naturais a que o sistema de revestimentos cerâmico estiver sujeito.	- Trabalhabilidade (plasticidade, retenção de água, tempo em aberto, deslizamento e adesão inicial); - Aderência; - Capacidade de absorver deformações (flexibilidade) – principalmente para fachadas.

Tipo	Função	Propriedade
Argamassa de rejuntamento (das juntas de assentamento das peças cerâmicas)	- Vedar as juntas; - Permitir a substituição das peças cerâmicas; - Absorver pequenas deformações do sistema.	- Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e adesão inicial); - Baixa retração; - Aderência; - Capacidade de absorver deformações (flexibilidade) – principalmente para fachadas.
Argamassa de reparo de estrutura de concreto	- Reconstrução geométrica de elementos estruturais em processo de recuperação.	- Trabalhabilidade; - Aderência ao concreto e armadura originais; - Baixa retração; - Resistência mecânica; - Baixa permeabilidade e absorção de água (durabilidade).

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Carasek (2010).

2.2.3 Propriedades no Estado Fresco

Segundo Bauer (2019), uma argamassa que detem boa trabalhabilidade possui uma maior extensão de aderência ao substrato devido à facilidade na sua aplicação proporcionada pela consistência adequada. Conforme Carasek (2010), a trabalhabilidade não é uma propriedade simples, pois depende de várias propriedades, as quais são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade

Propriedade	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade de a argamassa deformar-se sob ação de cargas.
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
Retenção da água e de consistência	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água.
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade. Argamassas de consistência fluída apresentam maior tendência à exsudação.

Propriedade	Definição
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume do material.
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato.

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Carasek (2010).

A NBR 16541 (ABNT, 2016) recomenda uma consistência de $260\text{mm} \pm 5\text{mm}$, quando não houver informação de água para a mistura da argamassa. Carasek (2010) afirma que a consistência do material é classificada e relacionada de acordo com quantidade da pasta aglomerante ao redor dos agregados: seca, plástica ou fluída.

Segundo Recena (2012), uma argamassa com muita fluidez, ou seja, com pouca consistência não é muito trabalhável, da mesma forma que uma argamassa muito consistente possuirá sua trabalhabilidade prejudicada. Essa propriedade varia e é ajustável conforme a quantidade de água na mistura (CARASEK, 2010)

Por outro lado, a plasticidade da argamassa é influenciada pelo tipo e quantidade de aglomerante, pela presença ou ausência de aditivo, pelo tempo e intensidade da mistura (CARASEK, 2010).

A coesão é a propriedade responsável pela aglutinação das partículas que compõem a pasta, logo uma argamassa com maior plasticidade (gorda) possuirá elevada coesão (RECENA, 2012).

A retenção de água entra como uma das principais propriedades do estado fresco da argamassa, devido a sua capacidade de controlar o deslocamento de água da mistura que não foi utilizada na hidratação do cimento, proporcionando a aderência da argamassa no substrato (BAUER, 2019). Segundo Carasek (2010), a retenção de água também influencia as propriedades no estado endurecido, relata também que o desempenho dessa propriedade varia conforme o tipo de argamassa, sendo em ordem decrescente dessa propriedade: argamassas com aditivo retentor de água, argamassas mistas de cimento e cal, argamassas com aditivos incorporadores de ar e argamassas de cimento.

Recena (2012) define a retenção de água como a habilidade da argamassa liberar lentamente a água aplicada na sua composição para o meio ou base porosa a qual foi empregada, ainda ressalta que essa propriedade é responsável por promover o ganho progressivo de resistência, garantindo a redução de processos de fissuração e também evitando o deslocamento de porções de argamassa de revestimento, favorecendo para homogeneidade das alvenarias.

A densidade de massa influencia na trabalhabilidade devido sua preparação, onde uma argamassa considerada leve favorece maior produtividade na sua execução, devido ser um material que reduz o esforço na aplicação manual, sendo assim, mais trabalhável a longo prazo (LISBOA; ALVES; MELO, 2017). Conforme Recena (2012), a quantidade de ar aprisionado na mistura implicará na redução de sua densidade, e também contribuiria para promover isolamento térmico às argamassas.

Segundo Carasek (2010), a densidade varia com o teor de ar incorporado e com as massas dos materiais que à constituem, principalmente dos agregados. Desta forma, a classificação dessa propriedade é apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco

Argamassa	Densidade de massa (g/cm ³)	Principais agregados empregados	Uso/ Observações
Leve	<1,40	Vermiculita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	1,40 a 2,30	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicação convencional
Pesada	>2,30	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de ABNT (2005).

A capacidade de união inicial da argamassa fresca no substrato é definida como adesão inicial, tal propriedade está relacionada com algumas características da pasta aglomerante, particularmente, a sua tensão superficial, que por sua vez depende da sua composição, sendo inversamente proporcional ao teor de cimento, ou seja, diminui a tensão superficial conforme aumenta a quantidade de cimento, isto também ocorre com a adição de cal à argamassa de cimento, contribuindo para melhor propagação da mistura sob o meio aplicado (CARASEK, 2010).

2.2.4 Propriedades no Estado Endurecido

A retração da argamassa é um processo complexo que se inicia no estado fresco e continua após endurecimento do material, esse fenômeno é resultado da perda de água em excesso da mistura, o qual ocorre devido reações químicas de hidratação do cimento (CARASEK, 2010).

Segundo Coelho, Torgal e Jalali (2009), a retração é uma propriedade associada com a variação de volume da argamassa, ou seja, relacionada com dimensão da sua espessura, além disso, afirmam que essa propriedade interfere diretamente na durabilidade, devido ter relação com o surgimento de fissuras, as quais permitem a entrada de substâncias nocivas que possibilitam a degradação do material.

Conforme Bauer (2019), argamassas simples à base de cimento com excesso de aglomerante e com espessuras excessivas são suscetíveis à retração natural, favorecendo para o deslocamento da argamassa do substrato devido tensões elevadas de tração entre a base e a pasta. Esse acontecimento provoca a redução de resistência em consequência da falta de aderência do meio que foi aplicado, ademais, essa tensão de tração influencia diretamente na capacidade de deformação, ou seja, no módulo de elasticidade da argamassa (CARASEK, 2010).

A aplicação da cal nas argamassas à base de cimento proporciona uma redução significativa do módulo de elasticidade, contudo, sem interferir, da mesma forma, na resistência à tração, logo, esse tipo de mistura possui a capacidade de absorver melhor as deformações provocadas pelas tensões internas, evitando assim as fissuras e também contribuindo para a vida útil do material (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

Segundo Lisboa, Alves e Melo (2017), a resistência e extensão do contato entre a argamassa e sua base é denominada aderência, sendo esta propriedade dependente do substrato que será aplicada a argamassa.

Carasek (2010) relata que a aderência das argamassas resulta de outras propriedades como: a resistência de aderência à tração, a resistência de aderência ao cisalhamento e a extensão de aderência. Além disso, o autor afirma que há cinco tipos de ruptura, denominadas de A, B, C, D e E, sendo a primeira classificação como ruptura do tipo adesiva, a qual geralmente deve-se pelo surgimento de patologias; a segunda e terceira denominam-se rupturas do tipo coesiva, que acontecem no interior da argamassa, a quarta causada pela resistência superficial inadequada; e a última ocorre por um defeito de colagem.

A NBR 13528-1 (ABNT, 2019) define a resistência de aderência à tração como o limite da tensão suportada por uma argamassa na interface da avaliação, quando sujeita a uma força ortogonal de tração. Essa propriedade possui alguns requisitos

sobre sua aplicação em emboço e camada úmida (ABNT, 2013), que são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Limites de resistência de aderência à tração.

Local		Acabamento	Resistência de aderência à tração (MPa)
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	≥ 0,20
		Cerâmica ou laminado	≥ 0,30
	Externa	Pintura ou base para reboco	≥ 0,30
		Cerâmica	≥ 0,30
Teto			≥ 0,20

Fonte: ABNT (2013).

A resistência à compressão da argamassa interfere no módulo de elasticidade, onde uma argamassa que apresenta elevada resistência mecânica tem sua capacidade de absorver deformações comprometida (LISBOA; ALVES; MELO, 2017). Contudo, as diretrizes aplicadas na norma C270 (ASTM, 2019) definem que as argamassas compostas pela cal precisam apresentar resistência à compressão superior a 2,4MPa.

O ensaio para determinar a resistência à compressão das argamassas, no Brasil, segue as normativas estabelecida na NBR 13279, a qual determina o uso de corpos de prova prismáticos (BAUER, 2019).

2.2.5 Argamassa de Revestimento

De acordo com NBR 13529 (ABNT, 2013), argamassas de revestimento são denominadas como cobrimento de uma superfície com aptidão para receber acabamento decorativo ou final. Esse tipo de argamassa é mais empregado na construção civil, sendo destinado para revestir parede, muros e tetos, tais aplicações precisam de algumas características específicas, tendo como propriedades de maior relevância para esse emprego a retração e a retenção de água (LISBOA; ALVES; MELO, 2017).

Segundo Recena (2012), as argamassas de revestimento necessitam de algumas propriedades para satisfazer todas suas funções, tais como: adequada

resistência de aderência ao substrato, isolamento termoacústico, além de precisar promover impermeabilidade à base e apresentar acabamento adequado, sendo este último relevante devido estar associado tanto para o fator estético como para amenizar o surgimento de fissuras.

As principais atribuições de uma argamassa de revestimento são: exercer proteção contra intemperismos (revestimentos externos); possuir isolamento térmico de 30% e de um acústico de 50%; possuir estanqueidade à água entre 70 e 100%; apresentar resistência ao fogo, ao desgaste e abalos superficiais; servir como base para acabamento; e promover regularização dos elementos de vedação (CARASEK, 2010).

Conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas destinadas para revestimento de paredes e tetos devem seguir critérios, os quais são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Requisitos estabelecidos pela NBR 13281 para argamassas de revestimentos.

Propriedade	Classe	Método de Ensaio
Resistência à Compressão (MPa)	P1: $\leq 2,0$	ABNT NBR 13279
	P2: 1,5 a 3	
	P3: 2,5 a 4,5	
	P4: 4,0 a 6,5	
	P5: 5,5 a 9	
	P6: $> 8,0$	
Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido (kg/m ³)	M1: ≤ 1200	ABNT NBR 13280
	M2: 1000 a 1400	
	M3: 1200 a 1600	
	M4: 1400 a 1800	
	M5: 1600 a 2000	
	M6: > 1800	
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	R1: $\leq 1,5$	ABNT NBR 13279
	R2: 1,0 a 2,0	
	R3: 1,5 a 2,7	
	R4: 2,0 a 3,5	
	R5: 2,7 a 4,5	
	R6: $> 3,5$	
Coeficiente de Capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	C1: $\leq 1,5$	ABNT NBR 15259
	C2: 1,0 a 2,5	
	C3: 2,0 a 4,0	

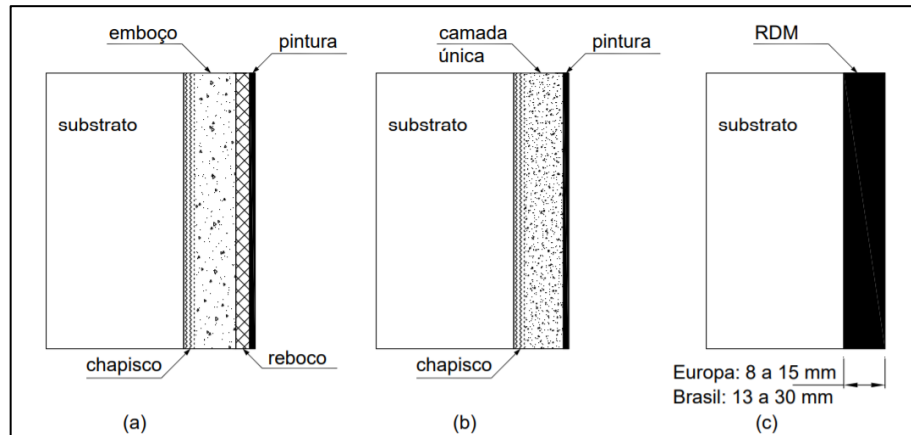
Propriedade	Classe	Método de Ensaio
	C4: 3,0 a 7,0	
	C5: 5,0 a 12,0	
	C6: >10,0	
Densidade de Massa no Estado Fresco (kg/m ³)	D1: ≤1400	ABNT NBR 13278
	D2: 1200 a 1600	
	D3: 1400 a 1800	
	D4: 1600 a 2000	
	D5: 1800 a 2200	
	D6: >2000	
Retenção de Água (%)	U1: ≤78	ABNT NBR 13277
	U2: 72 a 85	
	U3: 80 a 90	
	U4: 86 a 94	
	U5: 91 a 97	
	U6: 95 a 100	
Resistência Potencial de Aderência à Tração (MPa)	A1: ≤0,20	ABNT NBR 15258
	A2: ≥0,20	
	A3: ≥0,30	

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de ABNT (2005).

As argamassas de revestimentos são constituídas por camadas, as quais são subdivididas conforme a sua composição, conseqüentemente, aplicação (RECENA, 2012), conforme mostra a Figura 1. Segundo Lisboa, Alves e Melo (2017), essas camadas de revestimento seguem a seguinte definição:

- Chapisco: camada usada como preparo da base com finalidade de melhorar absorção e aderência do revestimento, distribuída de forma contínua ou não;
- Emboço: usada para uniformizar e regularizar a superfície para receber algum revestimento decorativo;
- Reboco: camada de revestimento empregado para cobrir e emboçar antes do acabamento final (geralmente, pintura);
- Camada única: como o próprio nome diz, é revestimento com um único tipo de argamassa aplicado na superfície;
- Revestimento decorativo (monocamada): camada de revestimento que possui o objetivo de regularizar e decorar.

Figura 1 - Diferentes alternativas de revestimentos de parede: (a) emboço + reboco + pintura (sistema mais antigo); (b) camada única + pintura; (c) revestimento decorativo (RDM).

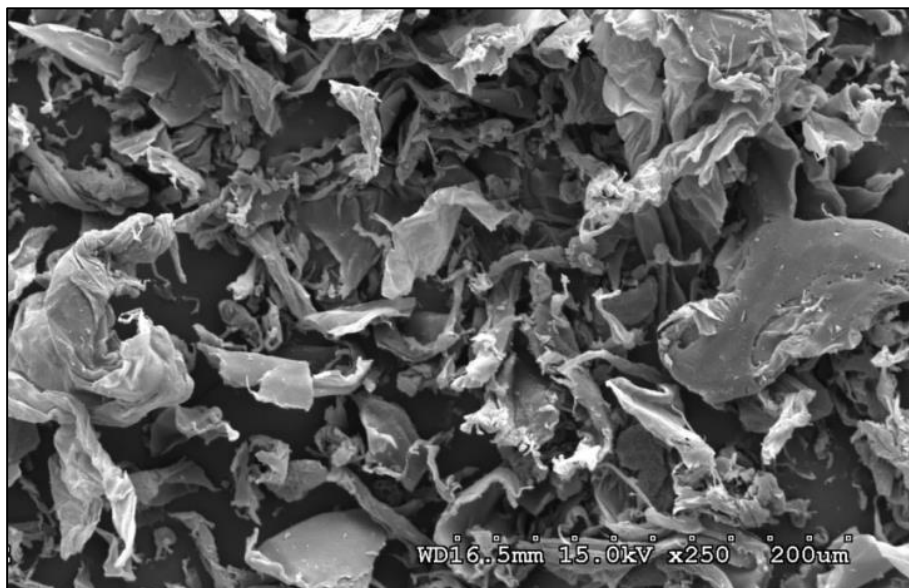


Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Carasek (2010).

2.3 POLIESTIRENO EXPANDIDO

O poliestireno expandido foi descoberto na Alemanha em 1949 pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchoz. Este material ganhou grande destaque na construção civil pela sua capacidade de isolamento, ser leve, ter resistência, facilidade de manuseio e apresentar baixo custo na sua produção (LISBOA; ALVES; MELO, 2017). Segundo García-Alcotel e Ferrándiz-Mas (2012), o EPS polímero termoplástico espumado é considerado agregado artificial e possui uma densidade inferior a 300kg/m^3 (Figura 2).

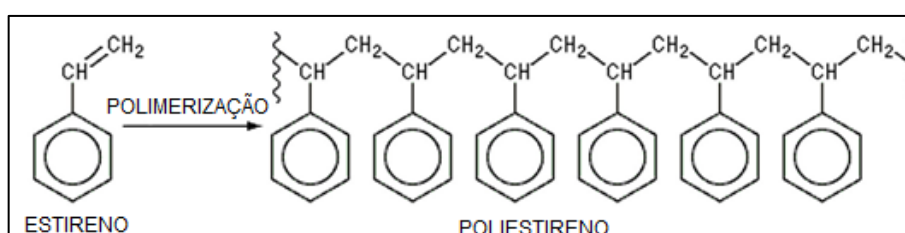
Figura 2 - Imagem do MEV da morfologia do EPS



Fonte: García-Alcotel e Ferrándiz-Mas (2012)

O EPS, material plástico celular rígido, é derivado da polimerização do estireno em água, cujo processo produtivo não usa o gás clorofluorocarbono (CFC) ou qualquer um de seus substitutos, sendo utilizado como agente expensor o hidrocarboneto, o qual se deteriora com mais rapidez pela reação fotoquímica gerada pelos raios solares, não comprometendo o meio ambiente (ABRAPEX, 2006). Segundo Uttaravalli, Dinda e Gidla (2020), a produção do poliestireno é feita a partir do monômero de estireno, geralmente pela sua polimerização em suspensão, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema de reação provável de polimerização de estireno.



Fonte: Uttaravalli, Dinda e Gidla (2020).

As principais vantagens de aplicação do EPS, conforme o ABRAPEX (2006) estão relacionadas com a baixa condutividade térmica, baixa densidade, elevada resistência mecânica, impermeabilidade, praticidade de manuseio, multifuncionalidade, isolante elétrico, resistência à compressão e ao envelhecimento.

2.3.1 Aplicações na Construção Civil

Conforme Uttaravalli, Dinda e Gidla (2020), há muitos estudos sobre a aplicação do subproduto do EPS no setor da construção civil, sendo, geralmente, inserido como agregado com intuito de aprimorar as propriedades dos materiais de construção.

O EPS permite a fabricação de materiais de construção leves, podendo ser utilizado na fabricação de concreto leve com finalidade de vedação (painéis de revestimento, paredes de cortina, sistema de piso compostos e blocos de concreto); pode ser empregado como sub-base de pavimentos rodoviários e ferroviários; utilizado para estruturas marinhas; e também como absorvedor de energia para proteção de estruturas militares (GARCÍA-ALCOCEL; FERRÁNDIZ-MAS, 2012).

O uso do poliestireno expandido, como substituto de materiais cerâmicos em lajes nervuradas, permite grande economia de cimbramentos e tempo, reduz

sensivelmente a mão-de-obra e o entulho na montagem dessas lajes (ABRAPEX, 2006).

Segundo o estudo de Schackow *et al.* (2014), o concreto leve de EPS é mais fácil de aplicar, além de possuírem densidade variando entre 1,07 e 1,25 g/cm³, reafirmando a categoria de material leve, contudo, foram classificados como não estruturais, ou seja, destinados apenas para vedação, isso devido a sua baixa resistência à compressão, a qual ainda é superior ao valor de resistência encontrado no concreto leve com vermiculita.

O estudo de Zhang, Chen e Yu (2019) mostra o uso do EPS na produção de argamassa leve de alto desempenho e a utilização de aditivos com a finalidade de amenizar os efeitos negativos que o EPS causa na resistência mecânica da argamassa, além de melhorar as condições de condutividade térmica e o encolhimento causado pela retração.

Conforme estudo realizado por Solomon e Hemalatha (2020), o EPS pode ser empregado na forma de concreto isolado, o qual possui propriedades de aprimoramento do isolamento e de outras propriedades mecânicas, alterando a falha de frágil, existente em sistema de forma de concreto isolado, para dúctil. Os autores afirmam que a introdução do EPS, no material estudado, reduz a demanda energética, proporcionando um sistema de construção sustentável com resistência estrutural aprimorada.

2.4 NANOCELULOSE

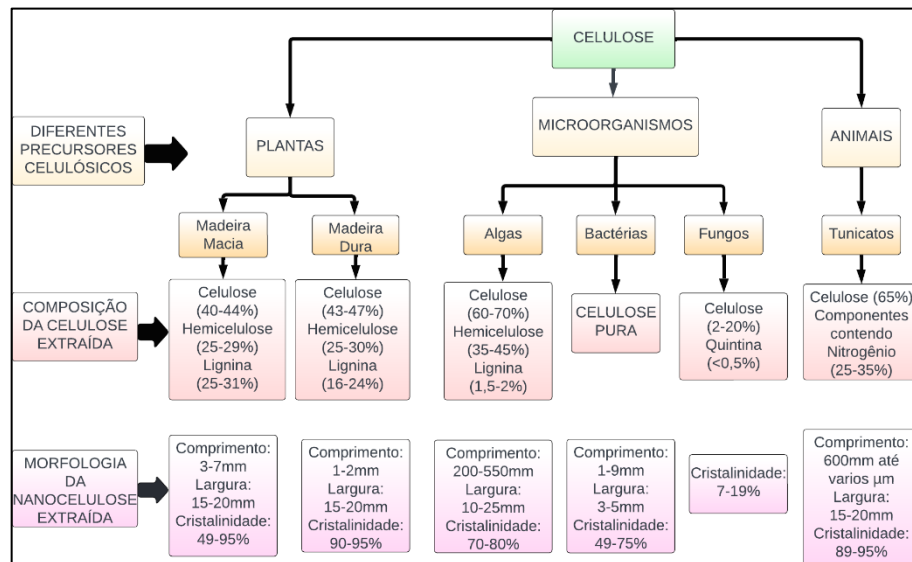
A nanocelulose é polissacarídeo linear composto por unidades de celobiose, que são um dímero de glicose covalente ligada por ligações glicosídicas entre grupo OH em átomos de C4 e C1 das unidades de glicose (DHALI *et al.*, 2021).

Segundo Leão *et al.* (2012), a nanocelulose é originada através de qualquer produto que tenha celulose, sendo esta definida como um polímero semicristalino. Tal cristalinidade varia conforme o seu processo de obtenção, a qual influencia diretamente no desempenho das propriedades mecânicas e, conseqüentemente, na capacidade de reforço em compósitos.

A celulose possui vários propulsores para sua produção, podendo ser desenvolvida a partir de plantas, micro-organismos e animal (tunicado). A origem da celulose tem relação direta com as propriedades da nanocelulose, desde o teor de

cristalinidade como as dimensões mínimas desses nanomateriais (DHALI *et al.*, 2021), como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Comparação do teor de celulose derivado de diferentes recursos juntamente com a sua morfologia e cristalinidade.

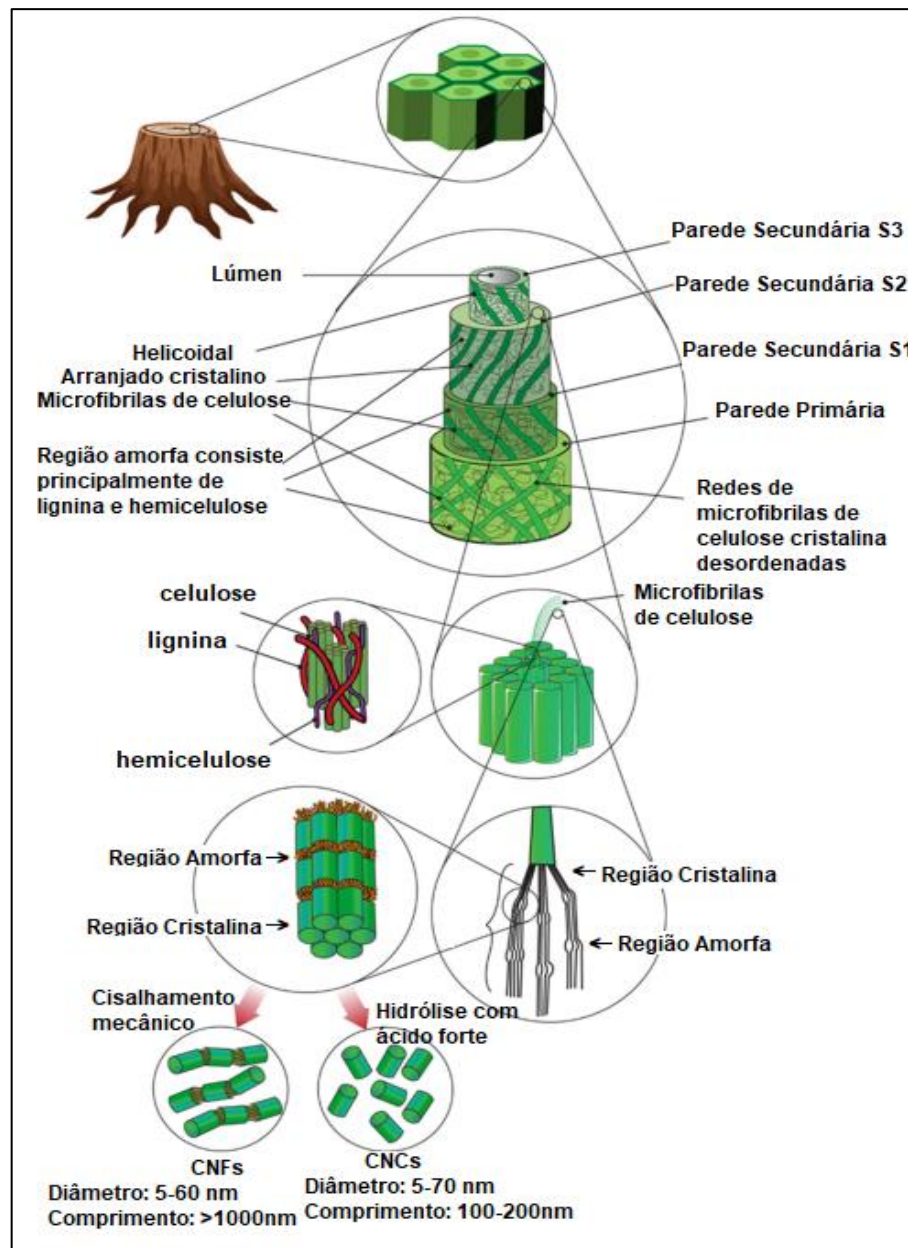


Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Dhali *et al.* (2021).

Contudo, antes do desenvolvimento da nanocelulose, a celulose precisa passar por um processo de isolamento, sendo submetida a tratamentos químicos e processo de desintegração mecânica para promover sua purificação, eliminando, assim, os demais constituintes do material vegetal, tais como lignina, hemiceluloses, extrativos e outros (LEÃO *et al.*, 2012), tal composição vegetal está apresentada na Figura 5.

Conforme Chu *et al.* (2020), a celulose pura passa por processos de cisalhamento mecânico ou hidrólise ácida controlada, originando partículas cristalinas fibrilares alongadas ou sem defeitos em forma de bastonetes com pelo menos uma dimensão na faixa de nanoescala, tais partículas são denominadas como nanocelulose.

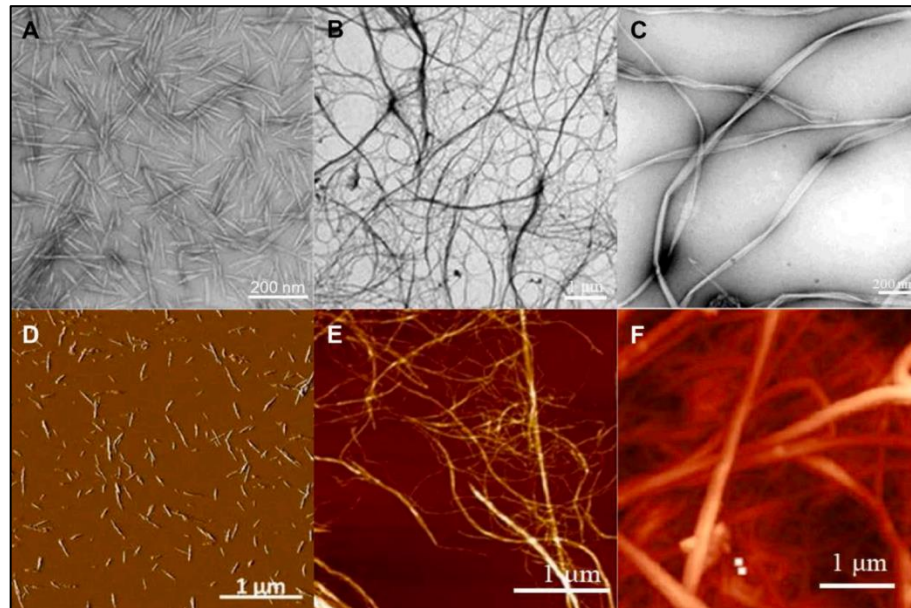
Figura 5 - Esquema de uma célula vegetal



Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Dhali *et al.* (2021).

De acordo com Barnat-Hunek *et al.* (2019), os nanomateriais de celulose podem ser divididos em cinco categoriais: nanocristais de celulose (CNC), nanofibrilas de celulose (CNF), nanocristais de tunicado de celulose (t-CNC), celulose de algas (AC) e celulose bacteriana (BC), algumas variações da nanocelulose são apresentadas na Figura 6.

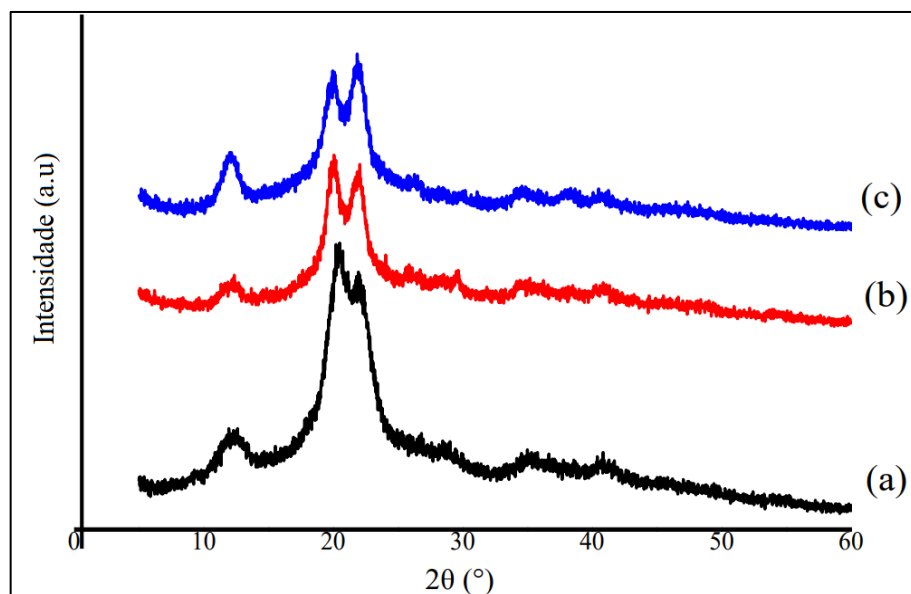
Figura 6 - Imagem do MEV e MFA, respectivamente, A e D para nanocristais de celulose, B e E para nanofibrilas de celulose e C e F para celulose bacteriana



Fonte: Chu *et al.* (2020).

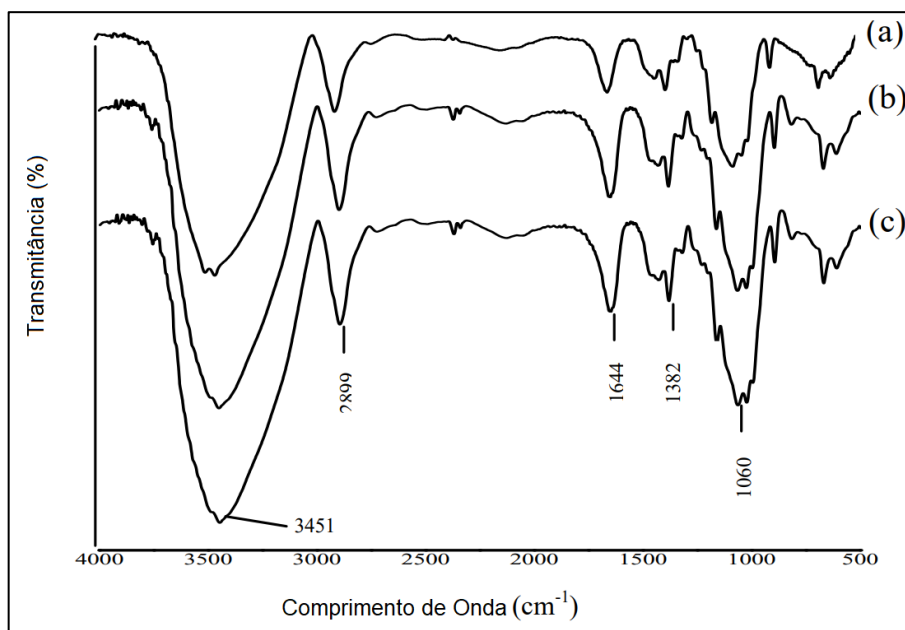
Wulandari *et al.* (2016) afirmam no seu estudo, através do DRX (Figura 7), que a maior concentração de ácido produz nanocelulose com menor cristalinidade quando comparada com celulose original e com nanocelulose com menor concentração ácida. Entretanto, relatam não há alteração entre os espectros da celulose e as nanoceluloses produzidas (Figura 8).

Figura 7 – Difração de Raios X de (a) celulose; (b) nanocelulose produzida com concentração de 60% de ácido sulfúrico (c) nanocelulose B produzida com concentração de 50% de ácido sulfúrico.



Fonte: Elaborado pela autora (2022), a partir de Wulandari *et al.* (2016).

Figura 8 - Espectros FTIR de (a) celulose; (b) nanocelulose produzida com concentração de 60% de ácido sulfúrico (c) nanocelulose B produzida com concentração de 50% de ácido sulfúrico.



Fonte: Elaborado pela autora (2022), a partir de Wulandari *et al.* (2016).

E Dhali *et al.* (2021) declaram que os métodos usados para extrair a nanocelulose afetam significativamente suas propriedades estruturais e físico-químicas. Sendo os nanocristais de celulose originados, comumente, por meio de tratamento ácido e as nanofibrilas de celulose através do processo de desintegração mecânica.

2.4.1 Aplicações na Construção Civil

O uso da nanocelulose em materiais tem sido interesse de diversos setores devido seu seguimento sustentável, contribuindo diretamente nas propriedades mecânicas, elétricas, magnética, térmicas, ópticas e de impermeabilidade, reforçando os materiais e ao mesmo tempo tornando-os mais leves (LEÃO *et al.*, 2012).

Segundo Chu *et al.* (2020), a aplicação da nanocelulose, em diversas áreas e materiais, está relacionada com suas propriedades de superfície e compatibilidade interfacial, facilitando a sua agregação em muitos meios, como solventes orgânicos, matrizes poliméricas e até soluções aquosas.

Barnat-Hunek *et al.* (2019) promoveram o estudo das propriedades do concreto com adição de nanocelulose na forma de nanocristais e nanofibrilas. Tal estudo mostrou que houve aumento das propriedades mecânicas gradativamente com o uso

dos nanomateriais na composição do concreto quando comparado com os resultados do composto cimentício convencional, contribuindo para menor área de contato e maiores valores de superfície específica livre, logo, favoreceu o aumento da adesão e molhabilidade. Além disso, os resultados obtidos na pesquisa comprovaram uma melhora na resistência ao congelamento-descongelamento com o uso de nanocristais.

O estudo realizado por Lee e Kim (2020) mostrou que o uso de nanocristais de celulose em compósito de cimento de alta tenacidade reforçado com fibra proporcionou o aumento da sua fluidez, a qual ocorre devido às propriedades hidrofílicas do CNCs. Além disso, identificou-se o aumento da resistência à penetração do íon cloro com aumento do teor dos nanomateriais. Os autores também defendem que a redução do tamanho dos poros causado pela presença de CNCs contribuiu para melhora da resistência ao congelamento-descongelamento.

Segundo o projeto de Hisseine *et al.* (2020), o emprego da nanocelulose em concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) como forma de controlar a retração autógena conquistou resultados promissores, principalmente, em idades iniciais do concreto. Tal habilidade foi atribuída pela liberação de água gradual dos filamentos de celulose, o que contribuiu para o reabastecimento dos poros da matriz de esvaziamento, favorecendo assim a redução do risco de fissuras em idades que o concreto não atingiu a resistência à tração máxima projetada.

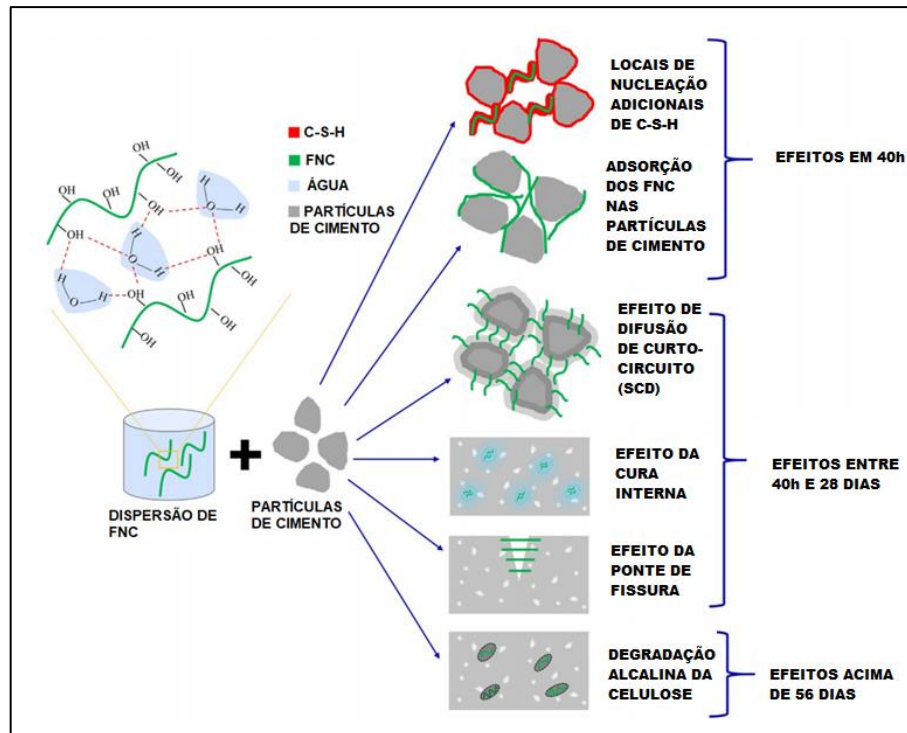
De acordo com estudos realizados para a introdução da nanocelulose bacteriana em argamassa de cimento, foram utilizados dois tipos de nanocelulose (em gel e pó). Os resultados deste estudo foram positivos em relação às propriedades mecânicas e trabalhabilidade para ambos os tipos de nanomaterial, contudo o uso da nanocelulose em gel apresentou propriedades inferiores às aquelas preparadas com pó (AKHLAGHI; BAGHERPOUR; KALHORI, 2020).

O trabalho sobre argamassa de cimento com adição de nanocristais de celulose, feito por Barnat-Hunek *et al.* (2019), mostrou que a adição melhora na resistência à compressão e flexão, além de possuir uma durabilidade maior ao gelo, contudo, apresentou resultados negativos em relação ao teste de durabilidade ao sulfato de sódio.

De acordo análise de Kamasamudram, Ashraf e Landis (2021) sobre a aplicação da nanofibrilas de celulose na pasta de cimento comum, identificou-se a interação das partículas cimentícias com o nanomaterial ao longo do tempo (Figura

9), promovendo um aumento na resistência à flexão. Os autores garantem que, nas primeiras 40 horas, houve uma produção de C-S-H e um processo de retardamento da hidratação. Entretanto, ao longo dos 28 dias iniciais, aconteceu a criação do canal entre as partículas de cimento com a solução de poro através da casca de C-S-H. Em seguida, a água retida na nanocelulose causou uma cura interna, proporcionando um aumento da tenacidade devido às propriedades de superfície livre da CNF. E após 56 dias, houve uma tendência para redução da resistência devido à alta alcalinidade da celulose decorrente da porosidade da pasta. Contudo, após 90 dias de cura, o uso da nanocelulose na composição resultou no aumento da resistência à compressão.

Figura 9 - Efeitos da nanocelulose em materiais à base de cimento.



Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Kamasamudram, Ashraf e Landis (2021).

Segundo Hisseine *et al.* (2019), pode-se comprovar o aumento das resistências mecânicas em nanoescala por meio do ensaio de nanoindentação. Esta pesquisa apresentou melhorias no módulo de indentação M , na dureza de indentação H e no módulo de fluência de contato C para todas as 4 fases principais da matriz cimentícia (Alita, Belita, C-S-H, CH). Os autores ainda afirmam que as melhorias das propriedades mecânicas em macroescala observadas com presença de filamentos de celulose foram derivadas das melhorias em escala microestrutural, principalmente,

pelo aumento das propriedades da fase C-S-H, o que contribuiu para melhora da ductilidade do sistema na macroescala.

Segundo Tenório *et al.* (2003), as propriedades mecânicas do cimento Portland estão associadas às suas fases constituintes, principalmente, na alita e a belita, sendo a alita responsável pelas propriedades de hidratação e de endurecimento; conseqüentemente, influenciando nas propriedades mecânicas do cimento após hidratação e cura.

2.5 MICROESTRUTURA EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

No campo da engenharia civil, os produtos à base de cimento são largamente utilizados, apesar de algumas limitações mecânicas e de durabilidade devido a existência de poros de multiescala, microinterfaces internas e trincas. Os nanomateriais podem reduzir essas limitações em consequência de afetar a hidratação do cimento (FU *et al.*, 2022).

A adição de micro e nanopartículas às misturas cimentícias pode resultar em uma estrutura de poros mais homogênea e mais fina, o que acontece devido à interação mais forte dos produtos de hidratação do cimento com as superfícies das partículas finas. A estrutura porosa produz compósitos cimentícios com propriedades específicas, influenciando diretamente no seu comportamento mecânico e durabilidade (LINDGREEN *et al.*, 2008).

Gao *et al.* (2019) afirmam que há melhorias nas propriedades mecânicas de materiais cimentícios com a utilização de nanomateriais, desta forma aumentando o interesse na sua aplicação como aditivo. Essa melhora está relacionada à nanoestrutura, potencializando o módulo de elasticidade, controlando o surgimento de trincas em nanoescala e subsequente à formação de microfissuras.

As análises de imagens de superfícies, em nível atômico, fornecem à ciência novas informações sobre a química e física do material analisado em tempo real (GOERTZ; MOORE, 2010). Segundo Peled, Castro e Weiss (2013), avaliar a estrutura em nanoescala é fundamental para entender o comportamento de compósitos cimentícios, devido às características em nanoescala estarem relacionadas ao desempenho do material em macroescala.

2.5.1 Análises Microestruturais

Segundo Mehta e Monteiro (2013), a microestrutura é uma estrutura sutil que pode ser compreendida com auxílio de um microscópio. Com uma baixa ampliação no microscópio (200x), é possível identificar que os compósitos cimentícios não possuem uma estrutura homogênea, mostrando que algumas áreas são densas e outra porosas. Na ampliação alta (2.000x e 5.000x), pode se verificar produtos originados pela hidratação do cimento, como hidróxido de cálcio e hidróxido de silicatos de cálcio.

Análises feitas no estudo de Gopalakrishnan e Nithiyanantham (2020) mostraram que foi possível identificar, através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), uma estrutura mais densa do gel C-S-H na matriz cimentícia em argamassas com uso de escória de cobre. O MEV age por meio da difração de retroespalhamento de elétron, o que permite captar informações cristalográficas, como, tipo de cristal e tamanho dos componentes da superfície (WILKINSON; BRITTON, 2012).

De acordo com Fu *et al.* (2022), por meio do MEV, foi possível verificar que o nanocarbonato de cálcio pode aprimorar a estrutura e proporção dos produtos de hidratação do cimento. Isto foi justificado microscopicamente, devido à existência de nucleação e reação química do nanocarbonato de cálcio com a superfície do gel C-S-H. Além disso, o MEV é amplamente utilizado para observar a zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados, auxiliando na investigação da interação e presença de aditivos com os compósitos cimentícios nesta região (GAO *et al.*, 2019).

Já a microanálise de difração de dispersão de elétrons (MEV/EDS), acoplada ao MEV, é fundamental para inspeção da microestrutura e textura cristalográfica, fornecendo conjunto de dados quantitativos sobre o material (WILKINSON; BRITTON, 2012). Auxiliando MEV/EDS, a difração de raios X (DRX) também contribui para a caracterização das fases cristalinas e morfologias da superfície dos materiais (LI *et al.*, 2021).

Outra análise, à nível de microestrutura, é análise termogravimétrica (TGA) que é utilizada para avaliar efeitos no grau de hidratação dos produtos da pasta cimentícias ao interagir com os materiais da mistura (HISSEINE *et al.*, 2019).

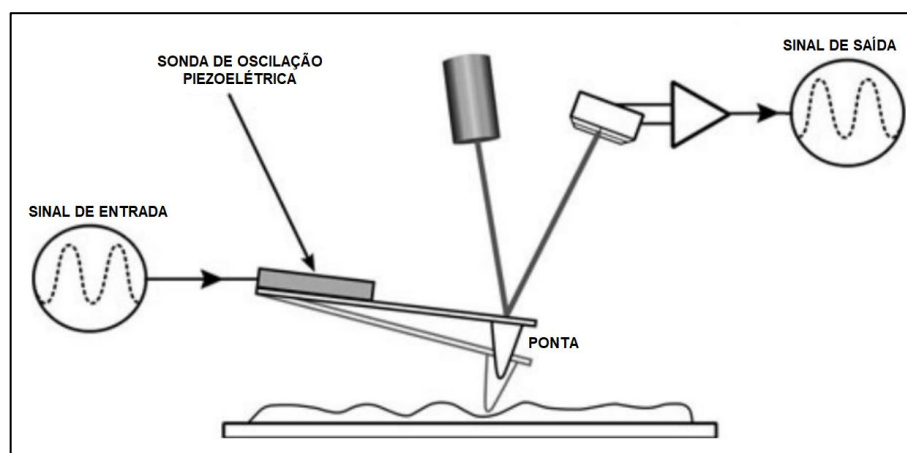
Contudo, de acordo com Goertz e Moore (2010), a ferramenta mais comum dentro dos microscópios de força de varredura (SFM) é o microscópico de força atômica (MFA), sendo considerado o equipamento padrão da ciência em nanoescala

para primeiras observações de superfície. Este tipo de análise microscópica age através de forças atuantes entre uma ponta extremamente fina e uma superfície (Figura 10).

Segundo Peled, Castro e Weiss (2013), as imagens geradas na análise de MFA mostram diferenças tridimensionais, ou seja, há representações topográficas mais precisas, onde cores mais escuras correspondem à altura de superfície mais baixa e alturas mais altas são cores mais claras. No estudo, foi possível identificar características da partícula não hidratada, C-S-H e C-H.

Conforme Butt, Capella e Kappl (2005), o MFA não só fornece imagens topográficas de alta resolução da superfície, mas consegue informações relevantes sobre propriedades locais do material, como elasticidade, dureza, adesão, constante de Hamaker e densidades superficiais de carga. Também é possível identificar com precisão a rugosidade do material devido à interação de atrito existente entre a ponta e superfície (ROA e SIRENA, 2022).

Figura 10 - Esquema de operação generalizada dos modos MFA oscilantes, mostrando a configuração instrumental.



Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Peled, Castro e Weiss (2013).

O MFA com auxílio da ferramenta que executa a nanoindentação da superfície, como mapeamento nanomecânico quantitativo de pico de força (QNM), consegue realizar caracterização física e química dos materiais dentro da zona de transição em compósitos cimentícios. Além disso, o QNM identifica com maior resolução espacial o valor para o módulo de elasticidade da superfície analisada do que as demais técnicas de nanoindentação comumente usadas (GAO *et al.*, 2019).

O teste de nanoindentação consiste basicamente em tocar o material de propriedades desconhecidas com outro material cujas propriedades são conhecidas. O objetivo principal deste ensaio é extrair o módulo de elasticidade e dureza do material analisado a partir de medições de deslocamento de carga e profundidade de penetração (FISCHER-CRIPPS, 2011).

O estudo realizado por Yang *et al.* (2022) mostrou que a nanoindentação possibilitou distinguir materiais em sistemas cimentícios, e também inspecionar a composição química, além da evolução de propriedades mecânicas sob ataque de sulfato.

De acordo com Roa e Sirena (2022), para se obter cálculos quantitativamente confiáveis dos dados retirados da análise MFA-nanoindentação, é necessário principalmente a boa calibração e escolha do perfil da ponta. Essa estimativa do perfil da ponta deve ser analítica para minimizar incertezas referente aos dados das propriedades analisadas.

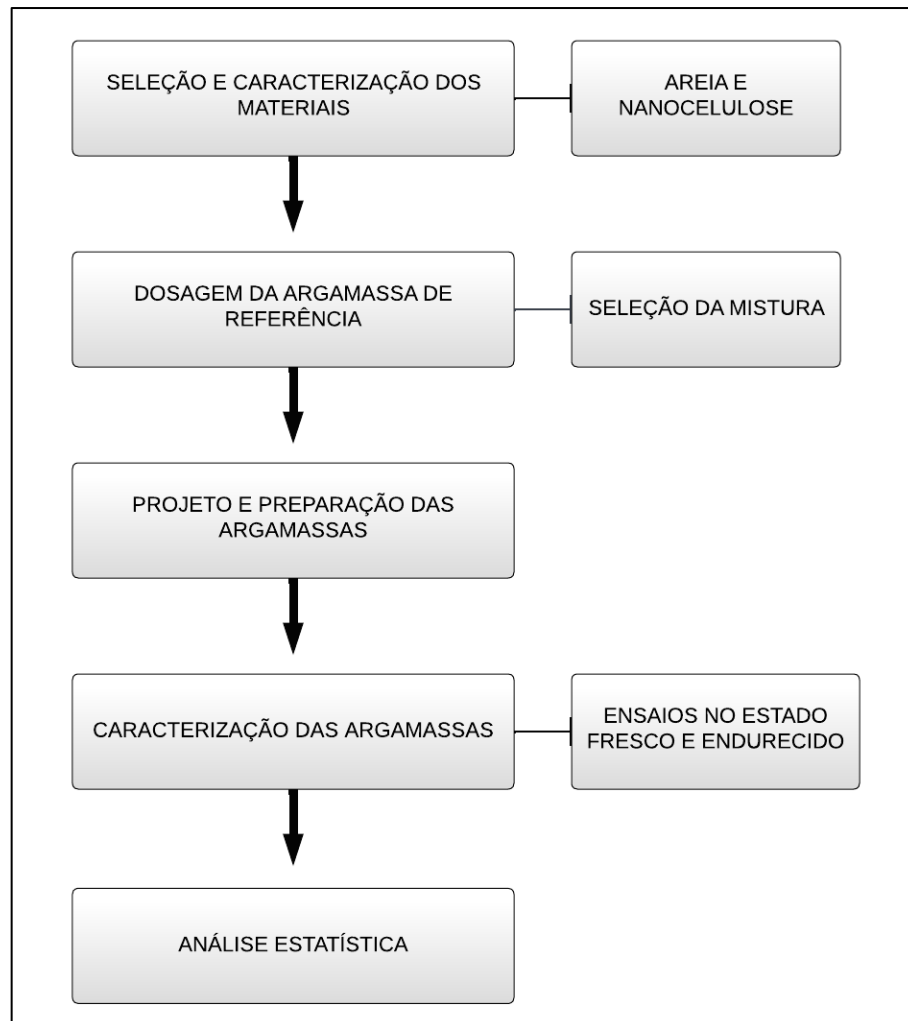
Segundo Griepentrog, Krämer e Cappella (2013), não só o raio da ponta do penetrador, mas também a forma são características relevantes a serem investigadas para uma boa obtenção de dados. Além disso, relatam que as pontas do nanoindentador normalmente possuem um raio de centenas de nanômetros até dez micrometros. E para realizar os ajustes dos dados retirados das curvas de nanoindentação, utilizam a Teoria de Oliver e Pharr ou equação de Hertz.

Desta forma, a nanoindentação é um teste da taxa de variação da profundidade de penetração que varia entre uma escala medida em nanômetros em vez de micrometros ou milímetros. E a área de contato do ensaio é determinada a partir da geometria da ponta (FISCHER-CRIPPS, 2011).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as atividades necessárias para atingir os objetivos do estudo. As etapas do desenvolvimento do procedimento experimental estão, resumidamente, apresentadas na Figura 11.

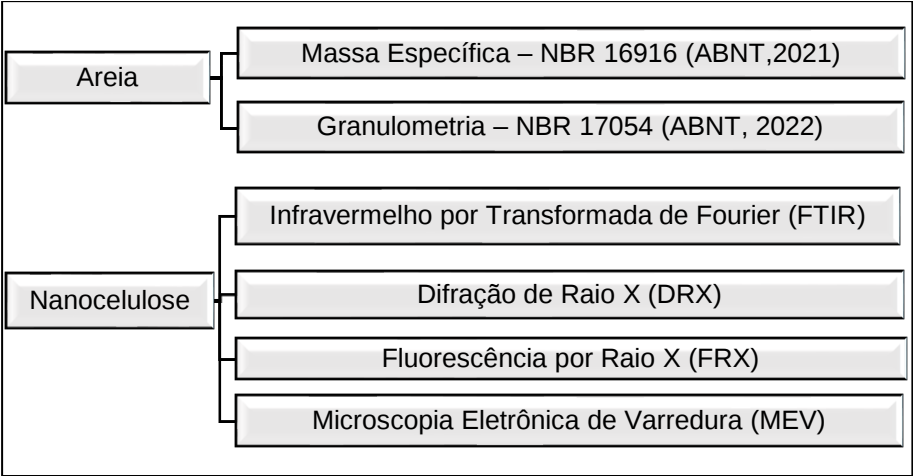
Figura 11 - Etapas do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O procedimento experimental inicia-se na etapa de caracterização dos materiais que foram utilizados para elaboração da argamassa de estudo. As análises dos materiais e das argamassas foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC (em Joinville/SC). Os ensaios para caracterização destes materiais são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Ensaios de caracterização dos materiais.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Após a caracterização dos materiais, foi realizada a otimização da dosagem das argamassas leves de revestimento, utilizando como traço de referência a composição proposta por Becker, Eftting e Schackow (2022); foram feitos alguns ajustes devido à necessidade de adequação para o modelo da argamassa proposto neste estudo. Posteriormente a seleção da argamassa de referência, foram preparadas quatro dosagens diferentes, sendo três dosagens com adição da nanocelulose e uma argamassa leve de referência. Logo, totalizaram a produção de 4 misturas diferentes (Quadro 7).

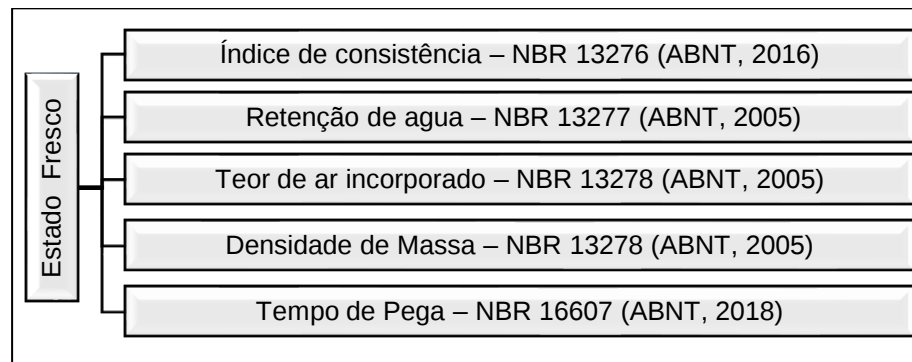
Quadro 7 – Descrição da nomenclatura dos traços das argamassas.

Nomenclatura	Descrição
AR	Argamassa leve de referência.
AN001	Argamassa leve com adição da nanocelulose 0,1% da massa do cimento.
AN002	Argamassa leve com adição da nanocelulose 0,2% da massa do cimento.
AN003	Argamassa leve com adição da nanocelulose 0,3% da massa do cimento.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

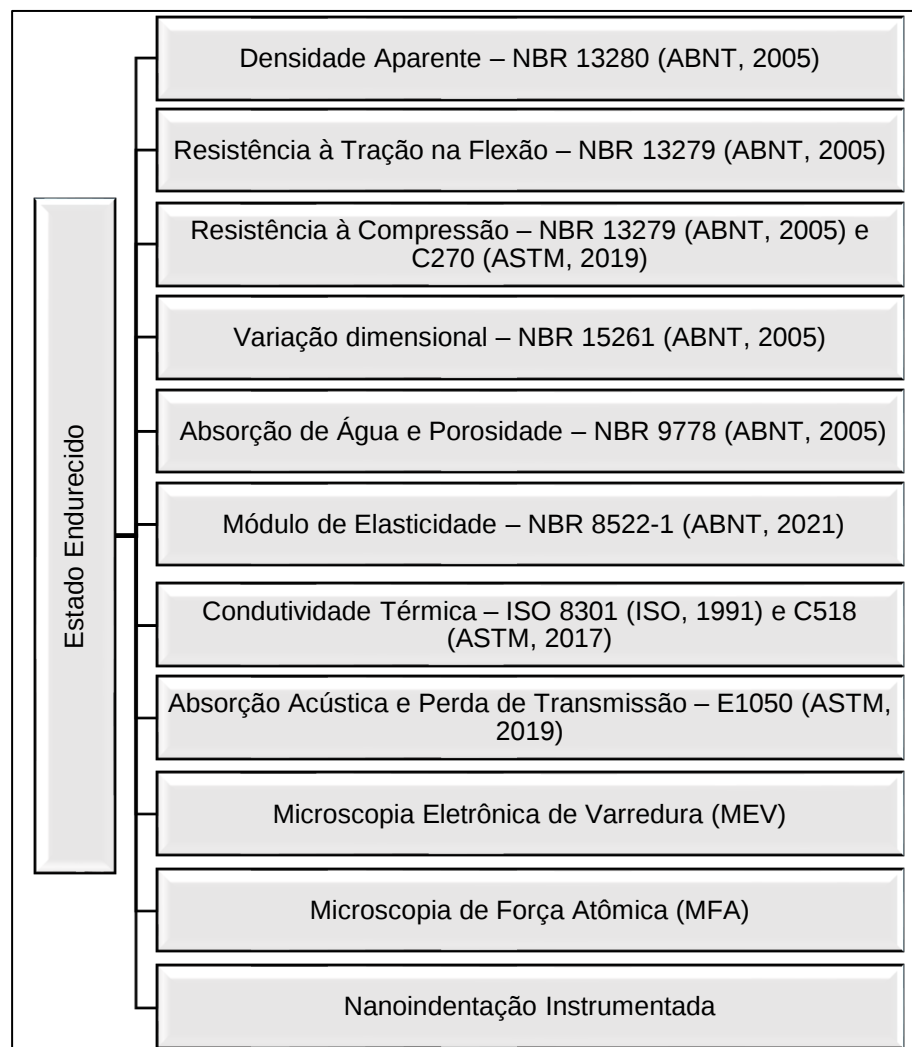
A proporção da dosagem estabelecida para argamassa visa a execução de argamassas leves ecoeficientes que satisfaçam as propriedades requeridas utilizando nanocelulose com adição de 0,1, 0,2 e 0,3% da massa do cimento Portland. Para analisar a influência dos traços utilizando a nanocelulose foram executados ensaios no estado fresco e endurecido das duas argamassas (Figura 13 e Figura 14).

Figura 13 - Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 14 - Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Posterior a avaliação dos resultados dos ensaios, foi estabelecida uma análise estatística entre as propriedades encontradas na argamassa de referência com as

argamassas com nanocelulose, a fim de verificar a influência que a nanocelulose exerceu na argamassa leve. Além disso, foi feita uma análise para identificar o teor da porcentagem da nanocelulose ideal utilizando gráfico de contorno de superfície de resposta.

3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a produção da argamassa de referência, foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CP II Z-32, cal hidratada, água, areia, EPS e os aditivos químicos (incorporador de ar e superplastificante). Para argamassa AN001, AN002 e AN003, além destes materiais, foi adicionada a nanocelulose.

3.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento CP II-Z-32 da marca Itambé, tendo como sua principal adição a pozolana entre 6 e 14%, utilizado para diversas aplicações, além de ter boa resistência a meios agressivos, possuindo propriedades adequadas para seu emprego em argamassas de revestimento (ITAMBÉ, 2021). Conforme as informações fornecidas pelo fabricante, a massa específica do cimento CP II-Z-32 é de 2,92 g/cm³. A Tabela 6 apresenta algumas características químicas encontradas no CP II-Z-32 que foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 6 - Composição química do cimento Portland

Substâncias	(% em massa)
Al ₂ O ₃	8,58
SiO ₂	21,25
Fe ₂ O ₃	3,23
CaO	52,74
MgO	2,69
SO ₃	2,55

Fonte: Elaborado pela autora (2021), a partir de Itambé (2020).

3.1.2 Areia

A areia, utilizada como agregado miúdo para a elaboração das argamassas, é uma mistura de areias finas de rio (quartzo). Para sua caracterização foram realizados

o ensaio de massa específica seguindo as diretrizes da NBR 16916 (ABNT, 2021) e o ensaio de granulometria conforme NBR 17054 (ABNT, 2022).

A areia passou pelo processo de secagem por um período de 24 horas, posteriormente, sendo resfriada em temperatura ambiente. Deste material foram retiradas duas amostras de 300g, em seguida o peneiramento das amostras foi realizado utilizando as peneiras com aberturas de malha de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm. Após a pesagem deste material retido em cada peneira, foi elaborada a curva granulométrica do agregado miúdo, sendo obtido o módulo de finura e a dimensão máxima característica da areia.

Para obter a massa específica da areia foi necessária uma amostra de 1,5kg. Inicialmente, a areia foi submersa em água durante 24h, e depois seca superficialmente de modo que ela estivesse no estado saturado em superfície seca. Para se determinar este estado de saturação, foi realizado o processo de compactação com 25 golpes. Após a compactação, foi retirado o molde, verificando se a areia mantinha a forma e, caso acontecesse isso, era repetido o procedimento de secagem até o material desmoronar ao desmoldar. Quando a areia apresentou a condição adequada, foi retirada uma amostra de 500g (m_s). Logo após, a amostra juntamente com o frasco foi pesada (m_c), tal conjunto de amostra e frasco ficaram imersos em água à uma temperatura constante de 21 ± 2 °C, e determinou-se o valor m_D . Para obter a massa seca da areia, a amostra ficou na estufa por um período de 24h, depois foi resfriada à temperatura ambiente para então realizar a pesagem e determinar sua massa seca (m_A).

Os valores de massa encontrados para m_s , m_c , m_D e m_A foram inseridos nas Equações 1 a 3, e foi determinada a massa específica da areia.

$$V_a = \frac{m_D - m_c}{\rho_a} \quad (1)$$

$$\rho_s = \frac{m_A}{V_f - V_a} \quad (2)$$

$$\rho_{SSS} = \frac{m_B}{V_f - V_a} \quad (3)$$

Onde:

ρ_s é a densidade aparente do agregado seco, em g/cm³;

m_A é a massa da amostra seca em estufa, em g;

V_f é o volume do frasco, em cm³;

V_a é o volume de água adicionada ao frasco, em cm³;

m_C é a massa do conjunto formado pela massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa do frasco, em g;

m_D é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa da água, em g;

ρ_a é a densidade da água, em g/cm³;

m_B é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em g;

ρ_{SSS} é a densidade do agregado na condição saturada superfície seca, em g/cm³.

3.1.3 Cal

A cal hidratada utilizada no preparo das argamassas é do tipo CH-III da marca Engecal. Conforme o fabricante, o material é constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e magnésio, e segue todas as exigências estabelecidas na NBR 7175 (ABNT, 2003).

3.1.4 Água

A água utilizada foi concedida pela concessionária local, a Companhia Águas de Joinville, de acordo com as normativas da NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

3.1.5 Aditivos

Foram utilizados dois aditivos fornecidos pela MC-Bauchemie: aditivo superplastificante e aditivo incorporador de ar. O superplastificante utilizado foi MC-Powerflow 4001 de alto desempenho com composição à base de policarboxilatos e com uma cor marrom (MC-BAUCHEMIE, 2019). Já o incorporador de ar foi o Centripor 420, o qual é formulado também com propriedades de retenção de água e ação

estabilizante, com uma densidade de 1kg/L, e apresentando também uma coloração marrom (MC-BAUCHEMIE, 2021).

3.1.6 Poliestireno Expandido

O poliestireno expandido foi adquirido na empresa Styroville do município de Joinville, Santa Catarina. Conforme o fabricante, o material fornecido são flocos de isopor reciclado, os quais possuem características adequadas para aplicação em estrutura de vedação leve, contendo diâmetro das suas pérolas entre 1 e 3mm, uma densidade de 0,03 g/cm³, a densidade aparente de 0,0609 g/cm³ e condutividade térmica de 0,035 W/m.K a 23°C (STYROVILLE, 2021).

3.1.7 Nanocelulose

A nanocelulose aplicada no estudo trata-se de uma celulose microfibrilada (Figura 15), conforme o fabricante, é um aditivo de base biológica, uma fibrila de celulose proveniente de árvores do gênero *Albies* das florestas escandinavas.

Figura 15 - Conglomerado de 10% de nanocelulose disperso em água.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para a caracterização do nanomaterial, foram realizadas as seguintes análises: espectroscopia de infravermelho (FTIR), fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) e MEV. Para preparação da amostra, a nanocelulose não passou por nenhum tratamento, apenas garantido que as amostras analisadas foram livres de impurezas. A preparação da amostra para todas as análises foi igualitária, sendo inserida em um substrato higienizado e com equipamentos devidamente calibrados.

A análise pela FTIR permitiu a determinação semi-quantitativa dos componentes do nanomaterial, que foi realizada em um equipamento Perkin - Elmer Spectrum One, com amplitude de 4000-560 cm^{-1} . Para realizar a inspeção, uma amostra com mínimo de impureza foi fixada no equipamento.

Para identificar a cristalinidade da nanocelulose, foi executada a Difração por raios X, por meio da utilização de um difractômetro de raios X Shimadzu XRD 6000 (usando radiação $\text{Cu K}\alpha$), com gama de difração em 2θ . Para realizar a estimativa da cristalinidade da nanocelulose, foi utilizado o mesmo método aplicado por Vieira (2018), o qual utilizou a Equação 4.

$$IC = \frac{(l_2 - l_1)}{l_2} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

l_2 é a altura referente à região cristalina ($2\theta \approx 23^\circ$);

l_1 é a altura referente à região amorfa ($2\theta \approx 17^\circ$).

Para a determinação da composição química em óxido, foi realizada a análise de FRX no espectrômetro de raios X modelo Philips PW 2400, e assim foi possível analisar compostos inorgânicos que estariam presentes no material.

Para análise microestrutural da nanocelulose, foi utilizado um equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura por emissão de campo de elétrons, modelo JSM-6701F, de fabricação da JEOL LTD, o qual possui resolução em escala nanométrica. Para preparação da amostra, foi realizado o mesmo procedimento que as demais análises, entretanto o material foi recoberto com ouro, devido à nanocelulose ser material isolante; em seguida, a mesma foi fixada sobre o suporte com fita adesiva.

3.2 DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

Foi necessário estimar a mistura da argamassa de referência. Para isso foi realizado a produção de dosagens diferentes para seleção do traço padrão do estudo, visto que a dosagem utilizada como parâmetro inicial feita por Becker, Effting e Schackow (2022) não utilizou uma porcentagem alta da substituição de EPS.

Então, foram produzidas 8 misturas (Figura 16) variando-se a proporção e o volume desses materiais, conforme mostrado na Tabela 7.

Figura 16 - Misturas utilizadas para escolha da argamassa de referência



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 7 - Composição preliminar das misturas para determinação da argamassa de referência.

Teste	C ⁽¹⁾ (g)	C ⁽²⁾ (g)	A ⁽³⁾ (g)	E ⁽⁴⁾ (g)	C ⁽⁵⁾ (g)	P ⁽⁶⁾ (g)	T ⁽⁷⁾ (g)	A ⁽⁸⁾ (g)	V ⁽⁹⁾ (l)
1	234	203,11	855,86	32,99	1,17	11,7	-	261,66	1,2
2	234	203,11	770,27	36,28	1,17	-	4,68	231,66	1,2
3	234	203,11	770,27	36,28	1,17	11,7	-	246,66	1,2
4	292	253,46	961,19	45,28	1,46	-	5,84	289,08	1,5
5	355	308,14	1168,57	55,05	1,77	-	7,1	351,45	2
6	292	253,46	961,19	45,28	1,46	14,6	-	289,08	1,5
7	306,6	253,46	961,19	45,28	1,53	15,3	-	303,53	1,5
8	350	303,8	1152,11	54,27	1,75	17,5	-	327,69	1,8

⁽¹⁾ Cimento; ⁽²⁾ Cal; ⁽³⁾ Areia; ⁽⁴⁾ EPS; ⁽⁵⁾ Centripor 420; ⁽⁶⁾ Powerflow 4001; ⁽⁷⁾ Tecnoflow; ⁽⁸⁾ Água; ⁽⁹⁾ Volume.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para a validação da argamassa de referência, foram analisados os resultados de seus ensaios de consistência e resistência à compressão. A produção e a quantidade de corpos de prova foram determinadas segundo as diretrizes estabelecidas pela NBR.

O aditivo superplastificante Tecnoflow aumentou a trabalhabilidade, contudo, diminuiu a resistência da mistura. Logo, as argamassas de teste 2, 4 e 5 foram desclassificadas na seleção. O aditivo Powerflow 4001 teve um melhor desempenho, no entanto, a sua interação com a mistura variou com o volume dos agregados. Quanto maior o volume da argamassa, houve uma interação mais eficaz dos aditivos com a pasta.

Os testes com uma porcentagem maior dos aditivos: 5% para o superplastificante e 0,5% para o incorporador de ar, alcançaram melhores resultados. Desta forma, a mistura com melhor desempenho e selecionada para referência do estudo foi a do teste 8.

Posteriormente, foram elaboradas as 4 misturas de argamassas para o estudo. As composições estão expostas na Tabela 8, sendo uma de referência e as demais

com nanocelulose. Para todas as misturas, o fator água/cimento inicial foi de 1,5, mas devido ao uso dos aditivos, houve uma redução de 34% da água na mistura, resultando em um fator água/cimento final de 0,99. Além disso, foi substituído 55% do volume de agregado natural por agregado leve (EPS) da argamassa convencional do estudo de Becker, Effting e Schackow (2022).

Tabela 8 - Composição das argamassas

Mistura	Cimento	Cal	Areia	EPS	Centripor	Powerflow	NC*
	kg/m ³						
AR	194,44	168,77	640,06	30,15	0,97	9,72	-
AN001	194,44	168,77	640,06	30,15	0,97	9,72	0,194
AN002	194,44	168,77	640,06	30,15	0,97	9,72	0,388
AN003	194,44	168,77	640,06	30,15	0,97	9,72	0,582

*Nanocelulose

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.3 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS

O preparo das misturas das argamassas seguiu as normativas definidas pela NBR 16541 (ABNT, 2016) e foram elaboradas em um misturador mecânico (Figura 17).

Figura 17 - Misturador mecânico



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O processo de fabricação das argamassas foi realizado mediante a pesagem de todos os materiais utilizados na mistura, de forma que a mesma contenha no máximo 2,5kg. A massa de argamassa que foi inserida na cuba do misturador foi processada em velocidade baixa com adição de 75% da água do traço no intervalo dos primeiros 10 segundos. Finalizando esse acréscimo de água, foi executada a mistura da pasta em velocidade baixa até completar 30 segundos desde o início do processo. Em seguida, foi aumentada a velocidade, processando a mistura na velocidade alta durante 60 segundos. Após esse período, foi desligado o misturador, realizando a raspagem do material da superfície interna e da pá, dentro do tempo de 90 segundos. Posteriormente, o misturador foi ligado novamente por 60 segundos, onde nos primeiros 10 segundos foram adicionados os 25% de água restante juntamente com os aditivos.

A preparação da argamassa de nanocelulose seguiu as mesmas instruções da argamassa de referência, contudo na água havia dispersão de uma porcentagem de nanocelulose. Para essa dispersão, foi utilizado um sonicador por 30 minutos (pulse on: 20s, pulseoff: 5s e 25% de potência) até a completa homogeneização da solução (Figura 18).

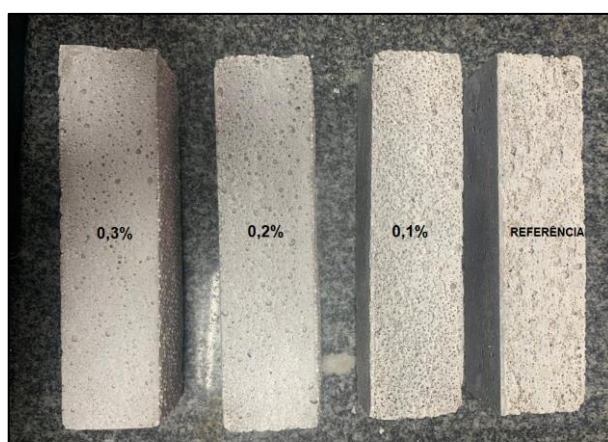
Figura 18 - Procedimento de dispersão da nanocelulose através do sonicador.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A moldagem dos corpos de provas prismático de 40x40x160mm (Figura 19), que foram utilizados nos ensaios, adotou os procedimentos estabelecidos pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Para esse procedimento, foi introduzido em cada molde acoplado à mesa de consistência uma porção de argamassa, utilizando o maior lado do nivelador para espalhar a mesma de forma uniforme. Em seguida foram executadas 30 quedas na mesa de adensamento. Após essa etapa, foi inserida mais uma parcela de argamassa, que foi espalhada com menor lado do nivelador de camadas, e seguiu com 30 quedas na mesa de adensamento.

Figura 19 - Corpo de prova prismático



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

A seguir são apresentados os ensaios de caracterização que foram realizados nas argamassas no estado fresco para atingir os objetivos da pesquisa.

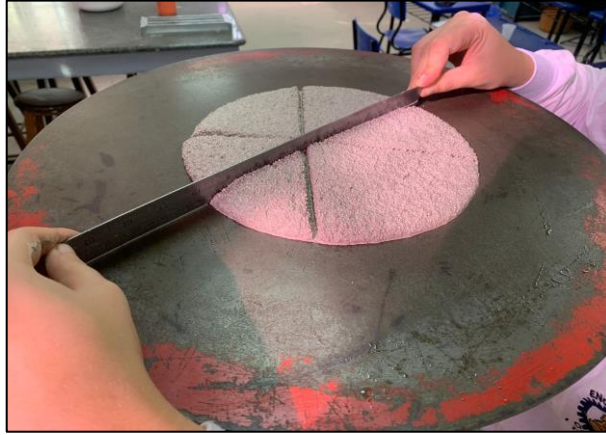
3.4.1 Índice de Consistência

Pelas diretrizes da NBR 13276 (ABNT, 2016), foi executado o ensaio do índice de consistência das argamassas, utilizando uma mesa de consistência (Figura 20).

Para esse ensaio, foi centralizado o molde tronco cônico sobre a mesa de consistência. O molde foi preenchido em três camadas com espessuras iguais, nas quais foram aplicados 15, 10 e 5 golpes de soquete, respectivamente, da primeira camada para última. Em seguida, a argamassa foi nivelada no molde através de uma régua, retirando o excesso de material, e então foi realizada a desmoldagem. Posteriormente, realizou-se 30 quedas, em 30 segundos, pelo acionamento manual

da manivela, e então foi medido o diâmetro em três pontos diferentes do espalhamento.

Figura 20 - Mesa de Consistência



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.4.2 Tempo de Pega

O ensaio que foi utilizado para determinar o tempo de pega das argamassas seguiu as normativas da NBR 16607 (ABNT, 2018). Para sua execução, foi utilizado o aparelho de Vicat (Figura 21).

O procedimento iniciou com a moldagem da argamassa, que permaneceu em câmara úmida durante a sua armazenagem. Posteriormente, foi verificado o aparelho de forma que o mesmo estivesse ajustado e adequado para a execução do ensaio, descendo a agulha de início de pega até a placa base, e registrando a marca zero.

Após um tempo de 30 minutos do enchimento do molde, o mesmo foi colocado centralizado na placa-base. A agulha foi deslocada suavemente até que houvesse o contato com a mistura, aguardando 1 a 2 segundos na posição até que a mesma atingisse seu estado de repouso. Em seguida, a agulha foi solta, permitindo que ela penetrasse verticalmente na pasta, após 30 segundos, sendo lida a indicação na escala. Tal processo foi repetido em intervalos de 10 minutos, distando no mínimo 10mm da borda do molde e a perfuração.

Figura 21 - Aparelho de Vicat



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao determinar o início do tempo de pega, foi realizada a troca das agulhas, utilizando a agulha de fim de pega. O molde foi invertido sobre a placa base, colocando-se em face oposta. As medições do fim do tempo de pega foram realizadas da mesma forma que o início de pega, terminaram quando a agulha não deixava marcas na argamassa.

3.4.3 Retenção de água

A retenção de água das argamassas foi determinada através do ensaio estabelecido pela NBR 13277 (ABNT, 2005). O ensaio consiste na retirada da água da argamassa por meio de sucção de uma bomba de vácuo em um funil de filtragem (Figura 22).

Figura 22 - Funil Buchner



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O ensaio foi iniciado assim que um prato é colocado sobre o funil juntamente com o papel-filtro umedecido. Com a torneira fechada, a bomba de água para sucção de 51mm de mercúrio foi acionada. Sucessivamente, foi aberta a torneira, a fim de retirar o excesso de água do papel-filtro, sendo a mesma fechada após o tempo de 90 segundos. Em seguida, foi pesado o conjunto (prato e papel-filtro umedecido). Posteriormente, o prato foi preenchido por argamassa de forma que ultrapassasse levemente da borda, e foram aplicados 16 golpes na área junto à borda e 21 em pontos centrais, o que assegurou o preenchimento uniforme do perímetro com total de 37 golpes. O excesso de argamassa foi retirado por meio de uma régua, em seguida as bordas foram limpas, e então o conjunto com argamassa foi pesado. A torneira novamente foi aberta por um tempo de 15 minutos, em sequência foi realizada na amostra a sucção de 51 mm de mercúrio, e então pesado o conjunto com argamassa após o fim do ensaio.

A retenção de água foi determinada através das Equações 5 e 6.

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (5)$$

$$R_a = \left[1 - \frac{(m_{arg} - m_{sucção})}{AF(m_a - m_v)} \right] 100 \quad (6)$$

Onde:

R_a é a retenção de água (%);

m_{arg} é a massa do conjunto com argamassa (g);

$m_{sucção}$ é a massa do conjunto após a sucção (g);

m_v é a massa do conjunto vazio após sucção (g);

AF é o fator água/argamassa fresca.

m_w é a massa total de água acrescentada à mistura (g)

m é a soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra (g).

3.4.4 Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado

A densidade de massa e o teor de ar incorporado foram determinados através das diretrizes estabelecidas na NBR 13278 (ABNT, 2005). Depois da produção das argamassas, elas foram inseridas dentro do cilindro calibrado por meio de 3 camadas com alturas iguais, sendo aplicados 20 golpes para cada camada. Em seguida, foram realizadas três quedas do recipiente, com altura de aproximadamente três centímetros, sendo nivelada com auxílio de uma espátula. A massa específica da argamassa foi determinada pela Equação 7.

$$d = \frac{m_{conj} - m_{vazio}}{v_r} \times 1000 \quad (7)$$

Onde:

d é a densidade de massa da argamassa (kg/m³);

m_{conj} é a massa do recipiente contendo a argamassa de ensaio (g);

m_{vazio} é a massa do recipiente vazio (g);

v_r é o volume do recipiente (cm³).

O teor de ar incorporado na argamassa foi determinado através das Equações 8 e 9.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} \quad (8)$$

$$A = 100 \times \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (9)$$

Onde:

d_t é a densidade de massa teórica da argamassa sem vazios (g/cm^3);

m_i é a massa seca de cada componente da argamassa mais a massa da água (g);

ρ_i é a massa específica de cada componente da argamassa (g/cm^3);

A é teor de ar incorporado (%);

d o valor da massa específica da argamassa (g/cm^3).

3.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

A seguir são apresentados os ensaios de caracterização que foram realizados nas argamassas no estado endurecido para atingir os objetivos propostos na pesquisa.

3.5.1 Densidade de Massa Aparente

O ensaio de densidade de massa aparente seguiu as normativas da NBR 13280 (ABNT, 2005). Inicialmente, foi realizada a pesagem de três corpos de prova com no mínimo 28 dias de idade (Figura 19). Em seguida, foi utilizado um paquímetro para determinar as dimensões dos corpos de prova, e então foi calculado o volume pela Equação 10. E posteriormente, foi determinada a densidade de massa aparente pela Equação 11.

$$v = l \times h \times c \quad (10)$$

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{m_{cp}}{v} \times 1000 \quad (11)$$

Onde:

l é a largura do corpo de prova (cm);

h é a altura do corpo de prova (cm);

c é o comprimento do corpo de prova (cm);

v é o volume do corpo de prova (cm³);

$\rho_{máx}$ é a densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m³);

m_{cp} é a massa do corpo de prova (g).

3.5.2 Absorção de água e Porosidade

A absorção de água e a porosidade da argamassa foram determinadas através da metodologia estabelecida pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Para cada dosagem foram utilizados dois corpos de prova.

Para determinação das propriedades, o corpo de prova foi colocado numa estufa à uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 72 horas, após esse período, foi feita a pesagem da amostra na condição seca. Em seguida, a amostra foi imersa na água em temperatura ambiente durante 72 horas, atingindo a sua condição saturada. Posteriormente, foi executado o processo de ebulição da amostra em torno de 5 horas, após o corpo de prova esfriar, foi registrada sua massa com a balança hidrostática.

O ensaio foi finalizado com a retirada da amostra da água, sendo seca com um pano úmido, e então determinada sua massa saturada. Para o cálculo da absorção de água foi utilizada a Equação 12, o índice de vazios (porosidade) foi determinado pela Equação 13 e a massa real da amostra pela Equação 14.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (12)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_{imersa}} \times 100 \quad (13)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_{imersa}} \quad (14)$$

Onde:

A é a absorção de água (g/cm³);

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_{imersa} é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura (balança hidrostática) (g);

ρ_r é a massa específica real.

3.5.3 Resistência à Tração na Flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão seguiu as normativas estabelecidas pela NBR 13279 (ABNT, 2005), e foi utilizado o aparelho da marca Contenco I-3022-AA. O rompimento das argamassas foi realizado em 28 dias, sendo três corpos de prova prismáticos para cada traço, os quais foram posicionados no centro do equipamento, onde foi submetido à uma carga de $50 \pm 10\text{N/s}$ até sua ruptura. O cálculo da resistência à tração na flexão foi determinado por meio da Equação 15.

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (15)$$

Onde:

R_f é a resistência à tração na flexão (MPa);

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L é a distância entre os suportes (mm).

3.5.4 Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 13279 (ABNT, 2005), por meio de uma prensa elétrica hidráulica marca Contenco de modelo I-3022-AA. O rompimento das argamassas foi realizado em 28 dias, sendo 6 corpos de prova prismáticos para cada idade do traço, os quais foram posicionados no centro do equipamento, onde foi submetido à uma carga de $500 \pm 50\text{N/s}$ até sua ruptura. O cálculo da resistência à compressão foi determinado por meio da Equação 16.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (16)$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão (MPa);

F_c é a carga máxima aplicada (N);

1600 é a área da seção considerada do dispositivo de carga $40 \times 40\text{ mm}$ (mm^2).

3.5.5 Módulo de Elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade foi baseada na ABNT NBR 8522-1 (ABNT, 2021). Desta forma, foi necessária uma adaptação, visto que é uma norma que prescreve módulo de elasticidade do concreto através do valor numérico encontrado do coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação. Foram utilizados três corpos de prova prismáticos para cada argamassa.

Inicialmente, as amostras foram apoiadas entre os pratos da prensa mecânica e foi aplicada uma carga até sua ruptura. Sendo assim, através dos dados de deformação e da tensão aplicada foi possível registrar o módulo de elasticidade gerado pelo próprio equipamento.

3.5.6 Variação Dimensional

A retração ou expansão linear das argamassas foi determinada a partir das diretrizes da NBR 15261 (ABNT, 2005), onde uma variação positiva indica expansão e uma variação negativa indica retração. Para o ensaio, foram necessários três corpos de prova para cada mistura (Figura 23).

Figura 23 - Corpo de prova para análise de variação dimensional



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Primeiramente, foram elaborados os moldes das amostras, os quais foram recobertos por filme PVC e também foi passada uma fina camada de vaselina para auxiliar no seu desmolde. A primeira leitura, por meio do aparelho comparador de comprimento, foi aos 7 dias, sendo a leitura final aos 28 dias, para então calcular a variação dimensional (Equação 17). Também foi realizado o registro da variação média de massa, a qual foi calculada por meio da Equação 18.

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (17)$$

$$\Delta m_i = \frac{m_{if} - m_0}{m_0} \times 100 \quad (18)$$

Onde:

ε_i é a medida de variação dimensional (mm);

L_i é a leitura na idade final (mm);

L_0 é a leitura efetuada após a desforma (mm);

Δm_i é a variação de massa (%);

m_{if} é a massa na idade final (g);

m_0 é a massa após a desforma (g)

3.5.7 Condutividade Térmica

O ensaio para determinar a condutividade térmica foi baseado nas normas ISO 8301 (ISO, 1991) e C518 (ASTM, 2017), e a mesma foi determinada com um condutímetro sensu modelo K10N.

Primeiramente, foram moldados os corpos de prova com uma espessura compatível com a utilizada em obras (entre 1,5 e 3 cm), os quais foram curados durante 28 dias. Após a elaboração das amostras, as mesmas foram colocadas entre fluxímetros, o que possibilitou determinar o fluxo de calor pela Lei de Fourier (Equação 19). Logo, a condutividade térmica foi medida pela média simples desses fluxos. E a condutividade térmica foi determinada por meio da Equação 20.

$$q = k \times \frac{T_2 - T_1}{E} \quad (19)$$

$$\gamma = k \times \frac{\frac{q_1 + q_2}{2} \times E}{\Delta T} \quad (20)$$

Onde:

q é a taxa de fluxo de calor (W/m²);

k é a condutividade térmica da amostra (W/ (m.K));

$T_2 - T_1$ é a diferença de temperatura ΔT (°C);

E é a espessura do material (mm);

q_1 e q_2 são as densidades de fluxo de calor medidas pelos fluxímetros 1 e 2 (W/m^2);

γ é a condutividade térmica (W/mK).

3.5.8 Absorção Acústica e Perda de Transmissão

O ensaio realizado para determinar a absorção acústica e perda de transmissão seguiu as diretrizes da E1050 (ASTM, 2019), a qual utiliza o tubo de impedância Bruel & Kjaer Type 4206 com módulo de aquisição Bruel & Kjaer Type 3160-A-042 , amplificador de Potência Type 2732 e Pré-Amplificador Bruel & Kjaer Type 2670 (Figura 24).

Figura 24 - Tubo de impedância.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para o ensaio foram executadas duas medições, uma com a amostra de diâmetro de 100 mm para a faixa de frequências de 50 Hz – 1.600 Hz, e outra com a amostra de diâmetro de 29 mm para a faixa de frequências de 500 Hz – 6.400 Hz. A perda de transmissão e absorção acústicas foram captadas utilizando 4 microfones B&K Type 4187 devidamente calibrados. Após isso, por meio do software Pulse Labshop da Bruel & Kjaer, foram obtidos gráficos do coeficiente de absorção por frequência e outro da perda de transmissão por frequência.

3.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

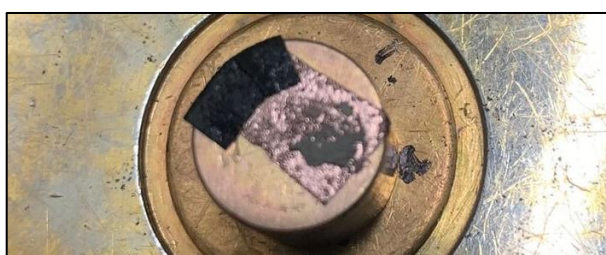
As análises da microestrutura das argamassas foram realizadas apenas com as misturas AR e AN003, visto que esta última possui o maior teor de nanocelulose na sua pasta.

3.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

Com a finalidade de avaliar a microestrutura das argamassas elaboradas com a nanocelulose, foram realizadas imagens das argamassas, utilizando o microscópio eletrônico de varredura modelo por emissão de campo JSM-6701F associado a um Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS) no Laboratório de Caracterização de Materiais.

As amostras de argamassas, após o ensaio de compressão aos 28 dias, foram retiradas do corpo de prova prismático com o auxílio de uma serra-fita. Em seguida, foram embutidas em resina, lixadas e polidas, e então foram recobertas com material condutor (ouro), tornando possível a análise microscópica através da emissão de feixe de elétrons que incidiram na amostra (Figura 25).

Figura 25 – Vista superior da amostra da argamassa recoberta com ouro utilizada na análise do MEV.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Conforme Wilkinson e Britton (2012), deve-se ter cuidado com os processos de preparação da amostra a fim de amenizar qualquer dano de corte sobre a sua superfície da amostra, por isso o polimento é um procedimento primordial.

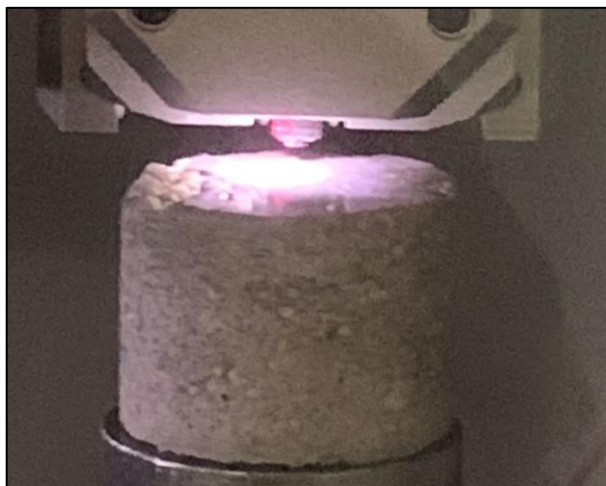
3.6.2 Microscopia de Força Atômica

Foi realizada a análise de microscopia de força atômica a fim de obter informações sobre a superfície e rugosidade da argamassa com nanocelulose em escala atômica. Para isso, foi utilizado o equipamento da marca NanoSurf, modelo Nanite B, situado no laboratório de análise microscópica da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC.

Para esta análise, inicialmente foi realizada a preparação da amostra das argamassas com a higienização do substrato e logo após as amostras foram fixadas com fita dupla-face. As amostras foram moldadas de forma que não houvesse

necessidade de serem embutidas em resina (Figura 26), e houve um processo para nivelar o corpo de prova semelhante ao do MEV, contudo sem o recobrimento do material condutor.

Figura 26 - Corpo de prova no AFM.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para análise da amostra, foi utilizado o modo de contato, o qual estabelece interação direta entre a ponta de silício do cantilever com o substrato analisado. Posteriormente, o laser direcionado à extremidade da sonda refletiu, por meio do sistema de fotodetectores, as informações mapeadas da superfície para o software NanoSurf CETR AFM, formando a imagem topográfica tridimensional.

As imagens geradas foram analisadas com auxílio do software WSxM v4.0 Beta 9.3, que possibilitou identificar os valores dos coeficientes de Skewness, de Kurtosis e da rugosidade média da superfície. Além disso, possibilitou um tratamento de imagem, o qual melhorou alguns artefatos gerados devido tratar a amostra ser considerada cerâmico.

3.6.3 Nanoindentação Instrumentada

As propriedades mecânicas microestruturas das argamassas (dureza e módulo de Young da matriz) foram analisadas utilizando a indentação instrumentada, através do equipamento da marca CETR acoplado no microscópio de força atômica.

A preparação das amostras segue as mesmas instruções para análise feita no MFA. De acordo com Gao *et al.* (2019), os resultados do ensaio de nanoindentação são confiáveis apenas com amostras preparadas adequadamente. Logo, a

planicidade da superfície analisada é crucial para a instrumentação no microscópio de força atômica.

Para determinar essas propriedades, iniciou-se com aplicação de uma carga de 20mN seguindo a metodologia do estudo realizado por Kim *et al.* (2022). Entretanto a carga máxima necessária e a utilizada neste estudo foi de 29mN, onde a relação entre a carga aplicada e a profundidade de penetração foi gerenciada pelo software UMT, disposto em 16 pontos por matriz com espaçamento de 50 μ m.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de significância do teor de nanocelulose e suas validações foram realizadas através do software OriginPro versão 9.95.167 da OriginLab. A propriedades analisadas foram as mesmas usadas como requisitos para seleção da argamassa de referência: índice de consistência e resistência à compressão.

Desta forma, foi realizada uma análise estatística por meio da ANOVA, para verificar se há interação significativa da nanocelulose nas propriedades da argamassa leve. Para isso foi considerado um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). A decisão da influência da nanocelulose na argamassa leve foi estimada a partir do p-valor desta análise, a qual considera como efeito significativo as variáveis que apresentarem p-valor menor que o nível de significância. A interação também foi verificada pelo coeficiente de determinação da análise (R^2). E para validação do método ANOVA, foi verificada a existência da normalidade e homogeneidade da amostra analisada.

Posteriormente à confirmação da interação do material de nanocelulose com as propriedades nas argamassas, foi identificado qual teor de nanocelulose de fato promove interação nas propriedades analisada, através do teste Turkey. Além disso, foi estimada a correlação entre as propriedades e o teor de nanocelulose por meio de uma equação de regressão linear simples, juntamente com sua validação pelo ANOVA.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados do programa experimental proposto na seção 3 com suas respectivas discussões. O capítulo inicia com os resultados e discussões referentes à caracterização dos materiais, seguindo com os ensaios no estado fresco, endurecido e análises microestruturais e, por fim, estimativa estatística.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Areia

Após a realização do ensaio de granulometria através do peneiramento, de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), determinou-se que a areia utilizada nas misturas possui módulo de finura igual a 1,71, sendo classificada como agregado fino, e com diâmetro máximo dos grãos de 1,18 mm. Pelo ensaio da NBR 16916 (ABNT,2021), a densidade da areia na condição saturada superfície seca é igual a 2,48 g/cm³.

Os valores encontrados para o diâmetro máximo dos grãos, módulo de finura e massa específica da areia são similares aos resultados obtidos por Becker, Effting e Schackow (2022), sendo 2,36 mm, 1,41 e 2,60g/cm³, respectivamente.

A Tabela 9 apresenta um resumo da caracterização da areia utilizada nas argamassas avaliadas e a Tabela 10 apresenta os resultados obtidos do peneiramento, que estão representados por meio de uma curva granulométrica na Figura 27.

Tabela 9 - Caracterização da areia.

Módulo de Finura	Dimensão máxima dos grãos	Massa Específica
1,71	1,18 mm	2,48 g/cm³
NBR 17054	NBR 17054	NBR 16916

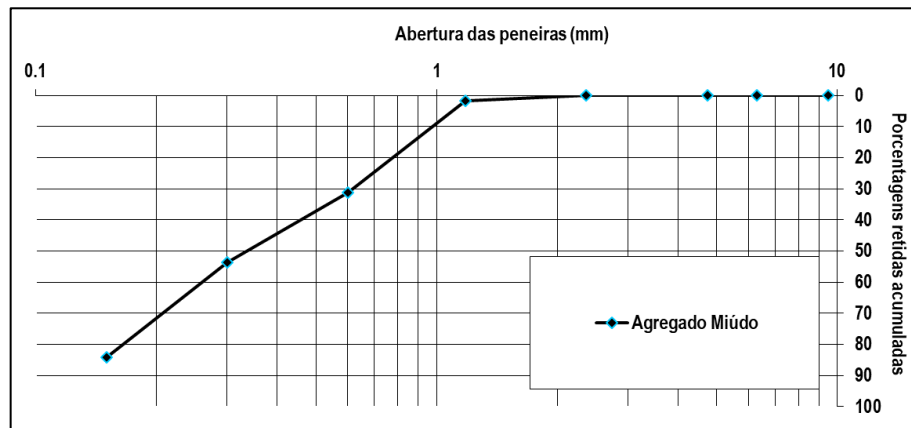
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 10 - Ensaio de granulometria da areia.

Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (g) =		300,00		Massa retida		
	b) massa inicial seca (g) =		300,00				
	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Variações	média	acumulada
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b	± 4 %	(%)	(%)
9,5	0,0	0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
6,3	0,0	0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4,75	0,0	0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2,36	0,0	0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,18	4,58	5,65	1,53%	1,88%	0,36%	1,71%	1,71%
0,6	89,37	86,88	29,79%	28,96%	0,83%	29,38%	31,08%
0,3	69,62	65,49	23,21%	21,83%	1,38%	22,52%	53,60%
0,15	90,37	93,19	30,12%	31,06%	0,94%	30,59%	84,19%
Fundo	46,06	48,79	15,35%	16,26%	0,91%	15,81%	100,00%
Total	300,00	300,00	Módulo de Finura =				1,71

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 27 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

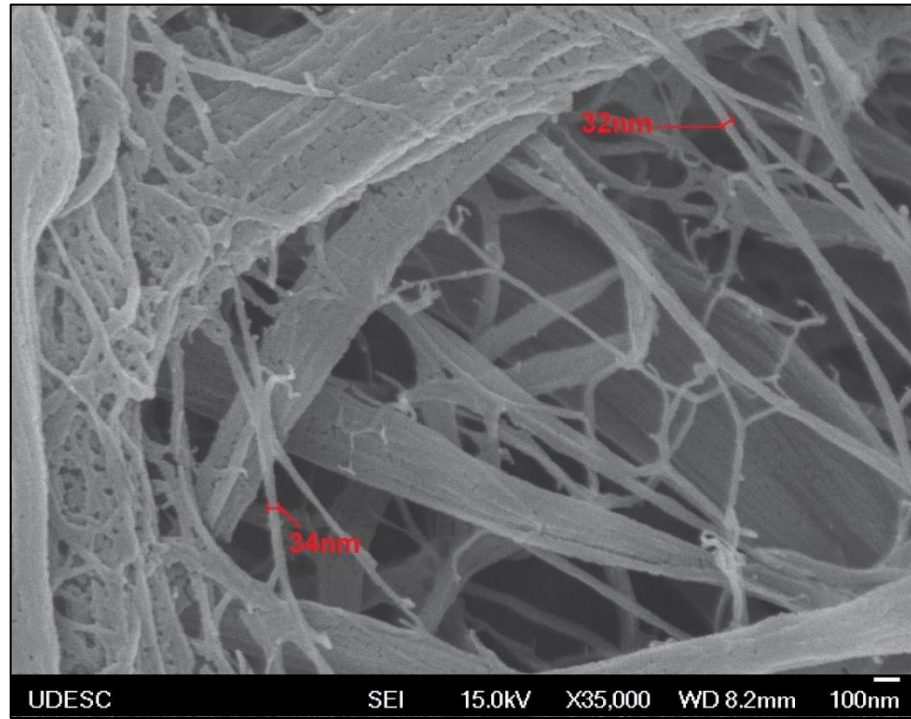
4.1.2 Nanocelulose

Para compreender melhor o material utilizado, foram executadas análises em escala micro. Foi realizada a avaliação da nanocelulose referente a sua morfologia por meio das imagens executadas pelo MEV (Figura 28 e Figura 29), o que possibilitou estimar a dimensão do material.

As dimensões encontradas, com ampliações de 35000 e 50000x, variam em uma escala inferior à 100nm e superior à 20nm. Observou-se que a nanocelulose do

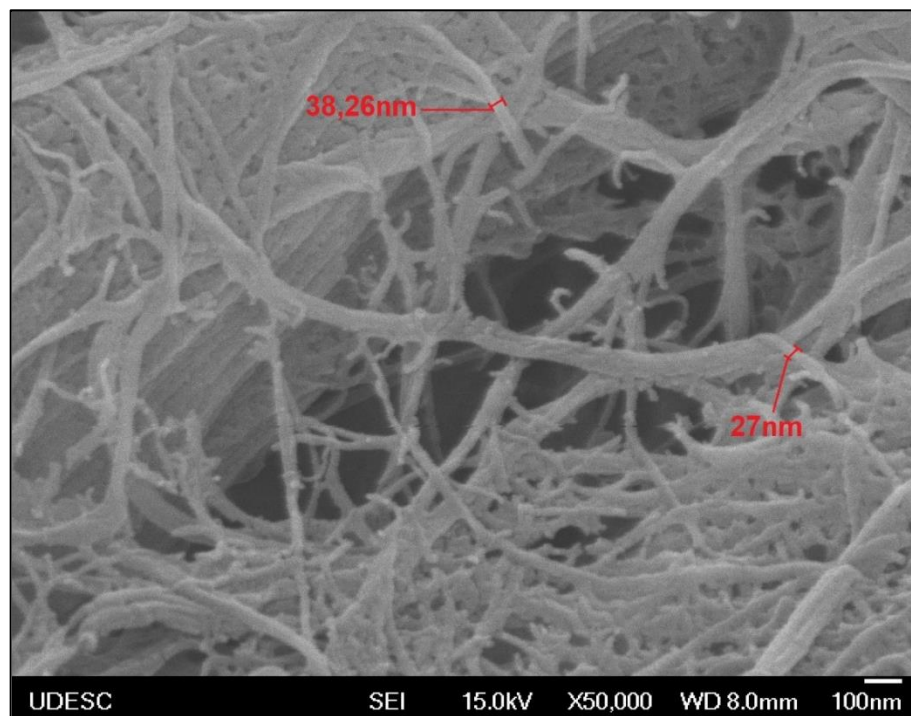
estudo estava aglutinada entre si, o que pode resultar em interpretações com dimensões maiores do que aquelas existentes.

Figura 28 – Morfologia da nanocelulose obtida pelo MEV com resolução de 35000x.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 29 - Morfologia da nanocelulose obtida pelo MEV com resolução de 50000x.

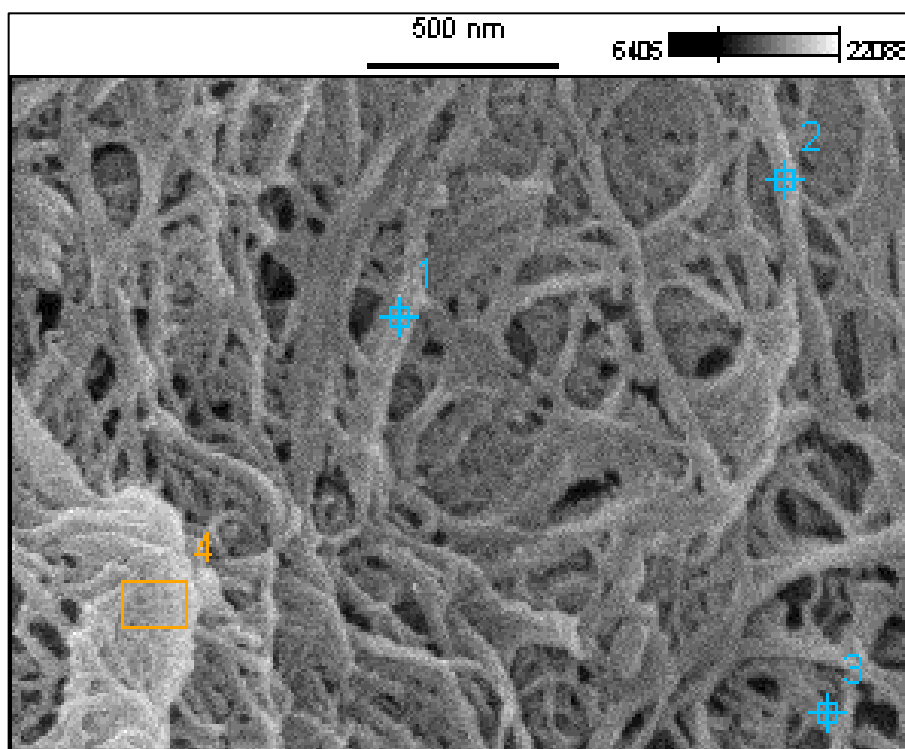


Fonte: Elaborado pela autora (2022)

E conforme Dhali *et al.* (2021), o material do estudo é de fato considerado nanocelulose, pois é inferior à 100nm; e dentro da classificação de nanofibrilas de celulose, devido apresentar comprimentos das fibras superiores à 1000nm. E Wulandari *et al.* (2016) também afirmam a classificação do material como nanocelulose, pois relatam que a celulose para ser considerada em escala nanométrica deve estar dentro de uma faixa de tamanho de 10 nm a 350 nm.

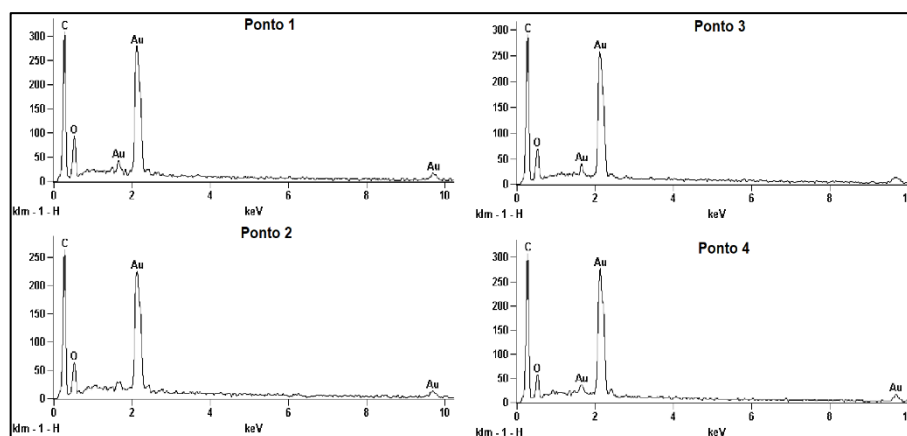
Foram feitas análises de 4 pontos da amostra da nanocelulose com o EDS (Figura 30). Os resultados obtidos nos 4 pontos foram semelhantes; e mostraram que o material do estudo é basicamente composto de carbono, o qual foi identificado nas primeiras tensões aplicadas pelo EDS (Figura 31).

Figura 30 - Mapeamento dos pontos da análise do EDS.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

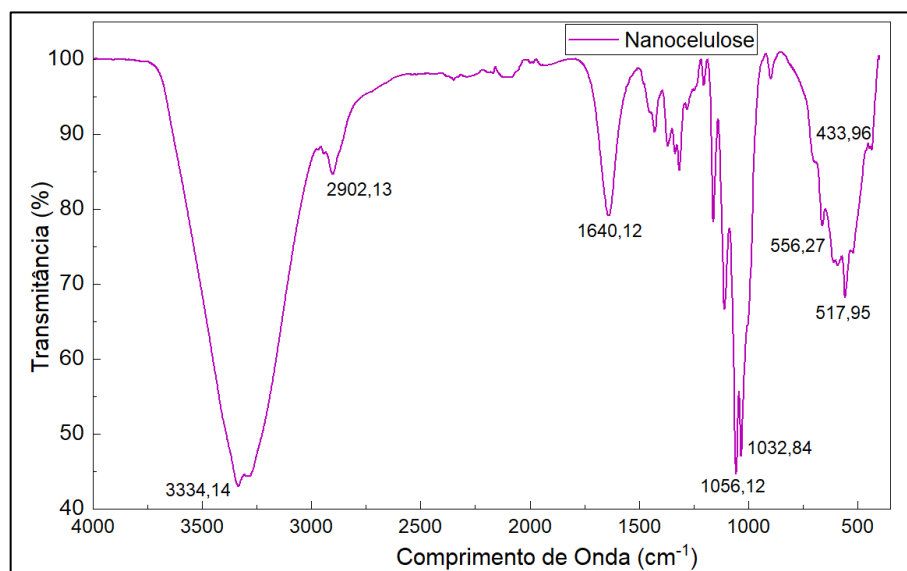
Figura 31 - Gráficos dos componentes identificados na análise de EDS nos pontos da Figura 30.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Por meio da composição química da nanocelulose obtida pelo FTIR, foi possível verificar alguns picos de comprimento de onda (Figura 32). Como o material analisado é classificado como madeira mole, o pico de 3334cm^{-1} indica absorção feita pelo grupo de OH^- com uma banda de larga e intensa. Já o pico $2902,13\text{cm}^{-1}$ corresponde à absorção de C-H alifático. O pico $1640,12\text{cm}^{-1}$ corresponde à deformação angular de ligações C-H. E os picos menores de comprimentos de onda ($<1140\text{ cm}^{-1}$) correspondem C-O de álcool secundários e C-H aromáticos.

Figura 32 - Espectro de FTIR da nanocelulose.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

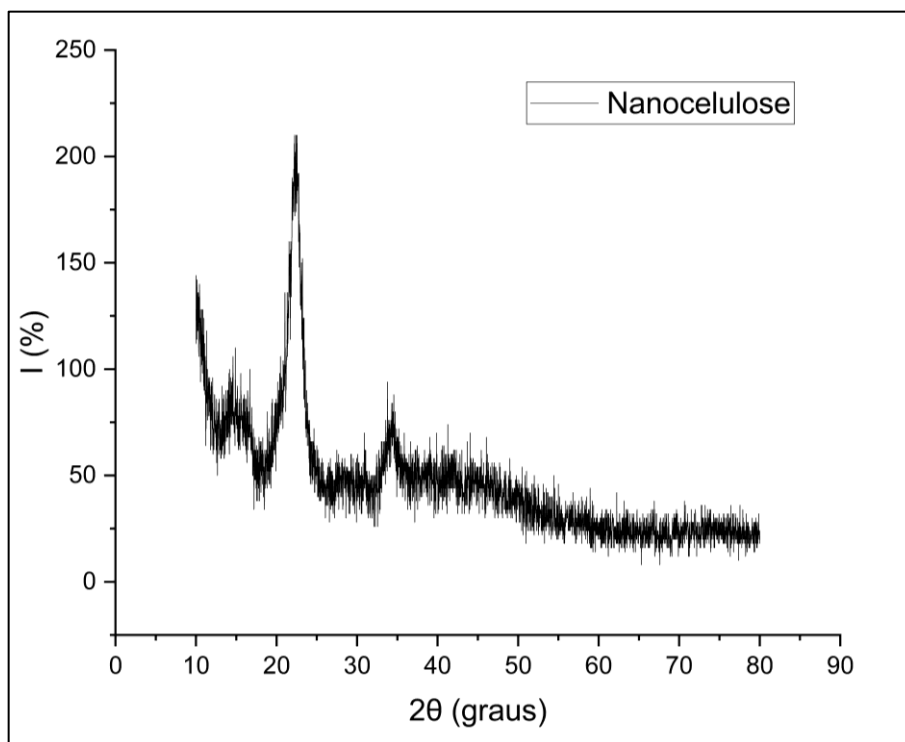
Os picos de comprimento de onda maiores correspondem à celulose, já os picos de menores intensidades podem ser referentes à lignina e hemicelulose. Todos

os picos da nanocelulose deste estudo foram picos semelhantes aos resultados encontrados por Wulandari *et al.* (2016) e Vieira (2018). Tais resultados foram referentes à um estudo utilizando nanoceluloses que passaram por processo de pré-tratamento e hidrólise ácida para a sua obtenção.

Pela difração de raios X, foi possível identificar uma estrutura com uma parte amorfa e outra cristalina. Como os picos em difratogramas de raios X indicam a cristalinidade do material, pela Figura 33 foi possível observar apenas um pico com maior intensidade, o qual se encontra em $2\theta \approx 23^\circ$. Utilizando a Equação 4, foi possível estimar a cristalinidade do material em 51,47%.

Os difratogramas ficaram bem semelhantes com os encontrados por Vieira (2018) e Wulandari *et al.* (2016), contudo a cristalinidade da nanocelulose deste estudo ficou próxima aquelas encontradas por Vieira (2018), com 52,4% e 56,52%. De acordo com Wulandari *et al.* (2016), essas diferenças de cristalinidade estão relacionadas às concentrações ácidas utilizadas no processo de hidrólise para extração da nanocelulose, onde a maior concentração ácida produz um material menos cristalino.

Figura 33 – Difratograma de raios X da nanocelulose



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Além disso, foi realizada a análise no FRX com a intenção de identificar compostos inorgânicos. Pelo ensaio, foi possível identificar cálcio no material. Conforme Dhali *et al.* (2021), a nanocelulose apresenta composição exclusivamente orgânica à base de carbono. Contudo, Vieira (2018) relata que hidróxido de cálcio pode ser utilizado como pré-tratamento para fabricação da nanocelulose, o que justificaria a presença de cálcio no resultado da análise do FRX.

4.2 ENSAIO NO ESTADO FRESCO

4.2.1 Índice de Consistência

Os resultados obtidos nas medidas do índice de consistência das argamassas contendo as três porcentagens de nanocelulose e da argamassa de referência estão apresentados na Figura 34.

Analizando os resultados, em geral as argamassas mantiveram as médias um pouco distantes do recomendado pela NBR 16541 (ABNT, 2016), cujo diâmetro de espalhamento de uma argamassa convencional deve estar entre $26 \pm 0,5$ cm.

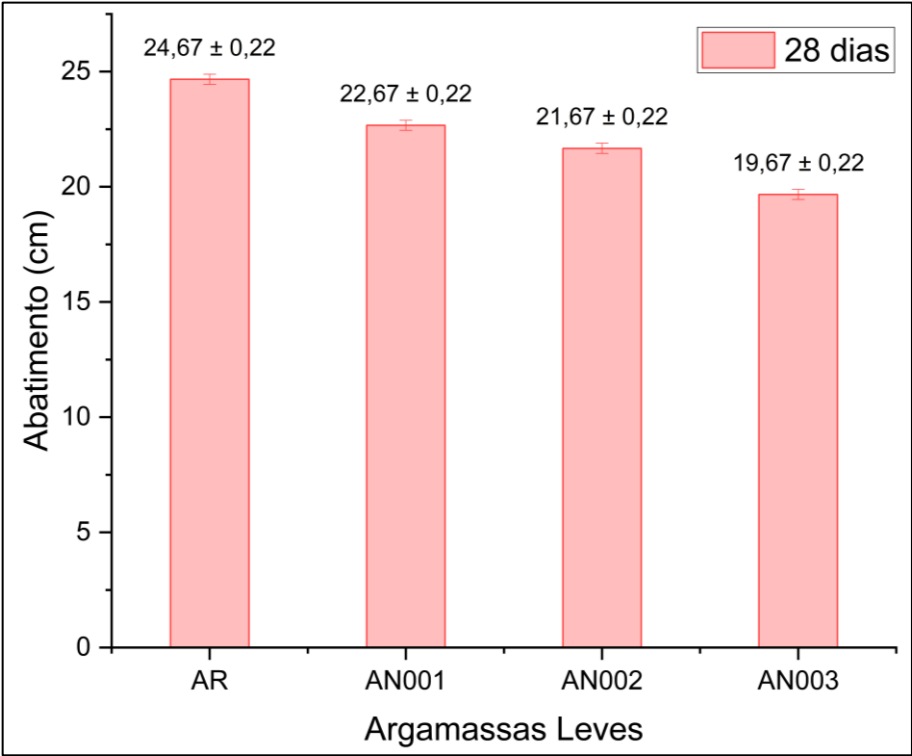
Entretanto, por se tratar de uma argamassa leve com 55% de EPS em volume do agregado miúdo, os resultados de abatimento foram diferentes ao estipulado para a argamassa convencional. E confirmado por Becker, Effting e Schackow (2022) que a presença do EPS, como agregado miúdo na argamassa, promove absorção da água de amassamento, tornando a argamassa um pouco mais seca.

Além disso, os resultados de abatimento das argamassas leves com nanocelulose foram reduzindo gradativamente conforme o percentual de nanomaterial acrescentado na mistura. Segundo Dhali *et al.* (2021), a nanocelulose é hidrofílica devido ao grande número de grupos de hidroxila presentes na sua estrutura. Desta forma, a nanocelulose atraiu as moléculas de água presentes na mistura, justificando o menor abatimento para a mistura com 0,03% de nanocelulose.

As misturas com nanocelulose demonstram uma consistência diferente da encontrada na argamassa de referência deste estudo (Figura 35), obtendo um formato de “cogumelo” após a sequência de 30 quedas. Isto pode ser justificado pela grande área de contato superficial da nanocelulose e o emaranhamento entre os seus filamentos e a pasta. Segundo Nasir *et al.* (2022), a consistência da argamassa tem a

tendência de diminuir com adição de nanocelulose, causada pela aglomeração do nanomaterial, além disso depende dos tamanhos de suas partículas na mistura.

Figura 34 - Abatimento das argamassas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 35 - Argamassa AN003 após o ensaio de consistência.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2.2 Tempo de Pega

O aumento da quantidade de nanocelulose nas argamassas influenciou diretamente nos seus tempos de pega (Tabela 11). Pela Figura 36, foi possível observar essa variação relacionada com o percentual da nanocelulose na mistura.

Observou-se que apesar de todas as argamassas com teor de nanocelulose alterarem o tempo de início e fim de pega, a AN003 realizou uma diferença inferior à AN002, isto pode ser devido à porosidade da pasta e à temperatura no dia em que o ensaio foi executado, visto que foram realizados em dias diferentes. Além desses fatores, a dispersão dos filamentos de nanocelulose pode ter alterado o resultado obtido pela mistura AN003, haja vista a dificuldade para manter uma dispersão uniforme da nanocelulose durante sua preparação. Desta forma, há possibilidade de concentrações pontuais do nanomaterial na mistura AN003, causando uma interação com os produtos de hidratação do cimento diferentes aos encontrados nas misturas AN001 e AN002.

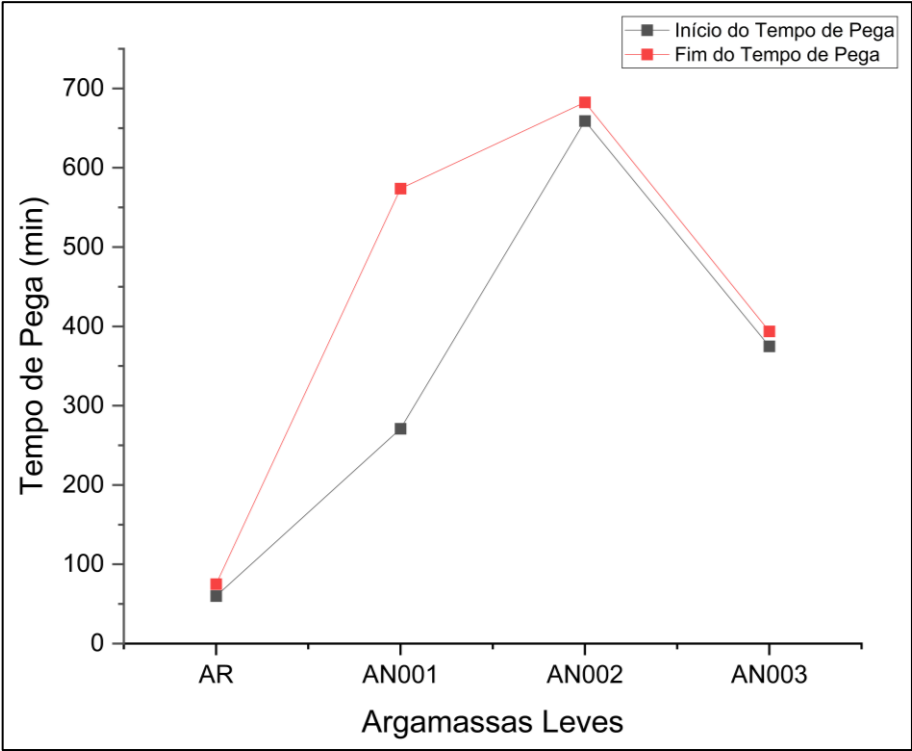
Tabela 11 - Tempo de pega das argmassas leves.

Mistura	Início de Pega (min)	Fim de Pega (min)
AR	60	490
AN001	271	756
AN002	659	814
AN003	375	660

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

De acordo com Garcia (2021), a incorporação de baixos teores de nanocelulose pode gerar variação no grau de hidratação do cimento, o que está relacionado à alteração no início do tempo de pega. E os estudos feitos por Ou, Ma e Jian (2012), indicaram que os grupos de hidroxila das moléculas de celulose estão ligados ao retardo da hidratação das pastas cimentícias. Desta forma, justifica o aumento para o tempo de início e fim de pega das argamassas AN001, AN002 e AN003 quando comparadas à AR.

Figura 36 - Variação dos tempos de pega das argamassas leves.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2.3 Retenção de Água

Analisando a retenção de água apresentada na Tabela 12, todas as argamassas obtiveram elevadas porcentagens. Conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005) todas as argamassas elaboradas apresentam alta capacidade de retenção de água, devido aos seus valores superiores a 90%.

Tabela 12 - Retenção de água das argamassas leves

Mistura	Retenção de água (%)
AR	92,19
AN001	96,58
AN002	95,93
AN003	93,14

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A argamassa do estudo está dentro dos padrões adequados para evitar fissurações, devido ao seu controle na perda de água por sucção ou evaporação. A rápida perda de água pode provocar redução das propriedades no estado endurecido, causada por não ocorrer adequadamente a hidratação completa do cimento

(CARASEK, 2010). Além disso, Bauer (2019) afirma que o controle do deslocamento de água favorece a aderência da argamassa no substrato, proporcionando uma melhor durabilidade e impermeabilidade.

Desta forma, a nanocelulose proporciona um tempo maior para hidratação do cimento devido aos teores de retenção de água nas misturas AN001, AN002 e AN003 serem superiores ao encontrado na AR, o que pode ser responsável pelos resultados encontrados no item 4.2.2 e nas propriedades do estado endurecido.

E o estudo de Hisseine *et al.* (2020) confirma que o uso da nanocelulose em compósitos cimentícios favorece o controle da retração autógena, atribuído pela liberação gradual de água pelos filamentos de nanocelulose. Além disso, afirma que independente da umidade relativa do ar, a nanocelulose libera toda água absorvida; sendo que esta distribuição de água ocorre de forma gradual com a necessidade imposta pela umidade no ambiente.

4.2.4 Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado.

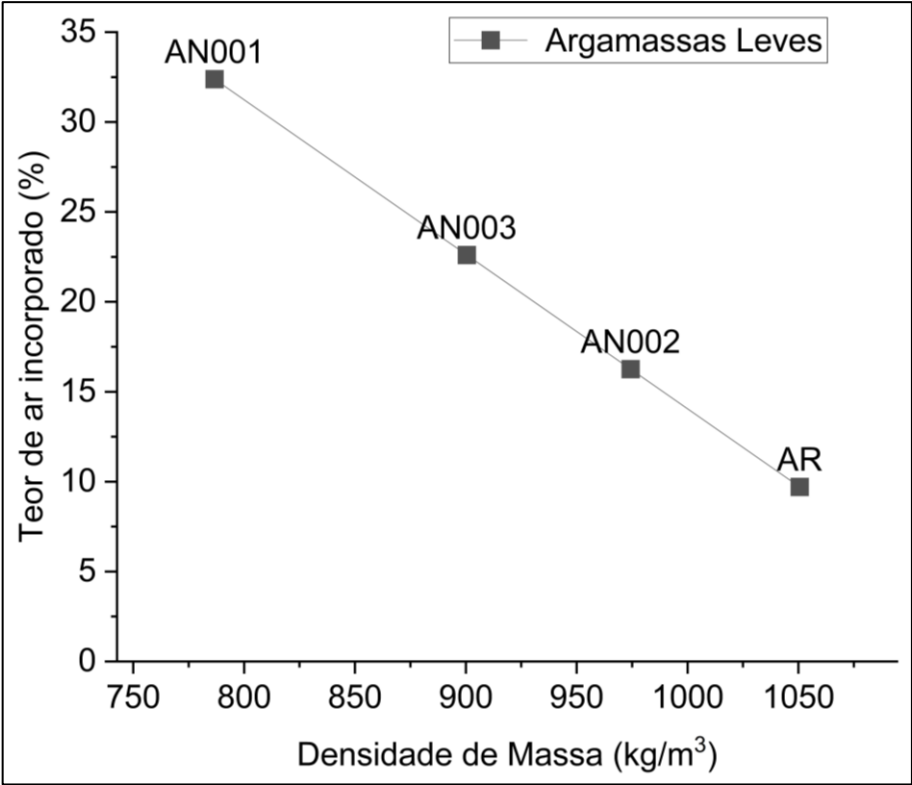
A densidade de massa foi reduzida conforme foi inserida a nanocelulose na mistura, e provocou o aumento do teor de ar incorporado (Tabela 13). Essa relação inversamente proporcional do teor de ar incorporado com a densidade de massa no estado fresco foi apresentada na Figura 37, e também foi encontrada no estudo realizado por Becker, Effting e Schackow (2022).

Tabela 13 - Teor de ar incorporado e densidade de massa para cada mistura.

Mistura	Teor de ar incorporado (%)	Densidade de massa (kg/m ³)
AR	9,71	1050,53
AN001	32,39	786,67
AN002	16,26	974,28
AN003	22,61	900,43

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 37 - Relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Contudo, observou-se que a argamassa AN001 foi responsável pela menor densidade de massa e consequentemente o maior teor de ar incorporado. Isto pode ter acontecido devido à interação do aditivo incorporador de ar com a proporção da nanocelulose na mistura e o seu processo de adensamento no momento do ensaio.

E conforme Carasek (2010), a argamassa deste estudo entra dentro da classificação de argamassa leve, por apresentar uma densidade no estado fresco inferior a 1400 kg/m³; e para NBR 13281(ABNT, 2005) a mesma é classificada como “D1”.

4.3 ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Densidade de Massa Aparente, Massa Específica Real, Absorção de Água e Porosidade.

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos das propriedades físicas dos ensaios descritos nos itens 3.5.1 e 3.5.2. Sendo que o ensaio da densidade de massa aparente foi executado com três corpos de prova e os demais com apenas dois.

Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas deste estudo estão dentro da classificação “M1”, pois apresentam uma densidade aparente inferior à 1200 kg/m^3 .

Os dados obtidos para as argamassas com nanocelulose indicaram que houve uma redução da densidade aparente e real nas misturas. Contudo, como houve maior índice de vazios para AN001, sua massa específica real contrapõe ao resultado obtido para densidade aparente. Desta forma, os valores de massa específica real diminuem com o aumento do teor de nanocelulose na mistura.

Tabela 14 - Resultados de Densidade de Massa Aparente, Massa Específica Real, Absorção de Água e Porosidade.

Mistura	Densidade de massa Aparente (kg/m^3)	Massa Específica Real (g/cm^3)	Absorção de Água (g/cm^3)	Índice de Vazios (%)
AR	$1199,46 \pm 0,01$	$1,55 \pm 0,00$	$28,13 \pm 0,21$	$30,33 \pm 0,1$
AN001	$1084,18 \pm 0,00$	$1,48 \pm 0,01$	$33,81 \pm 0,84$	$33,28 \pm 0,73$
AN002	$1133,85 \pm 0,04$	$1,46 \pm 0,01$	$35,79 \pm 0,04$	$34,30 \pm 0,2$
AN003	$1114,81 \pm 0,01$	$1,28 \pm 0,01$	$30,10 \pm 0,44$	$27,80 \pm 0,21$

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

E conforme já confirmado por Dhali *et al.* (2021), a nanocelulose apresenta propriedades hidrofílicas, o que proporcionou uma maior absorção de água nas misturas com o nanomaterial do que na argamassa de referência.

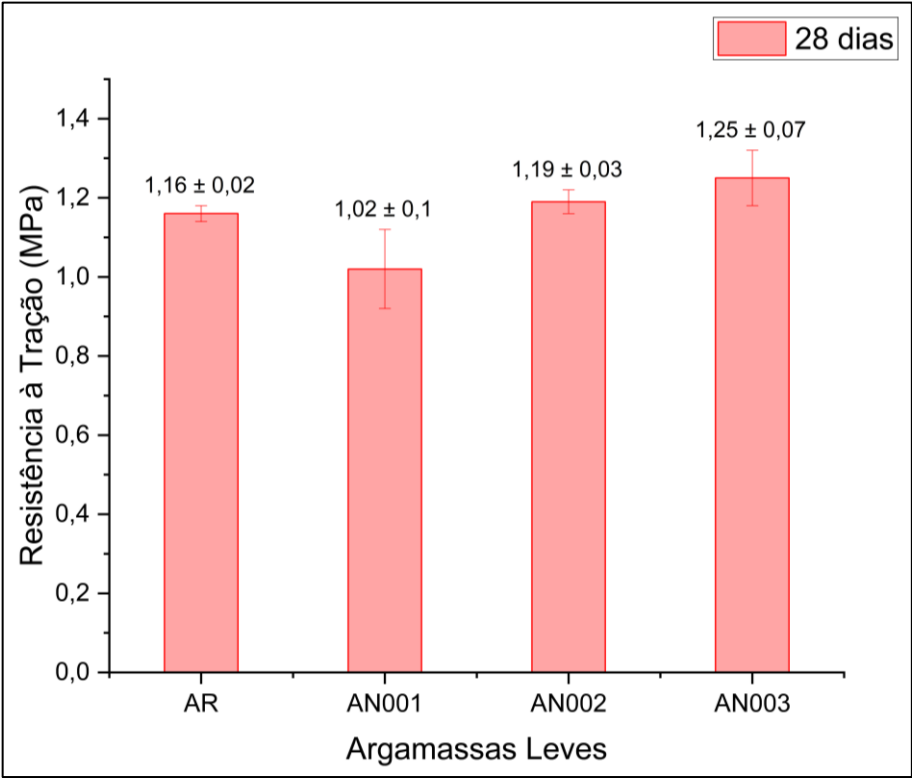
Além disso, os índices de vazios foram superiores também para argamassas com nanocelulose, exceto pela mistura AN003. Este último resultado confirma os resultados obtidos no item 4.2.1, onde o emaranhamento da nanocelulose na mistura produziu um formato de cogumelo, proporcionando uma pasta mais homogênea, consequentemente menor índice de vazios que as demais misturas.

4.3.2 Resistência à Tração na Flexão, Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade

A Figura 38 mostra os valores de resistência à tração na flexão da argamassa de referência e das argamassas com nanocelulose aos 28 dias. As misturas contendo nanocelulose alcançaram uma melhora em relação à de referência, com exceção da amostra da AN001. O valor encontrado para AN001 pode ser justificado por seu

resultado obtido no estado fresco, o qual apresentou um maior teor de ar incorporado para dosagem dessa argamassa em comparação às demais.

Figura 38 - Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias.



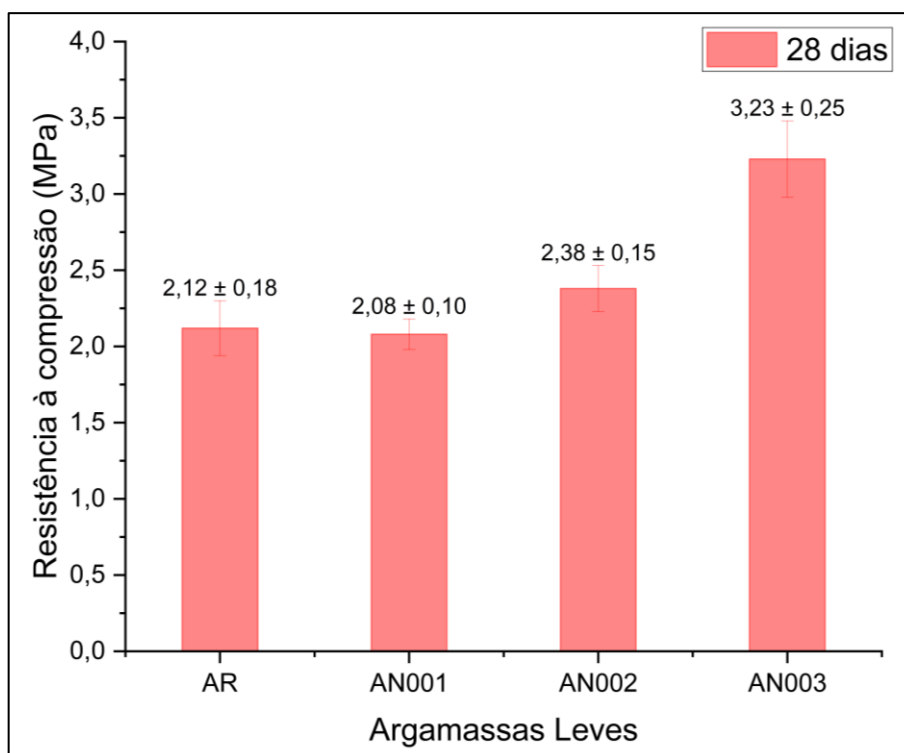
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A melhor resistência à tração foi obtida pela mistura AN003, que teve um aumento de 7,76% em relação à argamassa de referência. Pela NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as misturas se enquadram na categoria “R1”, pois suas resistências à tração na flexão apresentaram valores inferiores à 1,5 MPa.

Os resultados de resistência à compressão estão exibidos na Figura 39. Pela análise do gráfico, foi possível identificar uma melhora também com aumento do teor de nanocelulose quando comparado com a argamassa de referência, salvo também para a mistura AN001.

As argamassas do estudo tratam de argamassas não convencionais, sendo classificadas como leve. Desta forma, considerando que na sua composição denotam de 55% em volume de EPS, alcançaram resultados promissores para resistência à compressão.

Figura 39 - Resistência à Compressão aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

E com um aumento de 52,36% da resistência à compressão em comparação à argamassa de referência, a AN003 apresentou o melhor resultado. E sendo apenas ela responsável por alcançar o requisito estabelecido pela norma C270 (ASTM, 2019), a qual impõe a necessidade de uma resistência à compressão superior à 2,4 MPa para argamassas convencionais compostas por cal.

Os resultados de melhor desempenho nas resistências mecânicas com uso de nanocelulose também foram observados nos estudos de Barnat-Hunek *et al.* (2019), onde mostraram uma melhora com o uso de nanocristais de celulose em argamassas de 27,6% e 10,9% para resistência à compressão e tração na flexão, respectivamente. E Kamasamudram, Ashraf e Landis (2021), afirmam que há interação da nanocelulose com as partículas de cimento ao longo do tempo que são responsáveis pela melhora nas propriedades mecânicas.

E pela Tabela 15, é possível observar os resultados médios do módulo de elasticidade e seus respectivos desvios para cada mistura. Analisando a tabela, foi observada a presença de baixos valores para o módulo de elasticidade, o que indica uma rigidez baixa. Esses resultados estão relacionados principalmente ao teor elevado da substituição do agregado miúdo por EPS. Além disso, segundo Coelho,

Torgal e Jalali (2009), o uso de cal nas argamassas à base de cimento favorece a redução significativa do módulo de elasticidade.

Tabela 15 - Módulo de elasticidade das argamassas leves.

Mistura	Módulo de Elasticidade (GPa)
AR	$0,014 \pm 0,004$
AN001	$0,017 \pm 0,002$
AN002	$0,029 \pm 0,032$
AN003	$0,012 \pm 0,002$

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.3.3 Variação Dimensional

A Tabela 16 apresenta a média dos resultados de variação dimensional dos três corpos de prova de cada mistura. Analisando os dados, pode-se verificar que a nanocelulose proporcionou um controle na retração linear das argamassas.

As alterações volumétricas que provocam retração ou expansão são decorrentes das interações que acontecem durante a hidratação do cimento. E conforme afirma Garcia (2021) e Hisseine *et al.* (2020), a nanocelulose quando misturada com compósitos à base de cimento provoca reações nos seus produtos de hidratação. Desta forma, o nanomaterial age controlando a retração que pode ocorrer com o passar do tempo, devido à capacidade da liberação adequada de água durante os processos de hidratação do cimento.

Tabela 16 – Variação dimensional das argamassas.

Mistura	ε_i (mm)	Δm_i (g)
AR	-2,194	8,803
AN001	-0,821	-8,220
AN002	-0,006	-8,969
AN003	-0,009	-8,478

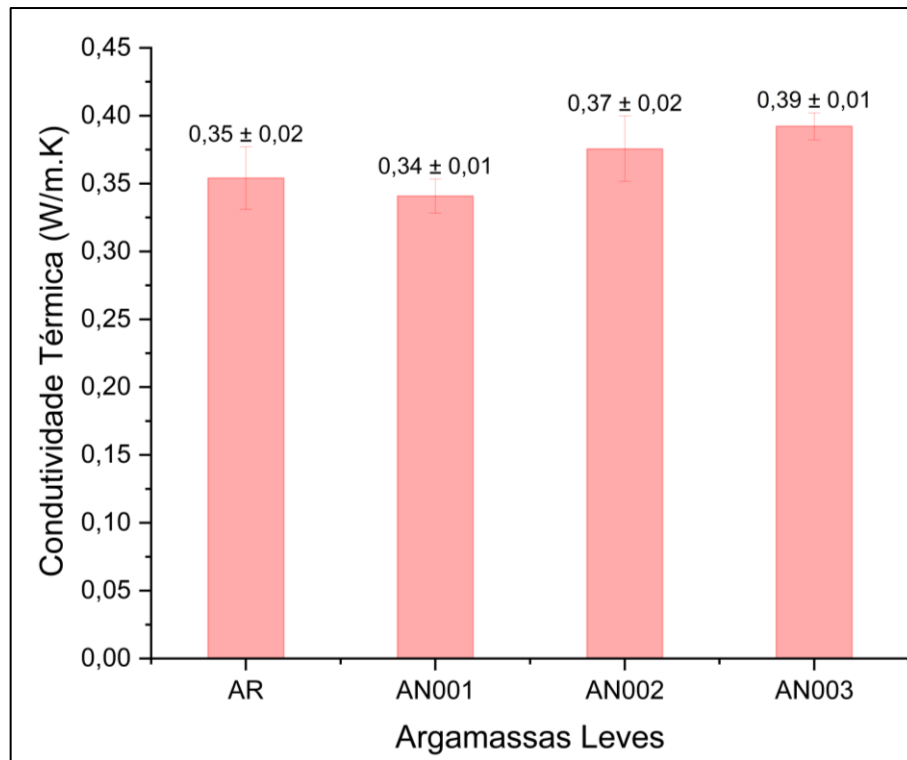
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Além disso, os resultados indicaram uma diminuição da retração na massa com nanocelulose na mistura, e um aumento para a argamassa de referência. Esses valores confirmam os resultados de menores densidades obtidas nos itens anteriores para as argamassas de nanocelulose.

4.3.4 Condutividade Térmica

A Figura 40 mostra os dados referentes à condutividade térmica das argamassas. Analisando os resultados, todas as argamassas apresentaram baixa condutividade térmica.

Figura 40 - Condutividade térmica das argamassas leves.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

E em comparação com resultados obtidos por Becker, Effting e Schackow (2022), as argamassas leves deste estudo apresentaram uma menor condutividade, devido ao alto teor de EPS nas suas misturas. Sendo a mistura AN001 responsável pela menor condutividade térmica, que já era esperado pois esta argamassa apresentou o maior teor de ar incorporado no estado fresco e o maior índice de vazios no estado endurecido.

Segundo Sahlol *et al.* (2021), a nanocelulose é considerada um material com isolamento térmico semelhante ao EPS. Desta forma, quando se compara a argamassa de referência com as argamassas com nanocelulose, as misturas não apresentaram alterações significativas entre si.

E Abu-Jdayil *et al.* (2019) também classificam a nanocelulose como um isolador térmico orgânico. Entretanto, ressalva que a sua condutividade térmica varia com a temperatura, com o teor de umidade e a densidade de massa.

4.3.5 Absorção acústica e Perda de Transmissão

A Figura 41 e a Figura 42 apresentam os resultados obtidos para absorção acústica das argamassas para baixa e alta frequência, respectivamente. Seguindo a metodologia utilizada por Becker, Effting e Schackow (2022), as frequências dos gráficos iniciaram em 315 Hz pois este valor apresenta o início da frequência para sons ambientais comuns.

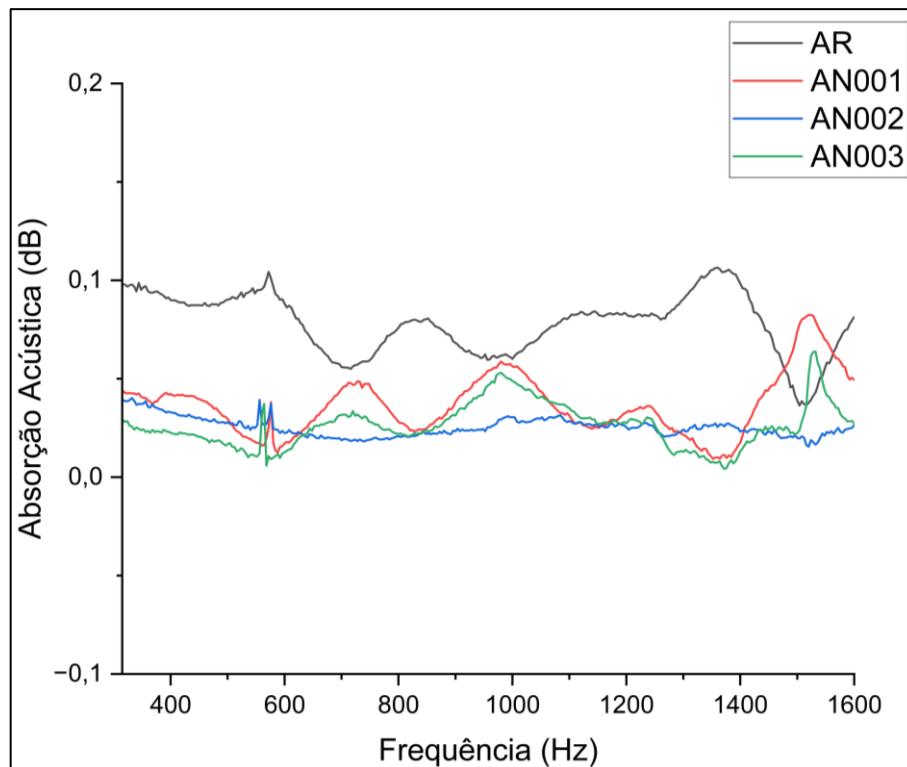
Analisando os resultados das amostras para baixas frequências, foram encontrados valores de absorção da argamassa de referência superiores às outras misturas. Contudo, houve uma oscilação dos dados ao longo da frequência devido à dificuldade de obter amostras com dimensões precisas quando inseridas no tubo de impedância.

Além disso, pelo gráfico da Figura 41, também foi possível observar que a AN001 apresentou maior absorção quando comparada às demais misturas com nanocelulose. Tal resultado é justificado pela maior porosidade presente nesta argamassa.

Os resultados de absorção acústica obtidos para amostras de alta frequência indicaram uma melhor absorção realizada pela mistura AN001 conforme a frequência foi aumentada. Contudo, houve também imprecisão dos resultados devido ao formato das amostras não possuírem encaixe perfeito dentro do tubo.

Essa imprecisão foi mostrada também pelos altos valores obtidos pelas misturas AN002 e AN003 nas frequências iniciais. Apesar disso, a curva obtida para todas as misturas é semelhante ao esperado para materiais porosos, isto causado pelo sutil aumento da absorção acústica conforme o aumento da frequência.

Figura 41 - Absorção acústica das amostras para baixas frequências.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Como os materiais deste estudo são porosos, a propagação do som ocorre através dos poros. E segundo Silva (2018), materiais porosos tem a tendência de se comportar com efeitos viscosos na sua propagação sonora, o que provoca uma dissipação da energia acústica em forma de calor. Além disso, ele relata que essa propagação em meios porosos depende da geometria do material, da propriedade do ar nos poros e das propriedades mecânicas do sólido.

Desta forma, analisando os dados obtidos nos dois gráficos de absorção, foi possível observar que a quantidade de poros foi um fator mais significativo que a dosagem do teor de nanocelulose nas misturas.

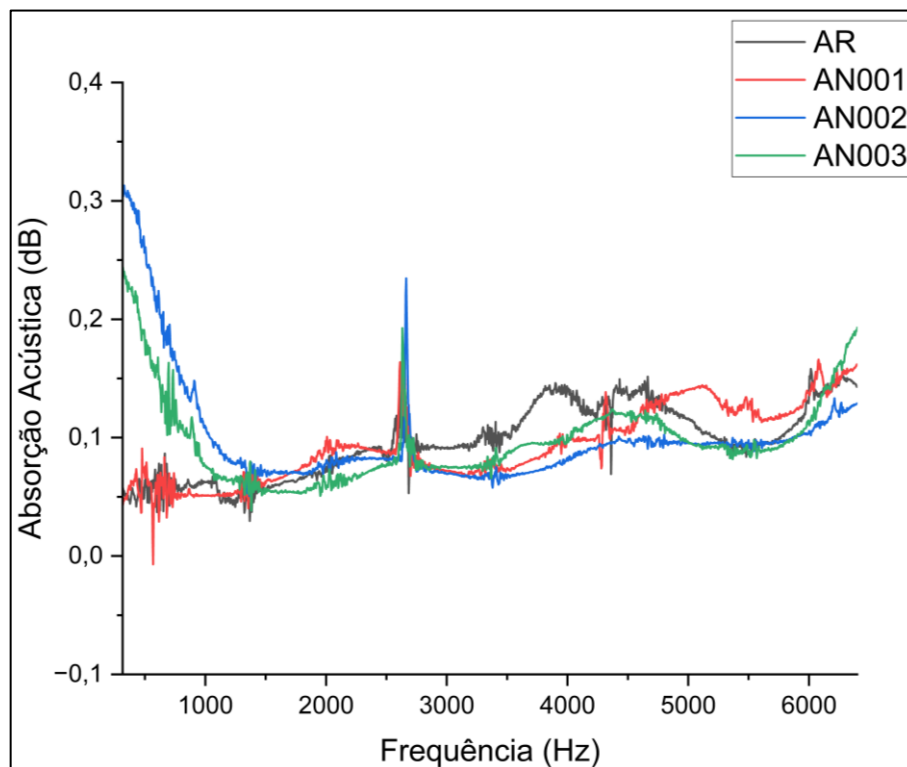
As perdas de transmissão baixa e alta frequência estão apresentadas na Figura 43 e na Figura 44, respectivamente. Analisando os dois gráficos de perdas de transmissão, observa-se comportamentos diferentes para as amostras de 100mm e 29mm (considerando a mesma dosagem de mistura). Essa diferença deve-se diretamente pelo formato da amostra. As amostras de 100mm apresentaram um formato mais adequado para o tubo de impedância, com menos vãos livres entre a amostra e a parede do tubo.

Pelo gráfico referente às amostras de baixa frequência, observou-se que a perda de transmissão é diretamente proporcional ao aumento do teor de nanocelulose na mistura. Sendo a AN003 responsável pelo resultado com maior perda de transmissão.

De acordo com a Lei da Massa, a perda de transmissão é a relação logarítmica entre a energia sonora transmitida e a energia sonora incidente no objeto (SIMÕES, 2011). Sendo assim, quanto maior a massa superficial do objeto, melhor o seu desempenho acústico.

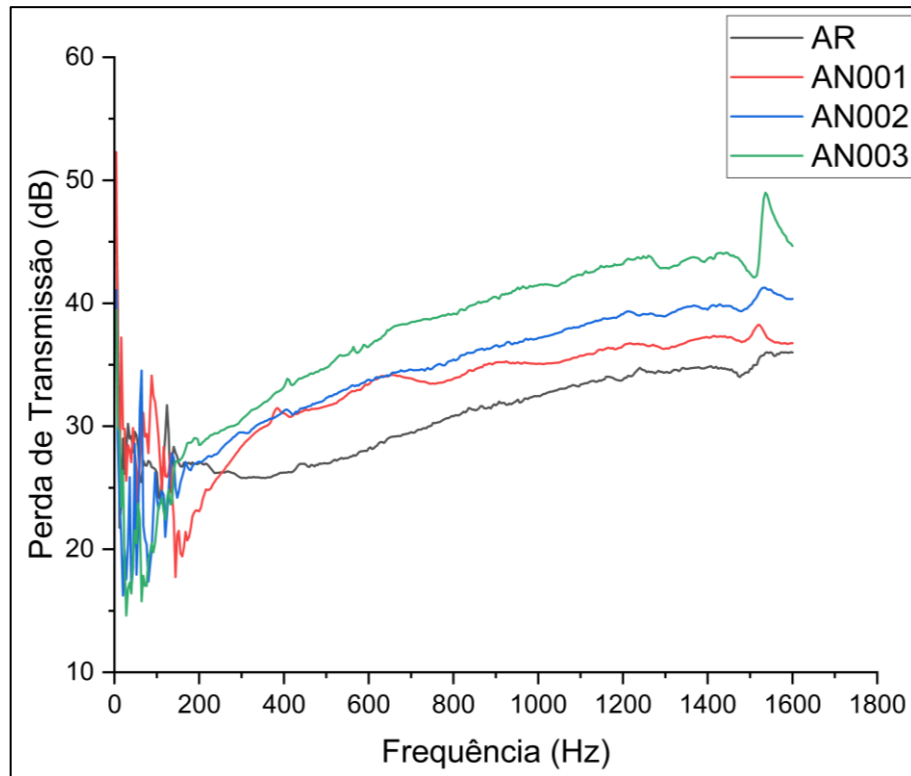
Desta forma, a mistura AN003 apresentou um melhor isolamento acústico devido à redução da transmissão de energia acústica para o ambiente, e devido à homogeneidade da mistura.

Figura 42 - Absorção acústica das amostras para altas frequências.



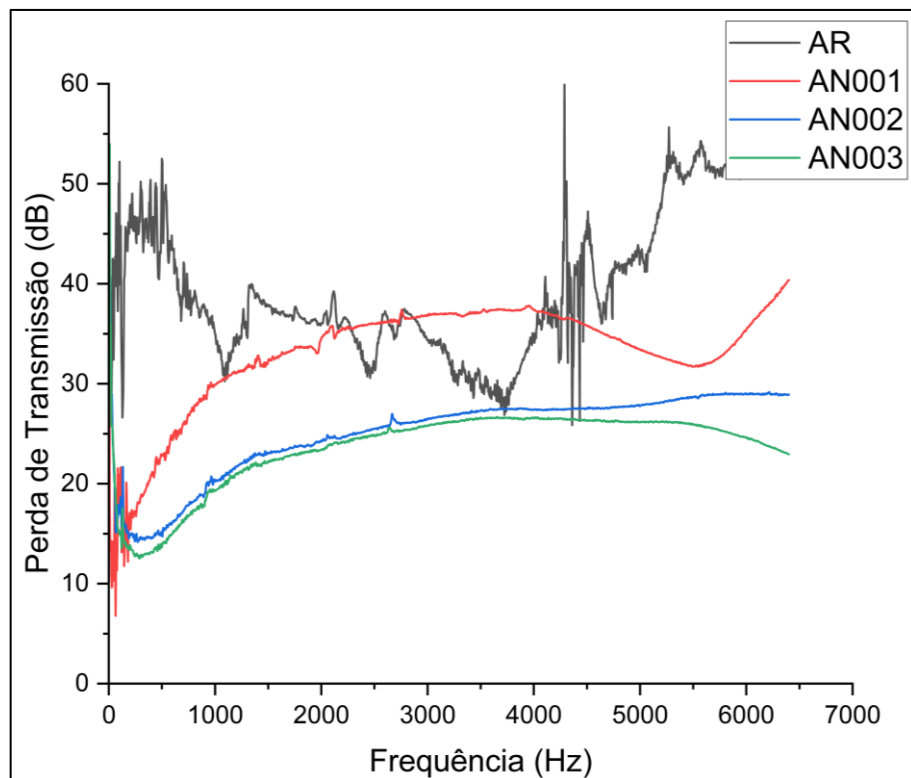
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 43 - Perda de transmissão das amostras para baixas frequências.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 44 - Perda de transmissão das amostras para altas frequências



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Analizando o gráfico das amostras de altas frequências, observou-se um efeito contrário ao obtido nas amostras de baixas frequência. Desta forma, a perda de transmissão foi inversamente proporcional ao teor de nanocelulose. Entretanto, considerando que as espessuras das amostras e homogeneidade das misturas variaram entre si, os resultados obtidos neste ensaio podem ter interferências em relação às demais características das amostras e não apenas ao teor de nanocelulose.

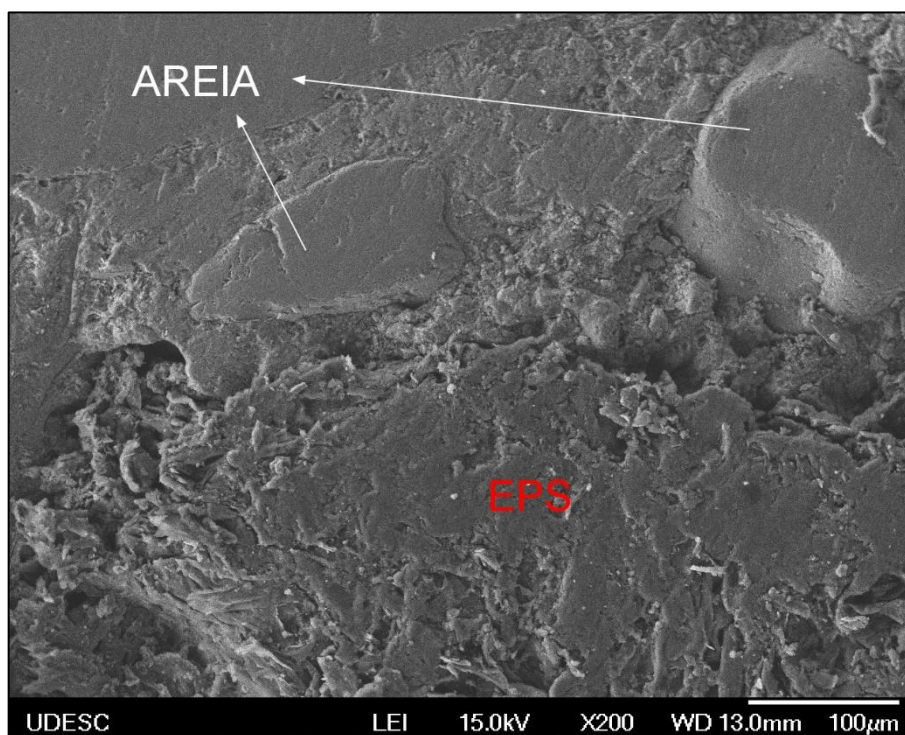
4.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

4.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens obtidas por MEV mostraram-se diferentes para cada mistura (Figura 45 e Figura 46). Em ambas houve danos referentes ao processo de polimento das amostras, causados pelo desprendimento de partículas de EPS.

Pela imagem da mistura AR, foi possível identificar partículas das areias e de EPS envolvidas pela pasta. Analisando o MEV, foi possível observar uma pasta com maior rugosidade, consequentemente menor homogeneidade entre as partículas.

Figura 45 - Imagem do MEV da AR com ampliação de 200x.



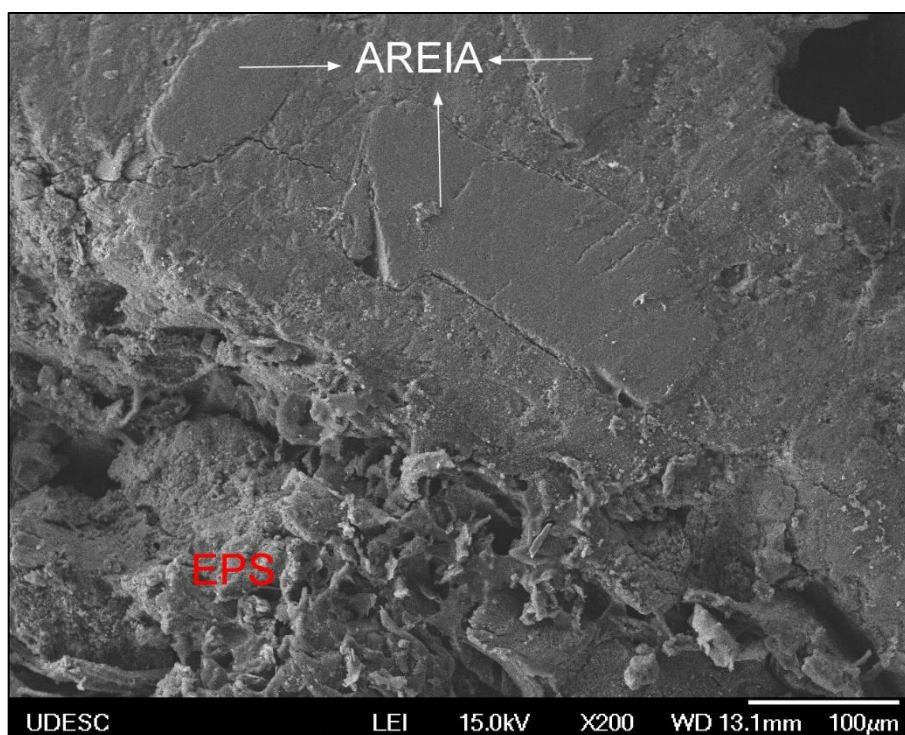
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A imagem do MEV da mistura AN003 mostrou uma argamassa com superfície mais lisa, devido à pasta cimentícia estar mais homogênea. Foi possível também identificar os grãos de areia e o EPS envolvidos pela pasta.

De acordo com o estudo de Nasir *et al.* (2022), a presença da nanocelulose proporcionou uma zona de transição mais lisa, causada pela ausência de grãos de cimentos desidratados. Além disso, comprovou-se que houve a formação de mais átomos de Ca, Si e AL, logo, favoreceu a densificação microestrutural com uma formação da rede do gel C-S-H mais hidratado.

Hisseine, Omran e Tagnit-Hamou (2018) também afirmam que os emaranhados de nanocelulose contribuem para uma microestrutura mais densa, causado pela conexão entre os filamentos de nanocelulose com os poros presentes na pasta. Desta forma, a nanocelulose promove aumento na resistência à fratura do esqueleto cimentício.

Figura 46 - Imagem do MEV da AN003 com ampliação de 200x.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.4.2 Microscopia de Força Atômica

Os resultados obtidos pelo MFA comprovaram a rugosidade maior para a argamassa de referência conforme apresentado pela Tabela 17.

Tabela 17 - Rugosidade média, coeficiente Skewness e coeficiente Kurtosis das argamassas AR e AN003.

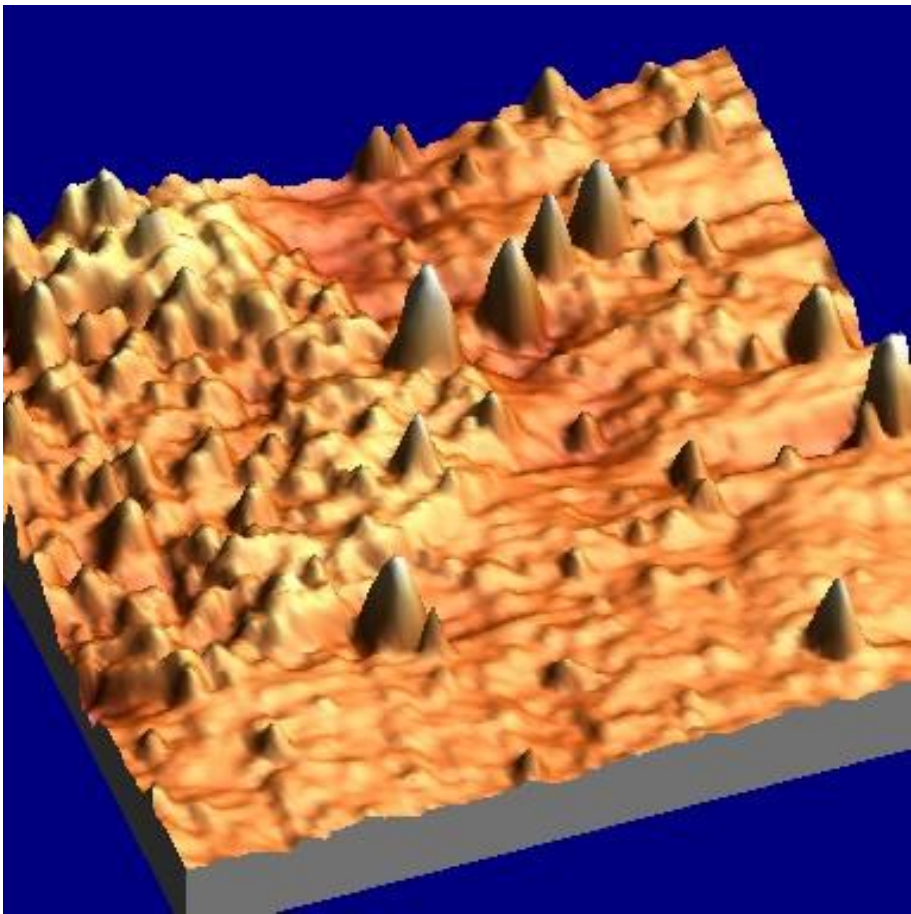
Mistura	RMS/ AP*	Coeficiente de Skewness	Coeficiente de Kurtosis
AR	0,030	1,29	8,18
AN003	0,007	-0,25	3,72

*Rugosidade Quadrática Média/ Área Projetada

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os valores apresentados na Tabela 17 são confirmados pelas representações topográficas das misturas mostradas na Figura 47 e na Figura 48.

Figura 47 - Imagem 3D da topografia da superfície da argamassa AR.

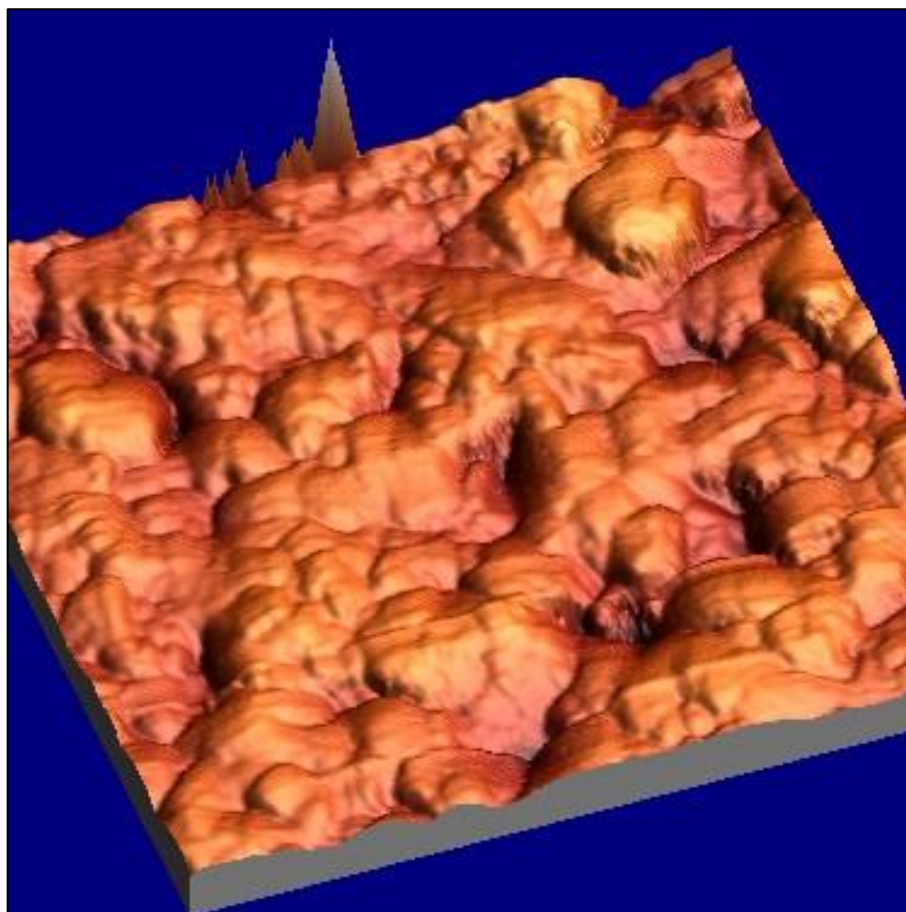


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O coeficiente de simetria (Skewness) mostra uma variação negativa para argamassa com nanocelulose e positiva para de referência. Desta forma, indicando a presença de vales na argamassa para nanocelulose, e maior presença de picos para argamassa de referência. Esses resultados do coeficiente são causados também pelo processo de tratamento da amostra para execução do ensaio.

Além disso, os coeficientes de achatamento (Kurtosis) das duas misturas apresentaram valores superiores à 3, o que indica uma tendência para formação de picos agudos. Entretanto, o resultado encontrado para argamassa de referência está mais distante do 3 do que o encontrado para argamassa de nanocelulose, logo, a mistura AN003 apresenta picos menos agudos.

Figura 48 - Imagem 3D da topografia da superfície da argamassa AN003.



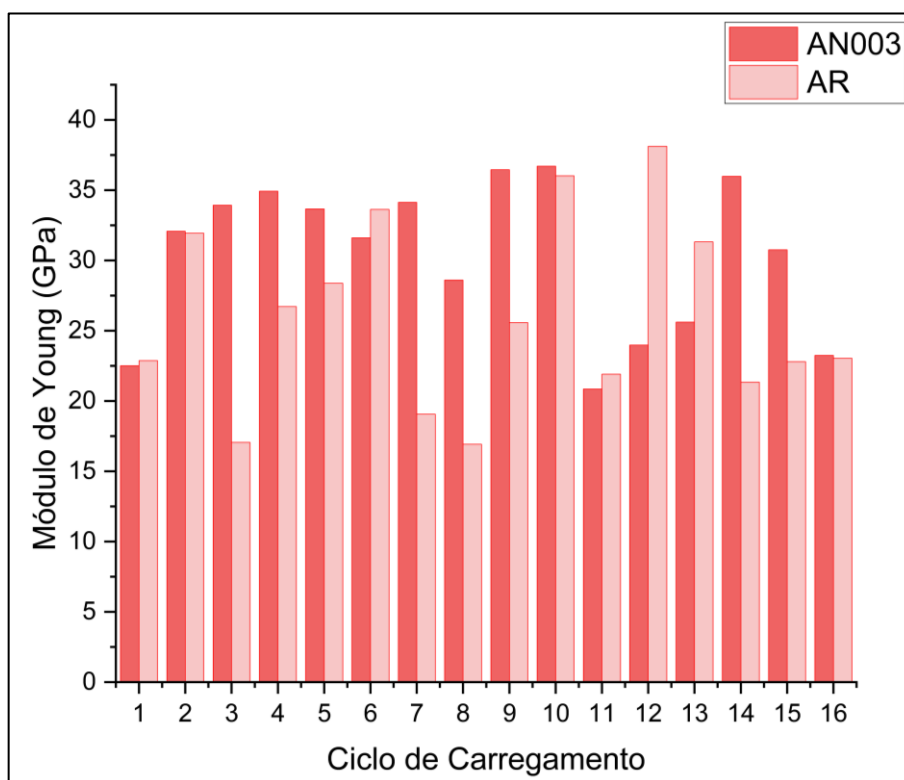
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Segundo Peled, Castro e Weiss (2013), a rugosidade na superfície de compósitos cimentícios tende a diminuir conforme vai aumentando a idade do material. Este efeito ocorre devido à hidratação das partículas de cimento ao longo do processo de cura. E de acordo com Garcia (2021), os filamentos de nanocelulose interagem com os produtos de hidratação do cimento, logo, confirma a tendência da redução de rugosidade na superfície. Gao *et al.* (2019) também comprovam uma redução na rugosidade para compósitos cimentícios com nanocelulose quando comparados com uma mistura sem o nanomaterial.

4.4.3 Nanoindentação Instrumentada

A Figura 49 mostra o resultado de módulo de Young obtido em cada um dos 16 pontos de carregamento indentado. Analisando o gráfico, observa-se uma oscilação maior entre os valores da mistura AR do que os da AN003. A média encontrada de cada mistura foi $26,044 \pm 5,155$ GPa e $30,316 \pm 4,363$ GPa, respectivamente, argamassa de referência e argamassa com 0,03% de nanocelulose.

Figura 49 - Módulo de Young encontrado pela nanoindentação ao longo da matriz das argamassas.



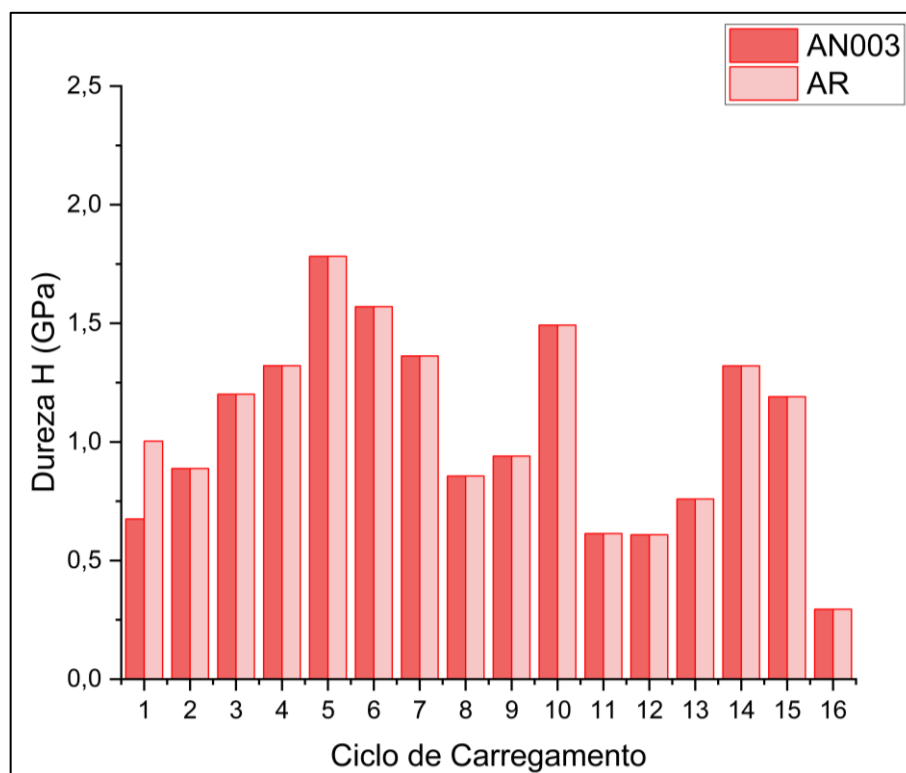
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os resultados obtidos por Hisseine *et al.* (2019) para o módulo de Young na matriz cimentícia foram $26,1 \pm 3,4$ GPa e $29,2 \pm 3,5$ GPa, respectivamente, para o concreto sem e com nanocelulose, os quais foram bem próximos aos módulos encontrados neste estudo. Gao *et al.* (2019) também alcançaram uma melhora no módulo de Young para pasta cimentícia com nanomaterial, sendo que seus valores foram $15,30 \pm 6,90$ GPa e $24,95 \pm 7,20$ GPa, respectivamente, para mistura sem e com o nanocelulose.

Na Figura 50 está a representação gráfica dos resultados obtidos para dureza H em cada um dos 16 pontos de carregamento indentado. Analisando o gráfico, foi

possível identificar que não houve diferença significativa entre as duas misturas. A média encontrada de cada mistura foi $1,075 \pm 0,310$ GPa e $1,055 \pm 0,330$ GPa, respectivamente, argamassa de referência e argamassa com 0,03% de nanocelulose.

Figura 50 - Dureza H encontrada pela nanoindentação ao longo da matriz das argamassas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os resultados obtidos por Hisseine *et al.* (2019) mostraram uma melhora de 25% na dureza para o composto com nanocelulose, o qual apresentou o valor de $0,98 \pm 0,20$ GPa. E ao comparar este resultado com os valores obtidos nesta pesquisa, observa-se uma dureza H superior para ambas misturas, com aumento de 9,7% e 7,6%, respectivamente, para as amostras sem e com nanomaterial.

Kim *et al.* (2022) relatam que não há uma ligação direta entre a dureza e a resistência mecânica de compósitos cimentícios. Contudo, Zhang *et al.* (2019) afirmam que a distribuição das fases heterogêneas de uma argamassa é crítica igual acontece nas pastas cimentícias quando considera-se o comportamento mecânico geral, entretanto a conectividade entre as fases desempenha papel fundamental na propagação de fissuras.

Ambos os resultados das propriedades analisadas na nanoindentação apresentam uma necessidade de uma amostragem maior, visto a presença de

materiais com dimensões variadas e superiores aos pontos de carregamento. As análises realizadas por Kim *et al.* (2022) foram em uma matriz de 100 pontos e as executadas por Miller *et al.* (2008) foram uma malha de 300 pontos. Desta forma, para uma precisão das propriedades do material em macroescala, há necessidade de uma área maior de análise. Além disso, Goertz e Moore (2010) afirmam que há possibilidade de algumas interferências na formação topográfica da superfície devido às vibrações descontroladas da ponta, o que pode adicionar ruído indesejado na força medida.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para verificar a significância da nanocelulose na argamassa leve nas propriedades mecânicas (Tabela 18), foram realizadas análises estatísticas com nível de significância de 5% a partir do método paramétrico ANOVA, conforme apresentadas nas Tabela 19 e Tabela 20.

Tabela 18 – Estatística descritiva do índice de consistência e da resistência à compressão.

Mistura	Índice de Consistência			Resistência à Compressão		
	(cm)			(MPa)		
	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão da Média	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão da Média
AR	24,667	0,289	0,167	2,117	0,134	0,077
AN001	22,667	0,289	0,167	2,079	0,136	0,078
AN002	21,667	0,289	0,167	2,375	0,191	0,110
AN003	19,667	0,289	0,167	3,226	0,327	0,188

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 19 - Análise da variância da consistência.

Índice de Consistência	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Estatística F	p-valor
Modelo	3	39	13	$1,950 \times 10^{-7}$
Erro	8	0,667	0,083	--
Total	11	39,667	--	--
R ²				0,983

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Pelo resultado obtido do p-valor referente à análise dos resultados do índice de consistência, observa-se um valor inferior ao nível de significância ($\alpha = 5\%$). Logo, há

interferência significativa do teor de nanocelulose no índice de consistência das argamassas. Além disso, pelo coeficiente de determinação (R^2), tem-se um valor próximo à 1, o que indica uma forte relação entre o modelo linear e as variáveis dependentes.

Tabela 20 - Análise da variância da resistência à compressão.

Resistência à Compressão	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Estatística F	p-valor
Modelo	3	2,569	0,856	$5,254 \times 10^{-4}$
Erro	8	0,358	0,045	--
Total	11	2,927	--	--
R^2				0,878

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Analisando o p-valor referente à análise dos resultados da resistência à compressão, também foi obtido um valor inferior ao nível de significância ($\alpha = 5\%$). Sendo assim, o teor de nanocelulose exerce uma interferência na resistência à compressão das argamassas. E pelo coeficiente de determinação (R^2), observa-se uma boa relação entre o modelo linear e as variáveis dependentes, provocado pelo seu valor próximo de 1.

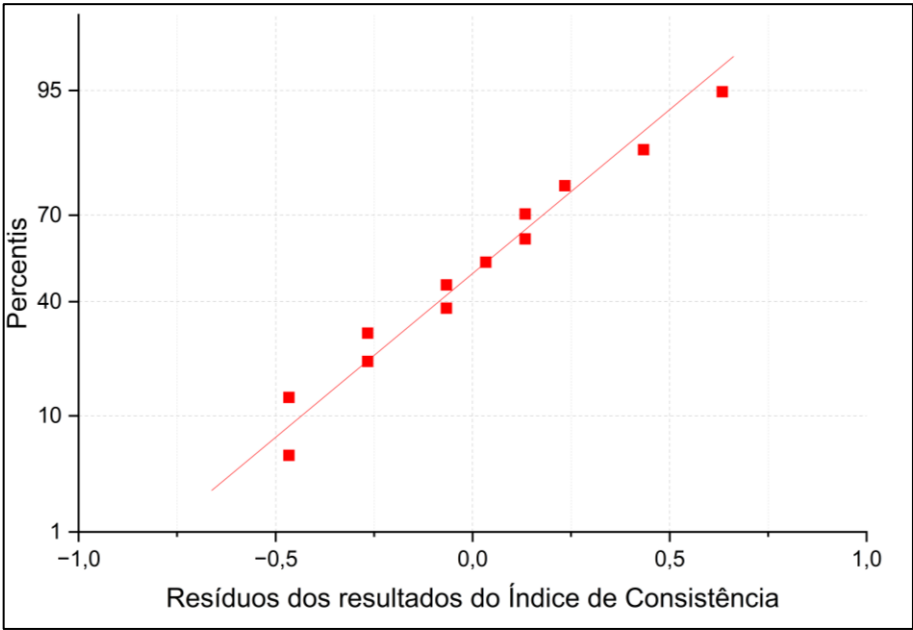
A validação da ANOVA foi feita por meio da análise dos resíduos da amostra de dados, obtendo os gráficos de normalidade (Figura 51 e Figura 52) e validação da homogeneidade da variância pelo teste de Levene (Tabela 21 e Tabela 22).

Tabela 21 - Análise da homogeneidade dos resultados do índice de consistência.

Índice de Consistência	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	p-valor
Modelo	0	0	0	1
Erro	0,07407	0,00926	--	--

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 51 - Gráfico de resíduos dos resultados do índice de consistência das argamassas.



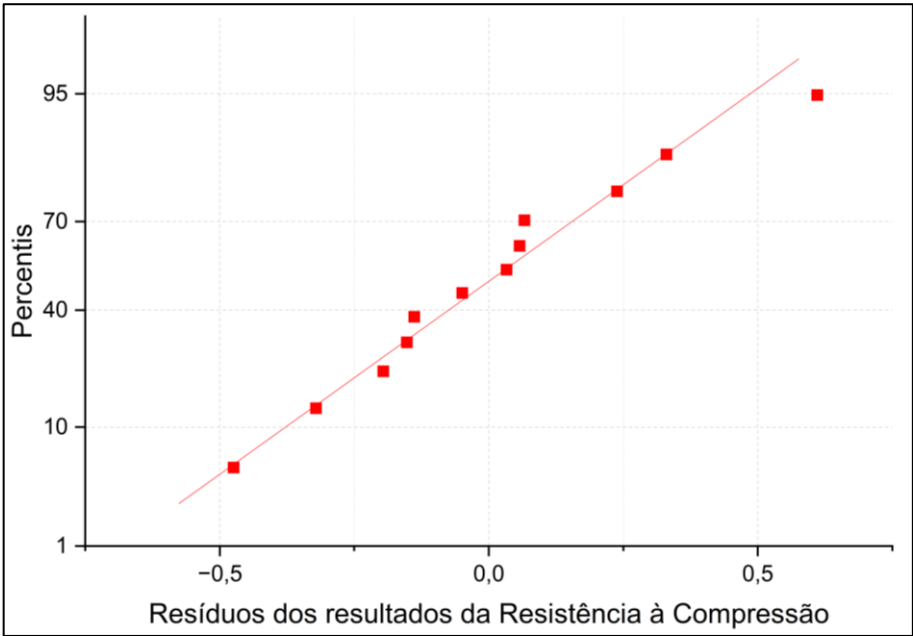
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 22 - Análise da homogeneidade dos resultados da resistência à compressão.

Resistência à Compressão	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	p-valor
Modelo	0,0489	0,0163	2,56318	0,1277
Erro	0,05087	0,00636	--	--

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 52 - Gráfico de resíduos dos resultados das resistências à compressão das argamassas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Analisando ambos os gráficos de resíduos, consegue-se verificar a existência de uma distribuição normal. E pelos testes de Levene, tem-se um valor superior ao nível de significância (5%), o que indica a homogeneidade dos dados das amostras utilizadas na ANOVA. Desta forma, os valores obtidos nas análises da variância das propriedades de fato apresentam resultados confiáveis.

Pelo teste Tukey (Tabela 23), foi possível verificar a partir de qual percentual de nanocelulose que houve significância em cada propriedade analisada. Os valores de p-valor encontrados (<5%), para o índice de consistência, mostraram que todas as porcentagens de nanomaterial influenciaram nesta propriedade. Já para resistência à compressão, apenas a partir do teor de 0,03% de nanocelulose houve alteração significativa (p-valor < 5%) na propriedade quando comparada às demais misturas.

Tabela 23 - Teste de Tukey para os resultados do índice de consistência e resistência à compressão.

Argamassa Comparadas	Índice de Consistência			Resistência à Compressão		
	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
AR - AN001	-2,755	-1,245	$1,317 \times 10^{-4}$	-0,592	0,515	0,996
AR - AN002	-3,755	-2,245	$6,287 \times 10^{-6}$	-0,295	0,811	0,484
AR - AN003	-5,755	-4,245	$6,045 \times 10^{-9}$	0,555	1,662	$9,309 \times 10^{-4}$
AN001 - AN002	-1,755	-0,245	0,012	-0,257	0,850	0,377
AN003 - AN001	-3,755	-2,245	$6,287 \times 10^{-6}$	0,593	1,700	$7,403 \times 10^{-4}$
AN003 - AN002	-2,755	-1,245	$1,317 \times 10^{-4}$	0,297	1,404	0,005

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Além disso, foi realizada uma análise de correlação dos resultados obtidos para as propriedades com o teor de nanocelulose na mistura (Tabela 24). Pelos valores acima de 5% retirados do ANOVA, confirma-se a significância diferente de zero para todos os coeficientes da equação de regressão linear.

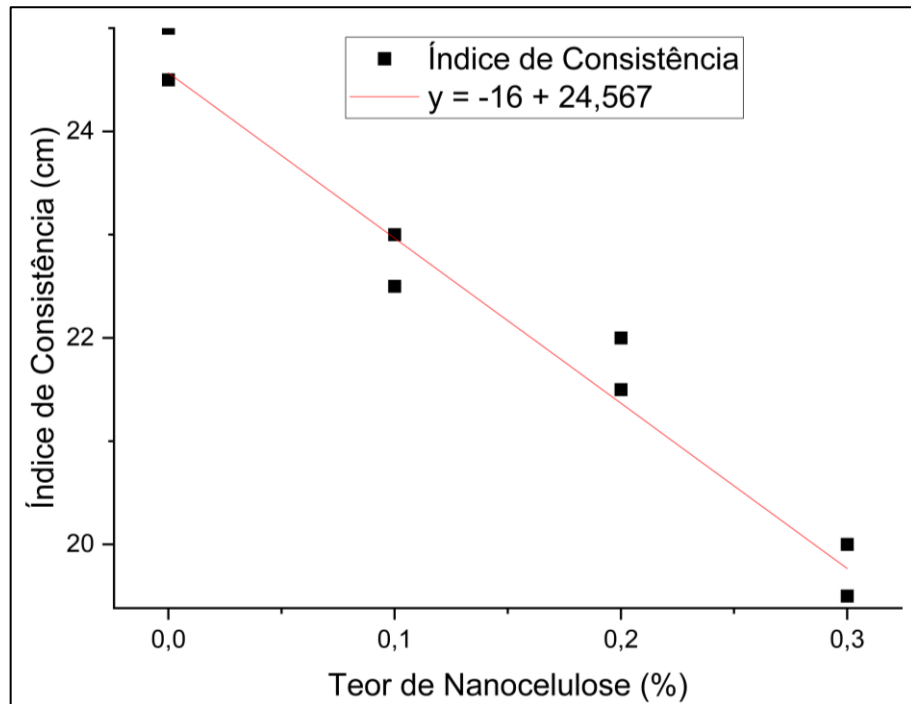
Tabela 24 – Valores dos coeficientes lineares e angulares para equação de regressão linear para as propriedades das argamassas e seu resultado ANOVA.

		Valor	Erro Padrão	t-valor	p-valor
Resistência à Compressão	Intercepto	1,906	0,149	12,746	$1,654 \times 10^{-7}$
	Inclinação	3,623	0,799	4,532	0,001
Índice de Consistência	Intercepto	24,567	0,172	142,898	$6,916 \times 10^{-18}$
	Inclinação	-16	0,919	-17,411	$8,282 \times 10^{-9}$

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

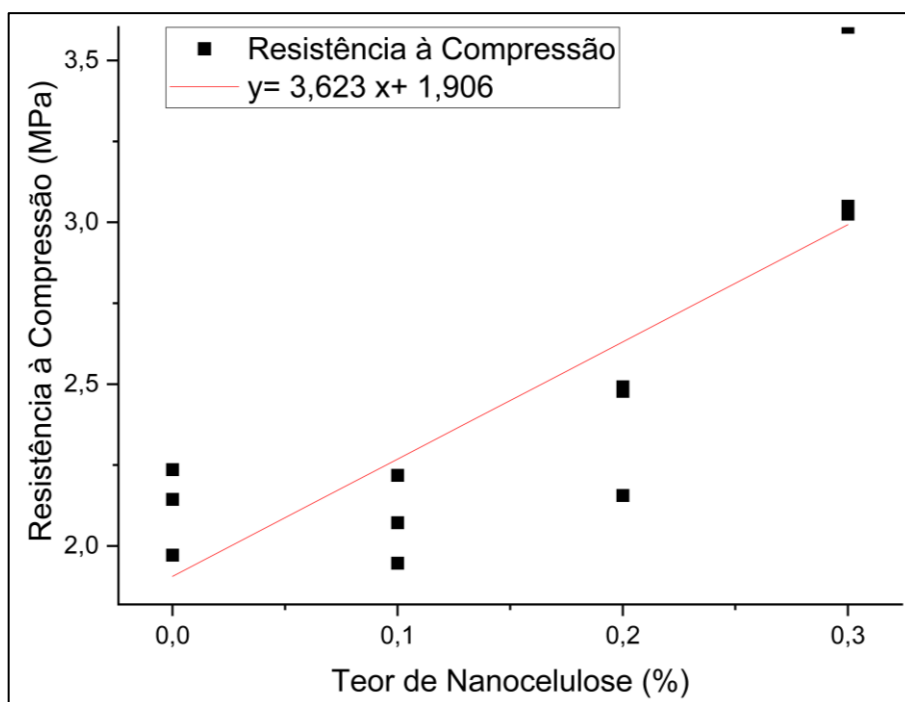
Analisando os valores para inclinação, observa-se uma relação negativa com o aumento do teor de nanocelulose para o índice de consistência, e positiva para a resistência à compressão. A Figura 53 e a Figura 54 mostram essa correlação, respectivamente, indiretamente e diretamente proporcional das propriedades com o teor de nanocelulose.

Figura 53 - Gráfico de Dispersão do índice de consistência



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 54 - Gráfico de Dispersão da resistência à compressão



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

As análises estatísticas reafirmam os resultados encontrados pelos autores Hisseine *et al.* (2019), Lee e Kim (2020), Hisseine, Omran e Tagnit-Hamou (2018) e Barnat-Hunek *et al.* (2019), os quais mostraram em seus estudos que a nanocelulose interfere nas propriedades de compósitos cimentícios conforme seu teor percentual.

5 CONCLUSÕES

Considerando que argamassas leves com uso de nanomateriais são uma prática relativamente nova e que há poucas diretrizes envolvendo estes materiais, e também pela caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, os resultados obtidos foram promissores e semelhantes aos encontrados em outros estudos. Das misturas com nanocelulose, a AN003 foi responsável pelo melhor desempenho geral das análises, sendo a única que possuiu estatisticamente interação significativa para resistência à compressão.

Nas dosagens de seleção da argamassa leve de referência, foi analisado que o EPS comprometia a trabalhabilidade da mistura, mas foi atingido o valor usual estimado pela norma com o uso dos aditivos. Entretanto, a nanocelulose, devido a sua ação hidrofílica, reduziu o índice de consistência conforme foi aumentado o seu percentual nas misturas. Esta redução de trabalhabilidade com o nanomaterial também aconteceu devido à dimensão e dispersão do mesmo na argamassa. E apesar de obter resultados menores para o índice de consistência, a argamassa alcançou uma textura que propiciou ser trabalhável.

Na análise de tempo de pega, as misturas com nanocelulose apresentaram alterações discrepantes quando comparadas à de referência. Tanto no início como no fim de pega, observou-se um aumento de tempo para as argamassas conforme seu teor de nanocelulose. Esse resultado é justificado pela interferência que o nanomaterial realiza na hidratação do cimento. A mistura AN002 atingiu o maior retardo de tempo de pega, causado pela maior dispersão da nanocelulose na mistura em comparação com a AN003, a qual apresentou o maior emaranhamento de nanocelulose.

Todos os resultados obtidos para retenção de água foram acima de 90%, as misturas com nanocelulose alcançarem os maiores percentuais. Este último foi atribuído pela liberação gradual de água pelos filamentos de nanocelulose, provocando assim um controle na retração autógena causada pela hidratação do cimento. No estado endurecido, houve a comprovação desse controle na liberação de água feita pela nanocelulose por meio dos resultados obtidos na análise de variação dimensional, onde as misturas com nanocelulose praticamente não obtiveram retração ao longo do tempo.

Na densidade de massa no estado fresco, os resultados obtidos foram inferiores à densidade da água para todas as misturas com nanocelulose. Este resultado foi devido ao alto teor de ar incorporado nas misturas. No estado endurecido, as argamassas com nanocelulose conquistaram os menores valores de massa específica quando comparadas com a de referência, além de uma maior absorção de água.

Quanto à resistência à compressão, ficou evidente a interação da nanocelulose nessa propriedade e pode-se confirmar os resultados promissores obtidos em outras pesquisas. Sendo a AN003 responsável pela melhor resistência, com um aumento de mais de 50% quando comparada com a argamassa de referência, além de atender o critério mínimo de 2,40 MPa estipulado pelas diretrizes da C-270 (ASTM, 2007). Para resistência à tração na flexão, não houve resultados discrepantes entre as misturas, entretanto, a AN003 apresentou um aumento de 7% em relação à AR. Já os resultados do módulo de elasticidade foram baixíssimos para todas as misturas, causados principalmente pelo percentual de EPS presente na mistura.

Quanto às propriedades de isolamento térmico, observou-se que as misturas com nanocelulose não alcançaram resultados significativos quando comparadas com AR, sendo o índice de vazios nas misturas o principal fator para as diferenças de resultados entre as misturas. Entretanto, todas as argamassas apresentaram valores extremamente inferiores às argamassas convencionais encontrada nas literaturas.

Em relação ao isolamento acústico, apesar de interferência externas (como formato da amostra), as argamassas com a nanocelulose alcançaram menores resultados de absorção acústica. E com relação à perda de transmissão, observou-se que a mesma é diretamente proporcional ao aumento do teor de nanocelulose na mistura, logo a AN003 apresentou o melhor isolamento acústico.

Em relação às análises no MEV, foi possível observar uma microestrutura mais densa para mistura AN003 quando comparada com a AR, além disso, menor zona de transição entre os agregados e a pasta cimentícia. As imagens do MFA comprovaram os resultados obtidos no MEV, as quais apresentaram uma microestrutura com menor rugosidade para AN003, indicando uma homogeneidade maior entre os agregados miúdos e a pasta cimentícia. Analisando os valores encontrados na nanoindentação, observa-se resultados semelhantes aos encontrados na literatura e uma melhora de 16,4% para AN003 quando comparada à AR.

As análises de variância (ANOVA) comprovaram que a nanocelulose interfere significativamente no índice de consistência e resistência à compressão. Contudo, o teste de Tukey mostrou que para a resistência à compressão apenas 0,03% da nanocelulose na mistura alcançou interferência significativa; já para o índice de consistência, todos os percentuais de nanocelulose apresentaram alterações relevantes na propriedade. E a partir das regressões lineares simples ajustadas, pode-se concluir que o teor de nanocelulose foi significativo devido à variação das propriedades mecânicas, o que foi observado pela presença de um p-valor para todos os coeficientes da equação muito inferior ao nível de significância.

Conclui-se que este estudo alcançou resultados relevantes sobre o desempenho da nanocelulose nas propriedades da argamassa leve, principalmente sobre sua influência na hidratação do cimento e na microestrutura. Entretanto, há alguns fatores para análises futuras (por exemplo, em relação à quantidade ideal de nanocelulose e tamanho ideal das partículas).

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar a interferência que a utilização de dimensões diferentes de nanocelulose pode provocar no índice de consistência;
- b) Realizar uma análise microestrutural com uma matriz de no mínimo 300 pontos indentados;
- c) Estudar o percentual de nanocelulose acima de 0,03% da massa do cimento adicionadas na mistura;
- d) Verificar a ação hidrofílica nas misturas com nanocelulose através da superfície de contato;
- e) Avaliar a resistência à aderência à tração e ataques químicos;
- f) Avaliar a reologia de argamassas com nanocelulose através da reometria rotacional;
- g) Avaliar a interferência da cristalinidade da nanocelulose nas propriedades mecânicas da argamassa.

REFERÊNCIAS

ABU-JDAYIL, Basim; MOURAD, Abdel-Hamid; HITTINI, Waseem; HASSAN, Muzamil; HAMEEDI, Suhaib. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: an overview. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 214, p. 709-735, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>.

AGUDELO-VERA, Claudia M.; MELS, Adriaan R.; KEESMAN, Karel J.; RIJNAARTS, Huub H.M.. Resource management as a key factor for sustainable urban planning. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 92, n. 10, p. 2295-2303, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.05.016>.

AKHLAGHI, Mohammad Amir; BAGHERPOUR, Raheb; KALHORI, Hamid. Application of bacterial nanocellulose fibers as reinforcement in cement composites. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 241, p. 118061, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118061>.

ALBUQUERQUE, Alexandre Serpa. Agregados. In: BAUER, La. Falcão. **Materiais de construção**: volume 1. 5. ed. Rio de Janeiro: L Tc, 2000. Cap. 4. p. 63-119.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de Construção**: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. São Paulo: Pini, 2012. 457 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C270-19**, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

_____. **C518-17**, Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017

_____. **E1050-19**, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019

ARAÚJO, Adolpho Guido; CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira; PALHA, Rachel Perez. Sustainable construction management: a systematic review of the literature with meta-analysis. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 256, p. 120350, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120350>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

_____. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral - Terminologia. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13528-1**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 13528-2**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração - Parte 2: Aderência ao substrato. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 16072**: Argamassa Impermeável. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO. **Manual de Utilização EPS na Construção Civil**. São Paulo: PINI, 2006.

ASTE, Niccolò; LEONFORTE, Fabrizio; MANFREN, Massimiliano; MAZZON, Manlio. Thermal inertia and energy efficiency – Parametric simulation assessment on a calibrated case study. **Applied Energy**, [S.L.], v. 145, p. 111-123, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.084>.

BARNAT-HUNEK, Danuta; GRZEGORCZYK-FRAŃCZAK, Małgorzata; SZYMAŃSKA-CHARGOT, Monika; ŁAGÓD, Grzegorz. Effect of Eco-Friendly Cellulose Nanocrystals on Physical Properties of Cement Mortars. **Polymers**, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 2088, 13 dez. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym11122088>.

BARNAT-HUNEK, Danuta; SZYMAŃSKA-CHARGOT, Monika; JAROSZ-HADAM, Monika; ŁAGÓD, Grzegorz. Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 223, p. 1-11, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.145>.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. Coordenação João Fernando Dias. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019. 539 p. 1 v.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. Coordenação João Fernando Dias. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019. 617 p. 2 v.

BECKER, Patricia Fernanda Bergmann; EFFTING, Carmeane; SCHACKOW, Adilson. Lightweight thermal insulating coating mortars with aerogel, EPS, and vermiculite for energy conservation in buildings. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 125, p. 104283, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104283>.

BUTT, Hans-Jürgen; CAPPELLA, Brunero; KAPPL, Michael. Force measurements with the atomic force microscope: technique, interpretation and applications. **Surface Science Reports**, [S.L.], v. 59, n. 1-6, p. 1-152, out. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfrep.2005.08.003>.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. Cap. 28. p. 885-936.

CHU, Youlu; SUN, Yan; WU, Weibing; XIAO, Huining. Dispersion Properties of Nanocellulose: a review. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 250, p. 116892, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116892>.

CIFUENTES, G. A. **Desempenho termomecânico de concreto massa com alto teor de cinza volante**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.

COELHO, Ana Zulmira Gomes; TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said. **A cal na construção**. Guimarães: Tecminho, 2009.

COMITE MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 137**: Argamassa e concreto – água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento portland. Montevideu, 1997.

DHALI, Kingshuk; GHASEMLOU, Mehran; DAVER, Fugen; CASS, Peter; ADHIKARI, Benu. A review of nanocellulose as a new material towards environmental sustainability. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 775, p. 145871, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145871>.

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E.. Durability of expanded polystyrene mortars. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 46, p. 175-182, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.029>.

FERRÁNDIZ-MAS, V.; BOND, T.; GARCÍA-ALCOCEL, E.; CHEESEMAN, C.R.. Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 61, p. 285-292, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.028>.

FISCHER-CRIPPS, Anthony C.. Nanoindentation. **Mechanical Engineering Series**, [S.L.], v. 3, p. 1-321, . 2011. Springer New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-9872-9>.

FIORITO, Antonio J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos**: estudos e procedimentos de execução. 2. ed. São Paulo: Pini, 2009. 232 p.

FU, Qiang; ZHANG, Zhaorui; ZHAO, Xu; XU, Wenrui; NIU, Ditao. Effect of nano calcium carbonate on hydration characteristics and microstructure of cement-based materials: a review. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 50, p. 104220, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104220>

GARCIA, Hudson Balonecker. **Influência da adição de celulose nanofibrilada sobre as propriedades físicas e mecânicas de um concreto permeável**. 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2021.

GARCÍA-ALCOCEL, E.; FERRÁNDIZ-MAS, V.. Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS). **Materiales de Construcción**, [S.L.], v. 62, n. 308, p. 547-566, 1 mar. 2012. Editorial CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2012.04611>.

GAO, Yuan; ZHU, Xingyi; CORR, David J.; KONSTA-GDOUTOS, Maria S.; SHAH, Surendra P.. Characterization of the interfacial transition zone of CNF-Reinforced cementitious composites. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 99, p. 130-139, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.002>.

GCCA. Global Cement na Concrete Association. **GNR - GCCA in Numbers**. 2020. Disponível em: <<https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>>. Acesso em: outubro de 2020.

GOERTZ, M.P.; MOORE, N.W.. Mechanics of soft interfaces studied with displacement-controlled scanning force microscopy. **Progress In Surface Science**, [S.L.], v. 85, n. 9-12, p. 347-397, set. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progsurf.2010.07.003>.

GOMES, M. Glória; FLORES-COLEN, Inês; MELO, Humberto; SOARES, António. Physical performance of industrial and EPS and cork experimental thermal insulation renders. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 198, p. 786-795, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.151>.

GOPALAKRISHNAN, R.; NITHIYANANTHAM, S.. Microstructural, mechanical, and electrical properties of copper slag admixed cement mortar. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 31, p. 101375, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101375>.

GRIEPENTROG, M.; KRÄMER, G.; CAPPELLA, B.. Comparison of nanoindentation and AFM methods for the determination of mechanical properties of polymers. **Polymer Testing**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 455-460, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.01.011>.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da física**. 8. ed. São Paulo: LTC, 2009. Volume 2 - Gravitação, ondas e termodinâmica.

HIDRA. Cal hidratada CH-III. 2020. Disponível em: <<http://calhidra.com.br/produto/cal-hidratada-ch-iii/>>. Acesso em: agosto de 2021.

HILL, Callum; NORTON, Andrew; DIBDIAKOVA, Janka. A comparison of the environmental impacts of different categories of insulation materials. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 162, p. 12-20, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.009>.

HISSEINE, Ousmane A.; OMRAN, Ahmed F.; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Influence of Cellulose Filaments on Cement Paste and Concrete. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 30, n. 6, jun. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002287](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002287).

HISSEINE, Ousmane A.; SOLIMAN, Nancy A.; TOLNAI, Balázs; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Nano-engineered ultra-high performance concrete for controlled autogenous shrinkage using nanocellulose. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 137, p. 106217, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106217>.

HISSEINE, Ousmane A.; WILSON, William; SORELLI, Luca; TOLNAI, Balázs; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Nanocellulose for improved concrete performance: a macro-to-micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 206, p. 84-96, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.042>.

International Organization for Standardization. **ISO 8301:1991/AMD 1:2010** - Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus — Amendment 1.

_____. **ISO 21930:2007/AMD 1:2017** - Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services.

ITAMBÉ. **Cimento Portland composto com pozolana**. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-ii-z-32/>. Acesso em: maio 2021.

ITAMBÉ. **Relatório de Ensaio**. 2020. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=369&chave=2020-13>. Acesso em: maio 2021.

KAMASAMUDRAM, Kavya S.; ASHRAF, Warda; LANDIS, Eric N.. Cellulose nanofibrils with and without nanosilica for the performance enhancement of Portland cement systems. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 285, p. 121547, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121547>.

KIM, Ji-Su; LIM, Jae-Hong; STEPHAN, Dietmar; PARK, Kyoungsoo; HAN, Tong-Seok. Mechanical behavior comparison of single and multiple phase models for cement paste using micro-CT images and nanoindentation. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 342, p. 127938, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127938>.

LEÃO, Alcides Lopes; SOUZA, Sivoney F.; CHERIAN, Bibin M.; CHAVES, Márcia R. M.; CALDEIRA, Mariana S.; FERREIRA, Mariselma; GONÇALVES, Daniele F. C.. Nanofibras de Celulose: fontes e aplicações. In: GRAEFF, Carlos (org.). **Nanotecnologia: ciência e engenharia**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012. Cap. 4. p. 125-155.

LEE, Hyung-Joo; KIM, Woosuk. Long-term durability evaluation of fiber-reinforced ECC using wood-based cellulose nanocrystals. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 238, p. 117754, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117754>.

LI, Jie; LIU, Qian; SANG, Yao. Several Issues about Urbanization and Urban Safety. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 43, p. 615-621, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.108>.

LI, Haoxin; NI, Dayou; LIANG, Guangwei; GUO, Yuchen; DONG, Biqin. Mechanical performance and microstructure of cement paste/mortar modified by VAEC dispersible powder cured under different temperatures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 278, p. 122446, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122446>.

LIMA, Luanda; TRINDADE, Emanuely; ALENCAR, Luciana; ALENCAR, Marcelo; SILVA, Luna. Sustainability in the construction industry: a systematic review of the literature. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 289, p. 125730, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730>

LINDGREEN, Holger; GEIKER, Mette; KRØYER, Hanne; SPRINGER, Niels; SKIBSTED, Jørgen. Microstructure engineering of Portland cement pastes and mortars through addition of ultrafine layer silicates. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 30, n. 8, p. 686-699, set. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.05.003>

LISBOA, Ederval de Souza; ALVES, Edir dos Santos; MELO, Gustavo Henrique Alves Gomes de. **Materiais de Construção: concreto e argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: SAGAH, 2017. 227 p.

MAHMOUDKELAYE, Samira; AZARI, Katayoon Taghizade; POURVAZIRI, Mitra; ASADIAN, Elnaz. Sustainable material selection for building enclosure through ANP method. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 9, p. 200, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00200>.

MATHIYAZHAGAN, Kaliyan; GNANAVELBABU, A.; PRABHURAJ, B. Lokesh. A sustainable assessment model for material selection in construction industries perspective using hybrid MCDM approaches. **Journal Of Advances In Management Research**, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 234-259, 23 abr. 2019. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/jamr-09-2018-0085>.

MC-BAUCHEMIE. **Ficha técnica do MC-PowerFlow 4001**. 2019. Disponível em: <https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/MC-PowerFlow%204001.pdf>. Acesso em: setembro de 2021

MC-BAUCHEMIE. **Ficha técnica do Centripor 4020**. 2021. Disponível em: <https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/Centripor%204020.pdf>. Acesso em: setembro de 2021

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concrete**: microstructure, properties, and materials. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2013. 675 p.

MILLER, Mahalia; BOBKO, Christopher; VANDAMME, Matthieu; ULM, Franz-Josef. Surface roughness criteria for cement paste nanoindentation. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 38, n. 4, p. 467-476, abr. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.014>.

MILLING, Amrita; MWASHA, Abrahams; MARTIN, Hector. Exploring the full replacement of cement with expanded polystyrene (EPS) waste in mortars used for masonry construction. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 253, p. 119158, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119158>.

MOHAMAD, Nabilla; MUTHUSAMY, Khairunisa; EMBONG, Rahimah; KUSBIANTORO, Andri; HASHIM, Mohd Hanafi. Environmental impact of cement production and Solutions: a review. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], 6 mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212>.

MORADIKHOU, Amir Bahador; ESPARHAM, Alireza; AVANAKI, Mohammad Jamshidi. Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 251, p. 118965, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118965>.

NAJI, Sareh; ÇELIK, Oğuz Cem; ALENGARAM, U. Johnson; JUMAAT, Mohd Zamin; SHAMSHIRBAND, Shahaboddin. Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential

buildings. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 84, p. 727-739, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.009>.

NASIR, Muhammad; AZIZ, Muhammad Arif; ZUBAIR, Mukarram; ASHRAF, Noman; HUSSEIN, Tag Nasreldin; ALLUBLI, Moath Khalid; MANZAR, Mohammad Saood; AL-KUTTI, Walid; AL-HARTHI, Mamdouh A.. Engineered cellulose nanocrystals-based cement mortar from office paper waste: flow, strength, microstructure, and thermal properties. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 51, p. 104345, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104345>.

NASIR, Muhammad; AZIZ, Muhammad Arif; ZUBAIR, Mukarram; MANZAR, Mohammad Saood; ASHRAF, Noman; MU'AZU, Nuhu Dalhat; AL-HARTHI, Mamdouh A.. Recent review on synthesis, evaluation, and SWOT analysis of nanostructured cellulose in construction applications. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 46, p. 103747, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103747>.

OU, Zhi Hua; MA, Bao Guo; JIAN, Shou Wei. Influence of cellulose ethers molecular parameters on hydration kinetics of Portland cement at early ages. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 33, p. 78-83, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.007>.

PELED, A.; CASTRO, J.; WEISS, W.J.. Atomic force and lateral force microscopy (AFM and LFM) examinations of cement and cement hydration products. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 36, p. 48-55, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.021>.

PESSOA, S.; GUIMARÃES, A.s.; LUCAS, S.s.; SIMÕES, N.. 3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 141, p. 110794, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110794>.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Conhecendo argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.

ROA, Simón; SIRENA, Martín. AFM imaging analysis of nanoindentation-induced plastic strain in indium surface for calibrating nanoindenters area profiles. **Physica B: Condensed Matter**, [S.L.], v. 633, p. 413773, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2022.413773>.

SANDANAYAKE, Malindu; GUNASEKARA, Chamila; LAW, David; ZHANG, Guomin; SETUNGE, Sujeeva; WANIJURU, Dennis. Sustainable criterion selection framework for green building materials – An optimisation based study of fly-ash Geopolymer concrete. **Sustainable Materials And Technologies**, [S.L.], v. 25, p. 178-188, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00178>.

SAHLOL, Doaa Gamal; ELBELTAGI, Emad; ELZOUGHIBY, Mohamed; ELRAHMAN, Mohammed Abd. Sustainable building materials assessment and selection using system dynamics. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 35, p. 101978, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101978>.

SCHACKOW, Adilson; EFFTING, Carmeane; FOLGUERAS, Marilena V.; GÜTHS, Saulo; MENDES, Gabriela A.. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 57, p. 190-197, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.009>.

SCHIAVONI, S.; D'ALESSANDRO, F.; BIANCHI, F.; ASDRUBALI, F.. Insulation materials for the building sector: a review and comparative analysis. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 62, p. 988-1011, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>.

SILVA, Diego Willian da. **Caracterização inversa vibroacústica de materiais porosos em tubo de impedância**. 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.

SIMÕES, Maia Flávio. **Acústica arquitetônica**. Procel edifica – Eficiência energética em edificações. Rio de Janeiro, agosto de 2011.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **ROADMAP -tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro. 2019. 64p. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/roadmap/roadmap-tecnologico-do-cimento-brasil.pdf/>>. Acesso em: outubro de 2020.

SOLOMON, A Arun; HEMALATHA, G. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. **Structures**, [S.L.], v. 23, p. 204-213, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2019.10.019>.

STYROVILLE. **Flocos eps (flocado)**. 2021. Disponível em: <<https://styroville.com.br/produto/flocos-eps-500-litros/>>. Acesso em: setembro de 2021.

SUNASEE, Rajesh. 4.20 - Nanocellulose: preparation, functionalization and applications. In: BARCHI, Joseph J. (ed.). **Comprehensive Glycoscience**. 2. Ed. Vol. 4. NY: Elsevier BV, 2021. Cap. 4-20. p. 506-537.

TENÓRIO, Jorge Alberto Soares; ARAÚJO, Fernando Gabriel da Silva; PEREIRA, Sérgio Sônego Raymundo; FERREIRA, Andréa Vidal; ESPINOSA, Denise Crocce Romano; BARROS, Alexandre. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland - Parte II: alita com adições de Fe e Al. **Rem: Revista Escola de Minas**, [S.L.], v. 56, n. 2, p. 113-117, jun. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672003000200009>.

UTTARAVALLI, Appala Naidu; DINDA, Srikanta; GIDLA, Bhanu Radhika. Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene: a review. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 137, p. 140-148, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2020.02.023>.

VIEIRA, A. C. **Produção de nanocelulose a partir da casca de eucalipto iodegradada por “*Pycnopus Sanguineus*”**. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio Filho Mesquita”, Botucatu, 2018.

XIE, Junxian; XU, Jun; ZHANG, Zhaohui; WANG, Bin; ZHU, Shiyun; LI, Jun; CHEN, Kefu. New ternary deep eutectic solvents with cycle performance for efficient pretreated radiata pine forming to lignin containing cellulose nanofibrils. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 451, p. 138591, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2022.138591>.

YANG, Jun; DING, Qingjun; ZHANG, Gaozhan; HOU, Dongshuai; ZHAO, Mingyu; CAO, Jierong. Effect of sulfate attack on the composition and micro-mechanical properties of C-A-S-H gel in cement-slag paste: a combined study of nanoindentation and sem-eds. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 345, p. 128275, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128275>

WILKINSON, Angus J.; BRITTON, T. Ben.. Strains, planes, and EBSD in materials science. **Materials Today**, [S.L.], v. 15, n. 9, p. 366-376, set. 2012. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1369-7021\(12\)70163-3](http://dx.doi.org/10.1016/s1369-7021(12)70163-3).

WULANDARI, W T; A ROCHLIADI,; ARCANA, I M. Nanocellulose prepared by acid hydrolysis of isolated cellulose from sugarcane bagasse. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 107, p. 012045, 5 fev. 2016. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/107/1/012045>.

ZHANG, Hongzhi; IAVIJA, Branko; LUKOVIĆ, Mladena; SCHLANGEN, Erik. Experimentally informed micromechanical modelling of cement paste: an approach coupling x-ray computed tomography and statistical nanoindentation. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 157, p. 109-122, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.102>.

ZHANG, Jian; CHEN, Bing; YU, Fu. Preparation of EPS-Based Thermal Insulation Mortar with Improved Thermal and Mechanical Properties. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 31, n. 9, p. 04019183, set. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002825](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002825).