

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

**THALIAN VALENTE SOARES**

**APLICAÇÃO DE CELULOSE BACTERIANA NANOFIBRILADA EM  
ARGAMASSAS LEVES DE REVESTIMENTO**

**JOINVILLE  
2024**

**THALIAN VALENTE SOARES**

**APLICAÇÃO DE CELULOSE BACTERIANA NANOFIBRILADA EM  
ARGAMASSAS LEVES DE REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Prof. Dra. Carmeane Effting  
Coorientador: Dr. Adilson Schackow

**JOINVILLE**

**2024**

S676a Soares, Thalian Valente

Aplicação de celulose bacteriana nanofibrilada em  
argamassas leves de revestimento / Thalian Valente Soares. -  
- 2024.

114 f.

Orientadora: Carmeane Effting

Coorientador: Adilson Schackow

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de  
Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Santa  
Catarina, Joinville, 2024.

1.Argamassa. 2. Nanocelulose bacteriana. 3.Reologia. 4.  
Microestrutura da argamassa. I. Effting, Carmeane. II.  
Schackow, Adilson. III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. IV. Título.

CDD 620.135 (20. ed.)

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Thaliane Valente Soares CRB 11/1214.

**THALIAN VALENTE SOARES**

**APLICAÇÃO DE CELULOSE BACTERIANA NANOFIBRILADA EM  
ARGAMASSAS LEVES DE REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Profª. Drª. Carmeane Effting.  
Coorientador: Dr. Adilson Schackow.

**BANCA EXAMINADORA**

Dra. Carmeane Effting

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membros:

Dra. Carmeane Effting

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Dra. Katiusca Wessler Miranda

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Dr. Adriano Michael Bernardin

Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC

Joinville, 1 de julho de 2024.

Dedico este trabalho aos meus avós, Maria M. e Pedro Soares. E minha avó, Maria A. Batista.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me guiar nos momentos mais sombrios da minha jornada.

A minha família, Tereza, Valciney e Thaliane, pelo apoio constante em todas as fases da minha vida. Amo vocês.

Ao meu esposo, Klysman, por seu amor, apoio inabalável e por ser minha fonte de força e inspiração.

A Universidade do Estado de Santa Catarina, através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade e conhecimentos adquiridos.

Ao Programa De Bolsas De Monitoria De Pós-Graduação (PROMOP) pelo apoio financeiro e possibilitar a realização deste trabalho com dedicação permitindo-me ampliar meu conhecimento científico.

Aos recursos do Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP).

À infraestrutura do Centro Multusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CCT/UDESC).

À infraestrutura do Laboratório de Materiais de Construção Civil de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (MCC/CCT/UDESC).

A minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carmeane Effting, pela confiança, incentivo, apoio e orientação ao longo deste trabalho.

Ao meu coorientador, Dr. Adilson Schackow, pelo auxílio na produção desta pesquisa, pelos momentos de descontração e histórias do ramo acadêmico e prestatividade nos ensaios laboratoriais.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, Dr. Adriano Bernardin e Dr<sup>a</sup>. Katiusca W. Miranda, por aceitarem o convite e pelas suas contribuições que enriqueceram este trabalho.

A empresa Nanobiocell por disponibilizar o material deste estudo e por esclarecer todas as dúvidas que surgiram ao longo da pesquisa.

E, a todos os meus amigos que colaboraram de forma direta ou indireta na produção desta pesquisa.

Meu mais sincero muito obrigada a todos!

## RESUMO

O presente estudo avaliou o desempenho de argamassas leves de revestimento contendo celulose bacteriana, empregando vermiculita como agregado leve. A celulose devido à sua abundância e potencial de aprimoramento das propriedades mecânicas em macro e microescala, aumenta a resistência dos materiais cimentícios e impermeabilidade, adesão e controle de retração autógena, bem como as propriedades reológicas da argamassa. Este estudo utilizou celulose bacteriana nanofibrilada (BCNF) em argamassas leves (0,05% em peso, 0,15% em peso e 0,25% em peso), visando analisar suas propriedades reológicas, mecânicas e microestruturais. Como uma solução inovadora, a BCNF utilizada é produzida naturalmente por um consórcio de bactérias responsáveis pela síntese do biopolímero, livre de impurezas e significativamente menos custosa em comparação com outras celuloses disponíveis no mercado, consumindo 90% menos água e energia, gerando apenas resíduos orgânicos. Análises de MET, TGA, DRX e FTIR foram usadas para BCNF. A adição de BCNF aumentou o índice de consistência das argamassas em 3,13%, não teve efeito significativo na resistência à flexão e diminuiu a resistência à compressão em 18,23% (para 0,25% em peso). Os testes reológicos permitiram a observação de ruptura estrutural e reconstrução das argamassas. Os dados foram ajustados usando os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley. A adição de 0,15% em peso mostrou uma tendência de crescimento do limite de escoamento, demonstrando estabilidade e menor viscosidade, indicando melhor trabalhabilidade, corroborando com os resultados de consistência. O BCNF melhorou a retenção de água em até 14,87%, atrasou o tempo de pega em até 28,52% (inicial) e 17,41% (final), reduziu a densidade fresca em até 26,53% e aumentou o teor de ar arrastado. A adição de 0,15% em peso de BCNF aumentou a condutividade térmica em 30,61% e estabilizou a variação dimensional, reduzindo a absorção de água (-19,61%) e o índice de vazios (-18,99%). O BCNF promoveu a hidratação contínua dos grãos de cimento, densificando a microestrutura da argamassa. No entanto, quando o BCNF se aglomera devido à dispersão ineficiente, seu efeito nas propriedades pode ser reduzido. O BCNF pode funcionar como um aditivo para melhorar as propriedades da argamassa e torná-la mais sustentável, pois é biodegradável e sua produção é limpa.

**Palavras-chave:** Argamassa; Celulose bacteriana; Reologia; Microestrutura da argamassa.

## ABSTRACT

The present study evaluated the performance of lightweight coating mortars containing bacterial cellulose, using vermiculite as a lightweight aggregate. Due to its abundance and potential for enhancing mechanical properties on both macro and microscale, cellulose increases strength and impermeability, adhesion, and control of autogenous shrinkage, as well as the rheological properties of the mortar. This study used bacterial nanofibrillated cellulose (BNFC) in lightweight mortars (0.05% by weight, 0.15% by weight, and 0.25% by weight), aiming to analyze their rheological, mechanical, and microstructural properties. As an innovative solution, the BCNF used is naturally produced by a consortium of bacteria responsible for synthesizing the biopolymer, free of impurities, and significantly less costly compared to other celluloses available on the market, consuming 90% less water and energy, and generating only organic waste. Analyses of TEM, TGA, XRD, and FTIR were used for BNFC. The addition of BCNF increased the consistency index of the mortars by 3.13%, had no significant effect on flexural strength, and decreased compressive strength by 18.23% (for 0.25% by weight). Rheological tests allowed the observation of structural breakdown and reconstruction of the mortars. The data were adjusted using the Bingham and Herschel-Bulkley models. The addition of 0.15% by weight showed a tendency to increase yield stress, demonstrating stability and lower viscosity, indicating better workability, corroborating the consistency results. BNFC improved water retention by up to 14.87%, delayed setting time by up to 28.52% (initial) and 17.41% (final), reduced fresh density by up to 26.53%, and increased air content. The addition of 0.15% by weight of BNFC increased thermal conductivity by 30.61% and stabilized dimensional variation, reducing water absorption (-19.61%) and void index (-18.99%). BCNF promoted continuous hydration of cement grains, densifying the microstructure of the mortar. However, when BNFC agglomerates due to inefficient dispersion, its effect on properties may be reduced. BNFC can function as an additive to improve the properties of mortar and make it more sustainable, as it is biodegradable and its production is clean.

**Keywords:** Mortar; Bacterial cellulose; Rheology; Mortar 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).....	22
Figura 2 – Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa, considerando o revestimento aplicado diretamente ao substrato (sem chapisco).....	30
Figura 3 – (a) Vermiculita Natural; (b) Vermiculita Expandida.....	31
Figura 4 – Microestrutura da Vermiculita: (a) ampliação de 2000x; (b) ampliação de 1000x.....	33
Figura 5 – Celulose bacteriana: (a) membrana de BC seca em estufa. (b).....	34
Figura 6 – Imagem MEV: (a) argamassa de controle; (b) argamassa com pó BC; (c) argamassa com gel BC.....	36
Figura 7 - Movimento das partículas no escoamento extensional.....	38
Figura 8 – Comportamento de um fluido de Newton e Bingham.....	40
Figura 9 – Interpretação física da viscosidade e da tensão de escoamento de um fluido quando sujeito a cisalhamento.....	41
Figura 10 – Ações nas partículas (a) durante o fluxo; (b) em repouso.....	42
Figura 11 – Curvas de fluxo de um fluido dilatante e fluidificante.....	42
Figura 12 – Viscosidade dinâmica e aparente de um fluido. ....	43
Figura 13 – Curva de fluxo de torque em função da velocidade de rotação. ....	45
Figura 14 – (a) Determinação da tensão de escoamento através do ensaio <i>stress growth</i> ; (b) Curva típica do <i>stress growth</i> de reômetro para concreto. ....	46
Figura 15 – Ensaio <i>up and down</i> (a) carregamento; (b) curva de fluxo.....	47
Figura 16 – Etapas do procedimento experimental.....	48
Figura 17 – Ensaios para caracterização dos materiais.....	49
Figura 18 – Estabilização do ar incorporado no Cimento CP II F.....	51
Figura 19 – Vermiculita expandida superfina. ....	52
Figura 20 – a) Cultura de bactérias que formam a membrana de celulose; b) Celulose purificada; c) Celulose bacteriana nanofibrilada. ....	53
Figura 21 – Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco.....	56
Figura 22 – Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido.....	57
Figura 23 – Processo de seleção das argamassas.....	57

Figura 24 – Proposta para ensaio reológico.....	61
Figura 25 – Detalhe do início da rampa de cisalhamento. ....	61
Figura 26 – Distribuição granulométrica da areia e vermiculita. ....	69
Figura 27 – Imagens MET das nanofibras de nanocelulose bacteriana (a) 500 nm, rede de fibras; (b) 500 nm, fibra única e (c) 200 nm, emaranhado de fibras.....	70
Figura 28 – Espectro FTIR da BCNF. ....	71
Figura 29 – Difratograma de raio x da BCNF. ....	72
Figura 30 – Curvas da análise de TGA da BCNF.....	73
Figura 31 – Estruturação das argamassas ao longo do tempo. ....	74
Figura 32 – Viscosidade aparente das argamassas desenvolvidas. ....	75
Figura 33 – Curva de fluxo das argamassas desenvolvidas. ....	76
Figura 34 – Tensões de escoamento (a); e viscosidades (b) das argamassas ajustadas pelos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.....	77
Figura 35 – Índices de consistências e resistências de tração e compressão das argamassas aos 28 dias. ....	78
Figura 36 – Microestrutura da argamassa ampliado 30x, a) MREF; b) MBC15. ....	89
Figura 37 – Microestrutura da MREF: a) interface de agregado; b) interface da vermiculita; c) zona de transição entre agregado e pasta de cimento; e d) matriz cimentícia e produtos de hidratação. ....	89
Figura 38 – Microestrutura da MBC15, a) interface da argamassa evidenciando a vermiculita; b) zona de transição interfacial da matriz cimentícia; c) aglomerado de nanofibras de BC; e d) produtos de hidratação e aglomerado de BC.....	90

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Classificação das rupturas do ensaio de aderência à tração. ....	29
Quadro 2 – Classificação granulométrica da vermiculita.....	32
Quadro 3 – Composição preliminar das misturas para a argamassa de referência. .	55
Quadro 4 – Composição das argamassas. .....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da vermiculita.....	31
Tabela 2 - Composição química do cimento Portland.....	49
Tabela 3 – Caracterização dos agregados.....	68
Tabela 4 – Parâmetros reológicos das argamassas pelo modelo de Bingham e Herschel-Bulkley.....	76
Tabela 5 – Estatísticas descritivas do índice de consistência e resistências de tração e compressão.....	80
Tabela 6 – Análise da variância da consistência e resistências.....	80
Tabela 7 – Teste de Tukey para os resultados do índice de consistência e resistências de tração e compressão. ....	81
Tabela 8 – Propriedades do estado fresco das argamassas leves. ....	82
Tabela 9 – Valores da aderência à tração da mistura MREF.....	84
Tabela 10 – Valores de aderência à tração da mistura MBC15. ....	85
Tabela 11 – Resultados da densidade aparente, massa específica real, absorção de água e índice de vazios. ....	87
Tabela 12 – Variação dimensional das argamassas. ....	87
Tabela 13 – Valores de condutividade térmica das argamassas. ....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BC	Celulose Bacteriana
BCNF	Celulose Bacteriana Nanofibrilada
CNC	Cristais de Nanocelulose
CFC	Celulose Fibrilada Cristalina
CMN	Comitê Mercosul de Normalização
DRX	Difração de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
IA	Incorporador de Ar
ISSO	Organização Internacional de Normalização
MBC	Mistura com Celulose Bacteriana
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MEV	Microscopia Eletronica de Varredura
MREF	Mistura de Referência
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
NM	Norma Mercosul
RDM	Revestimento decorativo monocamada
TGA	Termogravimetria
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
$\rho_r$	Massa específica real
$\tau_0$	Tensão de escoamento
$\tau_y(d)$ .	Tensão de escoamento dinâmica
$\tau_y(s)$ .	Tensão de escoamento estática
$\Delta T$	Variação de temperatura
$s^{-1}$ ou $1/s$	Segundos recíprocos
$\varepsilon$	Medida de variação dimensional
$\mu$	Viscosidade
$\mu_{eq}$	Viscosidade plástica aparente
$\tau$	Tensão cisalhante
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
Db	Decibéis
$Fe_2O_3$	Óxido de Ferro
g	Gramas
$g/cm^3$	Gramas por centímetro cúbico
Hz	Hertz
$kg/cm^3$	Quilograma por centímetro cúbico
$kg/m^2$	Quilograma por metro quadrado
$kg/m^3$	Quilograma por metro cúbico
MgO	Óxido de Magnésio
min	Minuto
mm	Milímetro
$mm^2$	Milímetros quadrados
$mm^3$	Milímetro cúbico
MPa	Mega Pascal
$OH^-$	Hidroxila
Pa	Pascal
Pa.s	Pascal por segundos
Ph	Potencial Hidrogeniônico
$q_1+q_2$	Densidade do fluxo de calor
Rpm	Revoluções por Minuto
S	Segundos
$SiO_2$	Dióxido de silício
$SO_3$	Trióxido de enxofre
$W/m^2$	Watt por metro quadrado
$W/m^2 \cdot ^\circ C$	Watt por metro quadrado por graus celsius
$W/mK$	Watt por metro por Kelvin

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1.	JUSTIFICATIVA .....	16
1.2.	OBJETIVOS .....	19
1.2.1.	Objetivo Geral.....	19
1.2.2.	Objetivos Específicos .....	19
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
2.1.	ARGAMASSAS PARA REVESTIMENTO .....	20
2.1.1.	<b>Materiais Constituintes .....</b>	<b>22</b>
2.1.1.1.	Aglomerantes .....	23
2.1.1.2.	Agregado Miúdo .....	23
2.1.1.3.	Aditivos químicos.....	23
2.1.2.	<b>Argamassas Leves .....</b>	<b>25</b>
2.1.3.	<b>Propriedades da argamassa.....</b>	<b>27</b>
2.1.3.1.	<i>Propriedades no estado fresco.....</i>	27
2.1.3.2.	<i>Propriedades no estado endurecido.....</i>	28
2.2.	VERMICULITA COMO AGREGADO LEVE .....	31
2.3.	CELULOSE BACTERIANA .....	33
2.4.	COMPORTAMENTO REOLÓGICO .....	37
2.4.1.	<b>Parâmetros e modelos reológicos .....</b>	<b>39</b>
2.4.1.1.	<i>Modelo de Newton e Bingham .....</i>	40
2.4.1.2.	<i>Modelo de Herschel-Bulkley.....</i>	42
2.4.1.3.	<i>Tixotropia.....</i>	44
2.4.2.	<b>Reometria para materiais à base de cimento.....</b>	<b>44</b>
2.4.2.1.	<i>Ensaio à taxa e tensão controlada .....</i>	44
2.4.2.2.	<i>Tensão de Crescimento (Stress Growth) .....</i>	45
2.4.2.3.	<i>Subida e Descida ou Escada (Up and Down) – ascendente-descendente</i>	47
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>48</b>
3.1.	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS .....	48
3.1.1.	<b>Cimento .....</b>	<b>49</b>
3.1.2.	<b>Cal.....</b>	<b>50</b>
3.1.3.	<b>Água .....</b>	<b>50</b>
3.1.4.	<b>Aditivos químicos.....</b>	<b>50</b>

3.1.5.	<b>Agregados Miúdos .....</b>	51
3.1.6.	<b>Celulose Bacteriana Nanofibrilada .....</b>	52
3.2.	<b>PLANEJAMENTO E SELEÇÃO DAS MISTURAS.....</b>	54
3.3.	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	56
3.3.1.	<b>Seleção das Argamassas .....</b>	57
3.3.2.	<b>Preparação das Argamassas .....</b>	58
3.3.3.	<b>Ensaios no Estado Fresco.....</b>	59
3.3.3.1.	<i>Índice de Consistência .....</i>	59
3.3.3.2.	<i>Comportamento Reológico.....</i>	60
3.3.3.3.	<i>Retenção de Água.....</i>	62
3.3.3.4.	<i>Densidade da Massa e Teor de Ar Incorporado.....</i>	63
3.3.3.5.	<i>Tempo de Pega.....</i>	63
3.3.4.	<b>Ensaios no Estado Endurecido.....</b>	64
3.3.4.1.	<i>Resistência de Aderência à Tração.....</i>	64
3.3.4.2.	<i>Resistência à Tração na Flexão e Compressão.....</i>	65
3.3.4.3.	<i>Densidade Aparente.....</i>	65
3.3.4.4.	<i>Absorção de Água e Porosidade .....</i>	65
3.3.4.5.	<i>Variação Dimensional.....</i>	65
3.3.4.6.	<i>Condutividade Térmica.....</i>	66
3.3.5.	<b>Análise Microestrutural.....</b>	67
3.3.5.1.	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....</i>	67
3.3.6.	<b>Análise Estatística.....</b>	67
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	68
4.1.	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	68
4.1.1.	<b>Agregados miúdo e leve .....</b>	68
4.1.2.	<b>Nanocelulose bacteriana .....</b>	69
4.2.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO – FASE I .....</b>	73
4.2.1.	<b>Comportamento reológico.....</b>	73
4.2.2.	<b>Índice de consistência, resistências à tração na flexão e compressão</b>	
	<b>78</b>	
4.2.2.1.	<i>Análise Estatística das Propriedades Mecânicas .....</i>	80
4.2.3.	<b>Retenção de água, densidade da massa, teor de ar incorporado e tempo de pega .....</b>	82
4.3.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO – FASE II .....</b>	84

<b>4.3.1.</b>	<b>Resistência de aderência à tração .....</b>	<b>84</b>
<b>4.3.2.</b>	<b>Densidade da massa aparente, massa específica real, absorção de água e porosidade.....</b>	<b>86</b>
<b>4.3.3.</b>	<b>Variação dimensional.....</b>	<b>87</b>
<b>4.3.4.</b>	<b>Condutividade térmica.....</b>	<b>88</b>
<b>4.4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO – FASE III .....</b>	<b>88</b>
<b>4.4.1.</b>	<b>Análise microestrutural .....</b>	<b>88</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel significativo na economia e na sociedade. No entanto, é uma atividade que tem impactos negativos consideráveis, sendo responsável por 50% da extração de recursos naturais e geração de resíduos, causando impactos ambientais em toda a sua cadeia produtiva (Besen; Da Silva, 2017). Para cada tonelada de CP produzida, são liberados na atmosfera 1 tonelada de dióxido de carbono, correspondendo de 7 a 10% das emissões globais deste gás de efeito estufa (Moradikhou *et al.*, 2020).

Com base nisso, as indústrias estão ávidas por inovações, que auxiliem no cumprimento da agenda 2030, buscando alternativas sustentáveis de modo que sejam reduzidos os efeitos dessas emissões por meio da minimização do consumo de material e energia, reutilização e reciclagem de materiais, além de explorar materiais que melhorem a eficiência do concreto e argamassa, visando evitar reparos na estrutura e minimizando o uso de recursos aumentando a adoção de tecnologias que auxiliam a manter processos de construção limpos e ambientalmente corretos (Araújo, Carneiro e Palha, 2020; Nações Unidas do Brasil, 2024).

A utilização da celulose em argamassas é aplicável devido à sua natureza ecológica e capacidade de substituir materiais derivados de petróleo. Com  $10^{11}$  toneladas biossintetizadas anualmente, a celulose é um polímero natural obtida de fontes renováveis mais abundante na Terra, proveniente principalmente de plantas, mas também de animais e bactérias (Akhlaghi *et al.*, 2020).

A celulose bacteriana (BC) é um biopolímero natural produzido por diferentes tipos de bactérias. A aplicação deste material em materiais cimentícios foi intensamente estudada nos últimos dez anos devido às suas notáveis propriedades físico-químicas, mecânicas e biológicas (Voicu *et al.*, 2017). A nanocelulose é um material derivado da celulose, mas possui características em escala nanométrica e oferece alta área superficial, além de aprimorar propriedades mecânicas quando utilizada como material de reforço (Mohammadkazemi *et al.*, 2015).

Recentemente, a nanocelulose destacou-se na reologia de compósitos cimentícios por suas propriedades sustentáveis e renováveis, melhorando as

características mecânicas desses materiais (Hisseine *et al.*, 2019; Long *et al.*, 2019). A reologia de uma argamassa também está relacionada ao seu estado endurecido, e a incorporação da nanocelulose na argamassa pode promover uma distribuição uniforme de materiais, resultando em um produto de qualidade (Ribeiro, 2021; Schankoski, 2017; e Jiao, 2021).

A argamassa leve é um tema que tem despertado cada vez mais o interesse dos pesquisadores. A introdução de agregados leves resulta em uma argamassa que pode melhorar o desempenho térmico e acústico, promovendo também a redução do consumo de energia de uma edificação. O emprego da vermiculita exemplifica esse tipo de agregado, pois promove a redução da condutividade térmica e da absorção acústica. Isso se deve ao fato de que a vermiculita é um material poroso e de baixa densidade que, quando adicionado a compósitos cimentícios, confere leveza (Schackow *et al.*, 2019; Schackow *et al.*, 2014; De Oliveira *et al.*, 2012).

Este trabalho pretende avaliar o uso da nanocelulose em argamassas leves utilizando vermiculita em sua composição, e destinadas ao revestimento de edificações, determinando suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas, e microestrutural, visando o desenvolvimento de uma argamassa com a aplicação de um material ecoeficiente em sua composição.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

Atualmente, o armazenamento de energia tem se tornado crucial devido ao desequilíbrio entre oferta e demanda em edificações, agravado pela carga termoacústica intensa nas cidades. Esse desequilíbrio ocorre porque as condições climáticas externas impactam significativamente o conforto interno das edificações. Com base nisso, busca-se materiais que ofereçam um bom desempenho térmico e acústico, a fim de reduzir o consumo de energia necessário para manter um ambiente interno confortável. A utilização desses materiais contribui para a sustentabilidade e a eficiência das edificações, ao minimizar a necessidade de sistemas ou equipamentos de climatização e isolamento adicionais (Pinto, 2009).

Uma alternativa para reduzir o consumo de energia e melhorar a área de contato superficial da argamassa é utilizar materiais que promovam essas

propriedades. A nanocelulose, por exemplo, possui características que atuam favoravelmente nesse contexto, além de ser um material ecologicamente correto. Morsy e Aglan (2007) destacam que a argamassa de revestimento atua como um envelope nas edificações, desempenhando um papel importante na melhoria das propriedades térmicas e acústicas, contribuindo para a redução do consumo energético.

Segundo Catai *et al.* (2006) os materiais empregados na construção civil, como a alvenaria de vedação e estrutural, possuem características de isolamento acústico, mas não o suficiente para reduzir os ruídos indesejados. Logo, o uso de materiais com composição fibrosa ou porosa são alternativas eficientes para a dissipação da energia acústica.

A celulose é um biopolímero utilizado como matéria-prima em diversas aplicações industriais. Sendo o polímero natural mais abundante do planeta, constitui a maior parte da biomassa das plantas, principalmente na parede celular vegetal. Com avanços tecnológicos, estão sendo exploradas diversas alternativas para o desenvolvimento sustentável e produtivo desse material, incluindo a produção de celulose por meio do metabolismo microbiano (Alves *et al.*, 2019).

A introdução de nanomateriais à base de celulose pode modificar as propriedades dos compósitos à base de cimento, reduzindo a dependência de matérias-primas convencionais e minimizando as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à sua produção (Liang *et al.*, 2022).

Os nanomateriais de celulose têm atraído interesse significativo na pesquisa devido aos seus elementos que podem ser aproveitados na obtenção de compósitos cimentícios de baixo impacto ambiental, pois a indústria de materiais cimentícios demonstra ser receptiva à utilização de diversos resíduos celulósicos como substitutos de matérias-primas convencionais (Moon, Schueneman e Simonsen, 2016; Rocha, Farias e Siqueira, 2022; Cernec *et al.*, 2005; Vegas *et al.*, 2006; García *et al.*, 2016).

Bai *et al.* (2023) relatam que a aplicação de nanocelulose em materiais cimentícios garante a qualidade do concreto e mantém a preservação ambiental, diminuindo o uso de recursos para o reparo da estrutura. A nanocelulose possui canais livres de transporte de água para clíqueres internos não hidratados,

causando um efeito retardador na hidratação precoce do cimento, devido ao seu teor de água livre no sistema de hidratação.

Nicolini (2021) descreve que a reologia das argamassas de revestimento é essencial para a sua aplicação e desempenho, podendo ser utilizada para estudar os efeitos dos aditivos numa pasta de cimento. Compreender e ajustar propriedades como fluidez e viscosidade é essencial para garantir resultados consistentes e de qualidade, no qual as informações podem garantir melhor desempenho em seu estado endurecido (Ribeiro, 2021).

Kolour *et al.* (2018) afirmam que a incorporação de nanocelulose em materiais cimentícios pode aumentar a tensão de escoamento e viscosidade, dependendo do tamanho das partículas e método de dispersão. Essas características auxiliam na previsão da trabalhabilidade da argamassa e na sua aplicação em canteiro de obras.

As nanofibras de celulose são usadas em compósitos à base de cimento como ingredientes de reforço, melhorando as propriedades do concreto devido à sua área superficial que potencializa suas interações com a matriz cimentícia e propriedades mecânicas. Reis, Effting e Schackow (2022) alegam que a adição de nanocelulose pode controlar a retração linear e aumentar a resistência do concreto, prevenindo o crescimento e propagação de trincas na matriz cimentícia, além de ser um material em abundância na terra e totalmente verde.

A celulose bacteriana para este estudo foi disponibilizada pela Nanobiocell, empresa situada em Joinville/SC, e caracteriza-se por sua produção inovadora devido a sua escalabilidade. A empresa utiliza essa abordagem inovadora visando abrir novas perspectivas para a produção de nanocelulose com propriedades melhoradas e sustentáveis. Destaca-se ainda que a produção do material é mais econômica em comparação com outras nanoceluloses disponíveis no mercado. Isso possibilita avanços significativos em áreas como engenharia de materiais, biotecnologia e ciência de materiais.

O estudo do desempenho da nanocelulose adicionada à massa de cimento em argamassa leve é fundamental dentro do contexto sustentável, visando melhorar sua capacidade mecânica e de isolamento, aproveitando as propriedades únicas da nanocelulose e sua produção. A análise reológica é uma escolha estratégica para otimizar o aproveitamento do material e desenvolver

proporções de dosagens eficazes para então realizar os ensaios comumente realizados em argamassas.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho consiste em avaliar a influência da aplicação da celulose bacteriana nanofibrilada (BCNF) na argamassa leve contendo vermiculita a partir da avaliação do comportamento físico-químico da mistura.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- a) avaliar a influência da concentração de nanocelulose no comportamento reológico, na hidratação da matriz de cimento Portland, e na resistência mecânica das argamassas produzidas;
- b) determinar o potencial de isolamento térmico das argamassas produzidas;
- c) avaliar o comportamento da nanocelulose na microestrutura da matriz cimentícia em contato com os agregados leves, bem como, a zona de transição.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão abordados os conceitos relacionados a argamassas leves de revestimento, seus componentes, tipos, requisitos e propriedades. Em seguida, serão apresentados o agregado leve e a celulose bacteriana que serão incorporados na argamassa do presente estudo. Conceituando também o comportamento reológico, e os ensaios utilizados para conduzir esse estudo.

### 2.1. ARGAMASSAS PARA REVESTIMENTO

As argamassas são elementos de um sistema de materiais de construção que se caracterizam pela sua capacidade de aderência e endurecimento. Sua composição envolve a mistura homogênea de aglomerantes, como cimento, cal ou gesso, com agregado miúdo, geralmente areia, e água. Adicionalmente, podem conter aditivos químicos, que promovem o retardo do tempo de pega, Redução E Estabilização De Água, Bem Como Adições Minerais (Recena, 2023; Isaia e Carasek, 2010; Lisboa, Alves e Melo, 2017).

A argamassa de revestimento desempenha um papel essencial na proteção das edificações, proporcionando maior durabilidade e reduzindo os custos de manutenção, atuando como isolante termoacústico, impermeabilizante, e na segurança contra incêndios. Além da função estética e base para aplicação de novos revestimentos (Sinhorelli, 2019). Essa argamassa é empregada comumente em paredes, muros e tetos considerando propriedades como retração e redução de água (Lisboa, Alves, e Melo, 2017).

As argamassas à base exclusivamente de cimento são frequentemente empregadas em fundações, chapisco e revestimentos de obras hidráulicas, onde a impermeabilidade é essencial. As argamassas que utilizam cal são conhecidas por sua maior plasticidade, tornando-as ideais para aplicação e proporcionando um acabamento mais uniforme. Essas últimas são comumente usadas em rebocos, emboços e no assentamento de alvenarias não estruturais. Além disso, há argamassas mistas, que combinam cimento e cal, e são empregadas em contrapisos, no assentamento de revestimentos e na construção de alvenarias, tanto estruturais quanto de vedação (Fiorito, 2009).

Esta pesquisa investiga uma argamassa específica para revestimento de paredes e tetos, que contém cal hidratada em sua composição. A presença de cal na argamassa no estado fresco melhora sua trabalhabilidade, facilitando sua aplicação e aumentando a produtividade. Quando endurecida, a argamassa tem a capacidade de absorver deformações causadas pelos movimentos da estrutura (Schackow *et al.*, 2015).

As argamassas leves têm o intuito de melhorar o desempenho térmico e acústico em aplicações de revestimento. A introdução de agregados com densidade inferior a 1,40 g/cm<sup>3</sup> proporciona argamassas leves. Esses agregados, de baixa densidade aparente, podem ser naturais ou sintéticos, muitas vezes subprodutos industriais. A vermiculita exemplifica esse tipo de agregado, com alta porosidade e baixa densidade. São utilizados quando se busca leveza, isolamento térmico ou acústico, contudo, resultam em materiais com baixa resistência mecânica final (Rossignolo e Agnesini, 2005).

Apesar das propriedades fundamentais dos revestimentos estarem ligadas ao seu estado endurecido, é a adaptação das propriedades reológicas das argamassas às diferentes demandas durante a aplicação que possibilita alcançar as melhores características finais do revestimento (Cardoso, John e Pileggi, 2010).

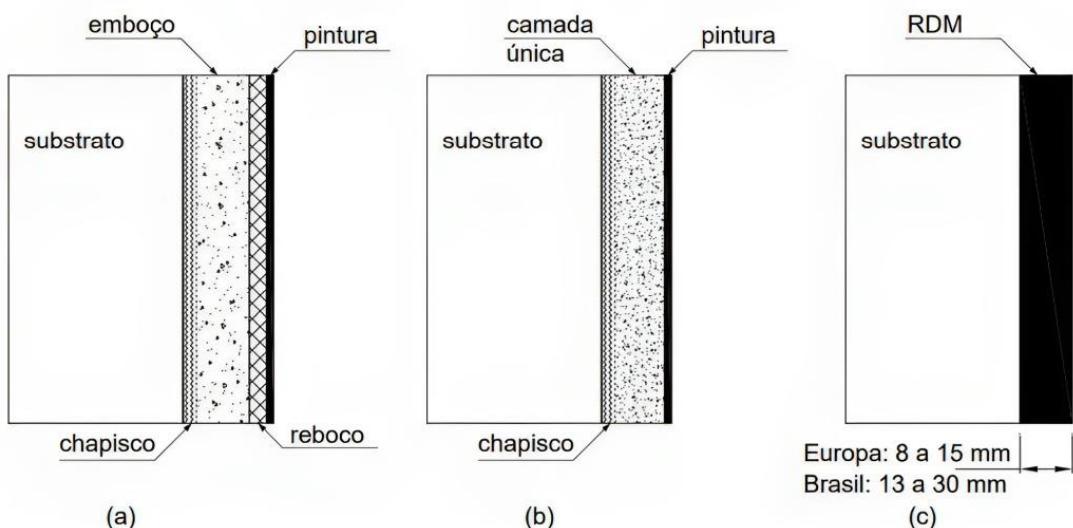
As principais funções de uma argamassa de revestimento incluem fornecer proteção contra intemperismo (especialmente para revestimentos externos), oferecer isolamento térmico de cerca de 30% e isolamento acústico de aproximadamente 50%, garantir estanqueidade à água variando entre 70% e 100%, apresentar resistência ao fogo, desgaste e danos superficiais, servir como base para acabamentos e facilitar a regularização de elementos de vedação (Carasek, 2010).

De acordo com Recena (2023), as argamassas de revestimento são estruturadas em camadas, as quais são classificadas com base na sua composição e aplicação (Figura 1). Segundo Lisboa, Alves e Melo (2017), as camadas de revestimento incluem:

- Chapisco: prepara a base, melhorando a absorção e aderência do revestimento, podendo ser aplicada de forma contínua ou não.

- Emboço: tem a função de uniformizar e nivelar a superfície para a aplicação de um revestimento decorativo posterior.
  - Reboco: é a camada aplicada para cobrir e nivelar antes do acabamento, geralmente a pintura.
  - Camada única: revestimento que utiliza apenas um tipo de argamassa aplicada na superfície.
  - Revestimento decorativo (monocamada): camada de revestimento que tem a finalidade de regularizar e decorar a superfície.

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



Fonte: Adaptado de CARASEK (2010).

### 2.1.1. Materiais Constituintes

A NBR 13281-1 (ABNT, 2023) define argamassa como uma mistura homogênea composta principalmente por aglomerantes, agregado miúdo e água, podendo incluir aditivos, dependendo de sua finalidade (Fiorito, 2009). A seguir, serão apresentadas as definições dos principais itens empregados na formulação de uma argamassa.

#### 2.1.1.1. *Aglomerantes*

Os aglomerantes são materiais com propriedades ligantes, em geral são pulverulentos e que misturados com a água formam uma pasta que endurece por processos devido às reações químicas ou por simples secagem. São utilizados, também, para ligar agregados, formando um corpo sólido e coeso (Diprotec, 2024). Os aglomerantes mais utilizados são cimento, cal e gesso.

O cimento tipo Portland, de acordo com Effting (2004) é formulado com a presença de alumina e sílica, minerais comuns encontrados em argilas e xistos, além de calcário, tornando-o um material amplamente disponível no mercado. Conforme a NBR 11172 (ABNT, 1990), é um aglomerante artificial derivado do clínquer Portland e a adição de um ou mais sulfatos de cálcio.

A cal é um material pulverulento muito fino. Na construção civil, é usada na forma de cal virgem ( $\text{CaO}$ ) e cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Esta é definida pela NBR 7175 (ABNT, 2003), é um pó resultante da hidratação da cal virgem.

#### 2.1.1.2. *Agregado Miúdo*

Os agregados são em sua maioria inertes e não reagem quimicamente com a água, mas é possível identificar reações químicas na zona de transição entre o agregado e a argamassa de cimento (Moravia, 2007). Conforme Faria e Palmeira (2010), os agregados são, em sua maioria, granulares, sem uma forma ou volume definido, e suas características são adequadas para materiais à base de cimento Portland, como concreto e argamassa. Eles podem ser obtidos de várias formas, incluindo fontes naturais, britagem, produção artificial ou reciclagem.

A granulometria da areia na argamassa influencia na sua composição final. Areias com granulometria graúda prejudicam a aplicação e reduzem a aderência. Em resumo, a distribuição granulométrica contínua é essencial para uma boa resistência, aderência e trabalhabilidade (Recena, 2023).

#### 2.1.1.3. *Aditivos químicos*

Os aditivos desempenham um papel essencial na resolução de problemas em argamassas, e o tipo de aditivo utilizado depende das propriedades que se

deseja modificar. Eles são empregados para aprimorar características como trabalhabilidade, reduzir a segregação, aumentar a coesão nas misturas e estender o tempo de pega. Esse último aspecto, o aumento do tempo de pega, é especialmente importante para melhorar o rendimento e facilitar a aplicação do produto no local (Martin, 2007).

Como é o caso dos aditivos incorporadores de ar e superplastificante, empregados neste estudo, que melhoram a trabalhabilidade, dispersão do cimento, redução da água e segregação (Akhlaghi *et al.*, 2020; Ferrández-Mas e García-Alcocel, 2012).

Os aditivos superplastificantes, conforme a NBR 11768 (ABNT, 2011), promovem um aumento na consistência do concreto sem a necessidade de aumento da quantidade de água, pois esses aditivos têm a capacidade de reduzir aproximadamente 12% da água de amassamento sem comprometer a consistência.

No âmbito da construção civil, eles são amplamente empregados devido à sua capacidade de adsorção nas partículas de cimento, resultando na diminuição da tensão superficial da água ao redor dessas partículas, promovendo um aumento significativo na fluidez da mistura (Mehta e Monteiro, 2014).

Do ponto de vista científico, no processo de hidratação, o cimento tende a formar flocos, devido ao tamanho de suas partículas (Nunes *et al.*, 2011). Os aditivos superplastificantes podem facilitar a ação dispersante sobre o sistema de cimento/água, através da interação das partículas provocada pelo surgimento de uma carga negativa na superfície dos grãos de cimento (Meirelles *et al.*, 1999; Graeff *et al.*, 2002). Esse aditivo também tem um impacto significativo no comportamento reológico das argamassas, geralmente são à base de éter-policarboxilatos ou de polímeros de formaldeído-naftaleno sulfonado (Bauer, 2019).

O aditivo incorporador de ar (IA), de acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2011), forma um sistema de bolhas de ar microscópicas que melhora a durabilidade, o desempenho térmico e acústico, a trabalhabilidade, a coesão e reduz a segregação das argamassas (Hartmann *et al.*, 2010). Esse aditivo

introduz bolhas de ar que reduzem o atrito entre os grãos do agregado, atuando como um lubrificante (Romano, Cincotto e Pileggi, 2018).

### 2.1.2. Argamassas Leves

As argamassas leves têm densidade abaixo de 2000 kg/m<sup>3</sup>, alcançada pela inclusão de ar no material usando aditivos ou agregados leves (Cardoso, Callejas e Durante, 2016). A NBR 12655 (ABNT, 2022) também estabelece o valor máximo da massa específica real dos agregados leves menores que 2000 kg/m<sup>3</sup>. A norma C331 (ASTM, 2017) define que a massa unitária dos agregados leves miúdos e graúdos se mantenha abaixo de 1120 kg/m<sup>3</sup> e 880 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente (Souza *et al.*, 2020).

As vantagens significativas dos compósitos cimentícios leves em comparação com os tradicionais incluem a baixa densidade, uma alta relação resistência/peso, menor coeficiente de condutividade térmica, melhor desempenho em tração e características acústicas aprimoradas (Sayadi *et al.*, 2016). Chen, Yu e Brouwers (2017) observaram que a estrutura porosa dos agregados leves facilita a absorção sonora. Além disso, Arenas *et al.* (2017) afirmam que o aumento da porosidade contribui positivamente para essa propriedade, embora perca propriedades de densidade e resistência mecânica. Eles também concluíram que a absorção sonora varia com a espessura avaliada.

Os agregados leves possibilitam a produção de concretos ou argamassas com resistências variadas, dependendo do tipo de agregado, da composição e da dosagem da mistura. A dosagem, baseada em conceitos técnico-científicos, define as proporções dos materiais constituintes para um uso eficaz da argamassa (Gomes *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2018). Estudos propõem misturas entre cimento, areia natural e agregados leves para caracterizar e analisar a viabilidade técnica de aplicação em construções. A otimização da eficiência e sustentabilidade é possível por meio de materiais alternativos de baixo custo, reciclados ou de fontes renováveis, contribuindo para a preservação das reservas naturais e economia (Arruda Filho *et al.*, 2012; Cardoso, Callejas e Durante, 2016; Tutikian *et al.*, 2017).

Os agregados leves são produtos granulares de estrutura porosa, amplamente produzidos e comercializados mundialmente, oferecendo diversas

aplicações. Os fabricantes propõem usos como isolamento térmico e acústico, decoração paisagística, enchimentos leves, obras de drenagem, aterros leves, infraestrutura e cultura hidropônica. Esses agregados podem ser de origem de base mineral, vegetal ou polimérica (Souza *et al.*, 2020; Andrade *et al.*, 2022).

Alguns exemplos de agregados de base mineral são a vermiculita expandida, argila expandida, cinzas de carvão etc. Os de origem vegetal são as fibras de sisal, cortiça, madeira, pó de serra, entre outros. E, de origem polimérica são o poliestireno expandido (EPS), acetato de vinil etileno (EVA) e resíduos de borracha e pneus.

Branco e Godinho (2013) conduziram uma análise comparativa sobre a redução do ruído de impacto em diferentes soluções de argamassa leve, incorporando materiais como argila expandida, EPS ou cortiça. A pesquisa investigou também o efeito do aumento da espessura das camadas. Os resultados demonstraram uma redução significativa do ruído de impacto em todas as soluções avaliadas, especialmente em altas frequências. No entanto, os níveis de redução estão diretamente relacionados, principalmente, com a camada de base ou substrato utilizada.

Arruda Filho *et al.* (2012) realizaram uma análise das propriedades de placas cimentícias, com e sem fibras de sisal incorporadas de maneira aleatória e alinhadas dentro da matriz. Os resultados destacam que a inclusão de fibras desempenha um papel importante na mitigação da fissuração na matriz de materiais cimentícios. Além disso, as fibras contribuem para o aumento da tenacidade, resistência à tração e resistência ao impacto. No entanto, esses benefícios estão ligados à interação entre esses elementos e às características físicas e geométricas.

Tutikian *et al.* (2017) realizaram estudo substituindo areia natural por Acetato de Vinilo Etileno (EVA) em diferentes proporções para contrapiso. Observou-se que com 100% de substituição proporcionou um eficaz isolamento acústico contra ruído de impacto. Pacheco *et al.* (2017) também substituíram os agregados naturais por EVA, notando que uma maior proporção de agregado grosso de EVA resultou em menor massa específica e, consequentemente, em melhor desempenho de isolamento acústico. O EVA manteve seu efeito

pneumático na redução do amortecimento mecânico, mesmo em contato com a pasta de cimento.

### 2.1.3. Propriedades da argamassa

As argamassas possuem requisitos que avaliam seu desempenho tanto no estado fresco quanto no endurecido, sendo essenciais para determinar sua aplicabilidade na construção e sua vida útil.

#### 2.1.3.1. Propriedades no estado fresco

As principais propriedades da argamassa no estado fresco incluem o índice de consistência, a retenção de água, a densidade de massa e o tempo de pega. Segundo Bauer (2019), uma argamassa que detém boa trabalhabilidade possui uma maior extensão de aderência ao substrato devido à facilidade na sua aplicação proporcionada pela consistência adequada.

O estudo das argamassas no estado fresco, assim como da sua trabalhabilidade pode ser mais bem compreendido através da reologia. A reologia é fundamentada, principalmente, na análise da deformação e fluxo da matéria, os quais englobam os fenômenos de elasticidade, plasticidade e viscosidade (Barnes *et al.*, 1989).

A NBR 16541 (ABNT, 2016) recomenda adotar o índice de consistência da argamassa de  $26 \pm 0,5$  cm. Silva (2008) classifica como: secas as argamassas que possuem índice de consistência inferior a 25 cm; plásticas com índice entre 26 e 30 cm; e fluídas quando o índice for superior a 36 cm.

Conforme mencionado por Recena (2023), uma argamassa excessivamente fluida, ou seja, com pouca consistência, não é facilmente trabalhável. Da mesma forma, uma argamassa muito consistente terá sua trabalhabilidade prejudicada. A consistência da argamassa varia e pode ser ajustada de acordo com a quantidade de água na mistura (Carasek, 2010).

A plasticidade da argamassa é afetada pelo tipo e quantidade de aglomerante, pela presença ou ausência de aditivo, e pelo tempo e intensidade da mistura (Carasek, 2010).

A coesão é a propriedade responsável pela aglutinação das partículas que compõem a pasta. Portanto, uma argamassa com maior plasticidade (gorda) apresentará uma coesão mais elevada (Recena, 2023).

A retenção de água, embora seja uma propriedade avaliada no estado fresco, tem um impacto direto no estado endurecido, como resistência final, na aderência e na durabilidade da argamassa. A retenção de água tem a 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 a ASTM C270 (ASTM, 2024) as argamassas devem reter, no mínimo, 75% de água. A NBR 13281-1 (ABNT, 2023) as classifica por classes.

A densidade de massa é um fator importante que influencia a trabalhabilidade da argamassa, que varia com o teor de ar incorporado e as massas dos materiais constituintes (Carasek, 2010). Argamassas mais leves são mais fáceis de aplicar manualmente, o que melhora a trabalhabilidade em longo prazo (Lisboa, Alves e Melo, 2017). A quantidade de ar aprisionado na mistura afeta a densidade, contribuindo para um melhor isolamento térmico (Recena, 2023).

A adesão inicial da argamassa fresca ao substrato é determinada pela sua capacidade de união inicial. Essa propriedade está relacionada à tensão superficial da pasta aglomerante, que, por sua vez, depende da composição da pasta. A tensão superficial é inversamente proporcional ao teor de cimento na mistura, ou seja, diminui à medida que a quantidade de cimento aumenta. Esse efeito também é observado com a adição de cal à argamassa de cimento, o que contribui para uma melhor propagação da mistura sobre o substrato (Carasek, 2010).

#### *2.1.3.2. Propriedades no estado endurecido*

As propriedades das argamassas no estado endurecido são fundamentais para o desempenho do revestimento, sendo a resistência mecânica a mais significativa. Segundo Cincotto *et al.* (1995), essa resistência diz respeito à capacidade das argamassas de resistir às tensões a que o revestimento pode ser submetido, como tração, compressão ou cisalhamento. Cestari (1997)

complementa, afirmando que a resistência mecânica é a habilidade de suportar esforços mecânicos sem apresentar deformações plásticas visíveis.

A retração da argamassa é um processo complexo que começa no estado fresco e continua após o endurecimento do material devido à perda de água e ao processo de hidratação do cimento (Carasek, 2010). Coelho, Torgal e Jalali (2009) afirmam que essa propriedade interfere diretamente na durabilidade, pois está relacionada ao surgimento de fissuras, permitindo a entrada de substâncias nocivas que podem degradar o material.

Conforme Bauer (2019), argamassas simples à base de cimento com excesso de aglomerante e com espessuras exageradas são propensas à retração natural, o que pode resultar no deslocamento da argamassa do substrato devido às elevadas tensões de tração entre a base e a pasta. Esse fenômeno reduz a resistência devido à falta de aderência, afetando diretamente a capacidade de deformação, ou seja, o módulo de elasticidade da argamassa (Carasek, 2010).

Segundo Lisboa, Alves e Melo (2017), a aderência da argamassa é a resistência e extensão do contato entre a argamassa e sua base, sendo esta influenciada pelo substrato no qual a argamassa é aplicada. Schackow (2015) relata que a aderência não é uma propriedade intrínseca da argamassa, mas sim uma medida da interação entre as diferentes camadas do sistema de revestimento, incluindo a base, o preparo da base e o próprio revestimento. A resistência de aderência à tração refere-se à máxima tensão suportada por uma área específica de revestimento (corpo de prova), na interface de avaliação, quando submetido a uma força de tração normal.

A Figura 2 ilustra a influência que a base causa na aderência do material por meio de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração. Enquanto Carasek (2010) relata que há cinco tipos de ruptura, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação das rupturas do ensaio de aderência à tração.

Denominação da Ruptura	Causas da Ruptura
A	Adesiva (patologias)
B	Coesiva (interior das argamassas)
C	

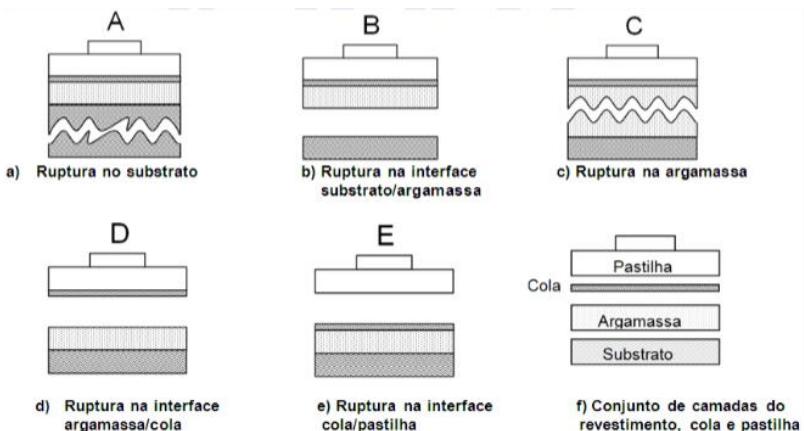
(continua)

(continuação)

D	Resistência superficial inadequada
E	Defeito de colagem

Fonte: Adaptado de Carasek (2010).

Figura 2 – Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa, considerando o revestimento aplicado diretamente ao substrato (sem chapisco).



Fonte: NBR 13258-2 (ABNT, 2019).

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 requisitos específicos para sua aplicação em emboço e camada úmida (ABNT, 2013).

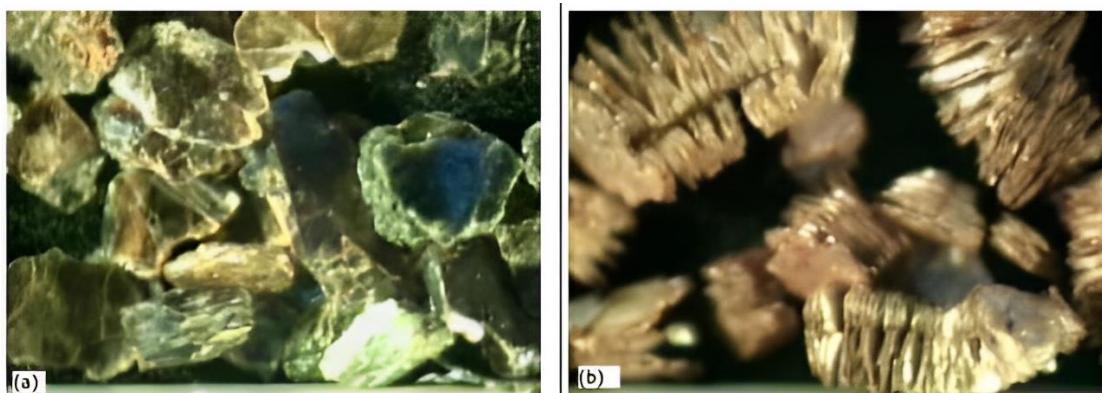
A resistência à compressão das argamassas de revestimento depende principalmente do tipo e quantidade dos aglomerantes, granulometria dos agregados e da relação água/cimento. O aumento da quantidade de água enfraquece a matriz da argamassa, aumentando a porosidade e diminuindo a resistência mecânica (Mehta e Monteiro, 1994).

Apesar de a cal melhorar a trabalhabilidade, ela reduz a resistência à compressão (Silva, 2006). A norma C270 (ASTM, 2007) estabelece que argamassas com cal devem ter resistência à compressão superior a 2,5 MPa, pois altas resistências podem diminuir a capacidade de deformação, resistência ao impacto e aderência (Tristão, 1995).

## 2.2. VERMICULITA COMO AGREGADO LEVE

A vermiculita (Figura 3a) é um mineral da família da mica, é obtida mediante um tratamento térmico realizado a temperaturas entre 900°C e 1100°C, ocorre sua expansão e esfoliação, resultando em um aumento significativo do volume inicial, em geral de 20 a 30 vezes, e originando a vermiculita expandida (Figura 3b). A vermiculita é composta por silicatos de alumínio, ferro e magnésio, tendo sua composição química expressa na Tabela 1. Esta forma expandida apresenta propriedades como baixa massa específica aparente e condutividade térmica reduzida. É um material que contribui para otimizar o comportamento térmico quando associado a elementos de vedação (Becker *et al.*, 2022; Sinhorelli, 2019; Brasil Minérios, 2019).

Figura 3 – (a) Vermiculita Natural; (b) Vermiculita Expandida.



Fonte: UGARTE *et al.* (2004).

Tabela 1 – Composição química da vermiculita.

COMPOSTO	INTERVALO (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	6 a 15
$\text{SiO}_2$	35 a 45
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7 a 11
$\text{H}_2\text{O}$	6 a 12
$\text{MgO}$	21 a 27
Álcalis	0 a 6

Fonte: SOUSA (2010).

A classificação granulométrica da vermiculita pode variar de acordo com o tamanho das partículas, sendo categorizada conforme padrão brasileiro, como apresentado na Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação granulométrica da vermiculita.

Classe	Tamanho (mm)
Média	55-95% > 2,4
Fina	65-95% > 1,2
Superfina	70-95% > 0,6
Micrométrica	80-100% > 0,3

Fonte: Adaptado de REIS (2002).

Na construção civil, a vermiculita é amplamente explorada por suas propriedades específicas. Sua baixa massa específica aparente a torna ideal para a produção de argamassas e concretos leves, utilizados em contrapisos e para preenchimento de lajes, reduzindo a carga nas estruturas. Além disso, sua baixa condutividade térmica e eficiência na absorção sonora a tornam valiosa para isolamento térmico e acústico em argamassas. A incombustibilidade da vermiculita a torna uma escolha comum na produção de argamassas projetáveis para revestimentos antifogo (Cintra, Paiva e Baldo, 2013; Ugarte, 2008; Cetem-MCT, 2005). Reis (2002) afirma que há moldes fabricados com vermiculita na proteção de estruturas metálicas que retardam o fogo em até 240 minutos.

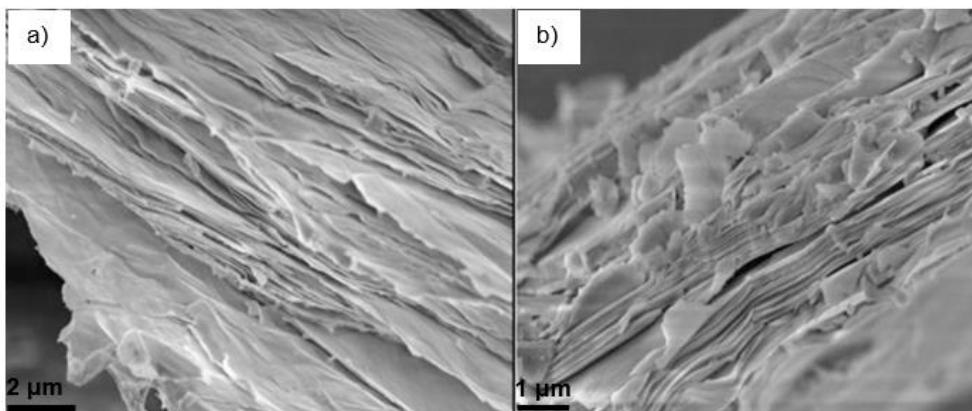
Köksal *et al.* (2015), conferiram benefícios para o conforto térmico e segurança contra incêndios adicionando vermiculita nas argamassas. Com base nisso, a NBR 15575-4 (ABNT, 2013) tem aumentado as exigências, focando em segurança contra incêndios e desempenho térmico. Ela avalia a reação ao fogo para evitar sua propagação, visando preservar a estabilidade estrutural. Além disso, aborda o desempenho térmico, garantindo que as paredes externas atendam critérios como transmitância e capacidade térmica.

Gonçalves (2014) constatou que a adição de 5% de vermiculita nas bases cimentícias da argamassa resultou em um desempenho satisfatório em termos de regulação da umidade relativa do ar em ambientes internos.

A microestrutura da vermiculita (Figura 4) possui poros. Durante a mistura, as partículas da vermiculita podem quebrar devido ao esforço aplicado, resultando em uma alteração na quantidade de água necessária para obter a

consistência desejada (Borges *et al.*, 2012). Ribeiro *et al.* (2005) mencionam que a adição desse agregado condiciona as propriedades da argamassa em pasta, exigindo um aumento na quantidade de água para manter a trabalhabilidade.

Figura 4 – Microestrutura da Vermiculita: (a) ampliação de 2000x; (b) ampliação de 1000x.



Fonte: Adaptado de GUILHERME, CABRAL E SOUZA (2020).

Araújo e Cândido (2015) aplicaram a vermiculita em concretos e argamassas, e observaram uma redução de até 50% na condutividade térmica e 30% na massa específica, quando comparadas a uma argamassa convencional, com valores da ordem de 610 kg/m<sup>3</sup>. Schackow *et al.* (2014) determinaram a condutividade térmica de 0,50 W/m.K e 0,34 W/m.K em concretos leves empregando a vermiculita com a variação de 55 e 65% do volume de concreto.

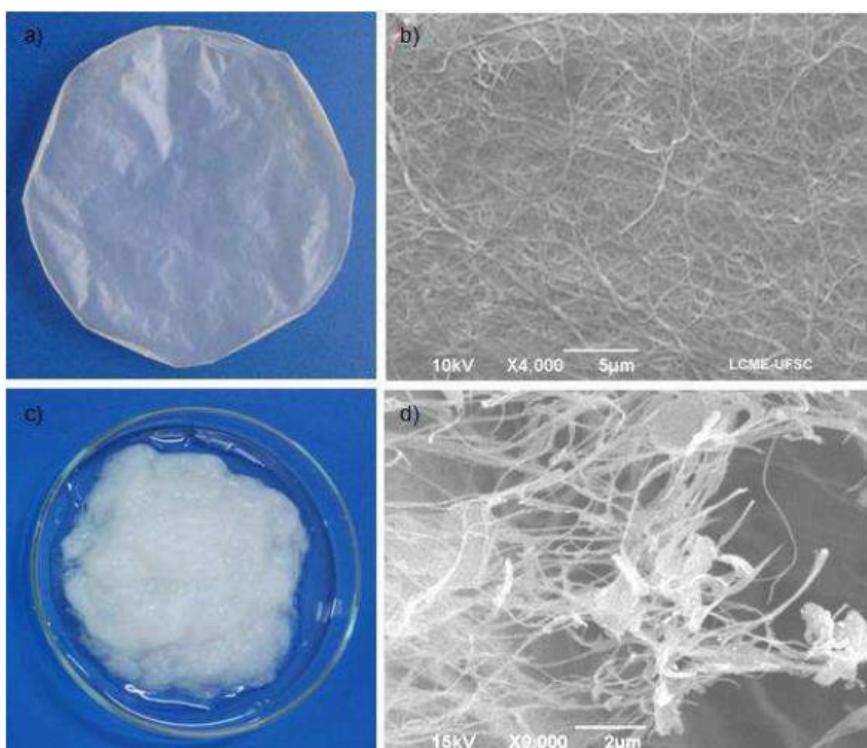
### 2.3. CELULOSE BACTERIANA

A celulose bacteriana é um composto orgânico com a fórmula química (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>, e compartilha semelhanças em sua estrutura química com a celulose vegetal, sendo biodegradável e não tóxica. Possui alta pureza e uma estrutura de rede nanofibrilar ultrafina e altamente organizada, com grande capacidade de retenção de água (Shezad *et al.*, 2010). É produzida livre de compostos de hemicelulose, pectina e lignina, demonstrando um grande potencial econômico (Keshk, 2014).

A Figura 5 apresenta um comparativo entre a membrana de celulose e a celulose desfibrilada em forma de gel, demonstrando que, em ambos os formatos, há uma rede ultrafina e de comprimento alongado. A produção de

celulose bacteriana envolve dois processos essenciais: fermentação e purificação. Durante a fermentação, os microrganismos podem se movimentar livremente no meio ou se fixar às fibras de celulose, resultando em uma estrutura de gel altamente inchada. Já o processo de purificação compreende a inativação dos microrganismos e a remoção de resíduos celulares e meio de cultura da matriz de celulose (Hu *et al.*, 2014; Amorim *et al.*, 2020).

Figura 5 – Celulose bacteriana: (a) membrana de BC seca em estufa. (b) MEV da membrana de BC seca em estufa. (c) BC hidrogel desfibrilada. (d) MEV BC hidrogel desfibrilada e liofilizada.



Fonte: SOUZA e RECOUVREUX (2016).

Devido às suas características fortes, leves, renováveis, abundantes e ecologicamente corretas, a nanocelulose tem sido amplamente utilizada em muitos campos, como alimentos, cosméticos, produtos farmacêuticos e recentemente empregados à materiais cimentícios (Tibolla, 2014; Mondal, 2020; Serpa *et al.*, 2016; Perrin *et al.*, 2020).

Estudos sobre a mistura de fibra de aço, fibra sintética, fibra vegetal etc., em argamassa e concreto como material de reforço para melhorar a resistência à tração e à fissuração estão em andamento (Kuroiwa, Quy e Hama, 2022). Pois

se espera uma maior utilização de fibras vegetais com o objetivo de reduzir a carga ambiental. No entanto, as fibras de nanocelulose advindas de plantas e bactérias tendem a se deteriorar em um ambiente alcalino, como o cimento (Muhammad e Majid, 2018; Romildo *et al.*, 2000; Ramakrishn e Sundararajan, 2005).

Kuroiwa, Quy e Hama (2022) destacam em seu estudo que a nanocelulose bacteriana nanofibrilada, quando tratada em condições altamente alcalinas com pH 12 ou superior no processo de lise (um processo que não é realizado na fabricação de nanocelulose vegetal nanofibrilada), é considerada um material com alta resistência a ácalis, atuando diretamente na microestrutura da pasta de cimento devido a seu comprimento na ordem de várias centenas de micrômetros.

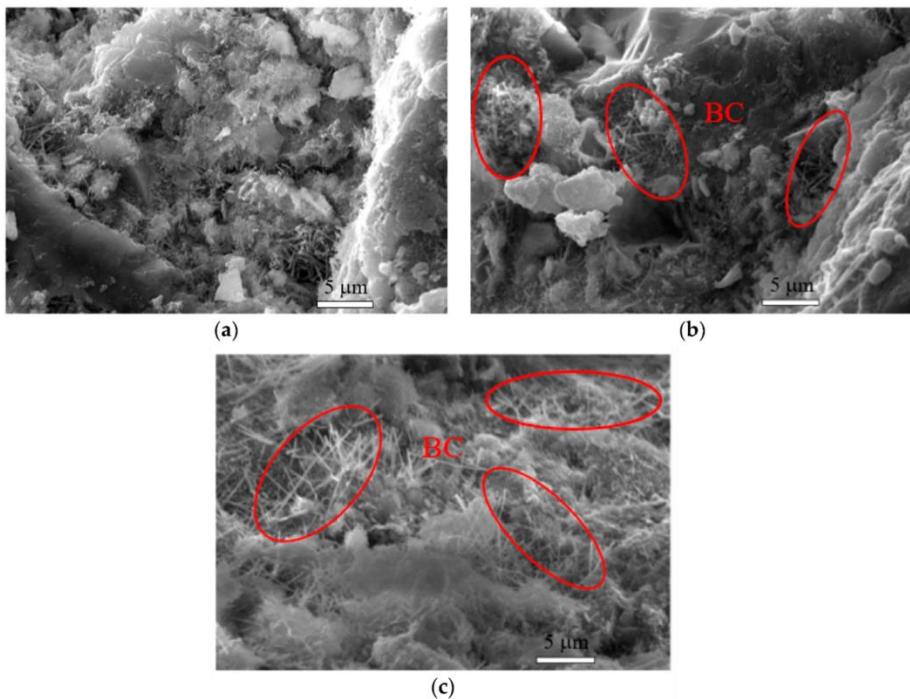
Pesquisas mostraram que materiais nanocelulósicos foram capazes de melhorar a capacidade de cura de compósitos cimentícios (Cuenca, Mezzena e Ferrara, 2021). Pois possui características de melhorar propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade, resistência à flexão e compressão, durabilidade, grau de hidratação, reduzir o tempo de pega e densificar a microestrutura (Jiao *et al.*, 2016; Parveen *et al.*, 2017; Gonçalves *et al.*, 2020; Gonçalves *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2016; Tang *et al.*, 2019).

O uso de celulose em nanoescala tem um impacto significativo na matriz cimentícia. Devido à sua grande área superficial, influencia a hidratação do cimento, resultando em maior resistência e controle da retração plástica. Além disso, pode atuar como agente modificador de viscosidade em materiais cimentícios, aumentando a tensão de escoamento e a viscosidade (Guo *et al.*, 2020; Kolour *et al.*, 2018). Estas propriedades melhoram o desempenho em macroescala da argamassa, pois as fissuras começam a crescer e expandir em escala nanometrica (Souza, 2010; Akhlaghi *et al.*, 2020).

O emprego de fibras celulósicas geralmente resulta em um aumento da resistência mecânica nas matrizes cimentícias. Isso se deve às alterações microestruturais na matriz, causadas pela contínua hidratação dos grãos de cimento ao redor das fibras. A zona de transição interfacial torna-se mais densa devido à reprecipitação dos produtos de hidratação do cimento nas camadas porosas (Santos, Teixeira e Savastano Junior, 2017).

Na Figura 6, é apresentada a interação entre a fibra de celulose e o cimento Portland, Akhlaghi *et al.* (2020) relatam que a celulose bacteriana melhora a ancoragem servindo como nanopontes para reter nanofissuras desempenhando uma transferência eficaz de cargas dentro da matriz. Segundo Naraganti, Pannem e Putta, (2019), essa interação pode ser física ou química, envolvendo um intertravamento mecânico por meio de ligações de hidrogênio com as moléculas de água no processo de amassamento, melhorando a resistência da pasta de cimento.

Figura 6 – Imagem MEV: (a) argamassa de controle; (b) argamassa com pó BC; (c) argamassa com gel BC.



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

De acordo com Hisseine *et al.* (2019), é possível confirmar o aumento das resistências mecânicas em nanoscala através do ensaio de nanoindentação. A pesquisa demonstrou 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).

De acordo com a Nanobiocell (2023), a nanocelulose utilizada neste estudo é derivada de um processo biotecnológico onde um consórcio microbiano cultivado em um meio rico em carbono, nitrogênio e fósforo produzem as

nanofibras que formam uma membrana tridimensional. Esta membrana é submetida a um processo de limpeza para a remoção da biomassa e em seguida é triturada para dar origem às nanofibras de celulose bacteriana (Antonio, 2012; Donini, 2010; Ogeda, 2010; Pinto, 2021).

## 2.4. COMPORTAMENTO REOLÓGICO

A reologia é a ciência que estuda o fluxo e deformação dos materiais sob esforço mecânico, sendo uma ferramenta de grande valor para o estudo das propriedades do estado fresco da argamassa. Barnes *et al.* (1989), relatam que a reologia é fundamentada na análise da deformação e fluxo da matéria, os quais englobam os fenômenos de elasticidade, plasticidade e viscosidade.

Na prática, a reologia é utilizada para prever e controlar o comportamento de fluxo da mistura a partir de dois conjuntos de informações: a composição da mistura e os processos aos quais será submetida (Ferraris; De Larrard; Sedran, 1998; Botella, 2005). A composição da mistura diz respeito à natureza, propriedades e proporção dos constituintes. Já os processos correspondem ao tempo, temperatura e forma de mistura, lançamento (bombeamento, vibração, peso próprio) e acabamento (De Larrard e Sedran, 2002; Yahia, 2014; Petit *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2011).

As argamassas consistem em proporções bem ajustadas de agregados, cimento e água. Os agregados podem ser vistos como suspensões concentradas de partículas sólidas em uma pasta de cimento. Nestas suspensões, as interações entre as partículas são influenciadas pela proximidade, forma e concentração das partículas, distribuição granulométrica, propriedades superficiais do agregado e composição do líquido (Sousa e Bauer, 2019; Banfill, 2005).

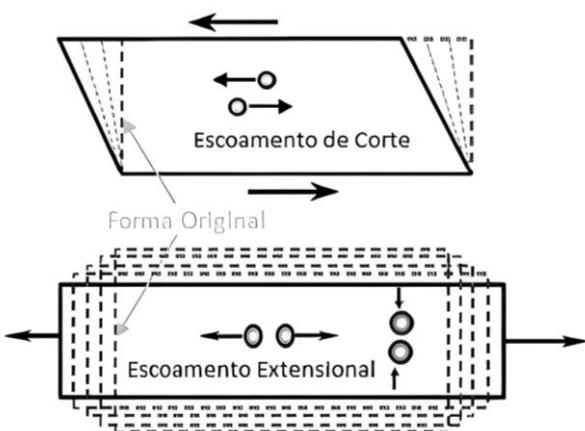
A reologia de uma argamassa de revestimento está relacionada à morfologia dos sistemas multifásicos e ao potencial de desempenho dos produtos. Os fatores reológicos levam em conta a técnica de mistura empregada, seja manual ou mecânica, considerando a diferença na taxa de cisalhamento entre as partículas internas e o tempo dedicado a cada uma das técnicas utilizadas. E, as características de aplicação da argamassa sobre uma superfície (Silva, 2006).

É muito comum classificar as propriedades da argamassa no estado fresco de forma qualitativa, sendo tradicionalmente caracterizadas pelo ensaio da mesa de consistência, prescrito pela NBR 13.276 (ABNT, 2016), avaliando dessa forma, a consistência do material por um conceito de trabalhabilidade através de níveis de espalhamento pré-estabelecidos. Autores como Cavani, Antunes e John (1997), Koehler e Fowler (2003), e Banfill (1991) contestam a eficácia da mesa para a medição da reologia da argamassa. Argumentam que os resultados da mesa, expressos apenas em índice de consistência, carecem de sensibilidade para capturar os parâmetros reológicos como viscosidade e tensão (Barroca, 2013).

As propriedades reológicas de uma argamassa podem ser quantificadas, descrevendo o fluxo do material através da viscosidade plástica e da tensão de escoamento (Ferraris, 1999), sendo esta última considerada como a tensão mínima necessária para iniciar o escoamento de uma suspensão (Oliveira *et al.*, 2000). Se a suspensão é submetida a uma tensão menor que a de escoamento, comporta-se como um sólido rígido (Glatthor e Schweizer, 1994; Oliveira *et al.*, 2000; Pileggi, 2001).

No escoamento extensional (Figura 7), as partículas adjacentes apresentam movimentos de contração e retração (Teixeira, 2013).

Figura 7 - Movimento das partículas no escoamento extensional.



Fonte: TEIXEIRA (2013).

Paiva (2005) descreve que o escoamento envolve o movimento das camadas internas do fluido e é caracterizado pela viscosidade, que depende da força aplicada e da taxa de deformação. O movimento das partículas em um

líquido pode resultar em dois tipos de escoamento: cisalhante (tangencial) e extensional (normal). No escoamento cisalhante, as camadas deslizam entre si.

Analizar o comportamento reológico da argamassa envolve a complexidade de sua composição, que incorpora vários materiais com propriedades físicas e mecânicas distintas interagindo entre si e os fatores ambientais externos. A interação entre partículas dos aglomerantes e a mistura química tendem a sofrer variação conforme a temperatura (Barroca, 2013; Shen *et al.*, 2021; Han e Ferron, 2016).

Pereira, Barros e Camões (2004) afirmam que não é viável prever o comportamento reológico com base no conhecimento das propriedades individuais de seus constituintes. Isso ocorre porque a diversidade e a quantidade de ensaios necessários para avaliar o efeito de todas as interações entre os componentes da mistura seriam imensas e, portanto, impraticáveis.

#### **2.4.1. Parâmetros e modelos reológicos**

O termo "reologia" foi criado por Eugene Bingham em 1929, derivado das palavras gregas "*rheos*" (fluir) e "*logos*" (ciência ou estudo). No contexto dos materiais à base de cimento, entender o comportamento no estado fresco é crucial, podendo ser avaliado usando reômetros rotacionais e tubulares (Barnes *et al.*, 2000).

As propriedades reológicas de um material não são valores absolutos, pois dependem das condições de ensaio (taxa de cisalhamento, temperatura, energia de mistura, histórico de cisalhamento) e do modelo reológico adotado (Ferraris, 1999; Lomboy, Wang e Wang, 2014). Wallevik *et al.* (2015) indicam que vários fatores podem afetar as propriedades reológicas, incluindo o modelo reológico, geometria, tempo e velocidade de ensaio, bem como as equações usadas pelo reômetro para converter velocidade de rotação e torque em taxa de cisalhamento e tensão cisalhante, respectivamente.

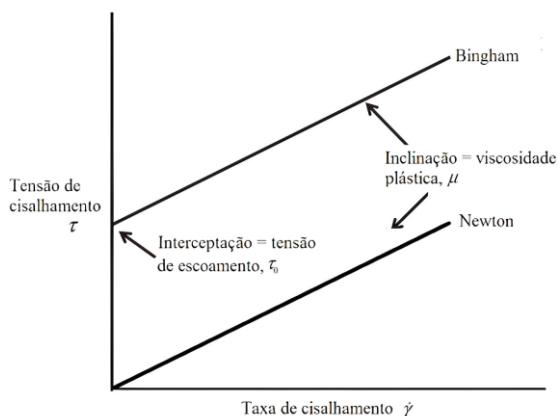
A seguir, serão apresentados modelos comumente utilizados em argamassas, abordando os parâmetros de tixotropia, comportamento sólido e viscosidade no modelo de Bingham, e características dilatantes e fluidificantes no modelo de Herschel-Bulkley.

#### 2.4.1.1. Modelo de Newton e Bingham

Em um fluido newtoniano, a tensão cisalhante ( $\tau$ ) é diretamente proporcional à taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ), sendo expressa pela Equação (1). Onde  $\mu$  representa a viscosidade, indicando a capacidade do fluido para escoar (Brunetti, 2008). O comportamento típico de um fluido newtoniano é ilustrado na Figura 8.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

Figura 8 – Comportamento de um fluido de Newton e Bingham.



Fonte: adaptado de BANFILL (2011).

A argamassa pode suportar tensões antes de começar a fluir, determinada pela tensão de escoamento ( $\tau_0$ ). Numericamente, corresponde à interseção da curva de fluxo (tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento) com o eixo das ordenadas, conforme mostrado na Figura 8 (Ferraris, 1999; Banfill 2005). Essa propriedade é fundamental para o fluxo adequado de misturas. Botella (2005) destaca que a tensão de escoamento é uma constante matemática, sendo importante para comparações e orientação de processos.

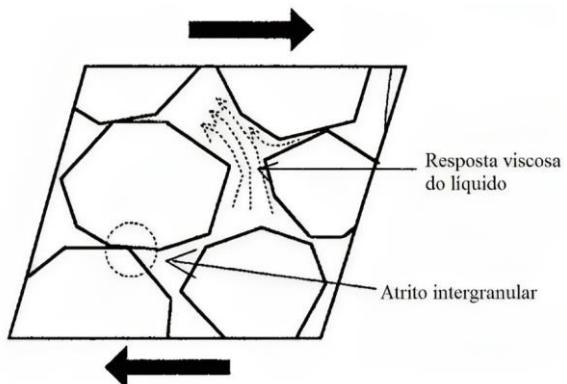
O comportamento sólido possui uma grande importância. Materiais à base de cimento podem não fluir devido à gravidade, adquirindo resistência e rigidez. O modelo mais simples que descreve um material com tensão de escoamento é o modelo de Bingham, apresentado pela Equação (2). Ele adiciona o termo  $\tau_0$  ao modelo de Newton, representando uma viscosidade constante dentro de uma faixa de taxa de cisalhamento (Nehdi e Rahman, 2004). Este modelo é

amplamente empregado em argamassas, pois permite a medição independente dos parâmetros  $\tau_0$  e  $\mu$ .

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

A Figura 9 representa o comportamento de uma suspensão sob cisalhamento. A viscosidade plástica reflete o fluxo de água nos vazios do sistema granular, ligando-se à quantidade de líquido na mistura. Por outro lado, a tensão de escoamento surge do atrito intergranular durante o cisalhamento, não estando apenas relacionada à fração volumétrica de sólidos, mas também ao empacotamento das partículas.

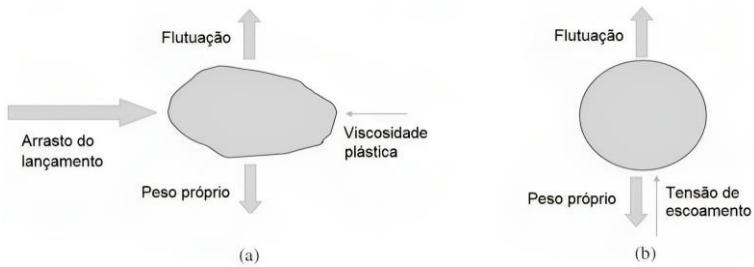
Figura 9 – Interpretação física da viscosidade e da tensão de escoamento de um fluido quando sujeito a cisalhamento.



Fonte: FERARIS; DE LARRARD (1998).

A viscosidade plástica e a tensão de escoamento estão ligadas à estabilidade da mistura, impedindo a separação de fases, chamada segregação. Isso é crucial durante o transporte e lançamento da mistura, quando as partículas estão sujeitas a vários esforços, incluindo arrasto, flutuação e peso próprio. A segregação pode ocorrer tanto em fluxo (dinâmica) quanto em repouso (estática) conforme demonstra a Figura 10, afetando a uniformidade da mistura (Bonen e Shah, 2005; Repette, 2011; Esmaeilkhalian *et al.*, 2014).

Figura 10 – Ações nas partículas (a) durante o fluxo; (b) em repouso.



Fonte: adaptado de BONEN; SHAH (2005).

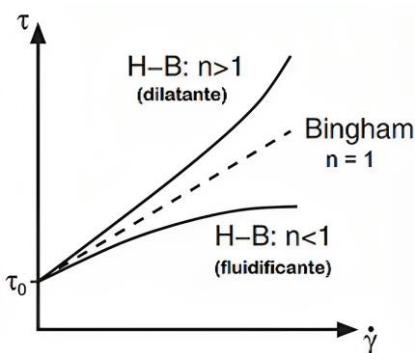
#### 2.4.1.2. Modelo de Herschel-Bulkley

A relação entre tensão aplicada e taxa de deformação não é linear. Os materiais à base de cimento podem apresentar comportamento reológico dilatante ou fluidificante, dependendo de fatores como composição, concentração de sólidos, interação e morfologia das partículas. O comportamento fluidificante se caracteriza pelo aumento da taxa de cisalhamento diminuindo a viscosidade, enquanto o dilatante ocorre o oposto (Matos, 2019; Nguyen, Remond e Gallias, 2011; Botella, 2005).

O modelo de Herschel-Bulkley é amplamente utilizado para descrever curvas de fluxo não lineares. Esse modelo é representado na Figura 11 e descrito pela Equação (3), onde  $\tau_0$  é a tensão de escoamento,  $K$  é a constante de consistência, e  $n$  é o índice pseudoplástico. Se  $n < 1$ , a mistura é fluidificante; se  $n > 1$ , é dilatante; e se  $n = 1$ , comporta-se como um fluido de Bingham. O valor absoluto de  $n$  indica a intensidade do comportamento dilatante ou fluidificante (Yahia, 2014).

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

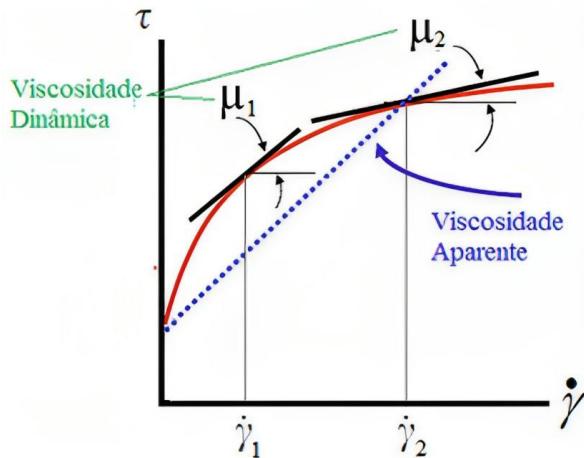
Figura 11 – Curvas de fluxo de um fluido dilatante e fluidificante.



Fonte: WALLEVIK; WALLEVIK (2011).

No modelo de Herschel-Bulkley a viscosidade não é um parâmetro de entrada fixo, pois varia com a taxa de cisalhamento, ao contrário dos modelos de Newton e Bingham. Em um fluido fluidificante, a viscosidade diminui à medida que a taxa de cisalhamento aumenta, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Viscosidade dinâmica e aparente de um fluido.



Fonte: BOTELLA (2005).

Para caracterizar o material, são necessários dois parâmetros: viscosidade dinâmica e viscosidade aparente. A primeira reflete o comportamento real do material, variando com a taxa de cisalhamento, enquanto a segunda, mantém-se constante em um intervalo é mais prática para aplicações (Botella, 2005).

No contexto do modelo Herschel-Bulkley, também é usado o termo  $\mu_{eq}$ : viscosidade plástica aparente, Equação (4), para descrever a viscosidade aparente em um modelo não newtoniano, sendo adicionado o termo “plástico” devido a esse comportamento.

$$\mu_{eq} = \frac{3K}{n+2} \cdot (\dot{\gamma}_{máx})^{n-1} \quad (4)$$

No qual  $\mu_{eq}$  é a viscosidade plástica aparente (Pa.s),  $K$  é a constante de consistência,  $n$  é o índice pseudoplástico e  $\dot{\gamma}_{máx}$  é a taxa de cisalhamento máxima do ensaio.

#### 2.4.1.3. *Tixotropia*

A tixotropia ocorre porque alguns materiais têm sua viscosidade alterada com o tempo. Suas propriedades de fluxo são influenciadas pelo histórico de esforços, levando a um aumento da viscosidade após o término da aplicação do esforço. Quando o oposto acontece, é chamado de reopexia ou antitixotropia. A velocidade ou taxa de reestruturação depende do tempo necessário para desfazer e rearranjar a microestrutura. Portanto, no contexto de fluidos em geral, a tixotropia é um fenômeno principalmente físico (Botella, 2005; Barnes, 1997; Coussot, 2002).

Em relação às argamassas, é adequado adotar o termo tixotropia, pois a estrutura destruída não se recupera completamente, resultando em uma destruição estrutural irreversível. Quanto mais estruturado o material, menor o risco de escoamento, o que facilita a sua aplicação em paredes (Safanelli *et al.*, 2023).

### 2.4.2. Reometria para materiais à base de cimento

Os ensaios reológicos podem ser categorizados em dois grupos principais, dependendo do tipo de esforço aplicado: extensão e cisalhamento. Na reometria de extensão, viscosímetros capilares e de orifício, o fluido é submetido à compressão com força ou deslocamento constante, resultando em deformações que dependem das propriedades reológicas do material e das condições do ensaio. Na reometria de cisalhamento são aplicadas tensões de cisalhamento ao material, como placas deslizantes e reômetros rotacionais com diferentes geometrias (Botella, 2005; Cardoso, John e Pileggi, 2009).

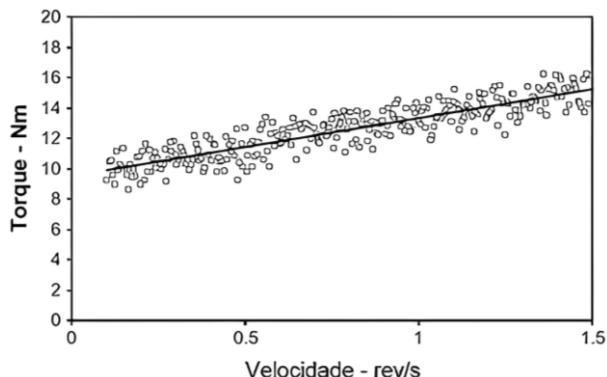
#### 2.4.2.1. *Ensaio à taxa e tensão controlada*

As curvas de fluxo (tensão cisalhante vs. taxa de cisalhamento) podem ser obtidas de duas maneiras: taxa controlada e tensão controlada. A primeira, à taxa controlada, consiste na aplicação de um gradiente de velocidade à amostra e na determinação do seu efeito na tensão cisalhante. A segunda, à tensão controlada, consiste em impor uma tensão cisalhante e medir a taxa de deformação do material (Matos, 2019). Independente da abordagem é

necessário garantir a medição no regime líquido, sem influência elástica. Isso requer precauções, como pré-cisalhamento da amostra e tempo adequado para medições em regime estacionário (Botella, 2005; Roussel *et al.*, 2012; Wallevik *et al.*, 2015).

Assumindo que a taxa de cisalhamento é proporcional à velocidade de rotação e a tensão de cisalhamento é proporcional ao torque, é possível obter curvas de fluxo como mostrado na Figura 13. Geralmente, essas curvas são ajustadas de forma semelhante ao modelo de Bingham:  $T = g + hN$ , sendo  $T$  o torque,  $N$  a velocidade de rotação,  $g$  e  $h$  são coeficientes relacionados à tensão de escoamento e viscosidade plástica (Banfill, 2011). Esse ensaio também permite a determinação da tensão de escoamento do material ao extrapolar os pontos da curva de fluxo até a taxa de cisalhamento zero, utilizando modelos matemáticos (Matos, 2019).

Figura 13 – Curva de fluxo de torque em função da velocidade de rotação.



Fonte: BANFILL (2011).

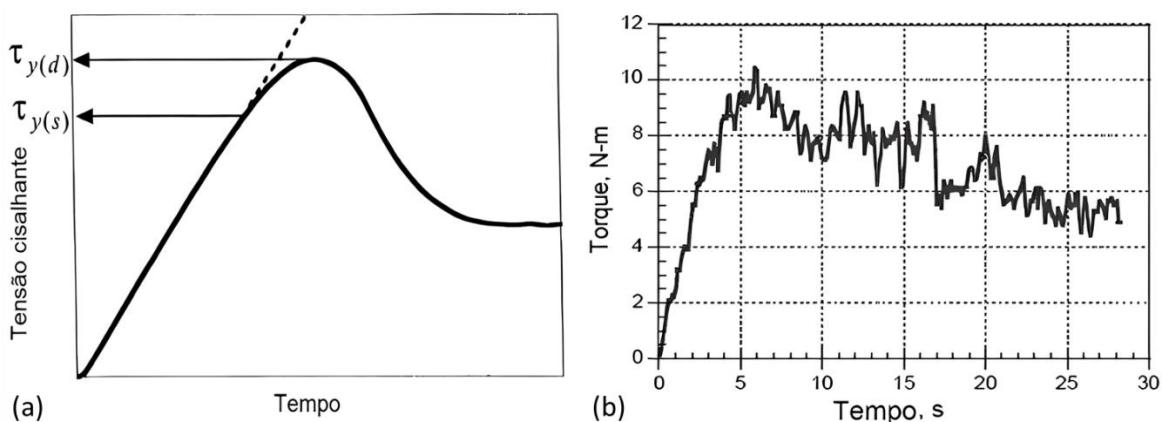
#### 2.4.2.2. Tensão de Crescimento (Stress Growth)

A estimativa da tensão de escoamento pode ser realizada por meio de modelos como Bingham e Herschel-Bulkley. Contudo, os resultados são altamente influenciados pelo modelo adotado, o tipo e a precisão do equipamento, bem como a amplitude das taxas de cisalhamento utilizadas, especialmente em baixas deformações. Assim, uma abordagem comum para determinar a tensão de escoamento é medir diretamente a tensão necessária para iniciar o fluxo (Saak, Jennings e Shah, 2001).

O ensaio de tensão de crescimento impõe uma velocidade de rotação à amostra para medir a progressão da tensão desenvolvida, desde o repouso até atingir tal velocidade, denominada como fluxo estacionário. A Figura 14a ilustra uma curva típica deste ensaio.

O ensaio começa quando o material se deforma elasticamente devido ao alongamento das ligações da estrutura interna (trecho inicial retilíneo). Em certo ponto, inicia-se a ruptura da estrutura, atingindo o limite elástico do material (tensão de escoamento estática  $\tau_y(s)$ ). O efeito viscoelástico é refletido pelo trecho não linear da curva, ocorrendo deformações elásticas (resposta sólida) e viscosas (resposta líquida). Por fim, a tensão atinge um valor máximo (tensão de escoamento dinâmica  $\tau_y(d)$ ), a partir da qual ocorre a completa desestruturação interna e o material começa a fluir (Botella, 2005; Saak, Jennings e Shah; 2001).

Figura 14 – (a) Determinação da tensão de escoamento através do ensaio *stress growth*; (b) Curva típica do *stress growth* de reômetro para concreto.



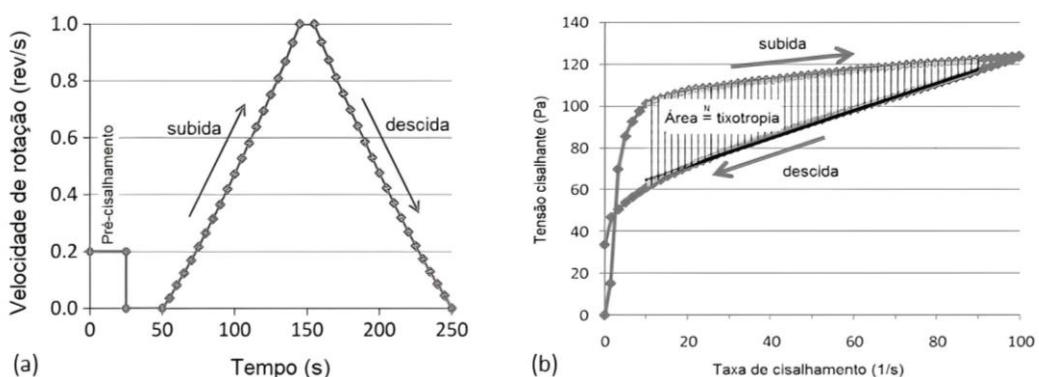
Fonte: (a) SAAK, JENNINGS, SHAH (2001); (b) RAHMAN, BALUCH, MALIK (2014).

De maneira semelhante ao que foi descrito no item 2.4.2.1, alguns reômetros são capazes de calcular a tensão de escoamento monitorando a evolução do torque até que se atinja uma velocidade de rotação constante, conforme representado na Figura 14b. A tensão de escoamento está diretamente relacionada ao torque máximo registrado.

#### 2.4.2.3. Subida e Descida ou Escada (Up and Down) – ascendente-descendente

O ensaio *up and down* é amplamente empregado na avaliação do comportamento reológico de materiais à base de cimento Portland. Este ensaio consiste no acréscimo e decréscimo sistemático da taxa de cisalhamento entre zero e um valor máximo (Figura 15a). E a Figura 15b ilustra as curvas de fluxo obtidas através deste ensaio.

Figura 15 – Ensaio *up and down* (a) carregamento; (b) curva de fluxo.



Fonte: Adaptado de WANG *et al.* (2011).

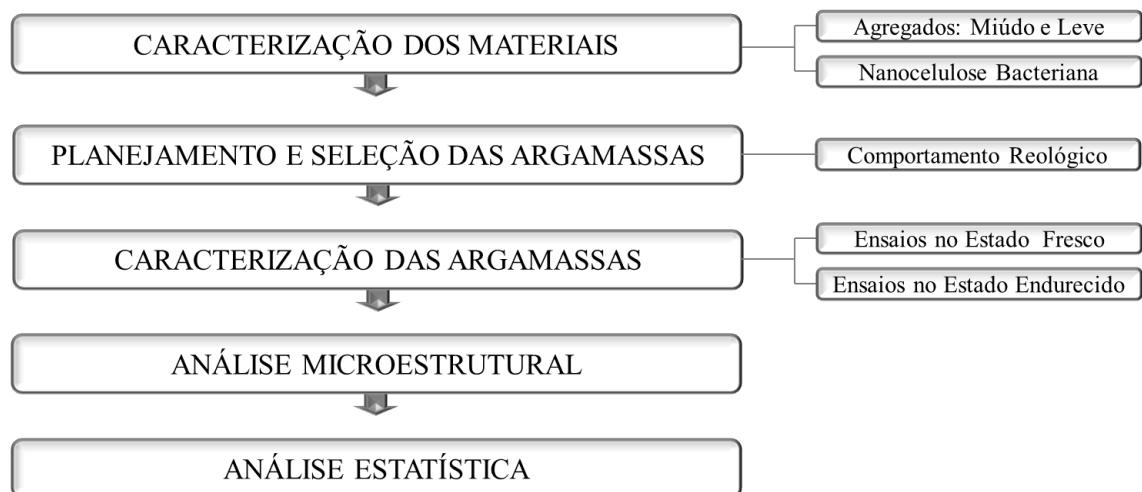
Durante a fase de aumento da taxa de cisalhamento, a estrutura das partículas de cimento se rompe, resultando em tensões superiores à fase de redução. A curva descendente permite estimar viscosidade plástica e tensão de escoamento (Lomboy, Wang e Wang, 2014). Medir as propriedades durante a redução proporciona resultados mais precisos, minimizando a influência da resposta elástica do material. Esse ensaio também avalia o comportamento tixotrópico, observado pela histerese da curva (Figura 15b). A área entre as curvas de aumento e redução representa numericamente a tixotropia (Coussot, 2005; Mewis e Wagner, 2009).

Não há consenso sobre o protocolo mais adequado para ensaios reológicos em pastas de cimento. Embora a norma C1749-17a (ASTM, 2017) forneça orientações sobre o processo de preparação da amostra, verificação do equipamento e outras variáveis que podem ocorrer no ensaio, não especifica um protocolo específico a ser seguido.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta os métodos utilizados para alcançar os objetivos definidos no escopo deste trabalho. A Figura 16 apresenta uma visão geral simplificada das etapas da pesquisa, ao longo deste capítulo essas etapas foram detalhadas de forma mais abrangente.

Figura 16 – Etapas do procedimento experimental.



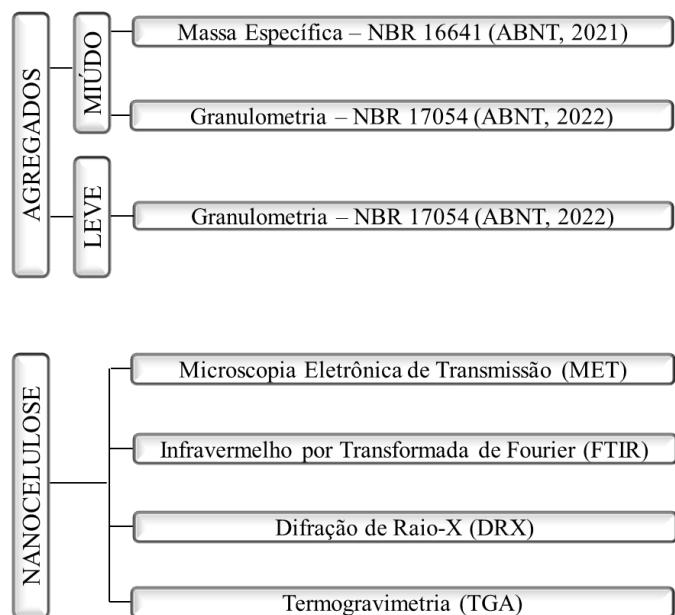
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

As análises dos materiais utilizados e das argamassas elaboradas foram realizadas nos Laboratórios do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, na cidade de Joinville/SC.

#### 3.1. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Para a produção da argamassa de referência, foram utilizados: cimento Portland CP II Z-32, cal hidratada, vermiculita, areia, água, e aditivos químicos: superplastificante e incorporador de ar. Nas demais argamassas foram incorporadas a nanocelulose bacteriana dispersa em água. O procedimento de caracterização dos materiais constituintes da argamassa é demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Ensaios para caracterização dos materiais.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

### 3.1.1. Cimento

Foi empregado o cimento tipo CP II-Z-32 devido às suas propriedades de resistência a ambientes corrosivos, tornando-o adequado para aplicação em argamassas de revestimento (Itambé, 2021). Este cimento contém uma adição de material pozolânico variando de 6% a 14% e material carbonático (fíler) com limite máximo de 10%. Possui uma densidade de 2,92 g/cm<sup>3</sup>, massa volumétrica de 1,08 g/cm<sup>3</sup> e um tamanho de partícula inferior a 41 µm. A Tabela 2 apresenta as características químicas encontradas no cimento CP II-Z-32 informadas pelo fabricante.

Tabela 2 - Composição química do cimento Portland.

Substância	(%) em massa
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,77
CaO	52,79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,15
MgO	2,15
SiO <sub>2</sub>	22,41
SiO <sub>3</sub>	2,79
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	0,78

Fonte: Adaptado de ITAMBÉ (2021).

### 3.1.2. Cal

A cal hidratada empregada na preparação das argamassas é do tipo CH-III, da marca Engecal, selecionada devido à sua capacidade de aglomeração e plasticidade. Ela é essencialmente composta por uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, com um teor de dióxido de carbono de 5,6%. Possui densidade 2,40 g/cm<sup>3</sup> e massa unitária de 0,75 g/cm<sup>3</sup>. Essa cal é comumente utilizada em argamassas de assentamento e revestimento, devido a sua notável durabilidade, estando em conformidade com as exigências estabelecidas na NBR 7175 (ABNT, 2003).

### 3.1.3. Água

A água utilizada é fornecida pela concessionária local, com pH entre 6,6 e 6,8 segundo a Companhia Águas de Joinville, estando de acordo com as normativas da NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

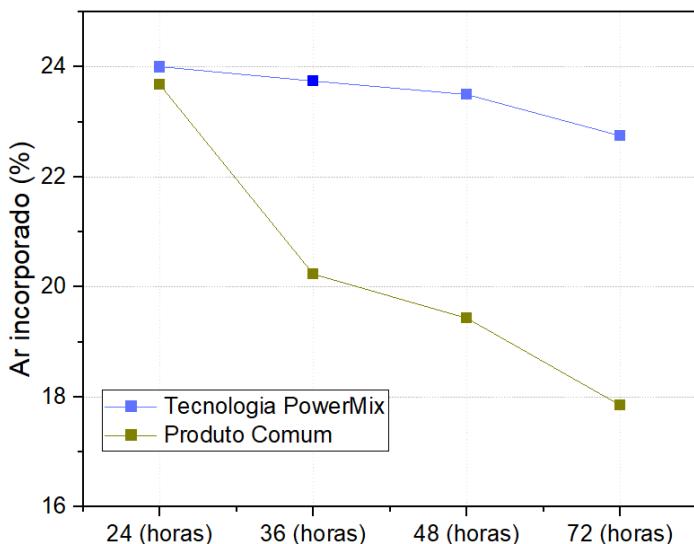
A quantidade de água desempenha um papel fundamental na qualidade da argamassa. O excesso de água pode resultar na redução da resistência mecânica, na porosidade e no aumento da retração e fissuração, comprometendo sua aderência ao substrato. Por outro lado, a falta de água pode levar a uma mistura rígida e dificultar a hidratação dos materiais (Recena, 2023; Trigo, 2014).

### 3.1.4. Aditivos químicos

O aditivo redutor de água utilizado para incorporação na argamassa foi o MC-Powerflow 4001, um aditivo superplastificante sintético baseado na nova tecnologia de polímeros éteres policarboxilatos (PCE). Caracteriza-se por suas propriedades de redução da relação água-cimento, mantendo a pega normal, bem como por sua compatibilidade com aditivos incorporadores de ar. Destaca-se por promover a estabilização em elevadas consistências e a dispersão eficaz nas partículas de cimento, atuando na superfície do concreto ou argamassa. Possui densidade de 1,12 kg/L e a dosagem recomendada varia de 0,2% a 5% em relação à massa de cimento (Mc-Bauchemie, 2023).

O aditivo incorporador de ar selecionado é o Centripor 420 é um aditivo composto por uma associação de tensoativos aniónicos entre 6 e 10% e Lauril Éter Sulfato de Sódio (LSS), ideal para argamassas estabilizadas devido às suas propriedades de retenção de água, estabilização e otimização de densidade. Um aditivo formulado com incorporadores de ar, retentores de água e agentes estabilizantes da linha PowerMix (Figura 18), com tecnologias que permite ao produtor oferecer soluções diferenciadas que aumentam a sustentabilidade no setor da construção civil. Com densidade de 1 kg/L, a dosagem recomendada é de 0,1% a 0,5% em relação à massa de cimento (Mc-Bauchemie, 2023).

Figura 18 – Estabilização do ar incorporado no Cimento CP II F.



Fonte: Adaptado MC-BAUCHEMIE (2024).

### 3.1.5. Agregados Miúdos

Para a caracterização de agregados, a areia fina de rio foi submetida aos ensaios de massa específica e composição granulométrica conforme as normas técnicas NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 17054 (ABNT, 2022), respectivamente. E, para a vermiculita, agregado leve, foi realizada a análise granulométrica de acordo com a norma NBR 17054 da ABNT (2022).

A Figura 19 apresenta a vermiculita utilizada no estudo, adquirida pela empresa Brasil Minérios. Se caracteriza por ser um material leve, inerte, não tóxico e isento de organismos orgânicos, com diversas aplicações. Pode ser empregada de forma independente ou combinada com outros elementos e

substâncias para proporcionar isolamento térmico e acústico na construção civil. Quando associada ao cimento e aditivos químicos, permite a formulação de argamassas de revestimento com propriedades termoacústicas (Brasil Minérios, 2023).

Figura 19 – Vermiculita expandida superfina.



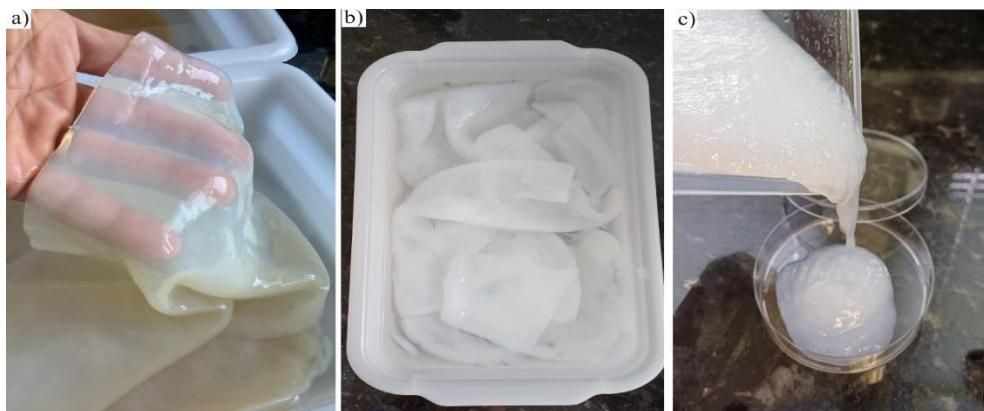
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

### 3.1.6. Celulose Bacteriana Nanofibrilada

A celulose bacteriana nanofibrilada foi disponibilizada pela empresa Nanobiocell (*Startup*), situada em Joinville/SC.

O método de produção desta nanocelulose bacteriana não utiliza meios de cultura comerciais e elimina qualquer necessidade de tratamentos químicos. Assim, é considerado um processo 90% verde. Comparada à produção de celulose microfibrilada de origem vegetal, pois a produção de BCNF consome 90% menos água e energia, gerando apenas resíduos orgânicos. As fibras produzidas possuem dimensões nanométricas e elevada relação L/D (comprimento/diâmetro), o que aumenta a disponibilidade de grupos hidroxila livres capazes de estabelecer fortes ligações de hidrogênio com a água utilizada no preparo da argamassa. O nanomaterial foi fornecido em uma solução aquosa com uma concentração de 1% de celulose para 300 ml de água (Figura 20c).

Figura 20 – a) Cultura de bactérias que formam a membrana de celulose; b) Celulose purificada; c) Celulose bacteriana nanofibrilada.



Fonte: NANOBIOCELL (2023).

Para caracterização deste nanomaterial, foram conduzidas as seguintes análises: microscopia eletrônica de transmissão (MET), espectroscopia de infravermelho (FTIR), difração de raio x (DRX) e termogravimetria (TGA).

Para a análise microscópica da celulose foi realizado o MET que é uma técnica de análise microestrutural que possibilita a observação da estrutura interna e morfologia superficial da amostra por meio da análise das intensidades de elétrons transmitidos e difratados. Para a preparação da amostra, a bacteriana foi dispersa com o auxílio de um ultrasonicador por 30 minutos, e a suspensão de BCNF (0,5%) foi diluída 1:10.000 utilizando solução de ácido fosfotúngstico a 2% para tingir a amostra e facilitar a visualização do material no microscópio. Uma gota desta solução foi colocada sobre uma grade de cobre e seca em temperatura ambiente por 48 horas antes da análise. Esse ensaio foi realizado pelo equipamento modelo JEM-2100, de fabricação da JEOL LTD, localizado no laboratório de Engenharia Mecânica do CCT/UDESC.

Para as análises FTIR, DRX e TGA foi utilizado 10 mL da suspensão de BCNF (0,5%) foram colocados em placa de Petri e secos em estufa por 24 horas. Em seguida, o filme produzido foi armazenado em dessecador por 1 hora e esta amostra foi utilizada para análises.

A análise por FTIR foi utilizada para determinar a composição semiquantitativa do material, bem como para monitorar suas reações e identificar a estrutura molecular da amostra. A análise foi conduzida utilizando um equipamento da marca Burke, modelo INVENIO-S, operado com uma faixa de

amplitude de 4000-400 cm<sup>-1</sup>, com resolução de 4 cm<sup>-1</sup> e número de aquisições por espectro de 32 scans.

A análise por Difração de Raios X (DRX) foi utilizada para examinar a cristalinidade e o principal componente químico do material. Esta análise foi realizada por meio de um difratômetro de raios X, modelo Shimadzu XRD 6000, dispositivo a 40 kV e 30 mA com CuK monocromático  $\lambda = 0,1542$  nm, 2°/min, empregando uma faixa de difração de 0° a 80° em ângulo 2θ. O índice de cristalinidade (IC) foi determinado utilizando a Equação (5). Na equação,  $I_{200}$  e  $I_{am}$  correspondem à intensidade geral do pico e à intensidade da linha de base, respectivamente (Segal, Creely, Martin e Conrad, 1958). Morán *et al.* (2008), Sun *et al.* (2016), e Vieira (2018) definem  $I_{200}$  como a altura do pico cristalino da celulose (2θ≈23°) e  $I_{am}$  como a altura da região amorfa (2θ≈17°), respectivamente.

$$IC = \frac{I_{200} - I_{am}}{I_{am}} \cdot 100 \quad (5)$$

Para a análise térmica da nanocelulose, foi realizado o ensaio de Termogravimetria (TGA) que é uma técnica que permite avaliar as variações na massa de uma amostra em relação à temperatura ou tempo, esse ensaio é amplamente utilizado para investigar a composição e a estabilidade térmica dos materiais (Dal Molin, 2010). A análise termogravimétrica foi realizada com TGA55 (TA Instruments). As amostras (10 mg) foram aquecidas de 20 a 600 °C a uma taxa de 10 °C/min em uma porta amostra de platina com fluxo de N2 de 40 mg/min.

### 3.2. PLANEJAMENTO E SELEÇÃO DAS MISTURAS

Após a caracterização dos materiais, foi realizada a otimização da dosagem para argamassa leve de revestimento. A composição da mistura baseia-se no traço de referência proposto por Reis, Effting e Schackow (2023), sendo necessário realizar adaptações para melhor se adequar ao modelo de argamassa proposto neste estudo. Todas as formulações mantiveram a proporção volumétrica de 1:1,13:2,16:1,72 (cimento:cal:areia:vermiculita), com

substituição de 55% do volume do agregado natural por vermiculita expandida superfina. E a determinação da proporção em massa da mistura foi realizada utilizando os valores de massa unitária, resultando em uma proporção de 1:0,79:3:0,33 (cimento:cal:areia:vermiculita). A composição das misturas das argamassas desenvolvidas se encontra no Quadro 3.

Quadro 3 – Composição preliminar das misturas para a argamassa de referência.

Testes	C <sup>(1)</sup>	C <sup>(2)</sup>	A <sup>(3)</sup>	V <sup>(4)</sup>	P <sup>(5)</sup>	C <sup>(6)</sup>	A <sup>(7)</sup>	V <sup>(8)</sup>
	Gramas							Litros
T1	385	303,78	1152,1	130,42	17,5	1,75	442,26	1,8
T2	385	303,78	1152,1	130,42	1,93	1,75	464,34	1,8
T3	385	303,78	1152,1	130,42	1,93	1,93	495,33	1,8
T4	385	303,78	1152,1	130,42	3,85	1,93	495,33	1,8
T5	385	303,78	1152,1	130,42	5,78	1,93	495,33	1,8

<sup>(1)</sup> Cimento; <sup>(2)</sup> Cal; <sup>(3)</sup> Areia; <sup>(4)</sup> Vermiculita; <sup>(5)</sup> PowerFlow 4001; <sup>(6)</sup> Centripor 420; <sup>(7)</sup> Água; <sup>(8)</sup> Volume.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A relação água/cimento no teste 1 foi de 1,15, com adição de 4,5% de superplasticificante e 0,45% de incorporador de ar. No entanto, devido à segregação da mistura e à baixa consistência, abaixo de 25,5 cm, indicando uma trabalhabilidade inadequada caracterizada por uma argamassa seca, foram desenvolvidas novas formulações para melhorar a trabalhabilidade. Essas formulações foram selecionadas com base nos resultados de consistência e resistência à tração. Em seguida, refinaram-se os critérios de seleção, considerando minuciosamente a possível influência da celulose, conhecida por suas características hidrofílicas, que podem induzir à secagem precoce da argamassa, mesmo com a adição de aditivos suplementares (Reis, Effting e Schackow, 2023). Com isso, foi selecionado o T5 para compor a argamassa de referência.

Foram definidas três misturas com peso de nanocelulose de 0,05%, 0,15% e 0,25% em relação à massa de cimento, totalizando quatro formulações incluindo o traço de referência. Posteriormente, foram produzidas quatro argamassas para a avaliação do estado fresco e endurecido, e escolhida a que

teve o melhor desempenho. A composição das argamassas em kg/m<sup>3</sup> está exposta no Quadro 4.

Quadro 4 – Composição das argamassas.

Mistura	Cimento	Cal	Areia	Vermiculita	Powerflow	Centripor	Água	BCNF
	kg/m <sup>3</sup>							
<b>MREF</b>	213,88	168,76	640,06	72,46	3,21	1,07	275,83	-
<b>MBC05</b>	213,88	168,76	640,06	72,46	3,21	1,07	275,83	0,107
<b>MBC15</b>	213,88	168,76	640,06	72,46	3,21	1,07	275,83	0,321
<b>MBC25</b>	213,88	168,76	640,06	72,46	3,21	1,07	275,83	0,535

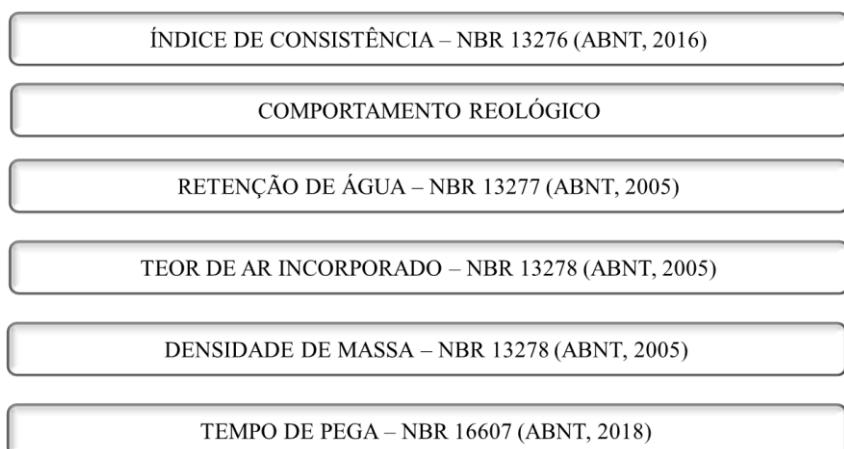
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Nesta pesquisa, foi utilizada a celulose bacteriana nanofibrilada (BCNF) em solução aquosa. De acordo com Akhlaghi *et al.* (2020), a celulose, quando empregada na forma de gel, deve ser diluída em uma solução de água e superplastificante à base de éter policarboxilatos para garantir a dispersão uniforme das nanofibrilas.

### 3.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

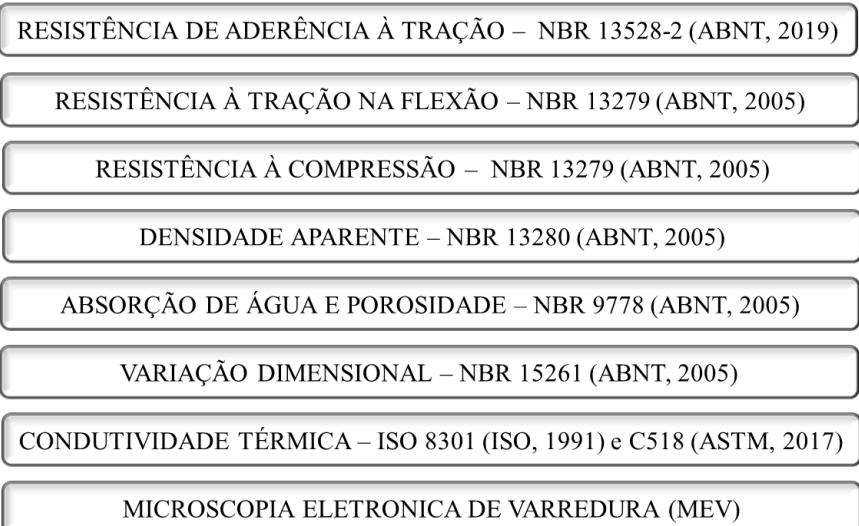
Para investigar a influência da concentração de nanocelulose nas misturas, foi realizado um estudo do seu comportamento reológico. Isso permitiu otimizar a utilização do nanomaterial. E em seguida, foram realizados os ensaios normatizados para avaliar o desempenho das argamassas nos estados fresco e endurecido (Figura 21 e Figura 22).

Figura 21 – Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 22 – Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido.



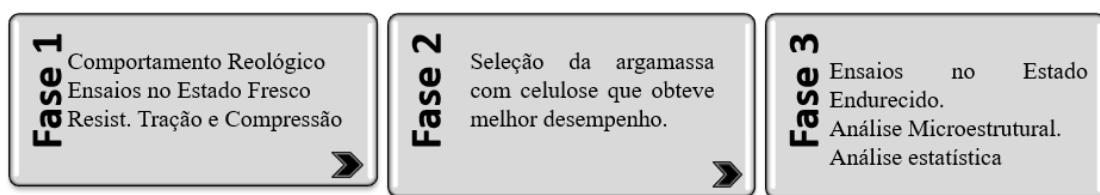
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Após esses ensaios, uma análise estatística pela ANOVA foi conduzida para avaliar a influência da nanocelulose nas argamassas desenvolvidas e identificar o teor ideal para sua aplicação em revestimento.

### 3.3.1. Seleção das Argamassas

As argamassas passaram por um processo de seleção conforme os resultados de seus ensaios de caracterização, conforme ilustrado na Figura 23. A quantidade de corpos de prova foi determinada seguindo as diretrizes estabelecidas na norma do seu respectivo ensaio.

Figura 23 – Processo de seleção das argamassas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Fase I: Inicialmente, foi realizado o ensaio de índice de consistência nas argamassas para a seleção da argamassa de referência. E a argamassa que obteve o espalhamento dentro dos parâmetros adequados foi submetida ao ensaio reológico para avaliar seu comportamento sob forças de cisalhamento.

Em seguida, a amostra foi moldada em corpos de prova para avaliar sua resistência à tração na flexão e à compressão.

Fase II: Nesta etapa foram avaliados os resultados do comportamento reológico e as resistências das argamassas, identificando qual argamassa contendo nanocelulose é mais adequada para a aplicação em revestimento, utilizando como parâmetros de seleção: índice de consistência, análise reológica, retenção de água, absorção de ar, densidade da massa, resistências à tração na flexão e compressão.

Fase III: Na terceira fase, foram realizados todos os ensaios no estado endurecido descrito no programa experimental de caracterização das argamassas de referência e com nanocelulose, além da análise microestrutural para finalizar a caracterização e alcançar os objetivos estabelecidos nesta pesquisa. E, por fim foi verificado à influência da nanocelulose nas argamassas através das análises estatísticas.

### **3.3.2. Preparação das Argamassas**

A preparação da argamassa em laboratório seguiu as diretrizes estabelecidas na norma NBR 16541 (ABNT, 2016), com o auxílio do misturador mecânico. O procedimento de fabricação das argamassas começou com a pesagem de todos os materiais, garantindo um limite máximo de 2,5 kg.

A preparação das misturas seguiu uma sequência específica de adição de materiais para garantir a uniformidade e consistência das amostras, visando a repetibilidade e eliminação de variáveis na análise. Primeiramente, os componentes secos - cimento, cal, vermiculita e areia - foram adicionados e misturados por 90 segundos. Em seguida, foi adicionado 25% do material líquido na seguinte ordem: água, nanocelulose (quando adicionada) e os aditivos (incorporador de ar e superplastificante).

A pasta foi processada em baixa velocidade por 30 segundos, e adicionados 75% da água durante os primeiros 10 segundos. Posteriormente, a velocidade é aumentada, e a mistura é processada em alta velocidade por 60 segundos. Após esse período, o misturador é desligado, e o material é raspado internamente por 45 segundos, seguido por 45 segundos de repouso, cumprindo os 90 segundos estipulados pelas normas. Em seguida, o misturador é ligado

novamente por 60 segundos, com a adição dos 25% restantes de água e dos aditivos nos primeiros 10 segundos.

A preparação da argamassa com nanocelulose seguiu o mesmo procedimento, com a adição de sua dispersão na água mantendo o volume de água na produção da mistura. Foi utilizado um ultrasonicador de dispersão de nanomateriais por 30 minutos, alternando entre 30 segundos de pulsos e 15 segundos de repouso, até alcançar a homogeneização completa e a separação das partículas.

A NBR 13279 (ABNT, 2005) descreve os procedimentos para a moldagem de amostras prismáticas de argamassa com dimensões de 4 x 4 x 16 cm. O molde foi fixado à mesa de consistência, e preenchido com argamassa em cada compartimento dos moldes. O adensamento foi realizado através de 30 quedas em cada uma das duas camadas na mesa de adensamento. Foram moldados 6 corpos de prova para cada mistura.

Após o endurecimento da argamassa por um período de  $48\pm24$  horas, os prismas foram mantidos em um ambiente com temperatura de  $23\pm2$  °C e umidade relativa do ar de  $60\pm5\%$  durante o período de cura de 28 dias, conforme especificado na norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

### 3.3.3. Ensaios no Estado Fresco

A seguir, estão delineados os ensaios de caracterização que foram conduzidos nas argamassas no estado fresco, em conformidade com os objetivos estabelecidos nesta pesquisa.

#### 3.3.3.1. Índice de Consistência

Conforme as diretrizes da NBR 13276 (ABNT, 2016), o ensaio para determinar o índice de consistência das argamassas foi realizado utilizando a mesa de consistência.

Para este ensaio, o molde tronco cônico foi centralizado sobre a mesa de consistência. O molde foi preenchido em três camadas de igual espessura, sendo aplicados 15, 10 e 5 golpes de soquete, respectivamente, da primeira à última camada. Em seguida, a argamassa foi nivelada no molde com o auxílio de uma régua, eliminando o excesso de material, e a desmoldagem foi conduzida

verticalmente. Subsequentemente, foram executadas 30 quedas em 30 segundos por meio do acionamento manual da manivela. E finalmente, o diâmetro do espalhamento foi medido em três pontos distintos, realizou-se uma média e o resultado foi expresso em milímetros.

### 3.3.3.2. Comportamento Reológico

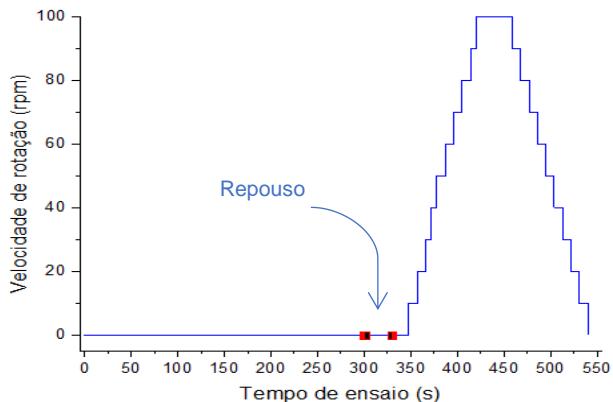
Para avaliar as propriedades reológicas da argamassa, foi utilizado o reômetro HAAKE, modelo Viscotester iQ Air, utilizando a geometria tipo vane que consiste em 4 aletas, com 22,00 mm de diâmetro e 16,00 mm de altura.

É importante destacar que, ao avaliar o comportamento reológico de argamassas, há uma restrição em relação à granulometria dos agregados miúdos utilizados, que deve ser inferior a 0,5 mm. Isso pode impactar os resultados da análise. No entanto, foi realizado um ajuste alterando o bêquer que comporta a amostra para atender às necessidades específicas da argamassa avaliada, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

O comportamento reológico das argamassas foi analisado variando a velocidade de rotação e medindo o torque necessário para atingir essas velocidades. O método proposto a ser utilizado é adaptação de Matos (2019) que combina tensão de escoamento (*yield stress*) com o perfil escada (*ascendente-descendente*) permitindo visualizar a tensão de escoamento estática e a curva de fluxo da argamassa.

Inicialmente, as amostras foram pré-cisalhadas há uma taxa de 0 a 0,05  $s^{-1}$  por 300 segundos (Figura 25), até atingir sua tensão máxima de ruptura. Tendo um repouso de 30 segundos. Posteriormente, para obter a curva de fluxo, pelo acréscimo da taxa de cisalhamento de 0,1 à 100  $s^{-1}$  por 90 segundos, com a velocidade variando de 10 em 10  $s^{-1}$ , mantendo a velocidade à 100  $s^{-1}$  por 30 segundos e em seguida invertendo o percurso. O perfil termina decorridos 540 segundos, sendo 300 segundos no ensaio de tensão de escoamento, 30 segundos com o repouso da amostra e 210 no perfil escada, como representado na Figura 24.

Figura 24 – Proposta para ensaio reológico.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 25 – Detalhe do início da rampa de cisalhamento.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O perfil em "escada" permite identificar a magnitude da estruturação das argamassas. Além disso, possibilita determinar os valores da tensão de escoamento, bem como as viscosidades plástica e aparente, utilizando a curva descendente, pois os dados obtidos desta forma são considerados mais confiáveis e repetíveis (Cappellari *et al.*, 2013).

Para a determinação dos parâmetros reológicos da tensão de escoamento, foi adotado um maior número de leituras na fase inicial da curva e aplicação de baixas taxas de cisalhamento. Quanto aos dados da porção descendente da curva de fluxo, os parâmetros foram ajustados pelos modelos de Bingham, (Equação (2)) e Herschel-Bulkley, (Equação (3)).

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

Onde:

$\tau$  é a tensão cisalhante (Pa);

$\tau_0$  é a tensão de escoamento (Pa.s);

$\mu$  é a viscosidade plástica (Pa.s);

$\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ );

K é o índice de consistência;

n é o índice pseudoplástico.

O modelo de Herschel-Bulkley fornece mais precisão para a tensão de escoamento e descreve comportamentos não-lineares em pastas, enquanto o modelo de Bingham é melhor para obter a viscosidade plástica e descrever materiais à base de cimento. Assim, ambos os modelos foram utilizados. Para garantir a repetição dos ensaios, as medidas reológicas foram realizadas em pelo menos duas amostras preparadas de forma idênticas, obtendo os parâmetros reológicos pela média das duas curvas obtidas no ensaio.

### 3.3.3.3. Retenção de Água

A retenção de água das argamassas foi avaliada conforme o procedimento estipulado pela NBR 13277 (ABNT, 2005), empregando o funil de Buchner. Esse método permitiu quantificar a água retida por cada argamassa por meio de um processo de sucção controlada.

O procedimento de ensaio iniciou com a colocação do prato sobre o funil, juntamente com o papel-filtro previamente umedecido. Com a torneira fechada, a bomba de água foi ativada, criando uma sucção de 51 mm de mercúrio. Posteriormente, a torneira foi aberta por um período de 90 segundos para remover o excesso de água do papel-filtro, sendo então fechada. Em seguida, o prato juntamente com o papel-filtro umedecido foi pesado.

O prato foi preenchido com argamassa de modo que ultrapassasse levemente a borda. Foram realizados 16 golpes com um soquete na área próxima à borda e 21 golpes em pontos distribuídos na parte central do prato para garantir um preenchimento uniforme. O excesso de argamassa foi removido com o auxílio de uma régua metálica, as bordas limpas e o conjunto com a argamassa foram pesados.

A torneira foi novamente aberta e mantida assim por 15 minutos. Após isso, a sucção de 51 mm de mercúrio foi aplicada à amostra. Por fim, o conjunto com a argamassa foi pesado após a conclusão do ensaio.

### 3.3.3.4. *Densidade da Massa e Teor de Ar Incorporado*

A densidade de massa e o teor de ar incorporado foram determinados de acordo com as diretrizes estabelecidas na NBR 13278 (ABNT, 2005). Após a produção das argamassas, elas foram colocadas em um cilindro calibrado em três camadas de altura uniforme. Em cada camada, foram aplicados 20 golpes.

Após o preenchimento das camadas e a compactação, o cilindro foi submetido a três quedas a partir de uma altura de aproximadamente três centímetros. Em seguida, a superfície foi nivelada com o auxílio de uma espátula.

### 3.3.3.5. *Tempo de Pega*

A determinação do tempo de pega foi realizada de acordo com a NBR 16607 (ABNT, 2018), seguindo os procedimentos definidos na NBR 16606 (ABNT, 2018) para a aparelhagem e moldagem das argamassas.

O ensaio inicia com o registro da data e horário de preparo da argamassa. O molde é preenchido sem deixar espaços vazios e garantindo uma superfície uniforme. Certifica-se de que a agulha do aparelho Vicat esteja limpa e devidamente posicionada, sem tocar a superfície da amostra.

No aparelho Vicat, foi registrado o horário de preparo e o momento da primeira penetração na amostra, com um intervalo padrão de 20 minutos para realizar a primeira penetração, que poderia ser ajustada conforme a análise da amostra. Foram executadas 41 penetrações, conforme NBR 16607 (ABNT, 2018) e C191 (ASTM 2021).

A altura do molde é de 41 mm, e essa medida pode ser subtraída para obter o tempo de pega. O início de pega é determinado quando a agulha penetra  $6 \pm 2$  mm da base de vidro, calculado com precisão ao interpolar os valores de penetração, obtendo o tempo inicial de pega em minutos. O fim de pega é estabelecido no instante em que a agulha penetra 0,6 mm na amostra.

Seguindo rigorosamente esses procedimentos de acordo com as normas mencionadas, foi possível obter medições confiáveis dos tempos de pega da argamassa, informações essenciais para o controle de sua aplicação e trabalhabilidade.

### 3.3.4. Ensaios no Estado Endurecido

A seguir, são delineados os ensaios de caracterização planejados para serem conduzidos nas argamassas em seu estado endurecido, alinhados com os objetivos estipulados nesta pesquisa.

#### 3.3.4.1. Resistência de Aderência à Tração

O ensaio de resistência de aderência à tração seguiu as normativas da NBR 13528-2 (ABNT, 2019). Para a realização do ensaio, foi empregado um dinamômetro de tração da marca *Solotest*, modelo hidráulico manual digital, que permite a aplicação de carga contínua. Foram utilizadas pastilhas com diâmetro de 50 mm e cola à base de resina epóxi, conforme a NBR 13528-1 (ABNT, 2019).

Foram construídas duas paredes, cada uma com aproximadamente 1 m<sup>2</sup>. Cada parede recebeu uma camada de argamassa com espessura de 1,5 cm, e o ensaio foi realizado quando a argamassa atingiu a idade de 28 dias. Foram distribuídos em cada parede 13 corpos de prova de forma aleatória na parede, mantendo uma distância de 50 mm entre eles, a partir das extremidades. O revestimento foi cortado com um dispositivo de corte cilíndrico a seco até expor a superfície do substrato, e então as pastilhas foram fixadas sobre os corpos de prova.

Antes de realizar o ensaio, foi necessário determinar a umidade do revestimento. Três amostras foram retiradas usando o dispositivo de corte cilíndrico de 50 mm. Essas amostras foram pesadas e colocadas em uma estufa até atingir a estabilidade de massa. Após isso, foram resfriadas e pesadas novamente.

Após a verificação da umidade, foram aplicadas forças de tração perpendicular aos corpos de prova utilizando um dinamômetro com uma taxa de carregamento constante até que ocorreu a ruptura do corpo de prova. Em seguida, foram registrados os seguintes dados para cada corpo de prova: a carga aplicada, a espessura do revestimento e o modo de ruptura. Com base nisso, foi determinada a resistência de aderência à tração.

### *3.3.4.2. Resistência à Tração na Flexão e Compressão*

Os ensaios de resistências à tração na flexão e compressão seguiram as normas estabelecidas pela NBR 13279 (ABNT, 2005), e foram conduzidos utilizando o aparelho da marca Contenco I-3022-AA. O rompimento das argamassas ocorreu após 28 dias de cura, com a preparação de seis corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16 cm para cada traço desenvolvido. Esses corpos de prova foram posicionados no centro do equipamento e submetidos a uma carga de  $50 \pm 10$  N/s para a tração na flexão, e uma carga de  $500 \pm 50$  N/s para compressão.

### *3.3.4.3. Densidade 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 a idade mínima de 28 dias. Em seguida, para determinar as dimensões desses corpos de prova, foi feita uma medição com um paquímetro.

### *3.3.4.4. 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 três corpos de prova.

Para determinar as propriedades, o corpo de prova foi submetido a um ciclo de secagem, saturação e ebulação. Primeiro, foi seco a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por 72 horas e pesado. Em seguida, saturado em água por 72 horas e pesado novamente. O processo de ebulação durou cerca de 5 horas, seguido de resfriamento, e sua massa foi registrada com uma 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.

### *3.3.4.5. Variação Dimensional*

A retração ou expansão linear das argamassas foi avaliada de acordo com as normas estabelecidas na NBR 15261 (ABNT, 2005). Neste ensaio, uma variação positiva indica expansão, enquanto uma variação negativa indica

retração. Foram utilizados três corpos de prova com dimensões de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm para cada composição.

Inicialmente, os moldes das amostras foram preparados, sendo revestidos com filme de PVC e uma camada fina de vaselina para facilitar o desmolde. A primeira medição foi feita após 7 dias usando um aparelho comparador de comprimento, com a medição final sendo realizada após 28 dias.

### 3.3.4.6. Condutividade Térmica

O ensaio para determinar a condutividade térmica foi baseado nas normas ISO 8301 (ISO, 1991) e C518 (ASTM, 2017), sendo utilizado um condutivímetro modelo K10N. Os corpos de prova foram moldados com espessura de 3 cm e curados por 28 dias. Após a preparação das amostras, foram posicionadas entre fluxômetros para medir o fluxo de calor de acordo com a Lei de Fourier descrito na Equação (6). E a condutividade térmica foi determinada pela média simples desses fluxos, conforme a Equação (7).

$$q = k \times \frac{T_2 - T_1}{E} \quad (6)$$

$$\gamma = k \times \frac{\frac{q_1 + q_2}{2} \times E}{\Delta T} \quad (7)$$

Sendo:

$q$  a taxa de fluxo de calor ( $\text{W/m}^2$ );

$k$  a condutividade térmica da amostra ( $\text{W/ (m.K)}$ );

$T_2 - T_1$  a diferença de temperatura  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$E$  a espessura do material (mm);

$\gamma$  a condutividade térmica ( $\text{W/m.K}$ );

$q_1 + q_2$  são as densidades de fluxo de calor medidas pelos fluxímetros 1 e 2 ( $\text{W/m}^2$ ).

### 3.3.5. Análise Microestrutural

A seguir, apresentam-se os ensaios de caracterização microestrutural que foram realizados nas argamassas em seu estado endurecido, em consonância com os objetivos estabelecidos neste estudo.

#### 3.3.5.1. *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)*

Para avaliar a microestrutura da argamassa contendo nanocelulose, foram obtidas imagens utilizando o microscópio eletrônico de varredura de bancada JCM-7000, operando em baixo vácuo (LV), disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais.

Após o ensaio de compressão aos 28 dias, as amostras foram retiradas dos corpos de prova prismáticos por meio de uma serra-fita. Posteriormente, essas amostras foram niveladas e cortadas com diâmetro e espessura de 2,5 mm, fixados no porta amostras com uma fita a base de carbono e então realizado o recobrimento com ouro. O ensaio permitiu verificar a microestrutura das argamassas através da emissão de feixe de elétrons que incidiram na amostra.

### 3.3.6. Análise Estatística

A análise da influência do teor de nanocelulose nas argamassas foi realizada utilizando o software OriginPro 2024. Foram conduzidas análises estatísticas (ANOVA) com um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ) e teste de Tukey para comparação múltipla entre grupos. O objetivo foi verificar se houve diferença estatística entre as argamassas com adições de celulose e se houve interação significativa da nanocelulose nas propriedades de índice de consistência e resistências à tração e compressão. A decisão da influência da nanocelulose foi baseada no p-valor da análise, considerando efeito significativo para p-valores menores que o nível de significância. A interação também foi avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Uma vez confirmada a interação da nanocelulose com as propriedades das argamassas, identificou-se o teor de nanocelulose que promoveu interação nas propriedades analisadas, por meio do teste Tukey.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos nesta pesquisa, conforme descrito na seção 3. O capítulo inicia com a caracterização dos materiais e segue com o processo de seleção das argamassas, conforme as fases definidas na Figura 23. Os resultados e discussão são divididos em função das fases de pesquisa. Primeiramente, é apresentada a análise do comportamento reológico e dos ensaios no estado fresco. Em seguida, são discutidos os índices de consistência e as resistências à tração na flexão e compressão, acompanhados de suas análises estatísticas, a fim de definir qual das misturas é mais adequada para aplicação prática e para a realização dos demais ensaios no estado endurecido. Por fim, são apresentadas as análises microestruturais das duas misturas selecionadas.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1. Agregados miúdo e leve

A Tabela 3 apresenta a caracterização da areia e da vermiculita através dos ensaios de granulometria e de massa específica, conforme especificado no item 3.1.5. Porém alguns dados da vermiculita foram fornecidos pelo fabricante, como a capacidade de retenção de água que pode atingir até 60% e condutividade térmica de 0,070 W/m•K a 23°C.

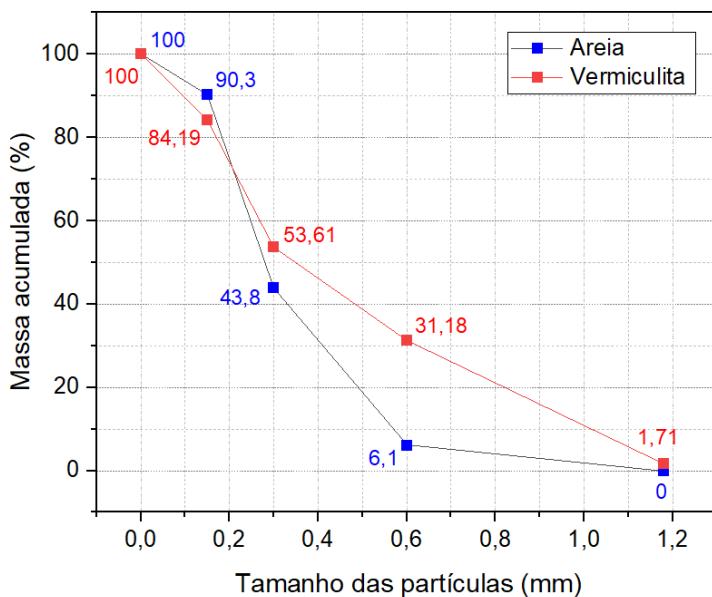
Tabela 3 – Caracterização dos agregados.

Propriedades	Areia Fina de Rio	Vermiculita Expandida
Módulo de Finura	1,40	1,71
Diâmetro Máximo do Grão (mm)	0,6	1,18
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,46	0,0721
Massa volumétrica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	0,2608

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Figura 26 ilustra a distribuição granulométrica dos agregados, conforme o ensaio realizado de acordo com a norma NBR 17054 (ABNT, 2022).

Figura 26 – Distribuição granulométrica da areia e vermiculita.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os resultados obtidos para a areia são similares com as descobertas de Becker, Effting e Schackow (2022) e Reis, Effting e Schackow (2023), em ambos os estudos as areias foram utilizadas em argamassa leve, sem considerar a influência da granulometria no comportamento reológico. Portanto, a areia utilizada no estudo foi selecionada com uma granulometria máxima de 0,6 mm tendo uma maior concentração de finos devido ao ensaio submetido no reômetro.

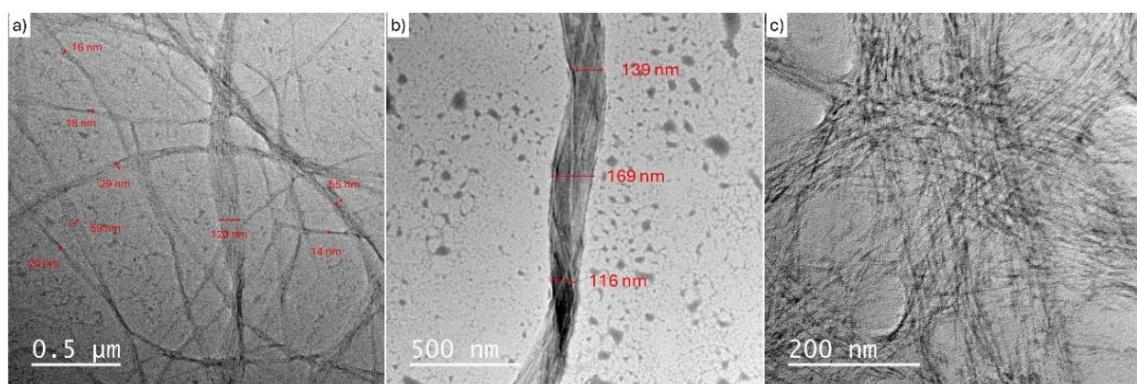
A vermiculita possui uma concentração significativa de grãos na peneira de diâmetro de 0,6 mm, classificando-a como superfina conforme o padrão brasileiro apresentado no Quadro 2. As características do módulo de finura da vermiculita estão em conformidade com Guilherme, Cabral e Souza (2020). Em estudos de granulometria conduzidos por Ugarte *et al.* (2008), foi observado que a vermiculita mais fina é comumente aplicada na construção civil.

#### 4.1.2. Nanocelulose bacteriana

Para uma melhor compreensão das características físicas do material utilizado, foi realizado um ensaio de Microscopia Eletrônica de Transmissão, com o objetivo de analisar a morfologia do material e estimar as dimensões das fibras. Conforme ilustrado na Figura 27, o emaranhado de fibras dificulta a estimativa

precisa de seu diâmetro, que varia de 14 nm a 122 nm. De acordo com Wulandari et al. (2016), o material é classificado como nanocelulose quando suas dimensões variam de 10 nm a 350 nm. O comprimento das fibras não pode ser determinado devido ao emaranhamento das nanofibras, resultando em uma proporção de comprimento muito extensa para ser mensurada. Essas nanofibras proporcionam uma maior razão L/D (comprimento/diâmetro), e quanto maior essa razão, mais interessantes se tornam as fibras em relação às suas propriedades de reforço. Khanddelwal, Windle e Hessler (2016) atribuem essa característica à ampla distribuição da largura das microfibras, decorrente da variabilidade na agregação dessas estruturas.

Figura 27 – Imagens MET das nanofibras de nanocelulose bacteriana (a) 500 nm, rede de fibras; (b) 500 nm, fibra única e (c) 200 nm, emaranhado de fibras.

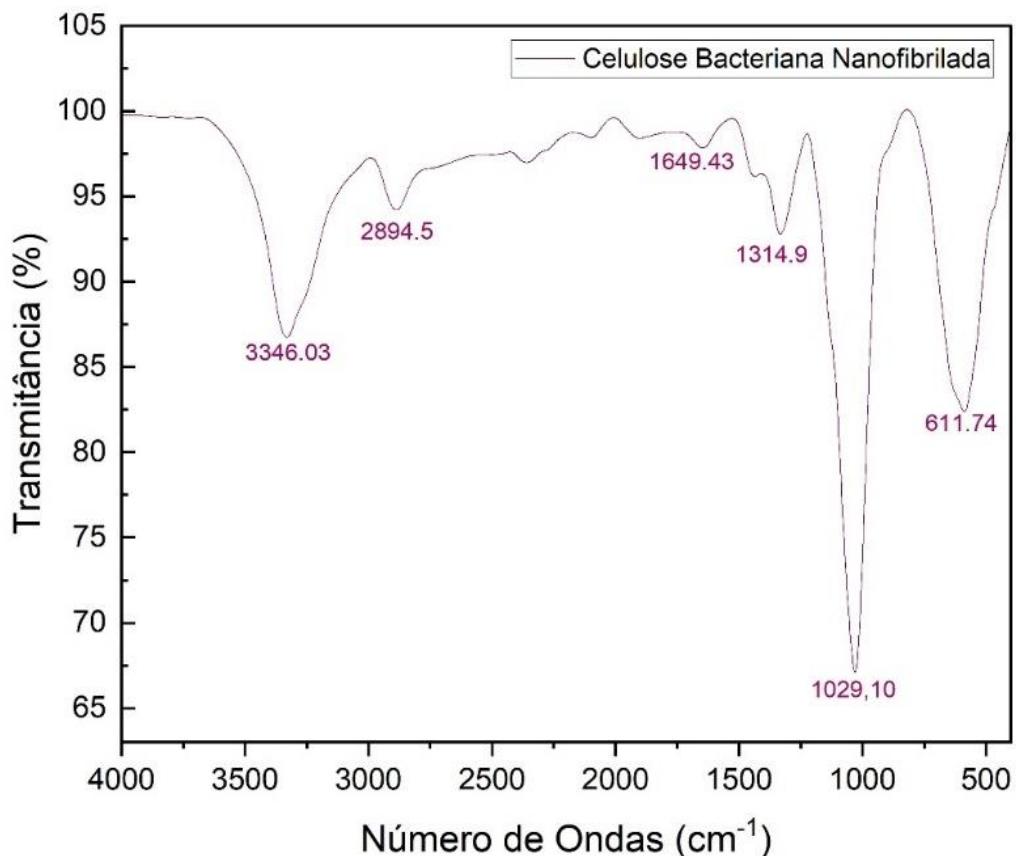


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O espectro obtido a partir da análise de FTIR confirma que a estrutura química do material empregado é característica de celulose, foi possível verificar alguns picos de comprimento de onda (Figura 28). A banda de absorção no infravermelho em  $3346,03\text{ cm}^{-1}$  é atribuída às vibrações do estiramento – OH – a banda é características dos grupos de hidroxilos presentes na nanocelulose. A absorção em  $1649,43\text{ cm}^{-1}$  e  $1314,9\text{ cm}^{-1}$ , correspondem à deformação OH. As bandas de  $2894,5\text{ cm}^{-1}$ ,  $1029,10\text{ cm}^{-1}$  e  $611,74\text{ cm}^{-1}$ , são atribuídas às bandas de vibração glicosídicas C–H, C–O–C e  $\beta$ - (1–4), respectivamente. A banda de  $2894,5\text{ cm}^{-1}$  corresponde ao estiramento C–H de alcanos e estiramento assimétrico CH<sub>2</sub>. A vibração em  $1029,10\text{ cm}^{-1}$  corresponde a deformação angular do C–H. E a banda de  $611,74\text{ cm}^{-1}$  corresponde a vibração de alongamento do C–O–H dos anéis de açúcar. Os picos de nanocelulose são semelhantes aos

encontrados por Duarte et al. (2012), Li et al. (2024), Liu *et al.* (2019), Dórame-Miranda *et al.* (2019) e Reis *et al.* (2023).

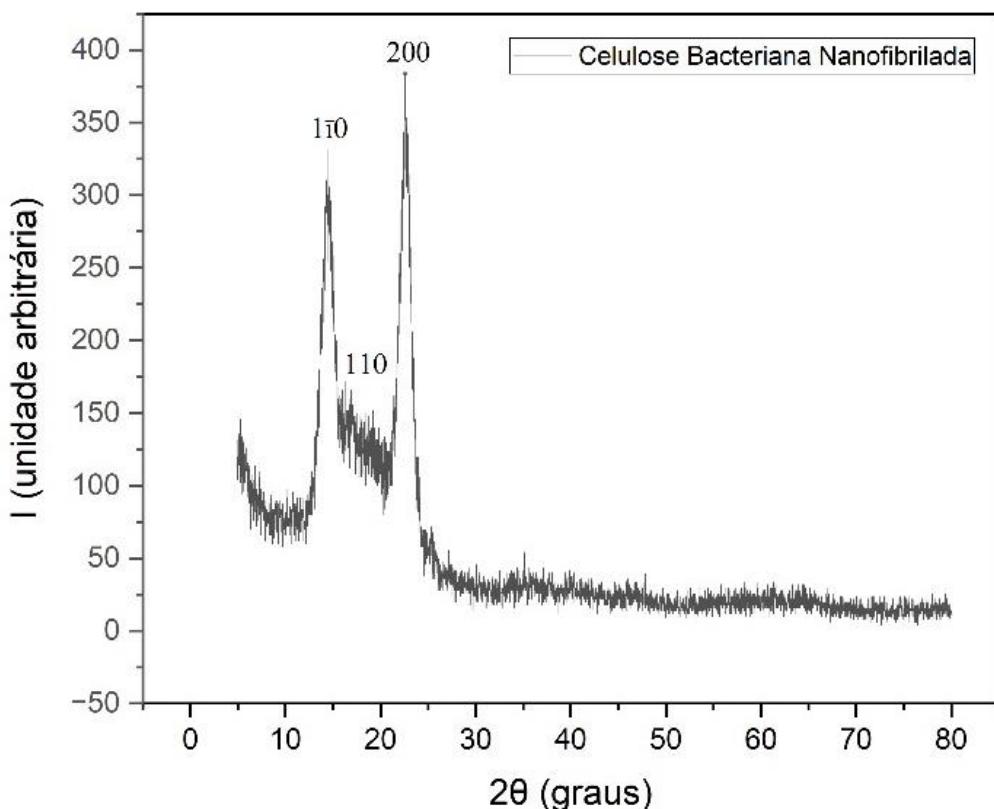
Figura 28 – Espectro FTIR da BCNF.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Figura 29 apresenta a DRX utilizada para caracterizar a estrutura cristalina e as propriedades físicas do filme de BC. A amostra apresentou picos em torno de  $2\theta = 14,41^\circ$ ,  $16,34^\circ$  e  $22,58^\circ$ , correspondentes aos planos cristalográficos  $1\bar{1}0$ ,  $110$  e  $200$ , respectivamente, indicando a estrutura típica de celulose tipo I (Ghozali, Meliana e Chalid, 2021; Barshan *et al.*, 2019; Kiziltas *et al.*, 2015). A cristalinidade da nanocelulose bacteriana foi determinada em 38,18% com base na Equação (5), caracterizando um material mais amorfó. O valor encontrado está próximo ao obtido por Liu *et al.* (2019) em seu estudo sobre celulose bacteriana oxidada e enxertada com quitosana. Os valores de cristalinidade da BC variam conforme o meio de cultura, a concentração de nutrientes e o tempo de incubação (Ruka *et al.*, 2012).

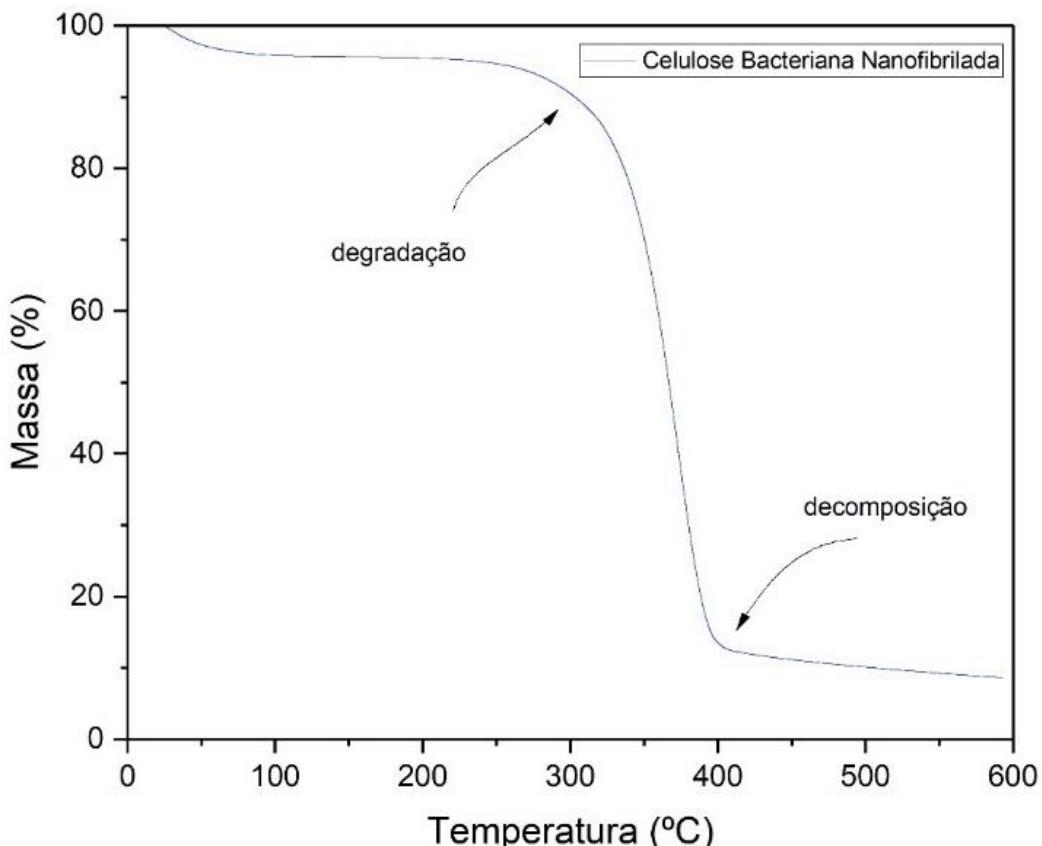
Figura 29 – Difratograma de raio x da BCNF.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A curva TGA da BC revelou três estágios de perda de massa (Figura 30). A primeira perda de massa, ocorrendo entre 40-110°C, foi atribuída à evaporação da água adsorvida na superfície da celulose. A estabilidade térmica da celulose foi observada na faixa de 100-250°C, indicando sua capacidade de resistir a altas temperaturas (Liang *et al.*, 2024). A temperatura onde a degradação de celulose é máxima ocorre em 300°C, com uma redução de massa de 85% para 12,5% ao atingir 400°C, onde ocorre a desidratação. Acima de 400°C, a curva indica que a nanocelulose começa o processo de decomposição das unidades glicosídicas seguida pela formação de resíduos de carbono (Duarte *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2010).

Figura 30 – Curvas da análise de TGA da BCNF.



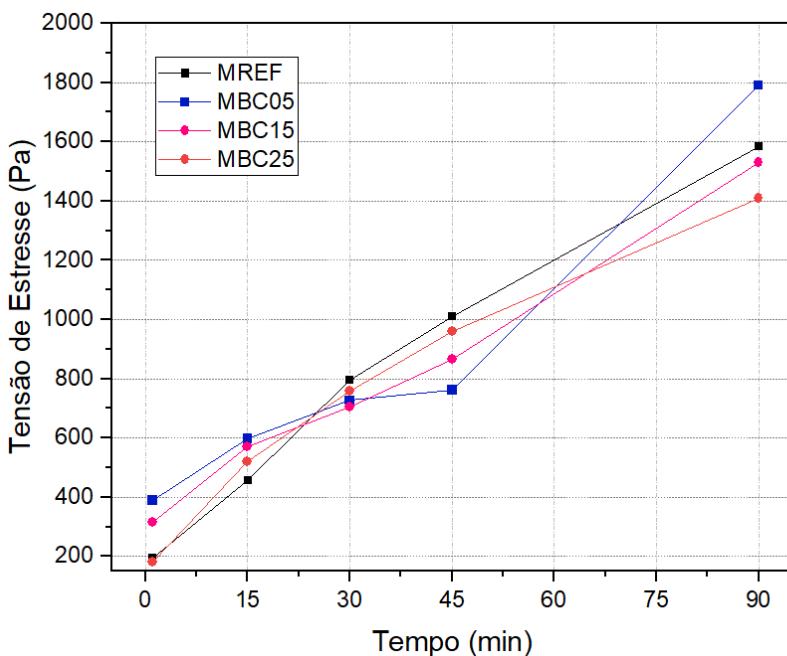
Fonte: Elaborada pela autora (2024).

## 4.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO – FASE I

### 4.2.1. Comportamento reológico

O ensaio reológico forneceu informações sobre a tensão de escoamento e a viscosidade da argamassa em análise contínua de cada mistura da argamassa. As tensões de escoamento foram medidas em uma taxa de cisalhamento controlada, e o tempo para atingir a tensão máxima. A Figura 31 apresenta o comportamento do material ao longo da hidratação do cimento, evidenciando sua estruturação e a consequente perda de trabalhabilidade. As argamassas com BCNF apresentaram uma tendência de aumento da tensão de escoamento com o tempo, visto que a adição de nanocelulose pode influenciar a tensão de escoamento e, com o tempo, as argamassas podem mostrar um aumento na tensão devido à interação entre as nanofibras e a matriz cimentícia, além do processo de hidratação (Hisseine *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020; Kolour *et al.*, 2018).

Figura 31 – Estruturação das argamassas ao longo do tempo.



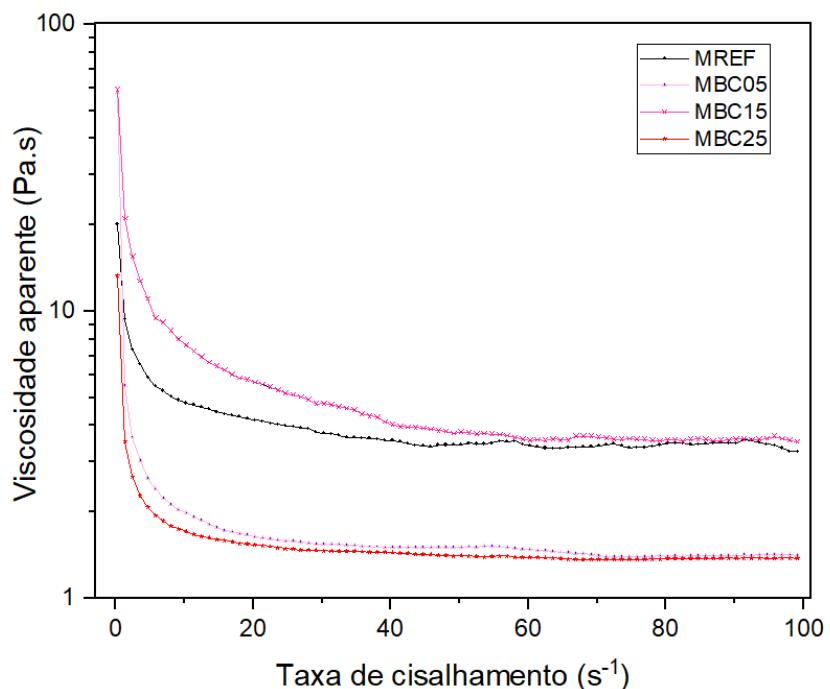
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Figura 31, pode ser observado que somente a MBC15 segue uma tendência linear de aumento de tensão, enquanto as demais apresentam variações desproporcionais, sendo acréscimo ou decréscimo de tensão. A mistura MBC05 apresenta o dobro da tensão da MREF, o que demonstra que um menor teor de BCNF aumenta a tensão inicial devido à interação das partículas de BCNF e de cimento, pois o nanomaterial está bem disperso e agindo de forma proporcional na mistura. Isso ocorre porque, quanto maior a quantidade de nanocelulose, maior o risco de aglomeração das partículas. A tensão de escoamento na MBC15 aumenta linearmente e de forma proporcional, devido a aglutinação dos materiais com a nanocelulose que exige mais água e acaba secando mais rápido superficialmente, necessitando de maior esforço para romper a estrutura. A tensão final das misturas MBC05 e MBC15 são mais próximas por conta da quantidade de nanocelulose e água na composição, enquanto a MBC25 contém uma quantidade maior de solução aquosa e nanocelulose o que ocasionou uma queda de tensão pois as reações ocorrem na microestrutura (CAO *et al.*, 2015; FARIAS, 2020).

A Figura 32 apresenta o aumento da viscosidade das argamassas. No ensaio reológico, a argamassa MBC15 se torna mais viscosa ao final,

apresentando maior espessura e rigidez quando a força é reduzida ou cessada. Sob força maior, a MBC15 é mais fluida. Esse comportamento é atribuído à incorporação de BCNF na mistura, que influenciam a estrutura interna da argamassa (Liang *et al.*, 2022). Sob aplicação de força, as fibras se alinham e facilitam o movimento das partículas, diminuindo a viscosidade temporariamente (Montes *et al.*, 2017). Quando a força é removida, as fibras formam uma rede estruturada, aumentando a viscosidade e rigidez. Este comportamento de redução de viscosidade resulta da capacidade das fibras de reorganizarem-se sob tensão e retornar a uma configuração rígida na ausência de força.

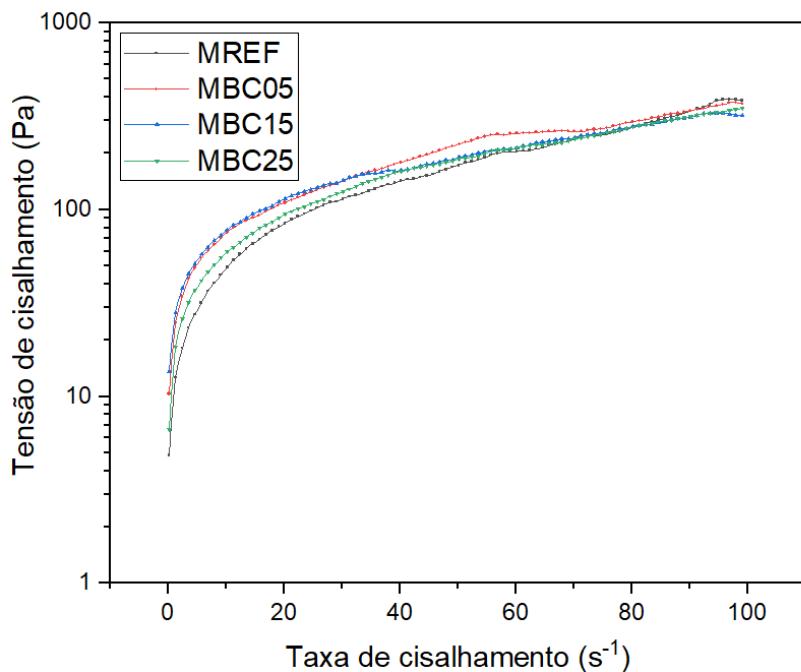
Figura 32 – Viscosidade aparente das argamassas desenvolvidas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Figura 33 apresenta as curvas de fluxo das argamassas contendo BCNF, enquanto a Tabela 4 apresenta os parâmetros reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley. O modelo de Herschel-Bulkley não fornece a viscosidade diretamente, uma vez que esta varia conforme a taxa de cisalhamento. Portanto, a viscosidade foi calculada utilizando a Equação (4), e então pode ser nomeada de viscosidade plástica aparente.

Figura 33 – Curva de fluxo das argamassas desenvolvidas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 4 – Parâmetros reológicos das argamassas pelo modelo de Bingham e Herschel-Bulkley.

Misturas	Bingham		Herschel-Bulkley			
	$\tau_0$ (Pa)	$\mu$ (Pa.s)	$\tau_0$ (Pa)	$K$	$n$	$\mu_{eq}$ (Pa.s)
MREF	15,46	3,99	5,33	20,049	0,586	3,45
MBC05	69,71	2,96	21,70	9,759	0,746	3,31
MBC15	70,05	2,47	11,82	14,831	0,641	3,22
MBC25	33,45	3,71	4,123	8,013	0,729	2,53

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

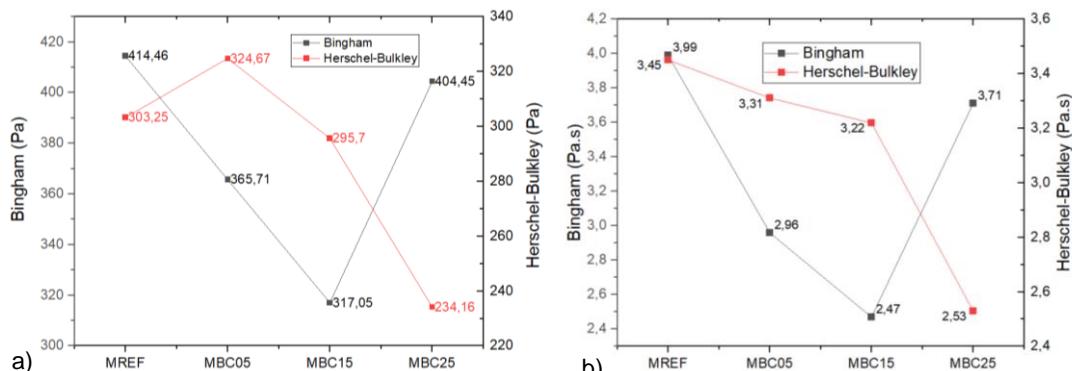
Pela Figura 33, observa-se que todas as misturas exibiram um comportamento fluidificante, caracterizado pela diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. Essa tendência é confirmada pelo índice pseudoplástico ( $n$ ) calculado pelo modelo de Herschel-Bulkley, o qual é menor que 1 para todas as misturas, conforme detalhado na Tabela 4. Ambos os modelos apresentaram um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,99. As tensões de

escoamento e a viscosidade plástica aparente das misturas foram ajustadas utilizando a taxa de cisalhamento máxima do ensaio.

Nota-se que com o aumento do teor de BCNF, a tensão de cisalhamento aumenta gradativamente no modelo de Bingham, exceto para a mistura MBC25. Este fenômeno pode ser atribuído à aglomeração das partículas de BCNF ou à sua interação com o aditivo redutor de água. Porém, Cao *et al.* (2015) constataram que, com o aumento do teor de nanocelulose, a tensão tende a diminuir, conforme evidenciado pelo modelo de Herschel-Bulkley. Cabral (2020) e Kelessidis *et al.* (2006) relatam que este modelo representa melhor o comportamento real das argamassas, pois os fluidos pseudoplásticos apresentam uma redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, conforme demonstrado na Figura 32.

A Figura 34 apresenta os valores ajustados das tensões de escoamento (a) e viscosidades (b) pelos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Figura 34 – Tensões de escoamento (a); e viscosidades (b) das argamassas ajustadas pelos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

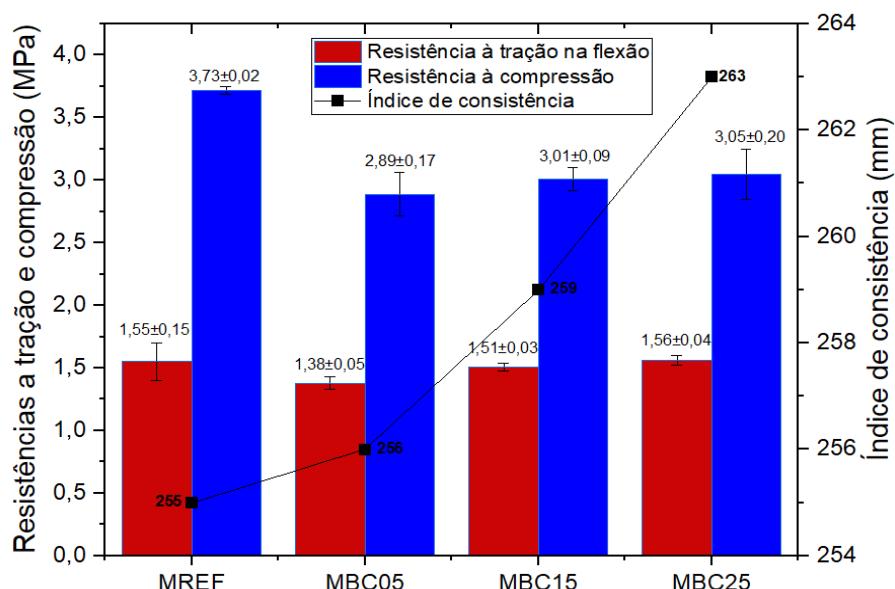
As tensões de escoamento do modelo de Bingham foram superiores aos do modelo de Herschel-Bulkley. No modelo de Bingham, a tensão variou de forma irregular na mistura MBC15, enquanto no modelo de Herschel-Bulkley houve uma queda na tensão de escoamento com o aumento do teor de BCNF. O mesmo fenômeno ocorre nas viscosidades das argamassas. A viscosidade pelo modelo de Bingham é denominada como viscosidade plástica e pelo modelo de Herschel-Bulkley é denominada de viscosidade plástica aparente. Cabral (2020) e Cao *et al.* (2015) relatam que, quanto maior o teor de incorporação de

nanocelulose, maior a viscosidade e a tensão de escoamento. É estabelecido que a viscosidade é um reflexo macroscópico do fluxo de água através dos vazios em um sistema granular (De Larrard, Sedran, 2002). A nanocelulose tende a reduzir esses vazios devido à evaporação da água durante o processo de secagem. Com a evaporação, o percentual de nanocelulose remanescente se transforma em um hidrogel, resultando na diminuição da viscosidade das misturas (Hisseine *et al.*, 2019). Esse fenômeno é bem representado pelo modelo de Herschel-Bulkley, pois a argamassa de estudo, segundo Kawatra *et al.* (1996) apresenta comportamento pseudoplástico.

#### 4.2.2. Índice de consistência, resistências à tração e compressão

Na Figura 35, é apresentado os resultados de espalhamento e resistências das argamassas leves. As argamassas leves apresentaram diâmetro de espalhamento entre  $260 \pm 5$  mm, conforme recomendado pela NBR 16541 (ABNT, 2016). A MREF, com 55% de vermiculita no agregado miúdo, teve um espalhamento de 255 mm, que difere do esperado para argamassas convencionais. Os resultados da resistência à tração na flexão e à compressão das MREF e das argamassas com BCNF, aos 28 dias, evidenciam consistentemente valores inferiores nas misturas contendo BCNF.

Figura 35 – Índices de consistências e resistências de tração e compressão das argamassas aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Cintra, Paiva e Baldo (2013) relatam que a consistência é determinada pela quantidade de água, pois Silva *et al.* (2010) e Xu *et al.* (2015) afirmam que é necessário aumentar o consumo de água na produção da argamassa com maior quantidade de vermiculita, pois a natureza porosa do material absorve e retém água com maior facilidade, tornando a argamassa mais seca (Sinhorelli, 2019).

As argamassas contendo BCNF obtiveram um aumento de 3,13% em comparação a MREF, apresentando um aumento gradual com a adição de nanocelulose. Esse fenômeno foi atribuído à eficiente dispersão e compatibilidade da BCNF com o aditivo superplastificante com um teor de 1,5%, devido às propriedades hidrofílicas da celulose, que promoveram melhor distribuição das partículas e reduziram a demanda de água (Cabral, 2020). A combinação de superplastificante com BCNF revelou-se uma técnica promissora para o desenvolvimento de compósitos cimentícios com melhor comportamento de fluxo, mantendo boas propriedades reológicas com baixo teor de superplastificante. Além de otimizar a trabalhabilidade das argamassas, essa combinação contribuiu para a sustentabilidade, reduzindo o uso de aditivos químicos (Cabral, 2020; De Souza Filho *et al.*, 2020).

A resistência à tração na flexão da mistura MREF foi de 1,55 MPa, enquanto a inclusão de 0,05% de BCNF resultou em uma redução de 10,97%, já as outras misturas obtiveram um valor próximo da referência. Todas as misturas foram classificadas como R3, exceto a MBC05, classificada como R2 pela NBR 13281-1 (ABNT, 2023). Quanto à resistência à compressão, houve uma queda de 25% para a MBC05, 19,3% para a MBC15 e 18,3% para a MBC25 em relação à argamassa de referência, devido ao aumento do teor de BCNF. Todas as misturas atenderam aos requisitos estabelecidos pela norma C270 (ASTM, 2024), que exige uma resistência à compressão superior a 2,5 MPa para argamassas convencionais com cal.

A incorporação de BCNF na argamassa resultou em uma diminuição das resistências. A diferença mínima entre as misturas MBC15 e MBC25 pode ser atribuída aos pontos de falha devido à aglomeração de BCNF (Anju *et al.*, 2016). De Souza Filho *et al.* (2020) indicam que a presença da vermiculita, que é um material poroso, pode ter contribuído para o aumento da porosidade da

argamassa, resultando em menor resistência mecânica. Deve ser considerado que as resistências não aumentaram porque foi utilizada a porcentagem da massa da suspensão aquosa de nanocelulose bacteriana sobre a massa de cimento. Ou seja, em uma solução aquosa de 6g, haveria apenas 0,06g de BCNF, o que pode não ser suficiente para aumentar significativamente as resistências. No entanto, Cintra, Paiva e Baldo (2013) argumentam que, como a argamassa de revestimento não tem função estrutural, a resistência mecânica pode ser considerada um parâmetro secundário em seu comportamento.

#### 4.2.2.1. Análise Estatística das Propriedades Mecânicas

Para determinar a influência da BCNF nas propriedades mecânicas das argamassas, foram realizadas análises estatísticas (Tabela 5) utilizando o método paramétrico ANOVA com um nível de significância de 5%. A ANOVA foi empregada para comparar as médias das propriedades mecânicas entre os grupos de argamassas com e sem BCNF, identificando possíveis diferenças significativas.

Tabela 5 – Estatísticas descritivas do índice de consistência e resistências de tração e compressão.

MISTURA	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (mm)			RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)			RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
	M	D	EP-M	M	D	EP-M	M	D	EP-M
MREF	255	0,11	0,06	1,55	0,21	0,12	3,71	0,03	0,02
MBC05	256	0,11	0,06	1,38	0,07	0,04	2,89	0,25	0,14
MBC15	259	0,10	0,05	1,51	0,04	0,03	2,99	0,12	0,07
MBC25	264	0,10	0,05	1,56	0,05	0,03	3,04	0,29	0,11

M: média; D: desvio padrão; EP-M: erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Após a análise de variância (Tabela 6), foi realizado um teste de comparação múltipla utilizando o teste de Tukey para avaliar a magnitude das diferenças entre as médias.

Tabela 6 – Análise da variância da consistência e resistências.

MISTURA	CONSISTÊNCIA				RESISTÊNCIA A TRAÇÃO				RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO			
	GL	QM	F	p-valor	GL	QM	F	p-valor	GL	QM	F	p-valor
Modelo	3	0,451	38,6	<1x10 <sup>-4</sup>	3	0,021	1,51	0,285	3	0,435	8,26	3,69x10 <sup>-3</sup>

(continua)

(continuação)

Erro	8	0,012	-	-	8	0,014	-	-	11	0,052	-	-
Total	11	-	-	-	11	-	-	-	14	-	-	-
R <sup>2</sup>		0,93548				0,36111				0,69271		

GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; F: Estatístico.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com base na análise de variância conduzida, foi evidenciada a influência significativa da BCNF nas propriedades mecânicas da argamassa. Todos os parâmetros investigados apresentaram um coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) próximo a 1, indicando uma forte adequação do modelo linear às variáveis dependentes.

Ao examinar a consistência das argamassas, identificou-se um p-valor inferior a  $1 \times 10^{-4}$ , acompanhado de uma proporção de variabilidade de 0,93548, o que sugere que a adição de BCNF resulta em um aumento significativo na consistência das misturas, igual a 93,55%. Em relação às resistências, os p-valores foram de 0,285 para tração e  $3,69 \times 10^{-3}$  para compressão, indicando interferência do aumento do teor de BCNF é significativa no ensaio de resistência à compressão, como evidenciado pelo p-valor  $< 0,05$ .

Na Tabela 7, estão apresentados os valores do teste de Tukey, que foi utilizado para comparar todas as combinações possíveis de médias e identificar as diferenças significativas entre os grupos. Esse procedimento complementa a análise de variância, permitindo uma interpretação mais precisa das diferenças nas propriedades mecânicas das argamassas devido à presença de BCNF.

Tabela 7 – Teste de Tukey para os resultados do índice de consistência e resistências de tração e compressão.

MISTURAS ANALISADAS	Consistência			Resistência à tração			Resistencia à compressão		
	LI	LS	p-valor	LI	LS	p-valor	LI	LS	p-valor
MBC05-MREF	-0,182	0,382	$6,8 \times 10^{-2}$	-0,478	0,134	0,34	-1,393	-0,265	0,004
MBC15-MREF	0,084	0,649	$1,3 \times 10^{-2}$	-0,361	0,251	0,94	-1,284	-0,156	0,012
MBC15-MBC05	-0,016	0,549	$6,4 \times 10^{-2}$	-0,189	0,423	0,63	-0,455	0,672	0,93
MBC25-MREF	0,584	1,149	$< 1 \times 10^{-4}$	-0,298	0,313	0,99	-1,160	-0,183	$7 \times 10^{-3}$
MBC25-MBC05	0,484	1,049	$1,13 \times 10^{-4}$	-0,126	0,485	0,31	-0,331	0,645	0,77
MBC25-MBC15	0,217	0,782	$2,1 \times 10^{-3}$	-0,243	0,368	0,91	-0,439	0,537	0,99

LI: limite inferior; LS: limite superior.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com o teste de Tukey, foi possível determinar a influência significativa do teor de BCNF nas propriedades de consistência e resistência à compressão, pois a resistência à tração não obteve um p-valor  $< 0,05$ . A consistência apresentou um p-valor inferior a 5%, indicando uma influência significativa do teor de BCNF na propriedade analisada, com uma interação mais pronunciada entre as misturas MBC25 e MREF. Nas resistências, apenas a compressão apresentou um p-valor menor que 5%, com maior interação entre MBC25 e MREF. Quanto à tração, observou-se uma redução comparativa em relação à referência, sugerindo uma dispersão ineficaz do material ou a pouca idade do ensaio. Um aumento das resistências ao longo do tempo foi evidenciado por Mendes *et al.* (2022), com um p-valor inferior a 5% aos 28 dias e ganho de resistência aos 56 dias.

#### 4.2.3. Retenção de água, densidade da massa, teor de ar incorporado e tempo de pega

As propriedades do estado fresco das argamassas desenvolvidas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades do estado fresco das argamassas leves.

MISTURA	Retenção de água (%)	Densidade da massa (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)	Tempo de Pega (min)	
				Inicial	Final
MREF	71,58	849,08	4,70	312	603
MBC05	78,48	623,81	29,91	386	609
MBC15	81,46	668,31	24,91	397	625
MBC25	82,23	842,84	5,30	401	708

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A retenção de água das argamassas está em conformidade com a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), a MREF e MBC05 classificadas como U2 e MBC15 e MBC25 classificadas como U3. Entretanto, em relação aos padrões da norma C270 (ASTM, 2024), apenas a MREF não atendeu aos requisitos estabelecidos. A argamassa estudada está em conformidade com os padrões adequados para evitar fissurações devido ao controle eficaz na perda de água. A BCNF, por ser de natureza hidrofílica, retém a maior parte da água absorvida

independentemente da umidade relativa do ar, enquanto a vermiculita aumenta o percentual de retenção de água devido à sua porosidade (Reis, Effting E Schackow, 2023; Mendes, Vanderlei E Basso, 2022; Hisseine *et al.*, 2019). A falta de capacidade adequada de retenção de água na argamassa pode comprometer seu manuseio, afetando a qualidade do revestimento devido à possível interferência nas reações de hidratação do cimento e carbonatação da cal (Cintra, Paiva E Baldo, 2013).

A inserção de BCNF na mistura ocasionou a redução da densidade de massa e o aumento do teor de ar incorporado, estabelecendo uma relação inversamente proporcional. A MREF apresentou maior densidade de massa e menor teor de ar incorporado em comparação com as argamassas com BCNF. Carasek (2010) classifica as argamassas deste estudo como leves de acordo com a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), devido à sua densidade no estado fresco ser inferior a 1400 kg/m<sup>3</sup>. O teor de ar incorporado baixo apresenta uma argamassa com menor leveza, o que influencia na trabalhabilidade proporcionando maior tempo de trabalhabilidade e reduzindo o esforço durante a aplicação. É necessário ressaltar que o aumento do teor de ar incorporado pode comprometer a resistência final da argamassa (Mansur, 2007; Cintra, Paiva e Baldo, 2013).

Todas as misturas apresentaram variações significativas no tempo inicial e final da pega com aumentos proporcionais ao teor de BCNF aplicada nas misturas. Os ensaios foram conduzidos em dias distintos, porém com condições controladas para eliminar possíveis variáveis que pudessem comprometer os resultados da pesquisa. Os tempos de início e fim de pega são influenciados pela temperatura do compósito (Mehta e Monteiro, 2014). À medida que o teor de BCNF aumenta, observa-se um efeito retardador no início de pega em comparação com a argamassa de controle (Cabral, 2020). Isso ocorre devido à menor liberação de calor nas primeiras horas em compósitos com nanocelulose (Bai *et al.*, 2023; Cao *et al.*, 2015). No entanto, a presença de aditivo superplastificante na argamassa retarda esse fenômeno nas primeiras horas (Mattana, 2013; Meirelles *et al.*, 1999; Graeff e Filho, 2002; Lima, 2019).

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO – FASE II

Com base nos resultados do estado fresco das argamassas, a mistura MBC15 apresentou os melhores resultados. Embora a MBC25 tenha demonstrado maior resistência e espalhamento, as diferenças não foram significativas. A MBC15 foi escolhida por reduzir a quantidade de material necessário, mantendo resultados semelhantes. Em termos de reologia, a MBC15 exibiu um aumento progressivo da tensão com o envelhecimento, alinhando-se mais precisamente ao modelo de Herschel-Bulkley, refletindo um comportamento reológico mais representativo das condições reais. Nesta seção serão apresentados os ensaios no estado endurecido realizados nas argamassas MREF e MBC15.

#### 4.3.1. Resistência de aderência à tração

As tabelas Tabela 9 e Tabela 10 exibem os resultados dos ensaios de aderência à tração das argamassas de referência e contendo BCNF, realizados em 12 corpos de prova. A forma de ruptura foi avaliada e classificada de acordo com a Figura 2. Uma análise média dos resultados revelou que a argamassa de referência obteve uma tensão de  $0,018 \pm 0,005$  MPa, com uma ruptura predominantemente do Tipo C, representando 87% dos casos. Já a argamassa contendo BCNF registrou uma tensão de  $0,025 \pm 0,005$  MPa, com 57% da ruptura ocorrendo na interface entre o substrato e a argamassa, enquanto os 43% restantes se dividem entre ruptura na argamassa e no substrato. No entanto, é importante observar que nenhuma das argamassas atende aos requisitos estipulados pela NBR 13749 (2013), que especifica um mínimo de 0,20 MPa de aderência sob tração para revestimentos internos e tetos, com base nisso todas as argamassas estão classificadas como A1.

Tabela 9 – Valores da aderência à tração da mistura MREF.

nº do CP	dm (mm)	Área (mm)	Local	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Classificação	Percentual (%)
1	50,25	1983,18	Bloco	26	0,01	C	85
2	50,45	1999,00	Bloco	46	0,02	B	50
3	50,45	1999,00	Junta	24	0,01	C	95

(continua)

(continuação)

4	50,48	2000,98	Bloco	24	0,01	C	100
5	51,08	2048,83	Bloco	35	0,02	C	100
6	50,9	2034,82	Bloco	48	0,02	C	100
7	50	1963,50	Bloco	50	0,03	C	100
8	50,6	2010,90	Junta	50	0,02	C	100
9	50,5	2002,96	Bloco	27	0,01	B	95
10	51,05	2046,83	Junta	31	0,02	C	100
11	50,93	2036,82	Bloco	34	0,02	B	30
12	50,85	2030,82	Junta	63	0,03	C	10

Umidade: 2,4%

Fonte: Adaptado pela autora a partir da NBR 13528-2 (2019).

Tabela 10 – Valores de aderência à tração da mistura MBC15.

nº do CP	dm (mm)	Área (mm)	Local	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Classificação	Percentual (%)
1	50,5	2002,96	Bloco	65	0,03	B	50
2	50,8	2026,83	Junta	53	0,03	B	50
3	50,4	1995,04	Bloco	51	0,03	B	50
4	50,995	2042,42	Bloco	38	0,02	C	90
5	50,225	1981,21	Bloco	46	0,02	C	50
6	50,46	1999,79	Junta	35	0,02	A	90
7	50,8	2026,83	Bloco	43	0,02	C	95
8	50,495	2002,57	Bloco	67	0,03	B	50
9	51,015	2044,02	Junta	58	0,03	D	25
10	50,825	2028,83	Bloco	42	0,02	B	95
11	51,025	2044,82	Bloco	47	0,02	C	70
12	50,775	2024,84	Bloco	66	0,03	B	50

Umidade: 1,71%

Fonte: Adaptado pela autora a partir da NBR 13528-2 (2019).

Os resultados foram menores porque a argamassa foi propositalmente aplicada diretamente no substrato, sem uma base de chapisco, para um resultado mais preciso. Além disso, espera-se que argamassas com agregado leve apresentem aderência reduzida. A BC não influenciou a aderência das argamassas leves. É importante destacar que os resultados podem ser influenciados por agentes externos, como umidade ou desvio na excentricidade da pastilha em relação à argamassa.

A resistência de aderência à tração é crucial para evitar problemas como fissuras não reparadas que permitam a penetração de água, comprometendo a aderência da argamassa à parede e levando ao desprendimento do revestimento (Schackow, 2015; Cintra, Paiva e Baldo, 2013). Segundo Vieira (2012), a presença de nanocelulose pode afetar negativamente o desempenho mecânico das argamassas. Isso ocorre porque a nanocelulose é introduzida em solução aquosa, e os ensaios no estado fresco mostram que sua superfície retém água. Esse fator pode impactar as propriedades mecânicas iniciais da argamassa, pois maiores concentrações de nanocelulose requerem mais solução aquosa, o que pode alterar o volume de água necessário e prolongar o tempo de cura para atingir o desempenho máximo. Adicionalmente, o tempo de cura em ambiente externo pode aumentar a fragilidade da argamassa, tornando-a mais suscetível a danos. Isso ocorre porque muitas das nanofibras na mistura ainda não passaram pelo processo de degradação adequado, ou seja, ainda não formaram um gel que fortaleça a matriz da argamassa (Paidoz, 2023).

#### **4.3.2. Densidade da massa aparente, massa específica real, absorção de água e porosidade**

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios realizados no estado endurecido, conforme descrito nos itens 3.3.4.3 e 3.3.4.4. Para cada um destes ensaios foram utilizados 3 corpos de prova. De acordo com a NBR 13281-1 (2023), as argamassas deste estudo são classificadas como DE1, devido à sua densidade está situada estar no intervalo entre 1200 e 1400 kg/m<sup>3</sup>. A adição de BCNF não influenciou a densidade da amostra seca e diminuiu em 19,61% a absorção de água e 18,99% o índice de vazios, indicando menor porosidade que pode contribuir para prolongar a vida útil do material ao impedir a entrada de agentes deterioradores, o que pode explicar a redução das propriedades mecânicas, a estrutura dos poros, e o refinamento da estrutura interna da matriz cimentícia (Becker, Effting e Schackow, 2022; Reis, Effting e Schackow, 2023; Mejdoub *et al.*, 2017; Goncalves *et al.*, 2019). A adição de BCNF resultou no aumento na absorção de água, devido às suas características hidrofílicas, corroborando com o estudo de Dahli *et al.* (2021).

Tabela 11 – Resultados da densidade aparente, massa específica real, absorção de água e índice de vazios.

MISTURA	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade da massa seca (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (%)
MREF	1358,52±2,17	1,25±0,01	30,64±1,02	38,49±1,11
MBC15	1375,43±0,31	1,27±0,04	24,63±4,70	31,18±6,11

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

#### 4.3.3. Variação dimensional

A Tabela 12 apresenta os resultados da variação dimensional média ( $\varepsilon$ ) dos três corpos de prova de cada mistura. A variação dimensional foi alta porque era uma argamassa leve com alta quantidade de vermiculita, um material que se expande e contrai facilmente. A presença de BCNF tem um efeito positivo no controle da retração linear das argamassas. Na mistura MBC15, a expansão foi controlada, resultando em uma redução na perda de massa para ambos os períodos de 1-7 dias e 1-28 dias em comparação com MREF. Essas alterações volumétricas foram influenciadas pela interação da celulose durante o processo de hidratação do cimento. A redução da porosidade na argamassa com BCNF (Tabela 11) contribui para menor absorção de água. Menos água na argamassa contribui para menor variação volumétrica da vermiculita. Além disso, o BCNF é composto de nanofibrilas, que podem ajudar a controlar a retração formando uma rede embutida na matriz, desde que bem dispersa (Farias, 2022; Reis, Effting e Schackow, 2023).

Tabela 12 – Variação dimensional das argamassas.

MISTURA	1-7 dias		1-28 dias	
	$\varepsilon_i$ (mm/m)	$\Delta m_i$ (%)	$\varepsilon_i$ (mm/m)	$\Delta m_i$ (%)
MREF	-5.734±0.037	-3.23±0.654	-14.93±0.755	-3.78±0.066
MBC15	0.028±0.006	-1.77±0.007	0.06±0.034	-2.76±0.346

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

#### 4.3.4. Condutividade térmica

A Tabela 13 apresenta os resultados da condutividade térmica das argamassas. Observa-se um aumento de 30,61% em MBC15 em comparação com MREF, os valores de condutividade térmica obtidos são maiores que 0,15 W/m.K, estando em conformidade com a norma NBR ISO 10456 (ABNT, 2022). No estado fresco, MBC15 tinha mais ar incorporado do que MREF. No estado endurecido, MBC15 mostrou menor porosidade. Isso pode indicar que BCNF contribuiu para o refinamento dos poros, promovendo a hidratação do cimento por mais tempo e formando mais produtos de hidratação. Devido à menor porosidade, a condutividade térmica aumentou para MBC15.

Tabela 13 – Valores de condutividade térmica das argamassas.

MISTURA	Condutividade térmica (W/mK)
MREF	0,49±0,010
MBC15	0,64±0,004

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Becker, Effting e Schackow (2022) relataram valores de condutividade térmica semelhantes quando vermiculita foi adicionada à mistura. Estudos de Sahlol (2021) e Reis, Effting e Schackow (2023) reforçam o potencial de isolamento térmico da nanocelulose quando incorporada à argamassa. No entanto, a condutividade térmica da celulose é influenciada por vários fatores, incluindo temperatura, teor de umidade, índice de vazios e densidade em massa (Abu-Jdayil *et al.*, 2019).

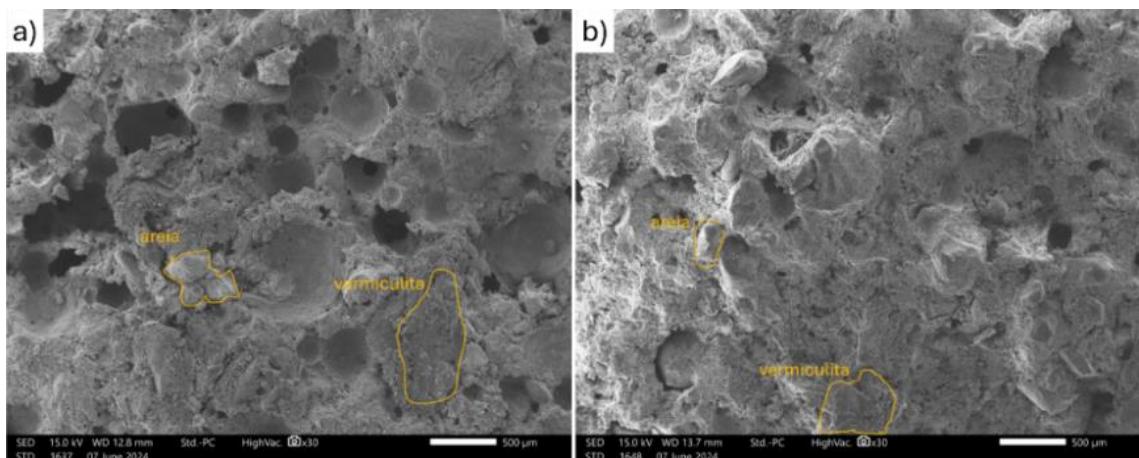
### 4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO – FASE III

#### 4.4.1. Análise microestrutural

As ilustrações apresentadas na Figura 36a e na Figura 36b demonstram a microestrutura das argamassas. A presença de BCNF na argamassa apresenta uma maior resistência à integridade da superfície da argamassa, resultando em uma microestrutura mais uniforme e menos suscetível a danos causados pelo lixamento, pois a BCNF proporciona maior área de contato superficial, o que fortalece a integridade da superfície (Akhanghi *et al.*, 2020). A

BCNF não só melhora a resistência à abrasão, mas também proporciona uma estrutura interna mais estável e menos suscetível a degradação tornando a argamassa mais eficiente.

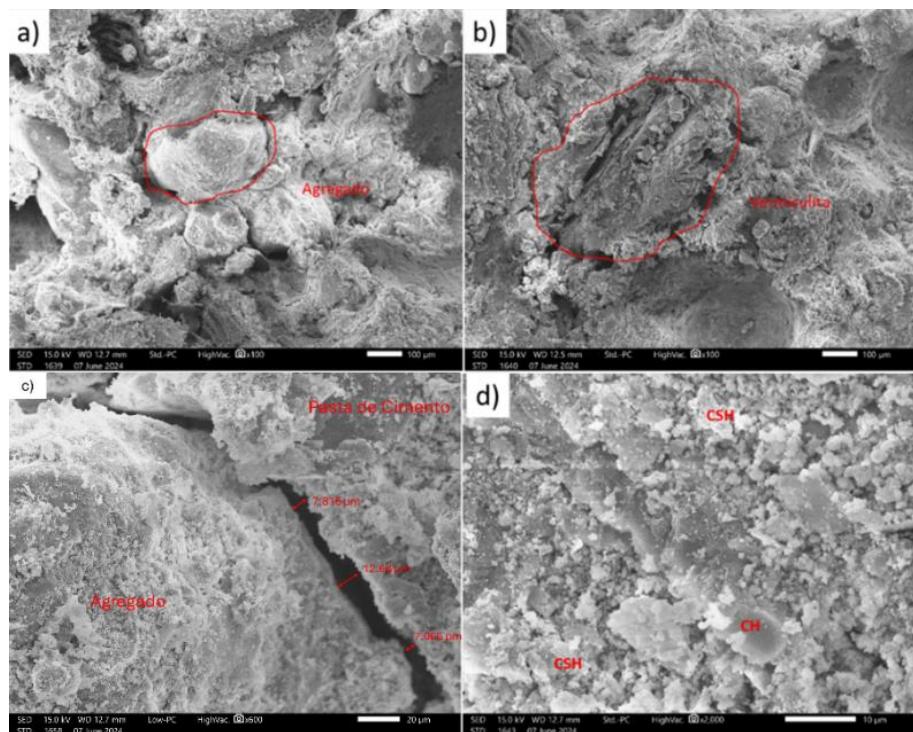
Figura 36 – Microestrutura da argamassa ampliado 30x, a) MREF; b) MBC15.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Figura 37 apresenta a microestrutura da argamassa de referência.

Figura 37 – Microestrutura da MREF: a) interface da areia; b) interface da vermiculita; c) zona de transição entre agregado e pasta de cimento; e d) matriz cimentícia e produtos de hidratação.

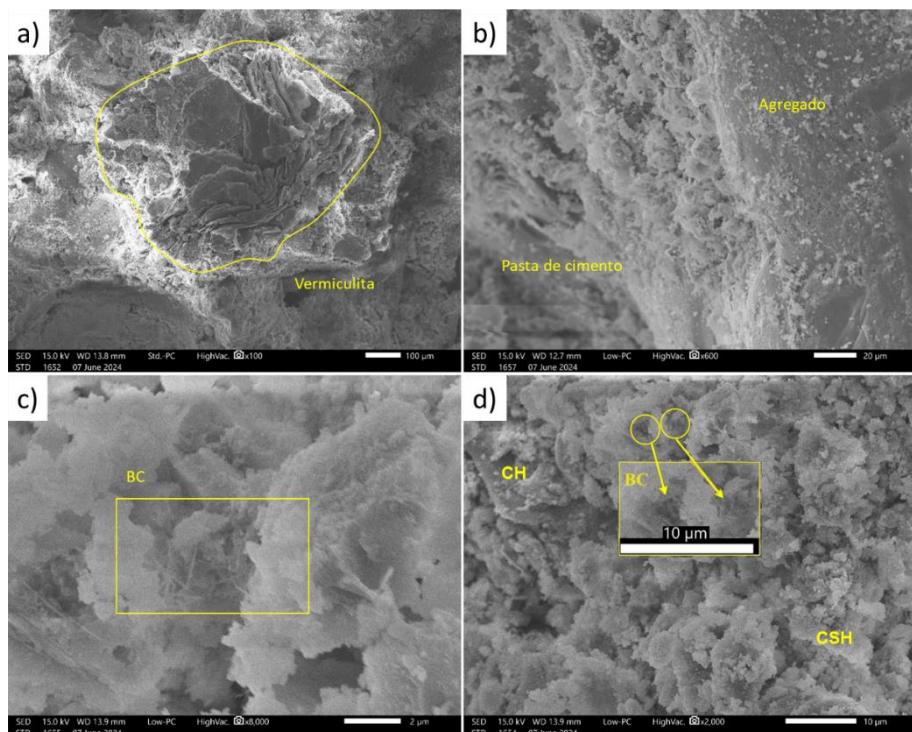


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Figura 37a e Figura 37b observa-se que a microestrutura da MREF apresenta vazios na superfície da argamassa em contato com o agregado e no interior da vermiculita. Na Figura 37c, apresenta uma zona de transição média de 8  $\mu\text{m}$  entre o agregado e a pasta de cimento. Na Figura 37d, é possível observar a formação de CH e CSH na matriz cimentícia, indicando que a argamassa ainda está passando por reações de hidratação do cimento.

A Figura 38 apresenta a microestrutura da argamassa contendo nanocelulose.

Figura 38 – Microestrutura da MBC15, a) interface da argamassa evidenciando a vermiculita; b) zona de transição interfacial da matriz cimentícia; c) aglomerado de nanofibras de BC; e d) produtos de hidratação e aglomerado de BC.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Figura 38a apresenta a microestrutura da MBC15 no qual podem ser visualizados menos poros em comparação à mistura MREF, isso se dá devido à aceleração do processo de hidratação do cimento pela presença da nanocelulose, resultando no preenchimento dos vazios com produtos de hidratação, formando uma microestrutura mais densa (Balea *et al.*, 2019). Por essa razão, não são observadas lamelas vazias na vermiculita. A Figura 38b apresenta a interface entre o agregado e a matriz de cimento, mostrando que há

ancoragem entre as nanofibras de celulose e a matriz de cimento. Isso provoca a retenção de nanofissuras e a diminuição da zona de transição (Akhlaghi *et al.*, 2020).

Na Figura 38c, é possível observar um emaranhado de nanopartículas de celulose na argamassa. Devido à idade da argamassa, a formação de etringita tardia foi descartada, já que não foi visualizada na argamassa de controle. O tamanho das fibras (conforme mostrado na Figura 27) também suporta a indicação de que se trata de nanocelulose. Akhlaghi *et al.* (2020) indicam que as nanofibras podem se dispersar por toda a matriz cimentícia.

Na Figura 38d, observa-se uma maior formação dos produtos da hidratação do cimento em comparação à MREF, contendo mais CSH, pois a celulose adere às partículas de cimento, acelerando a hidratação devido as suas propriedades hidrofílicas e a estabilização estérica do aditivo superplastificante. A porosidade total é reduzida e uma matriz mais densificada é formada nas pastas de cimento. A baixa concentração de celulose na mistura promove partículas livres na água, fornecendo reação de hidratação e aumentando o efeito de reforço (Whitana *et al.*, 2024; Bai *et al.*, 2023).

No entanto, devido à eficácia do método de dispersão e à combinação com o superplastificante, foi identificado apenas um aglomerado de partículas. Esse agrupamento de nanofibras na estrutura da argamassa de cimento tende a prejudicar o desempenho mecânico dos compósitos cimentícios. É importante destacar que foi difícil encontrar o emaranhado também devido à pequena quantidade de BCNF adicionada à mistura. A nanocelulose reduziu a zona de transição e os vazios na microestrutura, densificou a matriz cimentícia e aumentou os produtos de hidratação do cimento.

## 5 CONCLUSÕES

A adição de celulose bacteriana nanofibrilada (BCNF) à argamassa mostrou resultados promissores em relação ao comportamento reológico e ao desempenho tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Na estruturação da argamassa, MBC15 apresentou uma tendência de aumento da tensão de escoamento, demonstrando estabilidade, e menor viscosidade, indicando melhor trabalhabilidade. A adição de BCNF aumentou a fluidez da argamassa. Em relação à resistência à flexão, não houve influência significativa. Embora a resistência à compressão tenha sido menor para as argamassas com BCNF em comparação com MREF, ela aumentou nas misturas à medida que o teor de BCNF aumentou. A BCNF reduziu a densidade da argamassa fresca e aumentou o conteúdo de ar incorporado. Os tempos de início e final de pega foram aumentados com a adição de BCNF, sendo o tempo de início mais atrasado do que o tempo final de pega. Não houve diferença significativa na resistência ao cisalhamento. A BCNF reduziu a absorção de água e o índice de vazios, além de controlar o encolhimento linear e a perda de massa.

A BCNF reduziu os vazios na microestrutura, densificou a matriz cimentícia e aumentou os produtos de hidratação do cimento. A BCNF teve uma influência maior no estado fresco da argamassa devido às suas propriedades hidrofílicas. Inicialmente, a BCNF forma uma barreira que impede a entrada de água nos grãos anidros, atrasando assim a hidratação. Após a maior parte da hidratação ter ocorrido, a BCNF parece atuar como um caminho para a água penetrar ainda mais nos grãos anidros e formar mais produtos de hidratação, melhorando a homogeneidade da microestrutura e as propriedades mecânicas. No entanto, quando a BCNF se aglomera devido à dispersão ineficiente, sua capacidade de melhorar propriedades, como a resistência à compressão, pode ser reduzida. Considerando que a resistência à compressão não é um parâmetro fundamental para argamassas de revestimento, deve-se ter uma atenção especial à dispersão da BCNF.

## 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.
- AKHLAGHI, Mohammad Amir, *et al.* Application of bacterial nanocellulose fibers as reinforcement in cement composites. **Construction and Building Materials**. Volume 241, 2020, 118061, ISSN 0950-0618.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118061>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C191-21**. Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle; 2021.
- \_\_\_\_\_. **C1749-17s**. Standard Guide for Measurement of the Rheological Properties of Hydraulic Cementitious Paste Using a Rotational Rheometer. West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- \_\_\_\_\_. **C270-19**, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
- \_\_\_\_\_. **C331-17**: Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units, West Conshohocken, 2017.
- \_\_\_\_\_. **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
- ANJU, T. R.; RAMAMURTHY, K.; DHAMODHARAN, R. Surface modified microcrystalline cellulose from cotton as a potential mineral admixture in cement mortar composite. **Cement and Concrete Composites**, v. 74, p. 147-153, 2016.
- ANTONIO, Regina Vasconsellos *et al.* Produção de celulose bacteriana a partir de diferentes substratos. **Revista Técnico-Científica do IFSC**, p. 176-176, 2012.
- 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**, v. 256, p. 120350, 2020.
- ARAÚJO, D. de L.; CÂNDIDO, É. da S. Painel pré-moldado de argamassa armada com vermiculita expandida e reforçado com fibras de vidro. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. [S.I.], v. 10, n.3, set. 2015.
- ARENAS, C.; LEIVA, C.; VILCHES, L. F.; GONZÁLEZ GANSO, J. A.. Approaching a methodology for the development of multilayer sound absorbing device recycling coal bottom ash. **Applied Acoustics**, v. 115, p. 81- 87, 2017.

ANDRADE, Fábia Kamilly Gomes de et al. **Influência da nanotecnologia e dos agregados leves em argamassas cimentícias: uma análise experimental das propriedades físicas, mecânicas e acústica.** 2022.

ARRUDA FILHO, N. T.; DANTAS, C. P.; LEAL, A. F.; BARBOSA, N. P.; SILVA, C. G.; ALEXANDRE, M. V.. Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 894- 902, 2012.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 10456**. Materiais e produtos de construção — Propriedades higrotérmicas — Valores e procedimentos de projeto tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto, Rio de Janeiro, 2022.

\_\_\_\_\_. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral Terminologia. Rio de Janeiro, 1990.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

\_\_\_\_\_. **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 13281-1**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2023.

\_\_\_\_\_. **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 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 15575:** Edificações habitacionais - desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 16606:** Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **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 composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

BALEA, Ana *et al.* Nanocelluloses: Natural-based materials for fiber-reinforced cement composites. A critical review. **Polymers**, v. 11, n. 3, p. 518, 2019.

BAI, Shuai *et al.* Effect of nanocellulose on early hydration and microstructure of cement paste under low and high water-cement ratios. **Construction and Building Materials**, v. 409, p. 133963, 2023.

BANFILL, P. F. G. Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2955-2960, 2011.

BANFILL, Phillip Frank Gower. The rheology of fresh mortar-a review. In: **6th Brazilian and 1st International Symposium on Mortar Technology**. 2005.

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh mortar. Magazine of Concrete Research**, 43 (154), p 13 – 21, 1991

BARROCA, Paula Alexandra Gil. **Comportamento reológico e mecânico de argamassas com agregados leves**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior (Portugal).

BARNES *et al.* (1989) - **An Introduction to Rheology**, Holanda, Elsevier, cap.2, pp.16.

BARNES, H.A. **Thixotropy – a review**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Volume 70, Issues 1-2, May 1997, Pages 1 – 33.

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

BARSHAN, Saeedeh *et al.* Optimization and characterization of bacterial cellulose produced by *Komagatacibacter xylinus* PTCC 1734 using vinasse as a cheap cultivation medium. **International journal of biological macromolecules**, v. 136, p. 1188-1195, 2019.

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.

BESEN,D.W.; DA SILVA, R.L.M. **Tecnologias inovadoras e sustentabilidade na construção civil: um estudo de caso em Santa Catarina, SC**. Engenharia Civil-Pedra Branca, 2017.

BONEN, D; SHAH, S.P. Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete. **Progress in Structural Engineering and Materials**, Volume 7, Issue 1, January/March 2005, pages 14–26.

BORGES, P. H. R. *et al.* Geopolymer Concrete With Recycled glass: an alternative material for prefabricated elements. In: IAHS WORLD CONGRESS ON HOUSING SCIENCE, 38., Istanbul, 2012. **Proceedings...** Istanbul: Istanbul Technical University, 2012

BRANCO, F. G.; GODINHO, L.. On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission. **Construction and Building Materials**, v. 45, p.184-191, Abr. 2013.

Brasil minérios (2023). <https://www.brasilminerios.com.br/>

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. Pearson Prentice Hall, 2<sup>a</sup> Ed, São Paulo, 2008

CABRAL, Marllo Victor Soares. **Soluções aquosas de celulose microcristalina tratada superficialmente (TMCC) para desenvolvimento de compósitos cimentícios com melhor desempenho mecânico**. 2020.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.

CAO, Yizheng *et al.* **The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste.** Cement and Concrete Composites, v. 56, p. 73-83, 2015.

Cappellari M, Daubresse A, Chaouche M (2013) Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: relationship with water-retention. **Constr Build Mater** 38:950–961

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.

CARDOSO, A. A.; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.. Argamassas produzidas a partir de materiais não convencionais: uma revisão sistemática. In: 4º Encontro em Engenharia de Edificações e Ambiental, Cuiabá, 2016. **Anais...** Cuiabá: EEEA, 2016.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento - Manual de utilização.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, v. 1, p. 1-29, 2010, ISSN 0103-9830.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 6. International Symposium on Mortars Technology, 1. 2005. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBTA, 2005, p. 121-143.

CATAI, Rodrigo Eduardo; PENTEADO, André Padilha; DALBELLO, Paula Ferrareto. **Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico.** In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 2006. p. 4205-4216.

CAVANI, Gilberto R.; ANTUNES, Rubiane PN; JOHN, Vanderley Moacyr. Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas mistas. **Anais**, 1997.

CESTARI, D. J. - **Adição do copolímero acetato versatato em argamassa de revestimento**, Trabalho de graduação da Faculdade de Engenharia e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Bauru, 1997.

CHEN, Y. *et al.* Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance. **Construction and Building Materials**, Vol. 296, p. 123624, 2021.

CHEN, Y.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 839 – 851, Set. 2017.

CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C., CASCUDO, H. C., - **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**, São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995.

CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus-Propriedades relevantes. **Cerâmica**, v. 60, p. 69-76, 2014.

CMN - **COMITÊ MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO** - NM 137:97 - Argamassa e Concreto - Água para Amassamento e Cura e Argamassa e Concreto de Cimento Portland, CMN, 1997.

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

COUSSOT, P. **Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials: applications in industry and environment**. John Wiley & Sons INC, Hoboken, New Jersey, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. **Técnicas experimentais para estudo da microestrutura**. In: ISAIA, G. C. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed., São Paulo: IBRACON, 2010, p. 402-430.

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.

De Amorim, J.D.P.; de Souza, K.C.; Duarte, C.R.; Duarte, I.d.; Ribeiro, F.d.A.S.; Silva, G.S.; de Farias, P.M.A.; Stingl, A.; Costa, A.F.S.; Vinhas, G.M. Plant and bacterial nanocellulose: Production, properties and applications in medicine, food, cosmetics, electronics and engineering. A review. **Environ. Chem. Lett.** **2020**, 18, 851–869.

DE BRITO ALVES, Genoilson et al. BIOSSÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE CELULOSE BACTERIANA PROVENIENTE DO CHÁ DE KOMBUCHA. **Periódico Tchê Química**, v. 16, n. 32, 2019.

DE LARRARD, F.; FERRARIS, C.F.; SEDRAN, T. **Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material**. **Materials and Structures**, Volume 31, 1998, pg 494-498.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. **Mixture-proportioning of high-performance concrete**. **Cement and Concrete Research**, Volume 32, 2002, Pages 1699–1704

DE OLIVEIRA, Marilia P. et al. Gypsum-based composites with EVA waste and vermiculite/Compositos a base de gesso com resíduos de EVA e vermiculita. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 6, p. 684-690, 2012.

DE SOUZA FILHO, Aloysio Gomes. **Estudo da influência da utilização de celulose microcristalina (MCC) e fibras de sisal como reforço multiescala de compósitos cimentícios.** 2020. Tese de Doutorado. Universidade do Minho (Portugal).

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores.** EdiPUCRS, 2007.

DIPROTEC. Produtos técnicos para construção. Disponível: <https://www.diprotec.com.br/produto/aglomerantes/#:~:text=Os%20aglomerante,s%20%C3%A3o%20materiais%20com,um%20corpo%20s%C3%B3lido%20e%20coeso> Acesso em: 25/06/2024.

DONINI, Ígor AN *et al.* Biossíntese e recentes avanços na produção de celulose bacteriana. **Eclética Química**, v. 35, p. 165-178, 2010.

DÓRAME-MIRANDA, RF *et al.* Produção de celulose bacteriana por Gluconacetobacter entanii utilizando casca de noz-pecã como fonte de carbono e sua funcionalização química. **Polímeros de carboidratos**, v. 207, p. 91-99, 2019.

DUARTE, Eden Batista *et al.* **Caracterização de celulose bacteriana obtida a partir de resíduos agroindustriais.** 2012.

E. Cuenca, A. Mezzena, L. Ferrara. Synergy between crystalline admixtures and nano-constituents in enhancing autogenous healing capacity of cementitious composites under cracking and healing cycles in aggressive waters. **Construct Build Mater.**, 266 (2020), p. 121447

EFFTING, C. **Mecânica da fratura aplicada aos materiais duteis e frágeis.** 2004. 247 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

Engecal. (2021). Produtos da empresa. <https://www.engecal.ind.br/produtos/>

ESMAEILKHANIAN, B; KHAYAT, K.H; YIAGIA, A; FEYS, D. **Effects of mix design parameters and rheological properties on dynamic stability of self-consolidating concrete.** Cement and Concrete Composites, Volume 54, November 2014, Pages 21–28

FARIA, M. M.; PALMEIRA, E. M. **Agregados para a construção civil.** In: ISAIA G. C. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Celulose nanofibrilada em compósito de cimento Portland: transformações físico-químicas, microestruturais e análise do potencial de mitigação de reação álcali-agregado Materiais. São Paulo, Instituto Brasil do Concreto, 2010, v.1, p. 483-526.

FARIAS, M. M. et al. Caracterização da reatividade de agregados dos Campos Gerais do estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 2020, Fortaleza. Anais [...] Fortaleza, 2020.

FARIAS, Marcelo Miranda. **Celulose nanofibrilada em compósito de cimento Portland: transformações físico-químicas, microestruturais e análise do potencial de mitigação de reação álcali-agregado.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2023.

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E. Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS). **Materiales de construcción**, v. 62, n. 308, p. 547-566, 2012.

FERRARIS, C. F.; OBLAB, H.; HILLB, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v.31, p. 245–255, 2001.

FERRARIS, C.F. Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**. Volume 104, Number 5, September–October 1999.

FERREIRA NETO, M. F. **Nível de conforto acústico: uma proposta para edifícios residenciais.** 2009, 257f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

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

Gama, M., Dourado, F., Gouveia, RF, & Silva, DP (2018). Celulose bacteriana: um biopolímero versátil para aplicações em curativos. **Microbial Biotechnology**, 11(4), 586-610.

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.

GARCIA, Evelini Lauri Morri; SANCHES, Simone Leticia Raimundini; IGARASHI, Deisy Cristina Correa. Evidenciação dos ativos biológicos nas melhores e maiores empresas do setor de celulose e papel: uma comparação entre empresas abertas e fechadas. **ConTexto-Contabilidade em Texto**, v. 16, n. 32, 2016.

GHOZALI, Muhammad; MELIANA, Yenny; CHALID, Mochamad. Synthesis and characterization of bacterial cellulose by *Acetobacter xylinum* using liquid tapioca waste. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 2131-2134, 2021.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D. **Rheological Lab Testing of Building Formulations**. ConChem Conference, Düsseldorf, 1994

GOMES, P. C. C.; DE ALENCAR, T. F. F.; DA SILVA, N. V.; MORAES, K. A. M.; ÂNGULO, S. C.. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 31 – 46, Jul/Set. 2015.

GONÇALVES, S.R.C. **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos de argamassa – estudo de caso**. 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

GONÇALVES, H. et al. The influence of porogene additives on the properties of mortars used to control the ambient moisture. **Energy and Buildings**, v. 74, p. 61-68, 2014.

GONÇALVES, J., et al. (2019), Cellulose nanofibres (CNF) for sulphate resistance in cement based systems. **Cement and Concrete Composites**. 99:100-111. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.005>

GONÇALVES, J., et al. (2020), Cellulose nanofibres mitigate chloride ion ingress in cement-based systems. **Cement and Concrete Composites**. 114. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103780>

GRAEFF, A. G. ; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da . Análise e comparação das propriedades de aditivos superplastificantes. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 17, 2002. **Anais...** Passo Fundo - RS. CRICTE 2002.

GUILHERME, Deize Daiane Pinto; CABRAL, Kleber Cavalcanti; SOUZA, Wendell Rossine Medeiros de. Estudo do uso de vermiculita expandida nas propriedades mecânicas de argamassas leves. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, p. e-12894, 2020.

GUO, Aofei et al. A review on the application of nanocellulose in cementitious materials. **Nanomaterials**, v. 10, n. 12, p. 2476, 2020.

HAN, Dongyeop; FERRON, Raissa Douglas. Influence of high mixing intensity on rheology, hydration, and microstructure of fresh state cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 84, p. 95-106, 2016.

HARTAMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H. **Aditivos químicos para concretos e cimentos**. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. v.1, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 347-380.

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. 85 206, p. 84-96, maio 2019.

Hu W, Chen S, Yang J, Li Z, Wang H (2014) Functionalized bacterial cellulose derivatives and nanocomposites. **Carbohydr Polym** 101:1043–1060.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8301: Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. Genebra, 1991.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. Ibracon 2007.

ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo F. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. Concreto: Ciência e Tecnologia. 2011.

J. Goncalves, M. El-Bakkari, Y. Boluk, V. Bindiganavile. Cellulose nanofibres (CNF) for sulphate resistance in cement based systems. **Cement Concr. Compos.**, 99 (2019), pp. 100-111.

JIAO, Dengwu *et al.* Thixotropic structural build-up of cement-based materials: A state-of-the-art review. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, p. 104152, 2021.

KAWATRA, S. Komar; BAKSHI, A. K.; MILLER JR, T. E. Rheological characterization of mineral suspensions using a vibrating sphere and a rotational viscometer. **International Journal of Mineral Processing**, v. 44, p. 155-165, 1996.

KHANDELWAL, Mudrika; WINDLE, Alan H.; HESSLER, Nadine. In situ tunability of bacteria produced cellulose by additives in the culture media. **Revista de Ciência de Materiais** , v. 4839-4844, 2016.

KELESSIDIS V.C., MAGLIONE R., TSAMANTAKI C., ASPIRTAKIS Y. Optimal determination of rheological parameters for Herschel-Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling- **Journal of Petroleum Science and Engineering** 53: 203-224, 2006.

KESHK, S. M. Bacterial Cellulose Production and its Industrial Applications. **Journal of Bioprocessing & Biotechniques**, v. 04, n. 02, p. 1–10, 2014.

KIM, Ji-Su; LIM, Jae-Hong; STEPHAN, Dietmar; PARK, Kyoungsoo; HAN, TongSeok. 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.

KIZILTAS, Esra Erbas; KIZILTAS, Alper; BOLLIN, Shannon C.; GARDNER, Douglas J. Synthesis of bacterial cellulose using hot water extracted wood sugars. **Carbohydrate polymers**, v. 124, p. 131-138, 2015.

KOEHLER, E. P.; FOWLER D. W. **Summary of concrete workability test methods**. ICAR Report 105.1 International Center of Aggregates Research, Austin, 2003.

KOKSAL, Fuat; GENCEL, Osman; KAYA, Mehmet. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 88, p. 175-187, 2015.

KOLOUR, Hosain Haddad *et al.* An investigation on the effects of cellulose nanofibrils on the performance of cement paste and concrete. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 7, n. 1, p. 463-478, 2018.

KUROIWA, Emika; QUY, Nguyen Xuan; HAMA, Yukio. Influence of Nanofibrillated Bacterial Cellulose on the Properties of Ordinary and Expansive Mortars. **Materials**, v. 15, n. 6, p. 2094, 2022.

L. Jiao, *et al.* Natural cellulose nanofibers as sustainable enhancers in construction cement **PLoS One**, 11 (2016).

LI, Zhi-yu *et al.* Mechanism of Cr (VI) removal by polyphenols-rich bacterial cellulose gel produced from fermented wine pomace. *npj Clean Water*, v. 7, n. 1, p. 21, 2024

T. Liang, H. Wang, Y. Shu, S. Khan, C. Li, Z. Zhang, An intelligent film based on self-assembly of funoran and Ophiopogon japonicus seed anthocyanins and its application in monitoring protein rich food freshness, (2024).  
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110300>

Liang, L., Zhang, X., Liu, Q. *et al.* **Nanofibrilas de celulose para melhoria de desempenho de compósitos cimentícios de ultra-alta ductilidade**. Celulose 29 , 1705–1725 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04421-z>

LIMA, Alexandre. O papel dos impedimentos espaciais na Química Inorgânica. **NOIC**, 2019.

Lin, SP, Calvaruso, C., & Hsieh, YL (2013). A produção de celulose bacteriana a partir de lodo de fibras residuais. **BioResources**, 8(3), 4563-4571

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.

LIU, Xu *et al.* Fibras nanométricas dispersas a partir de celulose bacteriana enxertada com quitosana. **Polímeros de carboidratos**, v. 214, p. 311-316, 2019.

LOMBOY, Gilson R.; WANG, Xuhao; WANG, Kejin. Rheological behavior and formwork pressure of SCC, SFSCC, and NC mixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 54, p. 110-116, 2014.

LONG, Wu-Jian *et al.* Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118054, 2019.

MARTIN, J. F. Matias. **Aditivos para Concreto**. In: ISAIA, G.C. (Ed). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON. pp. 382-406. 2007.

MATTANA, Alécio Júnior *et al.* Influência dos constituintes do revestimento de argamassa sobre as suas propriedades reológicas. **Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias-ATIVIDADES ENCERRADAS**, v. 19, n. 1, p. 33-33, 2013.

MATOS, Paulo Ricardo de *et al.* **Estudo do uso de resíduo do polimento de porcelanato em concreto autoadensável**. 2019.

MC-Bauchemie. (2023). Ficha técnica Centripor 420. [https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas\\_tecnicas/Centripor%20420.pdf](https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/Centripor%20420.pdf)

MC-Bauchemie. (2023). Ficha técnica MC-PowerFlow 4001. [https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas\\_tecnicas/MC-PowerFlow%204001.pdf](https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/MC-PowerFlow%204001.pdf)

MC-Bauchemie (2024). Pasta de Argamassas Eslabilizadas, PowerMIX. [https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/Brasil/Downloads/Folder%20Argamassa%20Eslabilizada\\_web.pdf](https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/Brasil/Downloads/Folder%20Argamassa%20Eslabilizada_web.pdf)

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo JM; CARMONA FILHO, Antônio. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Pini, 1994.

MEJDOUN, Roukaya *et al.* Nanofibrillated cellulose as nanoreinforcement in Portland cement: Thermal, mechanical and microstructural properties. **Journal of Composite Materials**, v. 51, n. 17, p. 2491-2503, 2017.

MEIRELLES, J. R; LIBARDI, J; BALDO, J. B. O efeito da redosagem de superplastificante no abatimento de pastas de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 43. Florianópolis, 1999. **Anais...**

MENDES, Allana Ribeiro; VANDERLEI, Romel Dias; BASSO, Matheus Augusto. Análise do processo de dispersão da nanocelulose cristalina para a produção de compósitos cimentícios. **Ambiente Construído**, v. 23, p. 183-196, 2022.

MO, Kim Hung *et al.* Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 302-306, 2018.

MOHAMMADKAZEMI, Faranak et al. Manufacturing of bacterial nano-cellulose reinforced fiber– cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 958-964, 2015.

Mondal, S. *Nanocompósitos de polímero reforçado com nanocelulose para embalagens sustentáveis de alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos, nanocelulose sustentável e nanohidrogéis de fontes naturais* ; Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2020; pp. 237–253.

MONTES, F. et al. Rheological impact of using cellulose nanocrystals (CNC) in cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117497, 2020. NASIR, M. et al. **11. Nanocellulose: preparation methods and applications**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2017.

MOON, RJ; SCHUENEMAN, GT; SIMONSEN, J. Visão geral dos nanomateriais de celulose, suas capacidades e aplicações. **J. Ocupar. Med.**, v. 68, p. 9, 2016.

MORÁN, Juan I. et al. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. **Cellulose**, v. 15, p. 149-159, 2008.

MORAVIA, W. G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida**. 2007. 187f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MORADIKHOU, Amir Bahador; ESPARHAM, Alireza; AVANAKI, Mohammad Jamshidi. Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymers concrete. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118965, 2020.

MORSY, M. S.; AGLAN, H. A. Development and characterization of nanostructured-perlite-cementitious surface compounds. **Journal of materials science**, v. 42, p. 10188-10195, 2007.

Muhammad, U.F.; Majid, A. Contribution of plant fibers in improving the behavior and capacity of reinforced concrete for structural applications. **Constr. Build. Mater.** **2018**, 182, 94–107

Nações Unidas do Brasil. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. **Indústria, inovação e infraestrutura**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/9> Acessado dia 25 de julho de 2024.

Nanobiocell (2023). <https://www.nanobiocell.com.br/>

NARAGANTI, S. R.; PANNEM, R. M. R.; PUTTA, J. Impact resistance of hybrid fibre reinforced concrete containing sisal fibres. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 10, n. 2, p. 297-305, 2019.

NEHDI, M.; RAHMAN, M.-A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 11, p. 1993-2007, 2004.

- NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. London: Longman, 1995.
- NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013.
- NGUYEN, V.H; REMOND, S; GALLIAS, J.L. Influence of cement grouts composition on the rheological behavior. **Cement and Concrete Research**, Volume 41, Issue 3, March 2011, Pages 292–300
- NICOLINI, A. *et al.* Rheological behavior of fresh latex polymeric mortar by squeeze-flow technique. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 267, p. 121175, 2021.
- OGEDA, Thais Lucy; PETRI, Denise FS. **Hidrólise enzimática de biomassa**. Química nova, v. 33, p. 1549-1558, 2010.
- OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Fazendo Arte Editorial, 2000. 195 p
- OLIVEIRA, R. L. *et al.* Síntese e Caracterização da Celulose Microcristalina a partir da Celulose Bacteriana. In: **VII Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria**, São Pedro (SP), 2010.
- PACHECO, F.; KRUMENAUER, M.; DE MEDEIROS, D. R.; OLIVEIRA, M. F.; TUTIKIAN, B. F. F.. Development of lightweight concrete subfloor with ethylene vinyl acetate (EVA) aggregates waste to reduce impact sound in flooring system. **DYNA**, v. 84 (201), p. 290 – 295, 2017.
- PAIDOSZ, Maria Fernanda. **Efeitos da adição de celulose nanofibrilada em argamassas e pastas de cimento portland e sua influência no ataque externo por sulfatos**. 2023.
- PEREIRA, E., BARROS, J., CAMÕES, A., **Betão Autocompactável Reforçado com Fibras de Aço. Método de concepção e propriedades mecânicas**. Técnica. Maio, 2004
- Perrin, L.; Gillet, G.; Gressin, L.; Desobry, S. Interesse em Emulsões Pickering para Micro/Nanocelulose Sustentável em Aplicações Alimentares e Cosméticas. **Polímeros 2020** , 12 , 2385.
- PETIT, J.Y; WIRQUIN, E; VANHOVE, Y; KHAYAT, K. **Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete**. Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 5, May 2007, Pages 655–670.
- PILEGGI, R.G. *et al.*, Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimento de argamassas. e-Mat - **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil** Vol. 3, n. 2, p. 62-76, Novembro 2006.

PILEGGI, R.G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. São Carlos, 2001. 187p Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

PINTO, C. F. **Em busca de uma arquitetura sustentável: o uso de fontes alternativas de energia**. 2009. 224f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PINTO, Dayane Rodrigues. **Celulose bacteriana: biossíntese e aplicações**. 2021.

RAHMAN, M. K.; BALUCH, M. H.; MALIK, M. A. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. **Construction and building materials**, v. 50, p. 710-717, 2014.

Ramakrishna, G.; Sundararajan, T. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. **Cem. Concr. Compos.** 2005, 27, 575–582.

Rayssa Renovato dos REIS, Carmeane EFFTING, e Adilson SCHACKOW. Cellulose nanofibrils on lightweight mortars for improvement of the performance of cement systems. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, Volume 5, 2023.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Conhecendo argamassa**. Editora da PUCRS, 2023.

REIS, E. **Vermiculita no Brasil – Situação Atual**. Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT)/ Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE): 2002. p.1-19

REPETTE, W.L. **Concreto autoadensável**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. Editor Geraldo C. Isaia. Volume I, Pg 1769-1806. IBRACON. 2011.

RIBEIRO, Daniel Véras. Princípios da Ciência dos Materiais Cimentícios: Produção, Reações, Aplicações e Avanços Tecnológicos. **Editora Appris**, 2021.

RIBEIRO, R.A., SILVA L.M., FERREIRA, V.M., LABRINCHA, J.A. **Estudo da Influência de Cargas Leves nas Propriedades de uma Argamassa Bastarda**. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, 2005.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; FARIAS, Lidianne do Nascimento; SIQUIERA, Thais Pinto Lobo. Nanofibras de celulose (NFC) como reforço de matrizes cimentícias: revisão sistemática da literatura. **Revista ALCONPAT**, v. 12, n. 3, p. 311-327, 2022.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H; SILVA, F. B.; CARDOSO, F. A.; BARROS, M. M. S. B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, M. V. Sensibilidade de

argamassas de revestimento ao procedimento de mistura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 8, 2009, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBTA, 2009.

Romildo, D.T.F.; Karen, S.; George, L.E.; Khosrow, G. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cem. Concr. Compos.** 2000, 22, 127–143.

ROSSIGNOLO, João Adriano. AGNESINI, Marcos V. C. Concreto Estrutural Leve. In: INSTITUTO BRASILEITO DE CONCRETO. **Concreto: Ensaio, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

RUKA, Dianne R.; SIMON, George P.; DEAN, Katherine M. Alterando as condições de crescimento de *Gluconacetobacter xylinus* para maximizar o rendimento de celulose bacteriana. **Polímeros de carboidratos**, v. 89, n. 2, pág. 613-622, 2012.

S. Parveen, S. Rana, R. Fangueiro, M.C. Paiva. A novel approach of developing micro crystalline cellulose reinforced cementitious composites with enhanced microstructure and mechanical performance. **Cement Concr. Compos.**, 78 (2017).

SAAK, Aaron W.; JENNINGS, Hamlin M.; SHAH, Surendra P. New methodology for designing self-compacting concrete. **Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 429-439, 2001.

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.

SAFANELLI, Nicollas *et al.* Efeito Da Adição De Nanocelulose Na Reologia De Pastas De Cimento Com E Sem Superplasticificante. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO CIMENTO**, v. 1, p. 1-5, 2023.

SANTOS, S. F.; TEIXEIRA, R. S.; SAVASTANO JUNIOR, H. Interfacial transition zone between lignocellulosic fiber and matrix in cement-based composites. London: **Woodhead Publishing**, 2017.

SANTOS, W. J. dos; ALVARENGA, R. de C. S. S.; PEDROTI, L. G.; SILVA, R. C. da; FREIRE, A. S.; MORAES, B. A. de; CARVALHO, C. C. Proposta de método de dosagem para argamassas de revestimento com areia artificial de britagem. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 225-243, jan./mar. 2018.

SAYADI, A. A.; TAPIA, J. V.; NEITZERT, T. R.; CLIFTON, G. C.. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 112, n. 1, p. 716-724, 2016.

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.

SCHACKOW, Adilson *et al.* Análisis de la transmitancia térmica de las paredes y coberturas para construcciones utilizando hormigón ligero con vermiculita y EPS. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, p. 65-80, 2019.

SCHACKOW, Adilson *et al.* **Efeito das características pozolânicas de rejeitos de tijolos nas propriedades de argamassas**. 2015. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Tecnológicas-CCT. Joinville.

SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida *et al.* **Estudo de concreto autoadensável contendo fíler de britagem: características das partículas, floculação e reologia**. 2017.

Serpa, A.; Velásquez-Cock, J.; Gañán, P.; Castro, C.; Vélez, L.; Zuluaga, R. Nanocelulose vegetal na ciência dos alimentos: uma revisão. **Hidrocolagem Alimentar**. 2016 , 57 , 178–186.

SHEN, Wenkai *et al.* Change in fresh properties of high-strength concrete due to pumping. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124069, 2021.

SHEN, Wenkai *et al.* Influence of pumping on the resistivity evolution of high-strength concrete and its relation to the rheology. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124095, 2021.

Shezad O, Khan S, Khan T, Park J (2010) Physicochemical and mechanical characterization of bacterial cellulose produced with an excellent productivity in static conditions using a simple fed-batch cultivation strategy. **Carbohydr Polym** 82(1):173–180.

SILVA, L. M., RIBEIRO, R. A., LABRINCHA, J. A., FERREIRA, V. M. (2010). "Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar." **Cement and Concrete Composites** 32(1): 19-24.

SILVA, Narciso Gonçalves da. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006.

SINHORELLI, Kássia dos Santos *et al.* **Estudo das propriedades reológicas e térmicas das argamassas de revestimento contendo adições minerais e vermiculita**. 2019.

SOUSA J. G., BAUER E. – Estudo da Reologia das argamassas de revestimento no estado fresco, **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Brasil, Natal, 2002.

SOUZA, Nathaly Santana Leal de *et al.* Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduo de corte de pedras ornamentais (granitos e mármores) e argila. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.

SOUZA, S. **Obtenção de nanofibras de curauá e aplicação como reforço em compósitos baseados em pva**. Dissertação (mestrado), Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Bocatu, São Paulo, 2010.

TEIXEIRA, M. (2013) - **Estudo reológico de caldas hidráulicas para utilização na reabilitação da edificação**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

TEODORO Luisa; PARABOCZ, Cristiane Regina Budziak; ROCHA, Raquel Dalla Costa da. **Caracterização da argila vermiculita expandida avaliação dos padrões físico químicos e mineralógicos para aplicação como adsorvente**. Matéria (Rio de Janeiro), v 25 2020

ThermoFisher, Scientific. Energy dispersive X-ray spectroscopy elemental mapping for reliable chemical characterization. **MATERIALS SCIENCE**. 2023. <https://www.thermofisher.com/br/en/home/materials-science/eds-technology.html>

TIBOLLA, H. **Produção de nanofibras de celulose por hidrólise enzimática**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP, 2014.

TRIGO, T. M. P. da M. dos S. **Caracterização e avaliação de argamassas de reboco e camada de base com ligante PC e CSA**. 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Técnico Lisboa, Lisboa, 2014.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Florianópolis, 1995. 197p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

TUTIKIAN, B. F.; ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P. de; OLIVEIRA, M. F. de. Uso de agregado leve de EVA em contrapiso argamassado para isolamento ao ruído de impacto em edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 295-306, jul./set. 2017.

UGARTE, J. F. de O., *et al.* (2004) — **Comparação Estatística do Fator de Expansão de Concentrado de Vermiculita**, CETEM/MCT, 8p.

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

VIEIRA, Júlia Graciele. **Produção da metilcelulose a partir da celulose do bagaço de cana-de-açúcar usando dois agentes metilantes: sulfato de dimetila e iodometano, para aplicação como aditivo na formulação de**

**argamassas.** 2012. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

Vieira, M. R. - **Betão auto-compactável: Reologia do betão no estado fresco**, PhD, IST, 2008.

VOICU, Georgeta et al. Improvement of silicate cement properties with bacterial cellulose powder addition for applications in dentistry. **Carbohydrate polymers**, v. 174, p. 160-170, 2017.

WALLEVIK, O.H; WALLEVIK, J.E. **Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes**. Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 12, December 2011, Pages 1279–1288

WALLEVIK, O.H; FEYS, D; WALLEVIK, J.E; LHAYAT, K.H. **Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials**. Cement and Concrete Research, Volume 78, Part A, December 2015, Pages 100–109

WANG, K; SHAH, S.P; TAYLOR, P; GROVE, J; WIEGAND, P; STEFFES, R; et al. **Self-consolidating concrete-applications for slip-form paving: phase II**. National Concrete Pavement Technology Center, Institute of Transportation, Iowa State University; 2011.

WITHANA, H.; RAWAT, S.; ZHANG, Y. X. Effect of Nanocellulose on Mechanical Properties of Cementitious Composites—A Review. **Advanced Nanocomposites**, 2024.

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>.

X. Sun, Q. Wu, S. Lee, Y. Qing, Y. Wu. Cellulose nanofibers as a modifier for rheology, curing and mechanical performance of oil well cement. **Sci. Rep.**, 6 (2016)

XU J, CHU H, XU Y, et al. **Prediction of compressive strength and elastic modulus of expanded polystyrene lightweight concrete**. Mag Concr Res. 2015;67(17):1–9

YAHIA, A. **Effect of solid concentration and shear rate on shear-thickening response of high-performance cement suspensions**. Construction and Building Materials, Volume 53, February 2014, Pages 517–521.

Z. Tang, et al. Influence of cellulose nanoparticles on rheological behavior of oilwell cement-water slurries. **Materials**, 12 (2) (2019).



## Assinaturas do documento



Código para verificação: **F2K62Z9R**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:



**CARMEANE EFFTING** (CPF: 791.XXX.259-XX) em 28/08/2024 às 13:55:32

Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:40:14 e válido até 30/03/2118 - 12:40:14.

(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTIwMjJfMDAwMzY5OTVfMzcwMzhfMjAyNF9GMks2Mlo5Ug==> ou o site

<https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00036995/2024** e o código **F2K62Z9R** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.