

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÊXTIL**

BEATRIZ KRÜGER

**OBTENÇÃO DE FILAMENTOS DE ALGINATO DE CÁLCIO COM ÓXIDO DE
ZINCO PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS**

Blumenau

2024

BEATRIZ KRÜGER

**OBTENÇÃO DE FILAMENTOS DE ALGINATO DE CÁLCIO COM ÓXIDO DE
ZINCO PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS**

Projeto de final de curso submetido ao curso de Engenharia Têxtil do Centro de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Têxtil.

Orientadora: Prof. Andrea Cristiane Krause Bierhalz.

Dra.

Blumenau

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Krüger, Beatriz

Obtenção de filamentos de alginato de cálcio com óxido de zinco para aplicações biomédicas / Beatriz Krüger ; orientadora, Andrea Cristiane Krause Bierhalz, 2024.

75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Têxteis médicos. 3. Fios de sutura. 4. Fiação a úmido. 5. Alginato. I. Krause Bierhalz, Andrea Cristiane. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. III. Título.

Beatriz Krüger

Obtenção de filamentos de alginato de cálcio com óxido de zinco para aplicações biomédicas

Projeto de final de curso, apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Têxtil.

Blumenau, 24 de junho de 2024.



Documento assinado digitalmente

Grazyella Cristina Oliveira de Aguiar

Data: 27/08/2024 20:20:18-0300

CPF: ***.439.299-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Curso

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

Andrea Cristiane Krause Bierhalz

Data: 27/08/2024 18:11:46-0300

CPF: ***.346.940-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Andrea Cristiane Krause Bierhalz, Dra.

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Fernanda Steffens

Data: 29/08/2024 09:14:46-0300

CPF: ***.009.749-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Fernanda Steffens, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Rita de Cassia Siqueira Curto Valle

Data: 27/08/2024 21:24:16-0300

CPF: ***.303.918-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Rita de Cassia Siqueira Curto Valle, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina.

Dedico esse trabalho aos meus pais, que sempre me ensinaram que a educação e o respeito ao próximo são a chave para abrir todas as portas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois a Ele devem ser dadas toda a honra e glória! Sei que Ele sempre esteve ao meu lado, me abençoando grandemente. É graças a Ele que, ao longo de toda a minha trajetória, encontrei pessoas maravilhosas que, além de me concederem sua amizade, nunca pouparam esforços para me auxiliar no que era necessário.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina por cumprir seu objetivo institucional de fornecer ensino profissional de alto padrão.

Agradeço aos meus pais, Juliane e Sido Krüger, que sempre foram meu maior exemplo e orgulho. A vocês, expressei minha mais profunda gratidão por todo o amor, carinho, apoio e compreensão ao longo de todas as etapas da minha vida. Vocês são a minha maior fonte de inspiração!

Aos meus avós, Lilly e Fridolin Krüger, por todo amor, atenção e cuidado que sempre tiveram comigo e por todo incentivo a minha educação.

À minha querida orientadora, Prof^a. Dr^a. Andrea Cristiane Krause Bierhalz, por todo carinho, pelas valiosas contribuições, pela confiança depositada e pelo apoio constante.

À todos os professores do curso de Engenharia Têxtil, que nunca pouparam esforços para proporcionar o melhor ensino e aprendizado.

À todos os meus amigos, em especial, Alexander Schacht Sasse, Tzu Hsuan Chen e Melissa Aparecida Lada. Cuja amizade e companhia se tornaram essenciais ao longo dessa trajetória. Vocês tornaram meus dias mais leves, alegres e divertidos.

Faço um agradecimento especial a minha amiga, Larissa Klen Aragão. Agradeço pela sua mais sincera amizade e pela parceria que desenvolvemos ao longo desses últimos anos. Você foi uma presença decisiva para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço a todos os pesquisadores do LABMAN por todo auxílio e carinho com que sempre me trataram, em especial a pós-doutoranda, Bruna Porto, que sempre estava à disposição para sanar todas as minhas dúvidas.

Aos técnicos, pesquisadores e colegas de graduação do LEM, que sempre me receberam com muito carinho. Um agradecimento especial ao técnico Daniel Cunha, que auxiliou no desenvolvimento e na compreensão dos testes mecânicos deste projeto;

“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais
voltará ao seu tamanho original.”

- Albert Einstein.

RESUMO

Os fios de sutura absorvíveis são altamente valorizados em diversas aplicações médicas. No entanto, existem poucas alternativas aos fios de origem animal que ofereçam elevada biocompatibilidade e causem baixa reação tecidual. Nesse contexto, polímeros naturais como o alginato, demonstram-se materiais promissores para a criação de fios de sutura, devido suas propriedades de biocompatibilidade e baixa toxicidade. Sua principal limitação, no entanto, são suas propriedades mecânicas, que precisam ser melhoradas para tal aplicação. Nesse contexto, as nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) apresentam-se como um aditivo promissor para a formação de estruturas nanocompósitas, pois além de possibilitar a melhoria das propriedades mecânicas, pode conferir funcionalidades, como atividade antimicrobiana e absorção de radiação ultravioleta. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo a obtenção de filamentos de alginato de cálcio com incorporação de óxido de zinco, pelo método de fiação a úmido, utilizando diferentes concentrações de alginato (2 %, 3 %, e 5 % m/v) e nanopartículas de ZnO (1 %, 2,5 % e 5 %). A pesquisa busca avaliar as propriedades mecânicas, morfológicas, capacidade de absorção, perda de massa, reflectância e atividade antimicrobiana dos filamentos nanocompósitos, além de analisar a influência de diferentes concentrações do plastificante glicerol (5 % e 10 %) nas propriedades mecânicas dos filamentos obtidos. Os resultados apontam um aumento na densidade linear e da tensão de ruptura com o aumento da concentração de alginato. A concentração de 3 % de alginato foi selecionada para a obtenção dos filamentos nanocompósitos com ZnO e todas as proporções resultaram em microestruturas densas e uniformes. Verifica-se que incorporação de ZnO nos filamentos não corrobora para a obtenção de atividade antimicrobiana, entretanto, contribui para uma melhora na resistência mecânica dos fios. A concentração de 2,5 % de ZnO apresenta os melhores resultados, acarretando em um aumento de 21 % na tensão de ruptura dos fios. Essa concentração também apresenta reduções nos ensaios de reflectância, dando indícios de que o fio tem a capacidade de absorver radiação ultravioleta. A presença de ZnO nos filamentos contribui para uma perda de massa mais lenta e não altera expressivamente sua capacidade de absorção. A adição de glicerol favorece o alongamento dos filamentos, permitindo a execução de nós de sutura, mas compromete as propriedades mecânicas dos filamentos, provocando uma redução de mais de 80 % na tensão de ruptura e 96 % no módulo de elasticidade. De modo geral, os resultados são promissores e demonstram que a adição de nanopartículas de ZnO é benéfica para a obtenção de filamentos de alginato com melhores propriedades mecânicas, o que pode favorecer a utilização desse biopolímero em aplicações biomédicas.

Palavras-Chave: Têxteis médicos; Fios de sutura; Fiação a úmido; Alginato; Glicerol.

ABSTRACT

Absorbable sutures are highly valued in various medical applications. However, there are few alternatives to animal yarns that offer high biocompatibility and cause low tissue reaction. In this context, natural polymers such as alginate are promising materials for creating suture threads, due to their biocompatibility properties and low toxicity. Its main limitation, however, is its mechanical properties, which need to be improved for such an application. In this context, zinc oxide (ZnO) nanoparticles present themselves as a promising additive for the formation of nanocomposite structures, as in addition to enabling the improvement of mechanical properties, they can provide functionalities such as antimicrobial activity and absorption of ultraviolet radiation. In view of the above, this work aims to obtain calcium alginate filaments with incorporation of zinc oxide, by the wet spinning method, using different concentrations of alginate (2 %, 3 %, and 5 % m/v) and ZnO nanoparticles (1 %, 2.5 % and 5 %). The research seeks to evaluate the mechanical, morphological properties, absorption capacity, mass loss, reflectance and antimicrobial activity of nanocomposite filaments, in addition to analyzing the influence of different concentrations of the plasticizer glycerol (5 % and 10 %) on the mechanical properties of the filaments obtained. The results indicate an increase in linear density and rupture stress with increasing alginate concentration. A concentration of 3 % alginate was selected to obtain nanocomposite filaments with ZnO and all proportions resulted in dense and uniform microstructures. It is verified that incorporation of ZnO in the filaments does not contribute to obtaining antimicrobial activity, however, it contributes to an improvement in the mechanical resistance of the threads. A concentration of 2.5 % ZnO shows the best results, resulting in a 21 % increase in the breaking voltage of the wires. This concentration also presents reductions in reflectance tests, indicating that the thread has the capacity to absorb ultraviolet radiation. The presence of ZnO in the filaments contributes to a slower mass loss and does not significantly alter its absorption capacity. The addition of glycerol favors the stretching of the filaments, allowing the execution of suture knots, but compromises the mechanical properties of the filaments, causing a reduction of more than 80 % in the rupture tension and 96 % in the elastic modulus. In general, the results are promising and demonstrate that the addition of ZnO nanoparticles is beneficial for obtaining alginate filaments with better mechanical properties, which may favor the use of this biopolymer in biomedical applications.

Keywords: Medical textiles; Suture threads; Wet spinning; Alginate; Glycerol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos fios de sutura.....	24
Figura 2 – Estruturas de blocos G, M e alternado.....	26
Figura 3 – Morfologia das estruturas e aplicações biomédicas do alginato.....	27
Figura 4 – Gelificação do alginato na presença de Ca^+	28
Figura 5 – Mineral zincita.....	29
Figura 6 – Estrutura cristalina do óxido de zinco, denominada wurtzita.....	29
Figura 7 – Ação antimicrobiana do ZnO	30
Figura 8 – Esquema representativo do processo de fiação a úmido (a) industrial, (b) laboratorial com longa permanência no banho de coagulação e (c) laboratorial.....	32
Figura 9 – Fluxograma das etapas 1, 2 e 3 da metodologia de pesquisa.....	34
Figura 10 – Estrutura utilizada para o processo de fiação a úmido verticalizado.....	37
Figura 11 – Estrutura utilizada para a etapa de secagem dos filamentos.....	37
Figura 12 – (A) Nó cirúrgico; (B) Imagem do nó cirúrgico realizado no filamento.....	40
Figura 13 – Esquema representativo do fio com nó posicionado na máquina universal para ensaios de tração, no início do ensaio.....	41
Figura 14 – Gráfico representativo de Tensão <i>versus</i> Deformação.....	42
Figura 15 – Aparato utilizado para medir a reflectância dos fios de alginato com óxido de zinco.....	44
Figura 16 – Aspecto dos filamentos após sua formação.....	46
Figura 17 – Diferença entre os diâmetros dos filamentos com distintas concentrações de alginato.....	47
Figura 18 – Aparato utilizado para a etapa de secagem dos filamentos.....	47
Figura 19 – Aspecto visual dos filamentos de alginato.....	48
Figura 20 – Microscopia eletrônica de varredura dos filamentos de alginato.....	49
Figura 21 – Gráfico das curvas representativas de Tensão <i>versus</i> Deformação para os filamentos com diferentes concentrações de alginato.....	52
Figura 22 – Aspecto dos filamentos contendo 3 % de alginato e 10 % de ZnO	54
Figura 23 – Filamentos contendo 3 % de alginato e 1 % de ZnO , ainda úmidos.....	55
Figura 24 – Aspecto visual dos filamentos de alginato com ZnO	56
Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura dos filamentos de alginato sem e com ZnO	57

Figura 26 – Gráfico das curvas representativas de Tensão <i>versus</i> Deformação para os filamentos de alginato e suas variações com diferentes concentrações de ZnO.....	59
Figura 27 – Imagens em microscópio óptico com um aumento de 100x dos filamentos de alginato após o primeiro teste de perda de massa.....	61
Figura 28 – Resultado do teste difusão de ágar das amostras com 5 % de ZnO, contra <i>E. coli</i> e <i>S. aureus</i>	64
Figura 29 – Curvas de reflectância dos filamentos de alginato sem e com ZnO.....	65
Figura 30 – Diferença de Rigidez entre fios sem (a) e com (b) a adição de plastificante.....	67
Figura 31 – Aspecto visual dos filamentos de alginato com ZnO e glicerol.....	68
Figura 32 – Alongamentos dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO.....	70
Figura 33 – Tensão de Ruptura dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO.....	70
Figura 34 – Força de Ruptura dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO.....	71
Figura 35 – Módulo de elasticidade dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO.....	71
Figura 36 – Gráfico de Tensão <i>versus</i> Deformação para os filamentos de alginato e suas variações com diferentes concentrações de glicerol/ZnO.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Áreas de aplicação dos têxteis técnicos.....	22
Quadro 2 – Classificação dos têxteis médicos.....	23
Quadro 3 – Equipamentos Utilizados.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reagentes para o preparo do FCS convencional.....	35
Tabela 2 – Espessura e densidade linear dos filamentos de alginato.....	50
Tabela 3 – Número cirúrgico dos fios de alginato, obtidos de acordo com a NBR13904.....	50
Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos filamentos com diferentes concentrações de alginato.....	51
Tabela 5 – Correlação entre os testes mecânicos e o Número cirúrgico dos filamentos, segundo a NBR13904.....	53
Tabela 6 – Espessura e densidade linear dos filamentos de alginato sem e com ZnO.....	57
Tabela 7 – Número cirúrgico dos filamentos de alginato sem e com ZnO, de acordo com a NBR 13904.....	58
Tabela 8 – Propriedades mecânicas dos filamentos de alginato sem e com ZnO.....	58
Tabela 9 – Correlação entre os testes mecânicos e o Número cirúrgico dos filamentos, segundo a NBR13904.....	60
Tabela 10 – Perda de massa dos filamentos de Alginato sem e com ZnO.....	62
Tabela 11 – Absorção de fluídos dos filamentos de Alginato sem e com ZnO.....	63
Tabela 12 – Espessura e densidade linear dos filamentos de alginato sem e com ZnO.....	68
Tabela 13 – Número cirúrgico dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO, de acordo com a NBR 13904.....	69
Tabela 14 – Correlação entre os testes mecânicos e o Número cirúrgico dos filamentos, segundo a NBR13904.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
CN	Com Nó
ZnO	Óxido de Zinco
UV	Ultravioleta
FCS	Fluído Corpóreo Simulado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. OBJETIVOS	19
1.1.1. Objetivo Geral	19
1.1.2. Objetivos Específicos	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. TÊXTEIS TÉCNICOS	21
2.2. TÊXTEIS MÉDICOS	22
2.3. FIOS DE SUTURA	23
2.4. ALGINATO.....	25
2.5. NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO	28
2.6. FIAÇÃO A ÚMIDO.....	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1. MATERIAIS.....	35
3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	35
3.3. OBTENÇÃO DOS FILAMENTOS DE ALGINATO	36
3.4. INCORPORAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO	38
3.5. INCORPORAÇÃO DO PLASTIFICANTE	38
3.6. CARACTERIZAÇÃO	38
3.6.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	38
3.6.2. Espessura	39
3.6.3. Densidade linear	39
3.6.4. Ensaio de resistência mecânica	40
3.6.5. Capacidade de absorção de fluidos.....	42
3.6.6. Perda de massa	42
3.6.7. Atividade antimicrobiana	43
3.6.8. Análise de Reflectância	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1. FILAMENTOS DE ALGINATO.....	45
4.1.1. PRODUÇÃO DOS FILAMENTOS.....	45
4.1.2. ASPECTO VISUAL.....	48

4.1.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	48
4.1.4.	ESPESSURA E DENSIDADE LINEAR	50
4.1.5.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA	51
4.2.	FILAMENTOS DE ALGINATO COM OXIDO DE ZINCO	53
4.2.1.	PRODUÇÃO DOS FILAMENTOS	54
4.2.2.	ASPECTO VISUAL	56
4.2.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	56
4.2.4.	ESPESSURA E DENSIDADE LINEAR	57
4.2.5.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA	58
4.2.6.	PERDA DE MASSA	60
4.2.7.	ABSORÇÃO DE FLUÍDOS	63
4.2.8.	ATIVIDADE ANTIMICROBIANA	64
4.2.9.	ANÁLISE DE REFLECTÂNCIA	65
4.3.	FILAMENTOS DE ALGINATO COM OXIDO DE ZINCO E GLICEROL	66
4.3.1.	PRODUÇÃO DOS FILAMENTOS	66
4.3.2.	ASPECTO VISUAL	67
4.3.3.	ESPESSURA E DENSIDADE LINEAR	68
4.3.4.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA	69
5.	CONCLUSÃO	74
6.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	76
	ANEXO A - TABELA 1 - CATEGUTE CIRÚRGICO ESTÉRIL - DIÂMETRO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SOBRE NÓ.	82

1. INTRODUÇÃO

Em meio a um cenário econômico em constante desenvolvimento, no qual é possível observar o advento de novas tecnologias em questão de poucos meses, a busca por produtos inovadores e com maior valor agregado tem sido crescente. Nesse contexto, as fibras têxteis acabam ganhando destaque devido à sua versatilidade e à ampla gama de propriedades que podem apresentar, dependendo de sua composição e da técnica empregada para sua produção. Como consequência, substratos fibrosos denominados têxteis técnicos vem ganhando cada vez mais espaço e notoriedade (Hossain *et al.*, 2024).

Diferentemente dos têxteis convencionais, cujas aplicações são cotidianas e para os quais, aspectos como conforto e estética costumam ser mais relevantes, os têxteis técnicos apresentam-se como estruturas elaboradas com a finalidade de atender aplicações específicas. Dessa forma o seu desenvolvimento prioriza fatores como funcionalidade e desempenho, já que atendem a setores como construção civil, agricultura, automobilístico, proteção pessoal, esportes e medicina. Os têxteis técnicos são obtidos a partir de tecnologias de produção têxtil, como fiação, tecelagem, malharia, processos de acabamento e confecção e podem adquirir propriedades diferenciadas de acordo com sua composição (Matsuo, 2008; Rasheed, 2020).

Dentre as diversas áreas de aplicação dos têxteis técnicos, os têxteis médicos, ou *medtech*, apresentam-se como um dos setores em maior desenvolvimento. Este setor abrange estruturas projetadas para uma ampla gama de aplicações médicas, incluindo materiais de higiene, para primeiros socorros e artigos cirúrgicos. Os têxteis médicos podem ser subdivididos em materiais extracorpóreos, como órgãos artificiais; para cuidados médicos e higiene, como produtos odontológicos, luvas e máscaras; estruturas implantáveis, como fios de sutura cirúrgicos e enxertos; e não implantáveis, como meias de compressão e curativos. (Bartels, 2011; Morris; Murray, 2020; Paul, 2019).

Dentre os têxteis médicos, os fios de sutura acabam ocupando um lugar de destaque por serem utilizados em diversas rotinas médicas e odontológicas. A utilização dessa tecnologia é datada desde 3.500 a. C. onde costumava-se utilizar tendões, partes de intestino e pelos de animais, seda, linho e filamentos de ouro, para unir tecidos cutâneos e fechar feridas. Atualmente, com a variedade de fibras e processos disponíveis para sua fabricação, é possível escolher o tipo de fio mais adequado de acordo com as condições do tecido a ser suturado, seja ele de origem animal, vegetal ou sintética. Além de serem distinguidos pela sua composição, os fios de sutura também podem ser classificados quanto a sua estrutura, sejam eles

monofilamentares (um único filamento) ou multifilamentares (união de dois ou mais fios) e quanto a sua degradação junto a derme, sendo eles, absorvíveis ou não absorvíveis (Medeiros; Araújo-Filho; Ferreira De Carvalho, 2016).

No caso de suturas internas e mais invasivas ao corpo, é preferível utilizar fios absorvíveis, pois são estruturas que apresentam uma perda de resistência gradual e são completamente absorvidos pelo organismo. No entanto, alguns fios naturais, como o *catgut*, ainda provocam reações inflamatórias intensas e têm tempos de absorção imprevisíveis. Já os sintéticos, além de apresentarem uma resistência maior, ainda causam algumas reações teciduais. Essas limitações incentivam a busca por materiais alternativos com resistência mecânica adequada e alta biocompatibilidade, como os polímeros naturais.

Dentre os diversos polímeros naturais, o alginato destaca-se por possuir propriedades interessantes para aplicações biomédicas, como biodegradabilidade, não toxicidade e biocompatibilidade. Esse polissacarídeo aniônico, composto por blocos de ácido manurônico e ácido gulurônico, pode ser produzido por algumas bactérias, no entanto é encontrado de forma abundante nas paredes celulares de algas marinhas marrons como a *Laminaria hyperborea*, *Macrocystis pyrifera* e a *Ascophyllum nodosum* (Lee; Mooney, 2012; Sahoo; Biswal, 2021).

Uma das características mais notáveis desse biopolímero é sua capacidade de gelificação, que ocorre na presença de íons divalentes, como o cálcio (Ca^{2+}), ou trivalentes, como o alumínio (Al^{3+}). Ao entrar em contato com esses íons, os blocos de ácido gulurônico do alginato reagem formando ligações iônicas, favorecendo sua reticulação (Rezende; Mendes, 2015). Embora essa reação resulte em estruturas estáveis em diversos meios e com aplicações médicas promissoras, o alginato apresenta algumas limitações mecânicas. Em virtude disso, pesquisas atuais buscam melhorar essa propriedade combinando-o com outros polímeros, como a quitosana (Silva, 2022) e o colágeno (Sharabi *et al.*, 2014), e com nanoestruturas, como os nanocristais de celulose (Kim *et al.*, 2021; Kreutzfeld, 2023).

Dentre os materiais amplamente estudados para reforço mecânico, encontram-se as nanopartículas metálicas e de óxidos metálicos. São substâncias que, além de fortalecerem a estrutura do polímero, podem conceder a ele certas funcionalidades, que variam de acordo com o nanomaterial utilizado. O óxido de Zinco (ZnO) nanoparticulado, por exemplo, apresenta propriedades interessantes, como efeito fotocatalítico, proteção contra raios ultravioleta e atividade antimicrobiana, sendo este último, uma característica promissora quando se pensa no desenvolvimento de fios de sutura (Verbič; Gorjanc; Simončič, 2019). Alguns estudos

envolvendo filamentos de poliamida, polipropileno combinados com nanopartículas de ZnO, apresentaram, além da atividade antimicrobiana, uma aceleração no processo de cicatrização de feridas (Fiedot-Toboła *et al.*, 2018).

Certos biopolímeros, como o colágeno, a quitosana e o alginato, quando utilizados para o desenvolvimento de fibras têxteis, acabam apresentando algumas limitações quanto ao processo de fiação. A maioria das fibras sintéticas é produzida através do processo de fiação por fusão (*melt spinning*), no qual o polímero, inicialmente fundido, passa por uma fiação e em seguida é resfriado para obtenção dos filamentos. Entretanto, alguns polímeros, como os citados anteriormente, acabam se degradando antes de atingir a temperatura de fusão. Nesse caso, é possível utilizar técnicas alternativas, como a fiação a úmido (*wet spinning*). Esse método consiste em dissolver o polímero em um solvente e, em seguida, passar a solução por uma fiação para adquirir o formato filiforme. A extrusão ocorre em meio a um banho de coagulação, no qual o solvente, utilizado para solvatar o polímero é removido (Ozipek; Karakas, 2014; Puppi; Chiellini, 2017).

Diante deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a obtenção de filamentos nanocompósitos de alginato de cálcio e nanopartículas de óxido de zinco por meio da técnica de fiação a úmido. Será avaliada a influência das concentrações tanto do polímero quanto das nanopartículas nas propriedades mecânicas, morfológicas, de perda de massa e absorção de fluidos, além de investigar a funcionalização dos filamentos obtidos em termos de atividade antimicrobiana e bloqueio de raios ultravioleta. Também será estudada a possibilidade de incorporação de um agente plastificante, analisando a influência de diferentes concentrações dessa substância nas propriedades mecânicas dos filamentos desenvolvidos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a obtenção e caracterização de filamentos de alginato de cálcio com nanopartículas de óxido de zinco, por meio do processo de fiação a úmido, visando a aplicação como fios de sutura.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Avaliar o efeito da concentração de alginato nas propriedades mecânicas e morfológicas dos filamentos obtidos por fiação a úmido;
- b) A partir da concentração de alginato selecionada, obter filamentos nanocompósitos com diferentes concentrações de nanopartículas de ZnO;
- c) Avaliar as propriedades mecânicas, morfológicas, capacidade de absorção de fluídos e perda de massa dos filamentos nanocompósitos;
- d) Obter filamentos contendo glicerol como plastificante e determinar a resistência mecânica na ausência e presença de nó.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada uma revisão da literatura relativa a elementos essenciais para o desenvolvimento deste estudo, tendo como princípio a produção de fios de sutura aplicados à área de têxteis médicos. Em virtude disso, serão abordados temas como têxteis técnicos, classificação dos fios de sutura, técnicas de fiação a úmido e estudos sobre os materiais utilizados para a obtenção dos fios, sendo eles o alginato e o óxido de zinco (ZnO).

2.1. TÊXTEIS TÉCNICOS

O desenvolvimento de substratos têxteis ocorre por meio de técnicas de produção como fiação, tecelagem, malharia, entrançados e não tecidos. Por se tratar de uma área abrangente, é possível subdividir o setor em duas vertentes. A primeira abrange os têxteis convencionais, que consistem em substratos obtidos por meio das tecnologias de produção já mencionadas e cujo conforto e a estética costumam ser fatores preponderantes, tendo em vista que apresentam uma aplicação mais cotidiana. Apesar de possuírem certos requisitos de qualidade, são estruturas que acabam por não demandar propriedades técnicas ou de elevado desempenho (Rasheed, 2020).

Já os têxteis técnicos, embora sejam confeccionados a partir das mesmas técnicas de produção, são desenvolvidos visando funcionalidades e aplicações mais específicas, o que acaba exigindo desses substratos fibrosos elevado desempenho mecânico, físico, térmico e/ou químico. Requisitos que muitas vezes só podem ser obtidos a partir da utilização de fibras de elevado desempenho ou da modificação de certos atributos, como o tipo de entrelaçamento dos fios, no caso de fios multifilamentares, o *rapport* utilizado para o desenvolvimento da estrutura, a estrutura a ser desenvolvida, sendo ela bidimensional ou tridimensional, bem como, diferentes métodos de acabamentos, sendo eles, químicos, físicos ou biológicos (Ferreira; Ferreira; Oliveira, 2014; Maity; Singha; Pandit, 2023).

Os têxteis técnicos podem apresentar propriedades como resistência e retardância a chamas, isolamento acústico, térmico e elétrico, superhidrofobicidade, proteção contra radiação ultravioleta (UV), efeito autolimpante, antimicrobiano, entre outras (Horrocks; Anand, 2015). O Quadro 1 descreve as principais áreas de aplicação de têxteis técnicos, de acordo com a Messe de Frankfurt, organização que atua na realização de importantes feiras do ramo têxtil.

Quadro 1 – Áreas de aplicação dos têxteis técnicos.

 Agrotech	Agricultura, horticultura, paisagismo, pesca e silvicultura.	 Medtech	Artigos empregados na área de higiene e medicina.
 Buildtech	Arquitetura e construção civil.	 Mobiltech	Componentes utilizados em meios de transporte como, aviões, carros, naves espaciais, ônibus e trens.
 Clothtech	Calçados e vestuário.	 Oekotech	Materiais utilizados para proteção ambiental, reciclagem e redução de desperdícios.
 Geotech	Têxteis utilizados para construção de barragens e estradas, para drenagem, reforço e estabilização do solo.	 Packtech	Artigos para coberturas, embalagens e transporte de produtos.
 Homotech	Estofados, móveis e revestimentos de pisos e carpetes.	 Protech	Componentes de proteção pessoal e de bens.
 Indutech	Materiais aplicados nas indústrias elétrica, mecânica e química.	 Sporttech	Artigos de esporte e lazer.

Fonte: Adaptado de Messe de Frankfurt, (2023).

2.2. TÊXTEIS MÉDICOS

Segundo o *Textile Institute*, instituição internacional que promove a pesquisa e o desenvolvimento no setor têxtil, os têxteis médicos, também conhecidos como *Medtech*, podem ser definidos como estruturas projetadas para uma ampla gama de aplicações médicas, incluindo materiais para primeiros socorros, artigos cirúrgicos e até estruturas implantáveis. Dependendo da aplicação desejada, podem apresentar propriedades como atividade antimicrobiana, biocompatibilidade, flexibilidade, permeabilidade a vapores, ar e/ou líquidos, superfície hidrofóbica ou super-hidrofóbica, assim como resistência satisfatória à tração e à

abrasão (Bartels, 2011). Essas características levam o setor a adquirir subdivisões de acordo com a finalidade, o método de produção e, obviamente, a aplicação do substrato. O Quadro 2 apresenta as subdivisões atribuídas aos têxteis médicos, segundo Wang (2016).

Quadro 2 - Classificação dos têxteis médicos.

Materiais	Exemplos
Implantáveis	Enxertos e fios para sutura cirúrgica
Não-implantáveis	Meias de compressão e curativos
Cuidados médicos e de higiene	Produtos odontológicos e máscaras de proteção
Extracorpóreos	Órgãos artificiais, como fígados e rins

Fonte: Wang (2016).

A relevância desta área tornou-se mais evidente nos últimos anos, especialmente em virtude do advento da pandemia de Covid-19 em março de 2020. Uma busca na ferramenta Google Scholar indica que, entre os anos de 2015 a 2019, 2.900 documentos foram publicados com o termo "medical textile". No período de 2020 a junho/2024, esse número é de 4.610, demonstrando tratar-se de um setor em constante desenvolvimento.

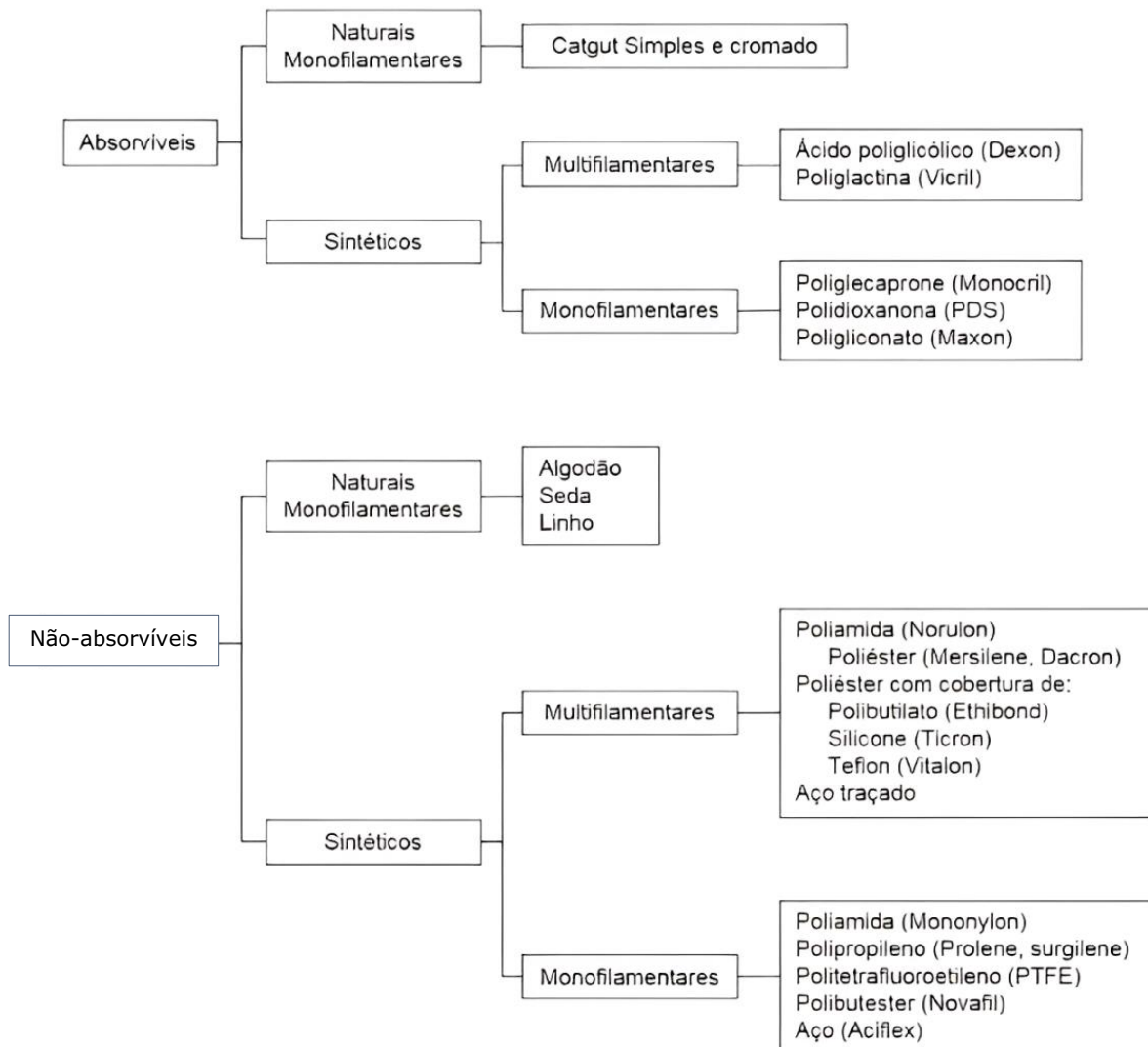
O avanço da nanotecnologia contribuiu para o crescimento desse nicho de mercado. A utilização de nanomateriais em processos de acabamento têxtil, bem como a incorporação direta de nanopartículas em polímeros e biopolímeros para processos de eletrofição, fição a úmido, entre outros, visando o desenvolvimento de fibras e nanofibras funcionalizadas, tornou-se um grande estímulo para o desenvolvimento de pesquisas e para a criação de novas tecnologias voltadas a aplicações médicas, promovendo, desta forma, o uso de novas matérias-primas e o aprimoramento de processos produtivos (Morris; Murray, 2020; Paul, 2019).

2.3. FIOS DE SUTURA

Suturas são comumente utilizadas para fechar feridas e manter os tecidos unidos até sua cicatrização. Um bom fio de sutura deve ser fácil de manusear, ter esterilidade, resistência à tração, não causar irritação ao tecido cutâneo, além de possuir comprimento e espessura uniformes, já que o diâmetro do fio influencia de forma diretamente proporcional na reação com a pele (Kumar; Srinivasulu, 2014). É importante escolher o tipo certo de sutura de acordo com o paciente, tipo de ferida e localização para evitar problemas pós-operatórios. A Figura 1

apresenta a classificação dos fios de sutura de acordo com Medeiros; Araújo-Filho; Carvalho, (2016).

Figura 1 - Classificação dos fios de sutura.



Fonte: Adaptado de Medeiros; Araújo-Filho; Carvalho, (2016).

Os fios de sutura podem ser classificados como naturais, oriundos de matéria-prima animal ou vegetal; ou como sintéticos, produzidos a partir de polímeros sintetizados e desenvolvidos pela necessidade de fios que causassem menor efeito inflamatório, comum nas suturas naturais (Byrne; Aly, 2019). Além disso, as suturas também são subdivididas entre absorvíveis e não absorvíveis. As absorvíveis são degradadas pelo corpo ao longo do processo de cicatrização e costumam auxiliar na recuperação do ferimento, enquanto as não absorvíveis precisam ser removidas após a cicatrização da ferida (Kumar; Srinivasulu, 2014).

Outra classificação possível é quanto à sua estrutura, sendo monofilamentares (um filamento) ou multifilamentares (união de dois ou mais fios). Os fios multifilamentares, apesar de serem mais resistentes mecanicamente, acabam ocasionando maior atrito com o tecido cutâneo, favorecendo, dessa forma, a ocorrência de infecções e processos inflamatórios. Já os monofilamentares, apesar de apresentarem uma estrutura mais simples, são mais fáceis de manusear e apresentam menor risco de infecção (Kumar; Srinivasulu, 2014).

Dentre os fios de sutura não-absorvíveis mais utilizados está a poliamida, devido ao seu baixo custo e propriedades como boa resistência mecânica e elasticidade. Já entre os absorvíveis, destaca-se o *catgut*, um fio absorvível, monofilamentar, feito a partir de matéria-prima animal proveniente da mucosa intestinal de bois e ovelhas. Esse tipo de fio pode ser simples ou cromado, sendo que o acabamento utilizando sais de cromo acaba interferindo diretamente em propriedades como tempo de absorção e reações teciduais adversas (Medeiros; Araújo-Filho; Carvalho, 2016).

Além dos exemplos já citados, evidenciam-se algumas estruturas sintéticas absorvíveis, como a poliglactina 910, formada a partir de um copolímero à base de glicolida e L-lactina, que dá origem a fios cuja resistência mecânica se mantém ao longo dos primeiros 30 dias, e só absorvido posteriormente, dentro de um período de 60 a 90 dias. Já o ácido poliglicólico dá origem a um fio de elevada resistência a tração, cuja estrutura é absorvida entre duas a três semanas, no entanto, sua composição pode ocasionar algumas reações inflamatórias em contato com a pele (Goel, 2016).

Também é válido destacar o desenvolvimento de fios de sutura absorvíveis a base de biopolímeros como o alginato (Kreutzfeld, 2023; Silva, 2022) e a quitosana (Missfeld, 2022), tendo em vista tratar-se de materiais com características interessantes para aplicações biomédicas, como biocompatibilidade, biodegradabilidade e atoxicidade. Apesar de serem recentes, as pesquisas nesta área acabam apresentando resultados promissores que podem contribuir em muito para o mercado de têxteis médicos.

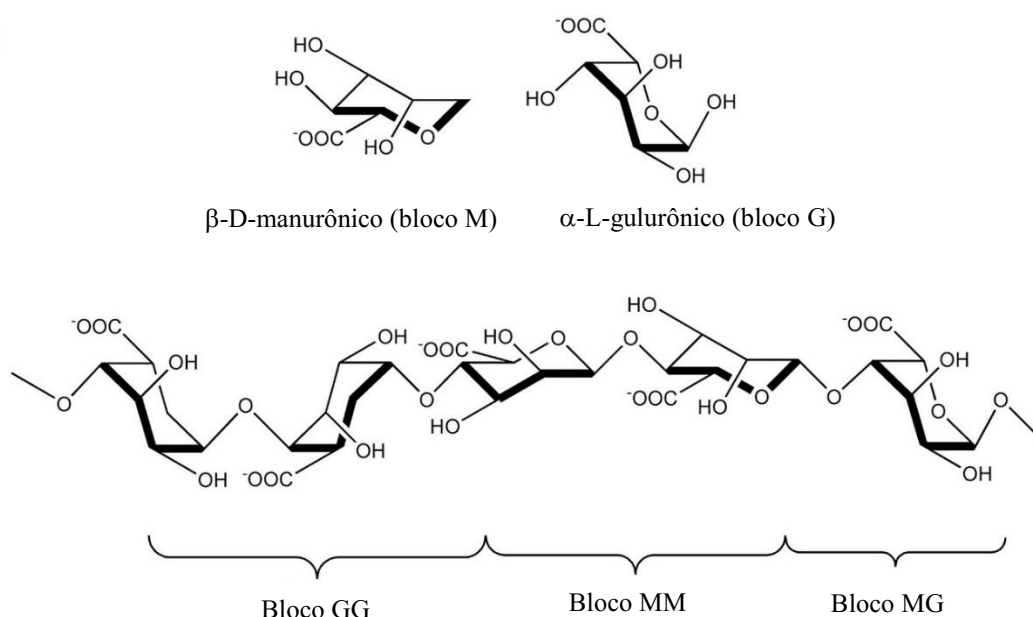
2.4. ALGINATO

O sal de ácido algínico, mais conhecido como alginato, é um abundante polissacarídeo de caráter aniônico, encontrado na parede celular de uma classe de microalgas marrons, denominada *Phaeophyceae*, representando cerca de 40 % da matéria seca destes

microrganismos. Além disso, esse biopolímero também pode ser produzido por organismos bacterianos, como *Azotobacter* e *Pseudomonas* (Lee; Mooney, 2012; Sahoo; Biswal, 2021).

O alginato pode ser caracterizado como um copolímero binário não ramificado, constituído por moléculas originadas de blocos homopoliméricos compostos por ácido manurônico (blocos M) e ácido gulurônico (blocos G), ou também por blocos heteropoliméricos (blocos MG). Na Figura 2 observa-se as diferentes configurações estruturais possíveis para o alginato.

Figura 2 – Estrutura de blocos G, M e alternado.

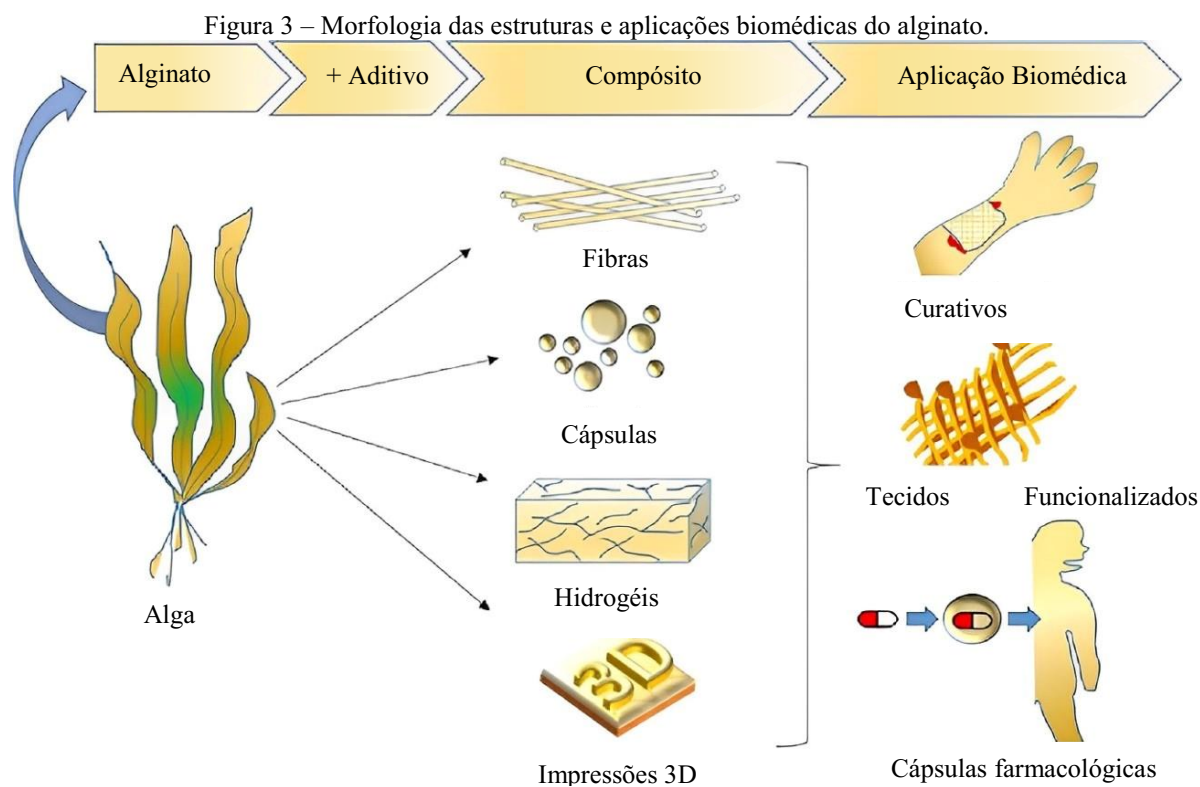


Fonte: Adaptado de Trevisol *et al.*, (2019).

A união entre esses monômeros ocorre na posição energética mais propícia, além disso, seu padrão sequencial e proporção de blocos na estrutura biopolimérica depende em grande parte da fonte de extração do alginato, o que acaba influenciando em suas propriedades físicas e químicas, bem como, em seu peso molecular (Aderibigbe; Buyana, 2018; Trevisol *et al.*, 2019).

Graças a propriedades como biocompatibilidade, não toxicidade, não antigenicidade e biodegradabilidade, o alginato vem sendo amplamente utilizado para fins biomédicos, farmacêuticos, cosméticos e no desenvolvimento de estruturas têxteis funcionalizadas (Puscaselu *et al.*, 2020). Por ser um biopolímero versátil, pode ser aplicado de formas variadas, como microcápsulas, microesferas, hidrogéis, fibras, esponjas e espumas. Devido a isso, costuma ser empregado no desenvolvimento de curativos para feridas, auxiliando no processo

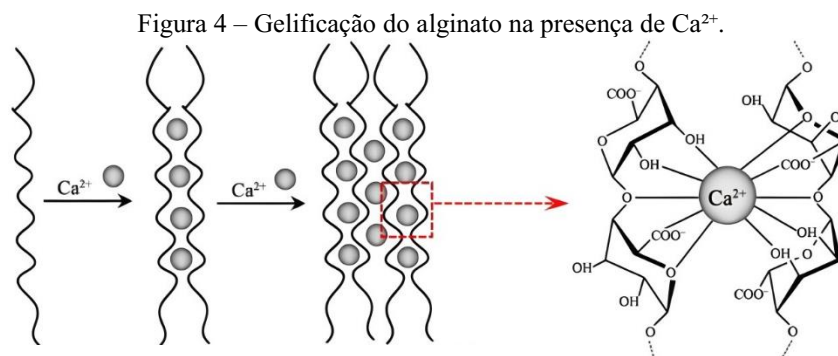
de cura e cicatrização, além de aprimorar as propriedades naturais de outros polímeros. A Figura 3 ilustra a ampla gama de aplicações do alginato (Deng *et al.*, 2021).



Fonte: Adaptado de Ahmad Raus; Wan Nawawi; Nasaruddin, (2021).

O alginato é um polímero solúvel em água. Conseqüentemente, estruturas desenvolvidas, como filmes e filamentos, tendem a se desintegrar na presença de meios líquidos, o que pode representar uma limitação para diversas aplicações. Ainda assim, é possível contornar essa deficiência mediante a capacidade deste polissacarídeo de formar hidrogéis insolúveis a partir de um processo de gelificação na presença de cátions divalentes, como cálcio (Ca^{2+}) e o bário (Ba^{2+}), ou trivalentes, como o alumínio (Al^{3+}). Atualmente, os íons de cálcio são os mais empregados neste processo, em virtude de sua melhor compatibilidade com o organismo humano e por formar fortes interações com os blocos estruturais de guluronato (blocos G), presentes no alginato, visto que estes apresentam uma quantidade maior de grupos funcionais hidroxila em sua molécula. Em meio ao processo de gelificação, estabelecem-se interações entre os grupos hidroxila e os cátions de cálcio, resultando na formação de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, dando origem a uma estrutura conhecida como “caixa de

ovos” (*egg box*)(Agüero *et al.*, 2017; Silva; Bierhalz; Kieckbusch, 2009). A Figura 4 apresenta as interações decorrentes do processo de gelificação do alginato na presença do íon Ca^{2+} .



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.*, (2022).

Uma área de pesquisa que tem ganhado notoriedade no ramo de têxteis médicos é a de desenvolvimento de filamentos de alginato. Diferentes métodos são empregados para a sua produção, dentre eles estão as técnicas de fiação microfluidica (*microfluidic spinning*), eletrofiação (*electrospinning*) e a fiação à úmido (*wet spinning*), sendo esta a mais utilizada (He *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022). Neste processo, o filamento é estirado em meio a um banho de coagulação contendo entre 1 % a 10 % de cloreto de cálcio (CaCl_2), através do qual sofre o processo de gelificação (Dharmarathne *et al.*, 2020).

O alginato apresenta-se como um material promissor, sendo extensivamente aplicado em meio a área médica para o desenvolvimento de nãotecidos. Entretanto, esse material costuma apresentar certas limitações quanto às suas propriedades mecânicas, decorrentes de características do próprio fio de alginato (Chen *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Em virtude disso, estudos vêm sendo realizados com o objetivo de aperfeiçoar estas propriedades, alguns deles incluem a combinação com outros polímeros como, quitosana (Silva, 2022), colágeno (Sharabi *et al.*, 2014) e nanocristais de celulose (Kim *et al.*, 2021). Inovações que apresentam um quadro favorável para o desenvolvimento de novos substratos têxteis a base de alginato.

2.5. NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO

O ZnO é um composto inorgânico da classe dos óxidos metálicos, frequentemente encontrado na forma de um pó fino de cor branca. Geralmente, é obtido de maneira sintética

por processos de sintetização química, embora possa ser encontrado na natureza como um mineral cristalino chamado zincita (Mayrinck *et al.*, 2014), apresentado na Figura 5.

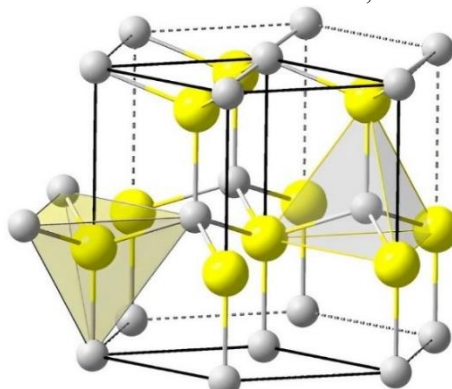
Figura 5 – Mineral zincita.



Fonte: ROCK IDENTIFIER, [s. d.].

Sua estrutura química é constituída por um átomo de zinco ligado a um átomo de oxigênio por meio de uma ligação dupla. O arranjo molecular mais estável desse composto exibe uma estrutura cristalina em formato hexagonal denominada wurtzita, onde os átomos de Zn (Zn^{2+}) e oxigênio (O^{2-}) organizam-se em camadas alternadas em um arranjo tetraédrico (Marana; Sambrano; De Souza, 2010), como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura cristalina do óxido de zinco, denominada wurtzita.



Fonte: Adaptado de Batista, (2015).

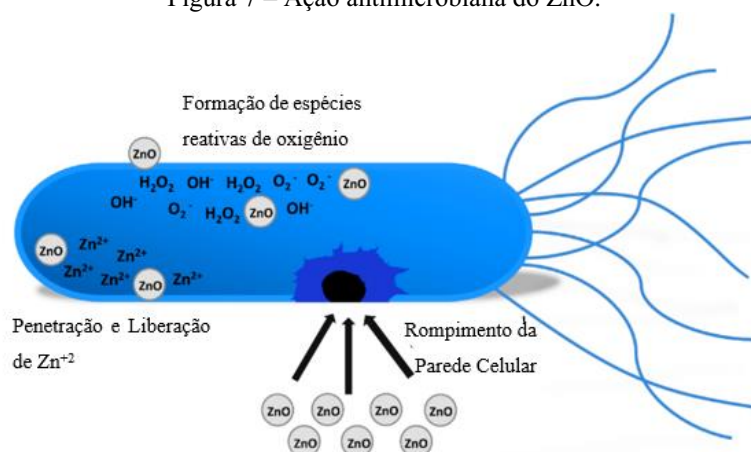
Esse óxido metálico tem uma ampla gama de aplicações e vem sendo utilizado há mais de 150 anos. Inicialmente, era empregado como pigmento para tintas brancas. No entanto, a partir dos anos 1900, o ZnO passou a ser amplamente utilizado para o desenvolvimento de tecnologias aplicadas às áreas médica, farmacológica e cosmética. Nos anos 1950, estudos mais aprofundados revelaram que o ZnO também poderia ser utilizado em aplicações semicondutoras, luminescentes, catalíticas, fotocondutoras e fotoquímicas (Feng, 2012).

No século XXI, observou-se um aumento significativo na pesquisa sobre nanoestruturas de ZnO (Mayrinck *et al.*, 2014), dentre elas, as nanopartículas se destacam como as mais utilizadas (Santos, 2020). Contudo, as propriedades inerentes desse material dependem, em grande parte, de fatores como método de síntese (Kumar *et al.*, 2013), morfologia e superfície, pureza do material utilizado, solubilidade e tendência à agregação (Czyżowska; Barbasz, 2022).

As nanopartículas de ZnO exibem uma variada gama de propriedades, incluindo condutividade elétrica (Zhang; Chen; Guo, 2019), capacidade retardante de chama (El-Hady; Farouk; Sharaf, 2013) e isolamento térmico (Wang *et al.*, 2019). Vale ressaltar que, no caso dos três atributos citados anteriormente, o ZnO atua apenas como um agente de complemento, ou seja, ele não apresenta um efeito significativo para que possa ser utilizado de maneira independente, mas sim como um agente que, combinado a outros materiais em escala nanométrica, pode amplificar as características desejadas.

No setor têxtil, propriedades como ação fotocatalítica, proteção contra raios ultravioleta (UV) e efeito antimicrobiano ganham destaque na funcionalização de substratos. A atividade fotocatalítica do ZnO contribui para a obtenção de um efeito autolimpante, resultante da quebra de compostos orgânicos por processos de oxidação. A proteção contra raios UV advém principalmente de sua estrutura cristalina, que confere ao nanomaterial uma excelente estabilidade química, permitindo a absorção, reflexão e dispersão da radiação ultravioleta. Já a ação antimicrobiana é decorrente principalmente do processo de adsorção das nanopartículas pela parede celular do microrganismo. Ao romper essa barreira, o óxido de zinco desencadeia uma reação fotocatalítica, inibindo a respiração celular e atacando estruturas como DNA, RNA e lipídeos (Verbič; Gorjanc; Simončič, 2019), como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Ação antimicrobiana do ZnO.



Fonte: adaptado de Verbič; Gorjanc; Simončič, (2019).

2.6. FIAÇÃO A ÚMIDO

Fibras têxteis são estruturas que apresentam uma elevada relação entre seu comprimento e diâmetro, sendo constituídas, em sua maioria, por polímeros. Podem ser subdivididas em fibras naturais, obtidas de matérias-primas vegetais, animais, ou proveniente de processos geológicos; fibras artificiais, derivadas de processos químico, que utilizam matéria-prima de origem natural para o seu desenvolvimento; e fibras sintéticas, produzidas a partir de químicos sintéticos. Por ser um material muito versátil, capaz de adquirir uma vasta gama de propriedades, dependendo de sua composição e produção, as fibras têxteis acabam representando uma elevada parcela no consumo mundial de polímeros (Costa; Rosa; de Lima, 2013; Zhang, 2014).

As fibras também podem ser subdivididas em contínuas e descontínuas. As fibras naturais, com exceção da seda e similares, costumam ser descontínuas, pois possuem uma extensão limitada. Já as fibras artificiais e sintéticas podem ser seccionadas para dar origem a fibras descontínuas ou podem gerar filamentos, que são estruturas contínuas que possuem um comprimento extremamente longo (Lord, 2003).

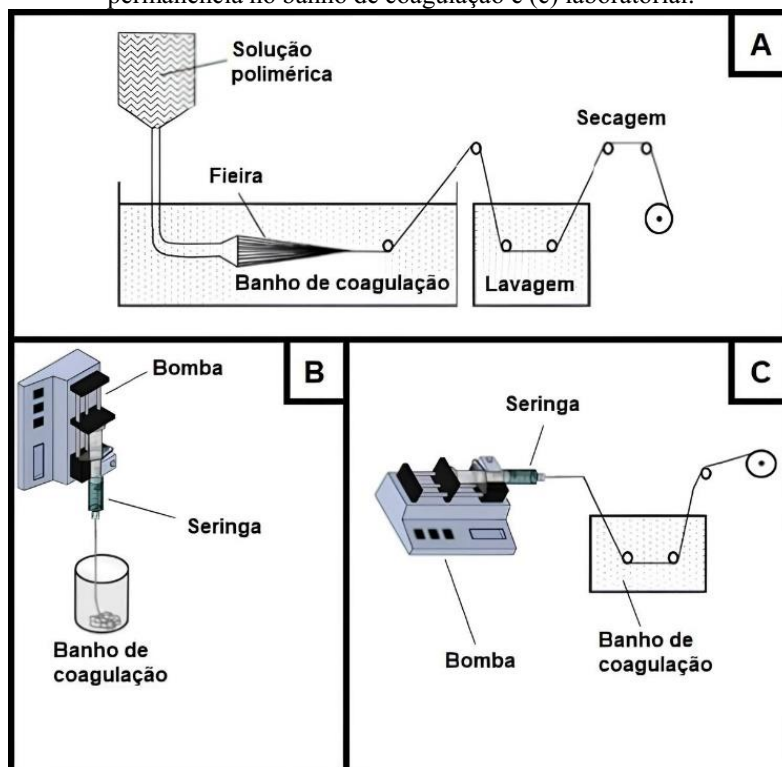
Certas propriedades inerentes a algumas fibras têxteis, como biocompatibilidade, estabilidade dimensional, permeabilidade e atoxicidade, além da elevada relação entre volume e área superficial, tornam esses materiais, estruturas apropriadas para aplicações biomédicas. Neste contexto, fibras sintéticas monofilamentares desenvolvidas a partir de polímeros biocompatíveis ganham destaque, pois acabam ocasionando menor reação tecidual em contato com a pele (Byrne; Aly, 2019).

A maioria das fibras sintéticas comerciais são produzidas através do método de fiação por fusão (*melt spinning*), no qual a matéria-prima é inicialmente liquefeita, por intermédio de elevada temperatura. Posteriormente, a solução é passada por uma fiação sob elevada pressão, para adquirir o formato filiforme, solidificando-se logo depois por meio de processos de resfriamento, dando origem a filamentos finos e contínuos (Zhang, 2014; Clemons, 2016).

No entanto, alguns polímeros não podem ser fundidos, pois se degradam antes de atingir a temperatura de fusão. Nesse caso é possível dissolver o polímero com o auxílio de um solvente. Se o solvente em questão for volátil a altas pressões de vapor, é possível realizar a solidificação dos filamentos por meio de um processo de evaporação do solvente, técnica conhecida como fiação a seco (*dry spinning*).

Contudo, em alguns casos o solvente em questão não pode ser evaporado, sendo necessário utilizar a técnica de fiação a úmido (*wet spinning*) - uma metodologia industrial originária da década de 1930, empregada no desenvolvimento de fibras sintéticas, como as acrílicas. Nesse caso, o solvente utilizado para dissolver o polímero é removido em meio a um banho de coagulação, proporcionando a solidificação do filamento (Ozipek; Karakas, 2014; Puppi; Chiellini, 2017; Zhang, 2014). Filamentos de alginato, por exemplo, são produzidos por esse método, no qual a solução de alginato é extrudada em um banho de coagulação contendo, geralmente, íons Ca^{2+} , que favorecem a sua gelificação e auxiliam na formação da estrutura reticulada. (Ci *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). Na Figura 8 é apresentado o processo de fiação a úmido.

Figura 8 – Esquema representativo do processo de fiação a úmido (a) industrial, (b) laboratorial com longa permanência no banho de coagulação e (c) laboratorial.



Fonte: Silva, (2022).

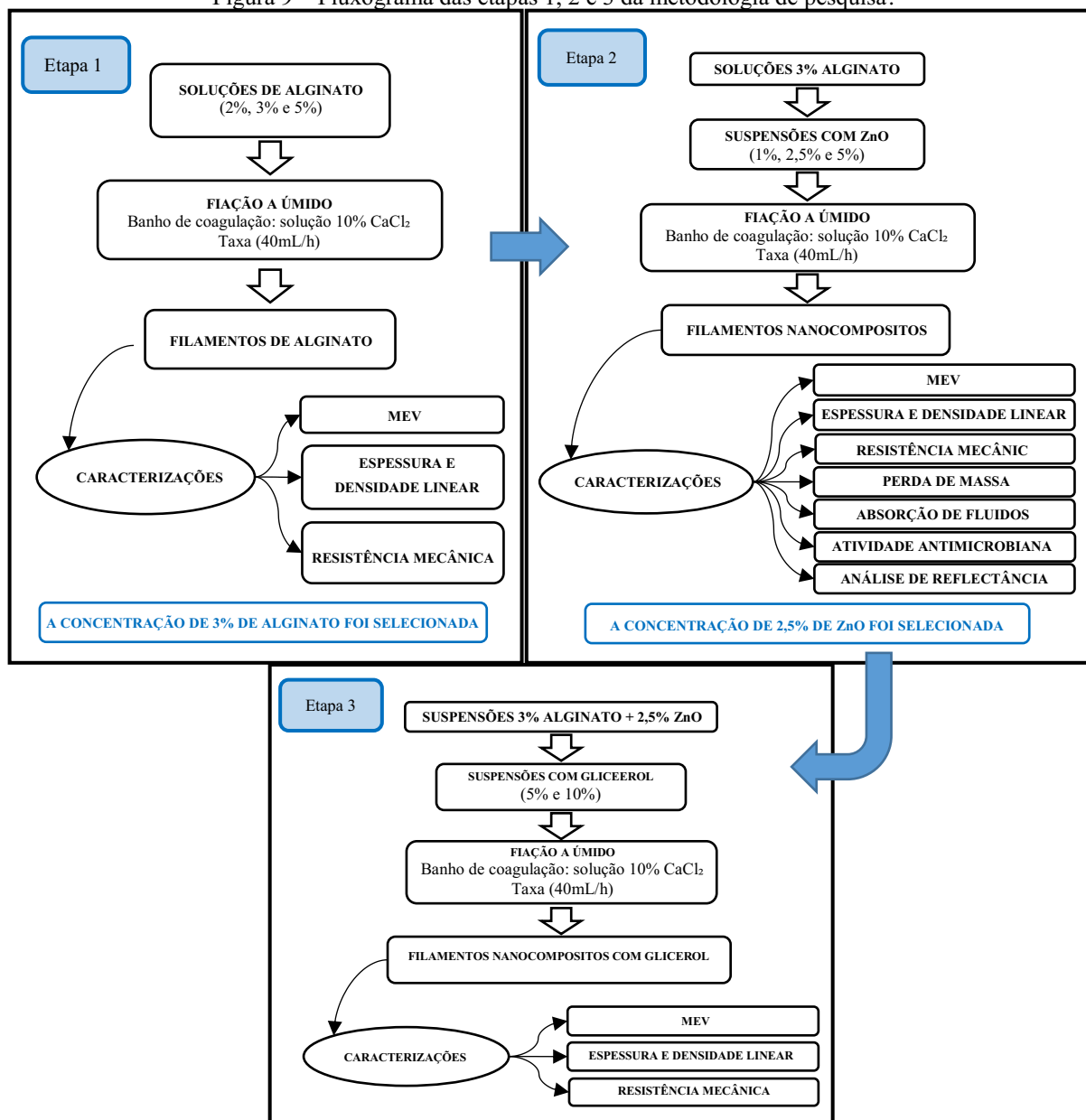
Filamentos de alginato obtidos pelo método de fiação a úmido são amplamente estudados como base para o desenvolvimento de estruturas biomédicas (Chen *et al.*, 2021; Hou *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2020). A combinação desse biopolímero com nanopartículas de óxido de zinco também vem ganhando destaque no desenvolvimento de filmes e membranas, visando a obtenção de estruturas que possuam propriedades como atividade antimicrobiana e proteção

contra radiação ultravioleta (Cleetus *et al.*, 2020; Motelica *et al.*, 2021). Em alguns casos, um agente plastificante pode ser utilizado, com o objetivo de conceder maior maleabilidade a essas estruturas. O glicerol já foi estudado como agente plastificante para diversas estruturas poliméricas para aplicações biomédicas, pois contribui para redução das forças intermoleculares, aumentando a movimentação das cadeias poliméricas (Hou *et al.*, 2022; Shinomura, Kawany M. B. Munhoz *et al.*, 2017). No entanto, há poucos estudos que abordam o desenvolvimento de fios de alginato nanocompósitos com nanopartículas de óxido de zinco e contendo plastificante, destacando a necessidade de pesquisas adicionais para explorar o potencial desses nanocompósitos obtidos pelo método de fiação a úmido.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento dos filamentos de alginato de cálcio contendo nanopartículas de óxido de zinco em solução e os métodos empregados para a sua caracterização em termos mecânicos, morfológicos e físico-químicos.

Figura 9 – Fluxograma das etapas 1, 2 e 3 da metodologia de pesquisa.



Fonte: Autora, 2024.

3.1. MATERIAIS

Para o desenvolvimento dos filamentos, foi utilizado como matéria-prima o biopolímero alginato de sódio de média viscosidade da Sigma-Aldrich (EUA). Para o banho de coagulação, foi empregado cloreto de cálcio dihidratado como agente reticulante. Com o intuito de funcionalizar os filamentos, visando uma atividade antimicrobiana, foram incorporadas à solução de alginato, nanopartículas de ZnO com distribuição de tamanho médio inferior a 40 nm, também provenientes da marca Sigma-Aldrich (EUA). Para averiguar o comportamento dos filamentos obtidos mediante a adição de um agente plastificante, foi utilizado glicerol P.A. da marca Neon. Já o fluido corpóreo simulado (FCS), utilizado nos testes de perda de massa foi preparado com reagentes de grau analítico de acordo com a composição descrita por Marques; Loebenberg; Almukainzi, (2011), apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Reagentes para preparo do FCS convencional.

Reagente	Nome	Quantidade
NaCl	Cloreto de sódio	8,035 g
NaHCO ₃	Bicarbonato de sódio	0,355 g
KCl	Cloreto de potássio	0,225 g
K ₂ HPO ₄ · 3H ₂ O	Fosfato de potássio dibásico tri-hidratado	0,231 g
MgCl ₂ · 6H ₂ O	Cloreto de magnésio hexahidratado	0,311 g
HCl	Ácido clorídrico 1 M	39 mL
CaCl ₂	Cloreto de cálcio	0,292 g
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio	0,072 g
Tris	Tris(hidroximetil)aminometano	6,118 g

Fonte: Marques; Loebenberg; Almukainzi, (2011).

3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas vidrarias, como béqueres, placas de petri, provetas, frascos erlenmeyer, bastões de vidro, pinças, barras magnéticas cilíndricas e funis de vidro. Os equipamentos utilizados estão listados no Quadro 3.

Quadro 3 - Equipamentos utilizados.

Equipamento	Marca e Modelo
Balança analítica	Shimadzu ATX
Estufa de renovação e circulação de ar	Newlab NL 82-81
Agitador magnético com aquecimento	Tecnal TC-0853/1
Bomba de infusão	Fresenius Kabi - Injectomat Agilia
Micrômetro Digital	Digimess
Banho de Ultrassom	Best – BST 200
Máquina universal para ensaios de tração	Instron® EMIC 23-100
Espectrofotômetro de reflectância	Datacolor 500

Fonte: Autora, (2024).

3.3. OBTENÇÃO DOS FILAMENTOS DE ALGINATO

Para o desenvolvimento dos filamentos foi preparada, inicialmente, 20 mL de uma solução de alginato de sódio de média viscosidade em água deionizada utilizando três diferentes concentrações do biopolímero, sendo elas 2 %, 3 % e 5 % (m/v). A solução foi mantida sob agitação em um béquer durante um período de 24 horas com o auxílio de um agitador magnético.

Posteriormente, foi realizada a preparação do banho de coagulação, para o qual foi utilizado uma solução de cloreto de cálcio dihidratado na concentração de 10 % (m/v), conforme o descrito por Silva, 2022. Com o auxílio de uma bomba infusora, operando a uma vazão de 40 mL/h, foi realizada a extrusão dos filamentos. Para conferir o formato filiforme ao substrato, foi utilizada uma seringa de 10 mL conectada a uma sonda traqueal de calibre 12, com 2,8 mm de diâmetro, ligada a uma ponteira de 1,6 mm de diâmetro e 4,2 cm de comprimento. A ponta da ponteira permaneceu submersa no banho de coagulação ao longo de todo o processo de extrusão. Na Figura 10 é apresentada a estrutura utilizada para o processo laboratorial de fiação a úmido verticalizado, similar ao sistema apresentado anteriormente na Figura 8.(b).

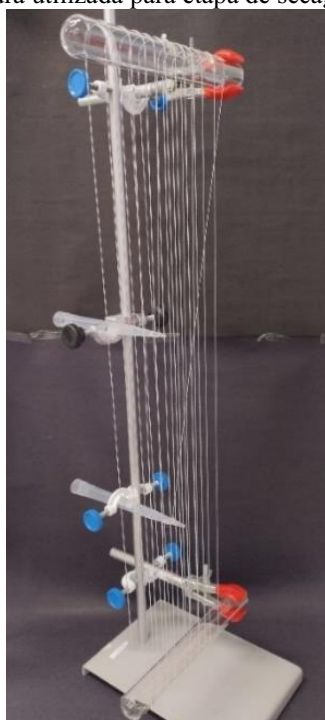
Figura 10 – Estrutura utilizada para o processo de fiação a úmido verticalizado.



Fonte: Autora, 2024.

Após o processo de extrusão, os filamentos permaneceram durante um período de 15 minutos no banho de coagulação. Em seguida eram lavados abundantemente com água deionizada para remoção do residual de cloreto de cálcio. Após a etapa de lavagem, os filamentos foram estendidos com o auxílio de um suporte, demonstrado na Figura 11, por um período de 24 horas até sua completa secagem.

Figura 11 – Estrutura utilizada para etapa de secagem dos filamentos.



Fonte: Autora, 2024.

3.4. INCORPORAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO

Os filamentos contendo ZnO foram obtidos mediante a adição das nanopartículas à solução de alginato de sódio antes do processo de fiação a úmido. Para essa etapa, foram utilizadas três diferentes concentrações do óxido em solução: 1 %, 2,5 % e 5 % (m/m) em relação a massa de alginato presente em solução. Após a adição das nanopartículas, a solução de alginato foi mantida sob agitação por 2 horas e 30 minutos. Em seguida, a solução foi submetida a um banho de ultrassom por um período de 10 minutos para melhor dispersão das nanopartículas, e posteriormente foi mantida por mais 30 minutos sob agitação, para garantir a homogeneidade da solução. Ao final dessa etapa foi realizado o processo de fiação a úmido e secagem de forma idêntica ao descrito no tópico anterior.

3.5. INCORPORAÇÃO DO PLASTIFICANTE

Com a finalidade de verificar a ação de um agente plastificante na composição dos filamentos, foi adicionado glicerol à suspensão de alginato de sódio e nanopartículas de óxido de zinco. Foram utilizadas duas concentrações de plastificante: 5 % e 10 % (m/m) em relação a massa de alginato presente na solução, conforme o descrito por Silva; Bierhalz; Kieckbusch, (2009). O processo de homogeneização da mistura alginato-ZnO-glicerol foi realizado conforme as etapas descritas no item anterior. Ao final da homogeneização, foi realizado o processo de fiação a úmido em banho de CaCl_2 10 %. Logo depois, o filamento obtido foi imerso, durante 15 minutos, em água destilada contendo 5 % de glicerol (m/v), para a remoção do residual de cloreto de cálcio que possa ter ficado na superfície do filamento. Ao final, os filamentos foram estendidos com o auxílio de um suporte, para secagem.

3.6. CARACTERIZAÇÃO

Com a finalidade de averiguar as características morfológicas e estruturais, bem como a resistência dos filamentos desenvolvidos, foram realizadas as técnicas de caracterização descritas nos tópicos subsequentes.

3.6.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para avaliar as características morfológicas, levando em consideração seções longitudinais e transversais, foram efetuadas análises de microscopia eletrônica de varredura

(MEV). Para realização do procedimento, as amostras foram previamente fixadas em suportes metálicos (*stubs*) com fita de carbono e em seguida recobertas por uma fina camada de ouro com o equipamento metalizador LEICA (modelo EM SCD 500) visando, dessa forma, conceder a condutividade necessária ao material. A análise das amostras foi realizada no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC em um microscópio JEOL (modelo JSM-6390 LV) com tensão de aceleração de 10 kV a 15 kV.

3.6.2. Espessura

Com o objetivo de obter a espessura média, em milímetros (mm), foram separadas 10 amostras com 25 cm de comprimento de cada filamento. Em seguida, com o auxílio de um micrômetro Digital da marca Digimess, foram aferidas 5 medições em locais distintos de cada uma das amostras.

3.6.3. Densidade linear

A densidade linear de fibras é uma grandeza denominada comercialmente de Título e comumente expressa em “ Tex ”, um sistema de titulação direto, no qual, quanto maior o Tex, maior será a espessura do fio. Para aferir esse parâmetro, foi realizada a pesagem de 10 amostras com 25 cm de comprimento de cada filamento desenvolvido. Em posse das medidas de massa e comprimento, foi possível determinar a densidade linear média dos filamentos utilizando a Equação (1).

$$K \cdot M = C \cdot T \quad (1)$$

Onde:

K: Constante resultante da razão entre o comprimento de 1000 m de fio pela massa do fio em gramas;

M: Massa do fio, em gramas;

C: Comprimento do fio em metros;

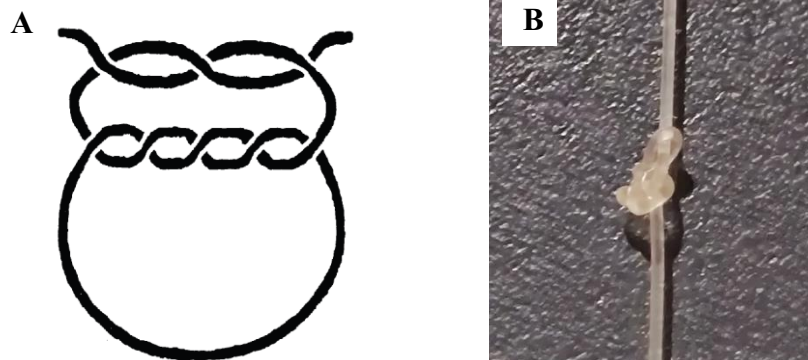
T: Título do Fio, em “ Tex ”.

3.6.4. Ensaio de resistência mecânica

A resistência mecânica dos filamentos foi analisada em termos de resistência à tração, módulo de elasticidade, tenacidade e alongamento. Foi utilizada como base para o desenvolvimento deste ensaio, a norma ASTM D2256/D2256M 2021b – Método de Teste Padrão para propriedades de tração de fios pelo método de fio único, com algumas alterações. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM) da UFSC - Blumenau, utilizando uma máquina de ensaio universal. Foram utilizados 10 corpos de prova de 25 cm de comprimento de cada uma das amostras desenvolvidas. O teste foi realizado com o auxílio de garras pneumáticas a uma taxa de deslocamento de 20 mm/min e um espaçamento inicial de 10 cm entre as garras.

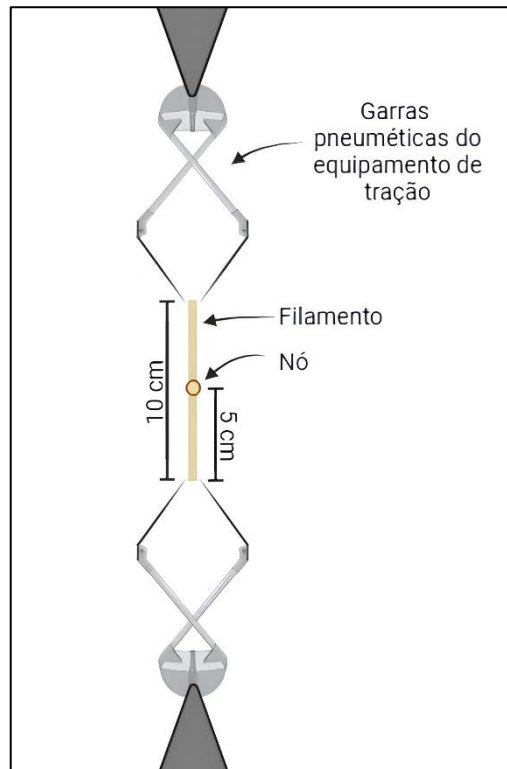
Por se tratar de um filamento cuja aplicação desejada é para fio de sutura cirúrgica, os ensaios de tração foram realizados utilizando amostras sem e com a presença de nós, uma vez que as suturas são comumente fechadas utilizando o denominado nó cirúrgico e devem possuir a resistência mecânica apropriada para suportar a realização desse nó em sua estrutura. O nó cirúrgico, apresentado na Figura 12, foi utilizado para o desenvolvimento dos testes de tração com a presença de nós, conforme descrito na NBR 13904 - FIOS PARA SUTURA CIRÚRGICA, (2003). A Figura 13 apresenta um esquema representativo do filamento com nó posicionado na máquina universal para ensaios de tração, no início do ensaio.

Figura 12 – (A) Nó cirúrgico; (B) Imagem do nó cirúrgico realizado no filamento.



Fonte: NBR 13904, 2003.

Figura 13 – Esquema representativo do fio com nó posicionado na máquina universal para ensaios de tração, no início do ensaio.



Fonte: Autora, 2024

O teste realizado em uma máquina universal para ensaios de tração forneceu o tempo de ensaio, o deslocamento das garras e a força de tração ao longo do período de ensaio. Em posse desses valores foi possível calcular a tensão de ruptura, utilizando a Equação (2) e a deformação por meio da Equação (3).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde σ é a tensão de ruptura do filamento (MPa); F é a força de tração (N) e A é área da seção transversal (mm^2).

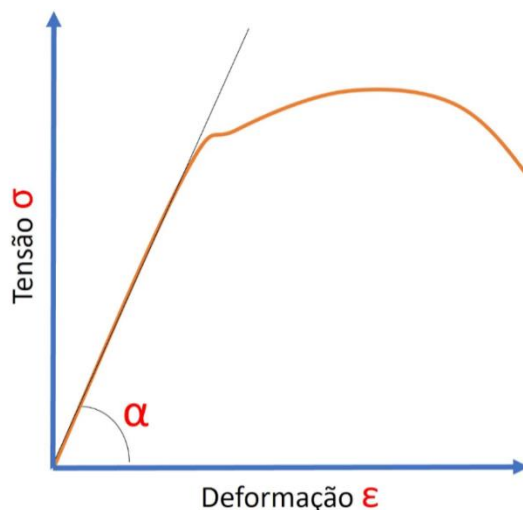
$$\varepsilon = \frac{(L_f - L_i)}{L_0} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde ε é a deformação do fio (%); L_i é o deslocamento inicial (mm); L_f é o deslocamento no momento da ruptura (mm) e L_0 é a distância inicial entre as garras no início do teste, neste caso, 100 mm.

O módulo de elasticidade dos filamentos foi obtido mediante análise dos gráficos de tensão *versus* deformação. Observa-se, na Figura 14, que ao longo do regime elástico, o gráfico

apresenta-se como uma região linear. Dessa forma, o módulo de elasticidade corresponde ao coeficiente angular da reta.

Figura 14 - Gráfico representativo de Tensão *versus* Deformação.



Fonte: (MÓDULO DE ELASTICIDADE | MÓDULO DE YOUNG, [s. d.]

3.6.5. Capacidade de absorção de fluidos

As análises de absorção foram realizadas em água deionizada e fluido corpóreo simulado (FCS) através método descrito por (Zorzi Bueno; Maria Moraes, 2011), com algumas alterações. Foram separadas amostras de 5 cm de comprimento de cada filamento, as quais foram previamente pesadas e inseridas em tubos falcon contendo 10 mL de água deionizada ou FCS. Após um período de 24 horas, as amostras foram retiradas dos tubos e pressionadas levemente entre duas folhas de papel filtro para remoção do excedente de água, para posterior aferição de massa. A absorção das amostras foi determinada utilizando a Equação (4).

$$Ab (\%) = \frac{m_m - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde Ab é a capacidade de absorção da amostra, expressa em percentual; m_m é a massa da amostra molhada e m_s é a massa da amostra seca.

3.6.6. Perda de massa

Para determinação da perda massa de filamento em meio líquido, inicialmente foram separadas 10 amostras de 5 cm de comprimento de cada filamento. As amostras foram

previamente secas em estufa a 60° C e pesadas. Em seguida os filamentos foram inseridos em tubos falcon contendo 10 mL de água deionizada ou FCS. Após períodos de 7 e 14 dias em contato com os fluidos, as amostras foram retiradas dos tubos e secas em estufa a uma temperatura de 60°C até atingirem a massa constante. A perda de massa dos filamentos foi determinada pela Equação (5).

$$PM (\%) = \frac{m_g - m_i}{m_i} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde PM é a perda de massa, expressa em percentual; m_i é a massa inicial da amostra, antes da imersão nos fluidos e m_g é a massa da amostra seca após o período de imersão nos fluidos.

3.6.7. Atividade antimicrobiana

A atividade antimicrobiana dos filamentos de alginato com nanopartículas de ZnO foi analisada utilizando a bactéria *Escherichia coli* (gram-negativa) e a *Staphylococcus aureus* (gram-positiva), de acordo o método qualitativo de teste padrão ISO 20645:2004 – Teste de placa de difusão de ágar.

Para a realização do teste, foi realizado cultivo das bactérias a uma temperatura de 37°C em caldo BHI por um período de 24 horas. As culturas foram então inseridas sobre placas petri contendo a solução de ágar. Em seguida, as amostras de filamento funcionalizadas, bem como a amostra controle, previamente esterelizadas, também foram adicionadas. As zonas de inibição apresentadas pelas amostras foram aferidas após um período de 24 horas de incubação a uma temperatura de 37°C.

3.6.8. Análise de Reflectância

O óxido de Zinco pode conceder aos substratos têxteis a capacidade de absorver radiação ultravioleta, propriedade que pode auxiliar na cicatrização de feridas e no tratamento de queimaduras (Pino *et al.*, 2023). Esse atributo pode ser interessante, tendo em vista que, os filamentos desenvolvidos podem ser empregados, futuramente, no desenvolvimento de curativos para o tratamento de queimaduras.

Para verificar se os filamentos possuem essa capacidade, foi realizada uma análise em um espectrofotômetro de reflectância DATACOLOR 500, entre os comprimentos de onda 360 até 400 nm, utilizando o iluminante D65. Para aferir o percentual de reflectância, o equipamento foi inicialmente calibrado com os padrões preto, branco e verde. Foram avaliados um total de 5 pontos em cada amostra, utilizando a abertura de 9 mm. Devido às limitações para medições de reflectância dos filamentos, foi utilizada uma impressora 3D do LABTEC – Laboratório de Tecidos e Malhas da UFSC Blumenau, para o desenvolvimento de um aparato cilíndrico de cor preta, cujo diâmetro interno é de 1 centímetro e a altura interna de 1,5 centímetros, conforme o ilustrado na Figura 15. O aparato permitiu a realização de leituras mais precisas, evitando a interferência de transmissão de luz em meio as análises.

Figura 15 – Aparato utilizado para medir a reflectância dos fios de alginato com óxido de zinco.



Fonte: Autora, 2024.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do desenvolvimento de filamentos nanocompósitos de alginato com ZnO. Inicialmente, serão exibidos os dados dos filamentos com diferentes concentrações de alginato, obtidos pelo processo de fiação a úmido. Posteriormente, serão apresentados os resultados dos filamentos nanocompósitos. E por último, o efeito da incorporação de glicerol nas estruturas filamentosas adquiridas.

4.1. FILAMENTOS DE ALGINATO

4.1.1. PRODUÇÃO DOS FILAMENTOS

Para produção dos filamentos, optou-se por avaliar a fiabilidade de soluções aquosas de alginato nas concentrações de 2 %, 3 % e 5 % (m/v). As duas primeiras concentrações foram definidas com base nos estudos de Mirabedini *et al.*, (2015) e Silva, (2022) que relatam em suas análises que a utilização de concentrações de alginato menores que 2 % originam filamentos com baixa estabilidade mecânica e aspecto visual não homogêneo. De forma análoga, os autores descrevem, que a utilização de concentrações de alginato superiores a 4 % geram soluções com elevada viscosidade, o que impossibilita o processo de fiação. Entretanto, Chen *et al.* (2021), ao utilizar uma estrutura de extrusão rotativa em meio ao processo de fiação a úmido, conseguiu desenvolver filamentos de alginato empregando uma concentração de 5 % do polímero em solução, em virtude disso, essa concentração também foi selecionada.

O processo de fiação a úmido foi realizado em um banho de coagulação contendo 10 % de cloreto de cálcio dihidratado em solução, conforme o descrito por Silva (2022). Como o alginato é um polímero solúvel em água, a concentração de cloreto de cálcio no banho de coagulação deve ser suficientemente elevada para que o processo de reticulação e gelificação dos filamentos supere a dissolução do alginato no banho.

A extrusão dos filamentos foi realizada com a bomba de infusão na posição vertical a uma vazão de 40 mL/h. Apesar das soluções apresentarem viscosidades diferentes, sendo a solução com 5 % de alginato a mais viscosa, todas apresentaram boa fluidez em meio ao processo, sem causar a obstrução do tubo ou da ponteira, utilizados para transportar a solução até o banho de coagulação e conferir o formato filiforme aos filamentos. De maneira geral, o

processo de fiação a úmido verticalizado possibilitou a realização de processos contínuos, sem o rompimento dos fios.

Após o processo de extrusão, os filamentos permaneceram no banho de coagulação por um período de 15 minutos para garantir uma boa reticulação e, posteriormente, foram imersos em água deionizada para remoção do excesso de cloreto de cálcio. Ao final do processo, os filamentos apresentavam um aspecto gelatinoso e translúcido, além de um diâmetro mais elevado, resultante da capacidade de absorção de água pelo alginato (Puscaselu *et al.*, 2020), como pode ser observado na Figura 16. Vale ressaltar que, embora apresentassem um aspecto aparentemente frágil, os filamentos demonstravam firmeza e alta estabilidade, o que é reforçado pelo fato de terem permanecido íntegros durante seu manuseio.

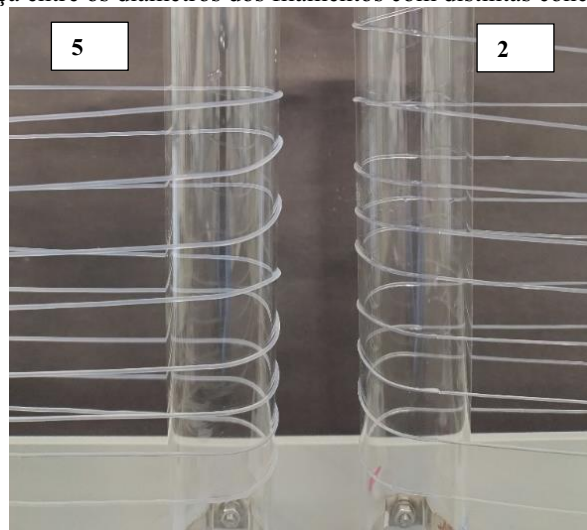
Figura 16 – Aspecto dos filamentos após sua formação.



Fonte: Autora, 2024.

Além disso, era perceptível uma leve diferença de diâmetro entre os filamentos, em virtude das diferentes concentrações de alginato utilizadas. Os filamentos com maiores concentrações do biopolímero apresentaram um diâmetro maior, como pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Diferença entre os diâmetros dos filamentos com distintas concentrações de alginato .



Fonte: Autora, 2024.

Após o banho com água deionizada os filamentos eram dispostos para secagem a temperatura ambiente (25°C) por um período de 24 h, como pode ser observado na Figura 18. Ao final do processo de secagem, observa-se uma diminuição em seu diâmetro, bem como um achatamento dos fios nas partes que ficaram em contato com os tubos de ensaio do suporte. As partes achatadas foram posteriormente descartadas, pois não seriam utilizadas nos ensaios de caracterização.

Figura 18 – Aparato utilizado para etapa de secagem dos filamentos.

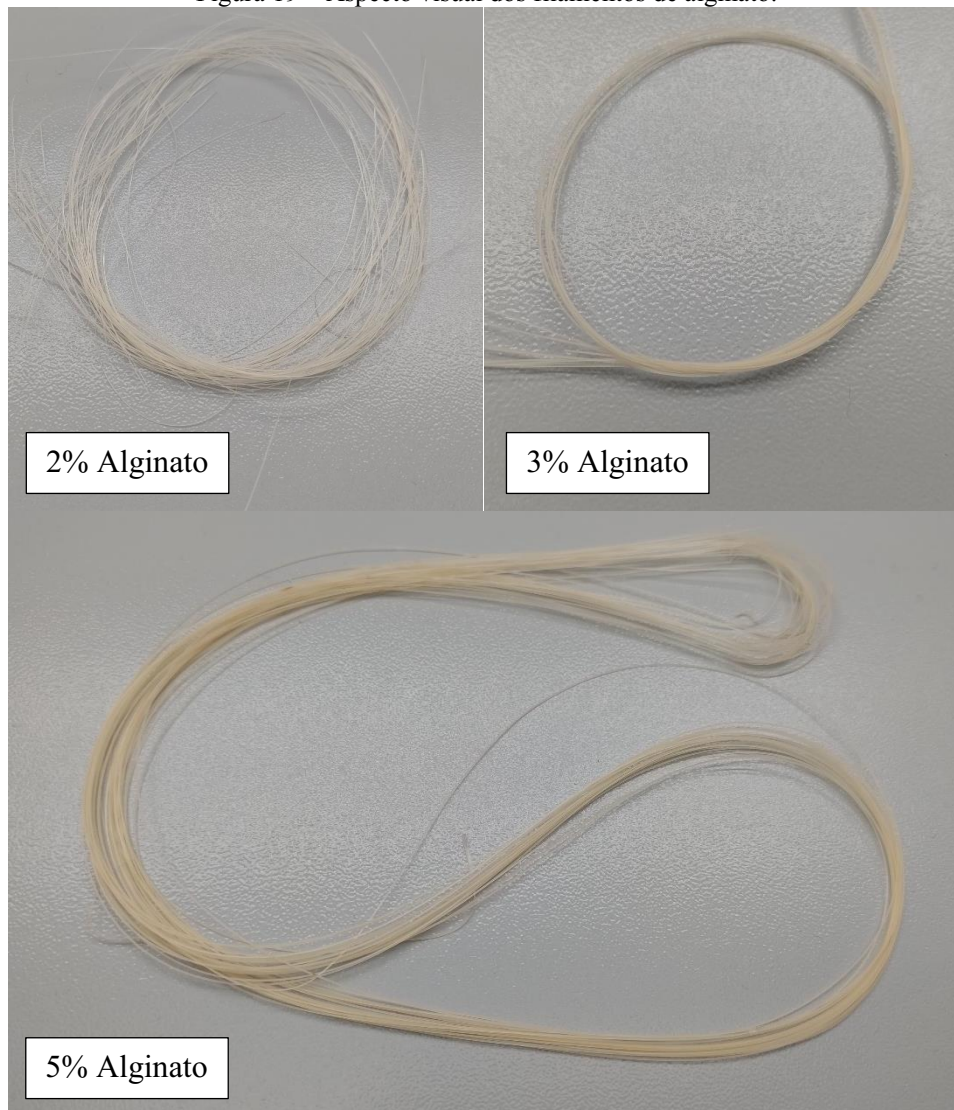


Fonte: Autora, 2024.

4.1.2. ASPECTO VISUAL

Os filamentos obtidos apresentaram uma consistência rígida, além de aspecto homogêneo e regular, sem a presença de pontos frágeis em sua estrutura, como pode ser observado na Figura 19. Percebe-se que a medida que a concentração de alginato aumenta os filamentos exibem uma coloração levemente mais amarelada, principalmente o fio com 5 % de alginato, coloração que é bem característica do biopolímero.

Figura 19 – Aspecto visual dos filamentos de alginato.



Fonte: Autora, 2024

4.1.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

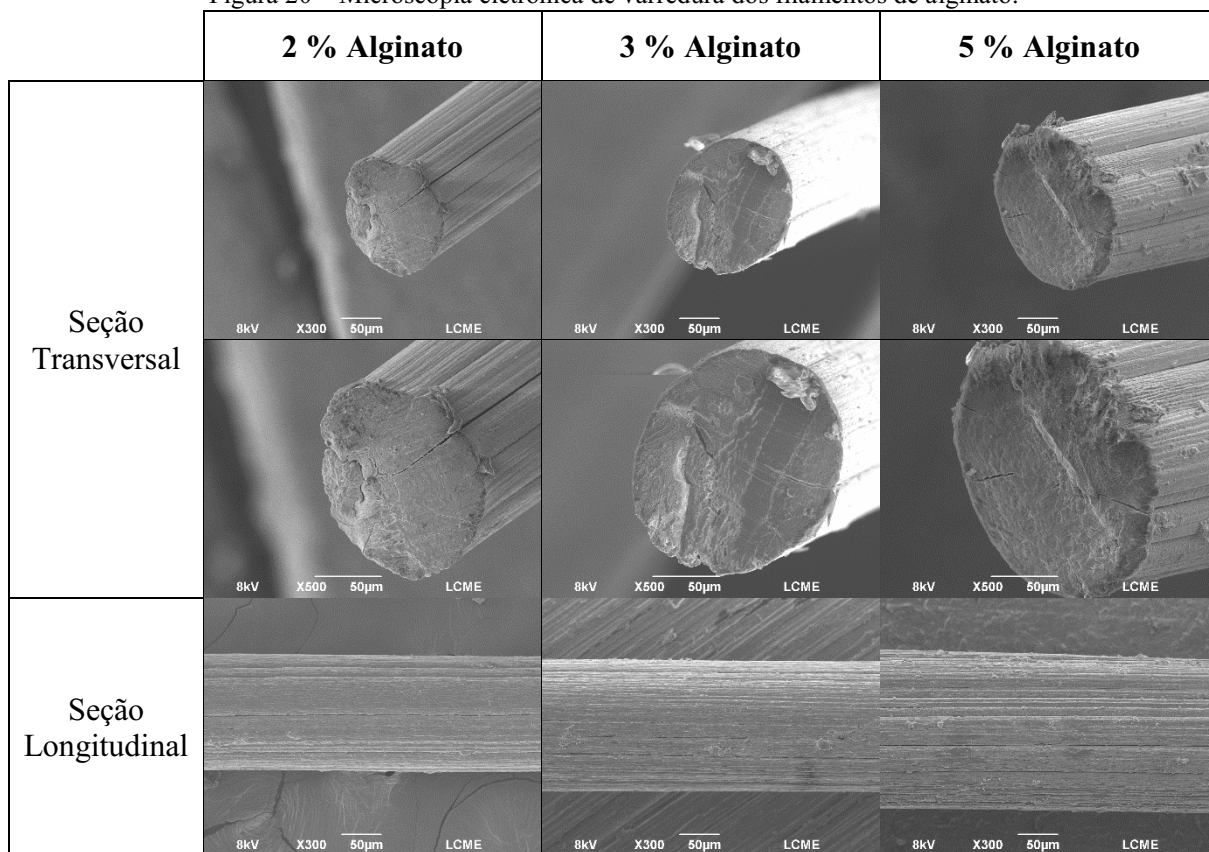
A análise morfológica dos filamentos foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e os resultados obtidos estão apresentados na Figura 20. É possível

observar que as amostras apresentaram uma microestrutura densa e bem homogênea, sem a presença de poros, tanto em sua seção transversal, quanto em sua seção longitudinal.

As seções longitudinais, no entanto, apresentam algumas ranhuras, detalhe que já foi mencionado por outros autores que também utilizaram a tecnologia de fiação a úmido para a produção de fibras de alginato (Chen *et al.*, 2021; Dumont *et al.*, 2018; Mirabedini *et al.*, 2015). Segundo Rohani Shirvan; Nouri; Sutti, (2022), a morfologia e a textura das fibras são diretamente influenciadas pelos parâmetros utilizados no processo de fiação a úmido, tais como concentração do polímero utilizado, composição do banho de coagulação e a taxa de extrusão dos fios. Os parâmetros apresentados, são fatores que podem ter contribuído diretamente para a formação de ranhuras nos filamentos de alginato desenvolvidos.

Ao observar a seção transversal das amostras, verifica-se que elas apresentam um formato circular bem definido e sem achatamentos. Outro detalhe a ser observado é a presença de algumas deformidades nas seções transversais, que podem ter sido ocasionados no momento da fratura das amostras para realização do teste.

Figura 20 – Microscopia eletrônica de varredura dos filamentos de alginato.



Fonte: Autora, 2024

4.1.4. ESPESSURA E DENSIDADE LINEAR

Os valores de espessura e densidade linear dos filamentos de alginato obtidos pela técnica de fiação a úmido são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Espessura e densidade linear dos filamentos de alginato.

Amostra	Espessura Média (mm)	Densidade Linear Média (Tex)
2 % Alginato	0,120 ± 0,002	22,97 ± 2,10
3 % Alginato	0,170 ± 0,003	45,15 ± 2,90
5 % Alginato	0,215 ± 0,017	64,84 ± 3,37

Fonte: Autora, 2024.

Os dados obtidos seguem um padrão já esperado, conforme mencionado no tópico 4.1.1, demonstrando um aumento diretamente proporcional entre a concentração de alginato utilizada, sua espessura e a densidade linear dos filamentos obtidos. A partir da obtenção dos dados de espessura média foi possível classificá-los enquanto fios de sutura, de acordo com a NBR 13904 - FIOS PARA SUTURA CIRÚRGICA, (2003), como pode ser observado na Tabela 3. Como não há uma normatização para fios de alginato, utilizou-se a classificação dos fios *catgut*, visando uma possível correlação dos resultados mecânicos. O número cirúrgico determina a tensão de ruptura que os fios de determinada faixa de diâmetro devem suportar.

Verifica-se que cada um dos filamentos se enquadra em uma classificação diferente de número cirúrgico. O fio com concentração de 2 % de alginato se enquadra no número cirúrgico 6 – 0, que engloba fios com diâmetro entre 0,100 a 0,149 mm. Já o filamento com 3 % de alginato adquire o número cirúrgico 5 – 0, que abrange os fios com espessura entre 0,150 a 0,199 mm. Enquanto o filamento contendo 5 % de alginato é classificado com o número cirúrgico 4 – 0, que inclui fios com diâmetro entre 0,200 a 0,249 mm.

Tabela 3 - Número cirúrgico dos fios de alginato obtidos, de acordo com a NBR 13904.

Amostra	Número Cirúrgico	Faixa de diâmetro (mm)
2 % Alginato	6 – 0	0,100 – 0,149
3 % Alginato	5 – 0	0,150 – 0,199
5 % Alginato	4 – 0	0,200 – 0,249

Fonte: Autora, 2024.

4.1.5. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

O comportamento mecânico dos filamentos de alginato foi analisado por meio de ensaios de tração. Para cada amostra de filamento desenvolvida, foram realizados 10 ensaios. Como os filamentos apresentavam certa rigidez, impossibilitando a realização de nós, esse teste foi realizado sem a presença de nós. Na Tabela 4 são apresentados os dados de tensão de ruptura, alongamento, módulo de elasticidade e força de ruptura.

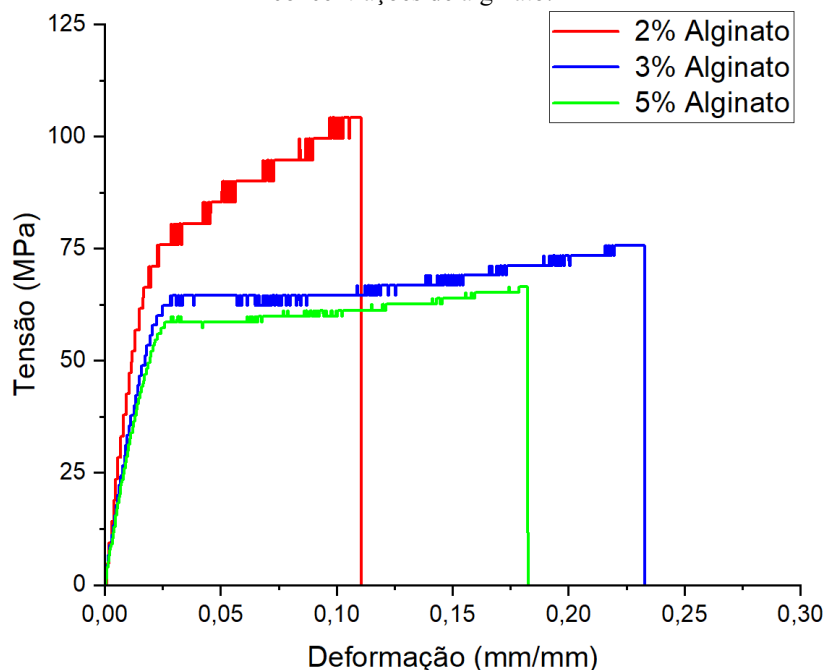
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos filamentos com diferentes concentrações de alginato

Amostra	Força (N)	Alongamento ϵ (%)	Tensão de Ruptura σ (Mpa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
2 % Alginato	2,36 \pm 0,21	11,13 \pm 1,21	215,23 \pm 19,74	4201,19 \pm 76,86
3 % Alginato	3,36 \pm 0,37	20,70 \pm 2,42	151,74 \pm 20,15	2988,59 \pm 38,17
5 % Alginato	4,64 \pm 0,30	17,76 \pm 3,35	131,92 \pm 8,67	3021,80 \pm 34,95

Fonte: Autora, 2024.

Verifica-se que os filamentos contendo 3 % e 5 % de alginato apresentaram maior percentual de alongamento se comparado a amostra contendo 2 % de alginato, demonstrando que esses filamentos são mais dúcteis, ou seja, têm maior capacidade de deformação. Na Figura 21, é possível observar as curvas representativas de tensão *versus* deformação dos filamentos, verifica-se que os fios com maior concentração de alginato apresentam um comportamento plástico, com uma região de escoamento maior, ou seja, possuem maior capacidade de deformação plástica. Já o filamento com 2 % de alginato, apresenta uma estrutura mais rígida, e com menor capacidade de deformação (Callister; Rethwisch, 2012).

Figura 21 – Gráfico das curvas representativas de Tensão *versus* Deformação para os filamentos com diferentes concentrações de alginato.



Fonte: Autora, 2024.

Os dados obtidos também indicam que, à medida que a concentração de alginato aumenta, a tensão de ruptura diminui. Entretanto, vale ressaltar que, como este parâmetro é obtido pelo do quociente entre a Força no momento de ruptura e a área da seção transversal dos filamentos, esse resultado já era esperado. Como demonstrado no tópico anterior, o aumento na concentração de alginato acarreta em um aumento no diâmetro dos filamentos e, conseqüentemente, em sua seção transversal. Dessa forma, uma seção transversal reduzida contribuiria para obtenção de dados de tensão de ruptura mais elevados. Sendo assim, os resultados de Força seriam mais expressivos para a análise de resistência mecânica desse material. Observa-se que, à medida que a concentração de alginato aumenta, a força de ruptura apresentada é maior, o que era previsível, considerando que o aumento da concentração de alginato resulta na formação de uma estrutura polimérica mais densa e reforçada (Chen *et al.*, 2021).

A análise do módulo de elasticidade confirma as observações dos parágrafos anteriores. Nota-se que o filamento com 2 % de alginato exibe o resultado mais elevado, indicando que essa amostra apresenta uma maior rigidez se comparada às demais. Já as amostras contendo 3 % e 5 % de alginato apresentam resultados semelhantes e demonstram maior flexibilidade, característica importante para os fios de sutura.

Jing *et al.*, (2020) relata que estruturas de alginato com cadeias mais reticuladas apresentam características como maior rigidez e menor alongamento, além de uma redução de sua resistência à tração. Enquanto estruturas com cadeias menos reticuladas apresentam maior flexibilidade, alongamento e maior resistência. Considerando que a concentração de CaCl₂ nos banhos de coagulação foi a mesma para todos os filamentos, acredita-se que os filamentos com 2 % de alginato acabaram sofrendo uma reticulação mais vigorosa, tendo em vista que uma menor concentração de polímero, contribuiria para uma maior disponibilidade de íons Ca⁺ em meio ao banho.

Através dos resultados mecânicos é possível fazer a correlação entre o número cirúrgico dos filamentos e a tensão média que os fios devem suportar, de acordo com a NBR13904. Essa correlação é apresentada na Tabela 5, onde se verifica que de acordo com os parâmetros exigidos pela norma, os filamentos contendo 2 % e 3 % possuem a força requerida (considerando o desvio padrão). No entanto, o alongamento também é uma propriedade importante para o manuseio durante a aplicação como fio de sutura, de forma que a concentração de 3 % apresenta resultados mais condizentes. Diante do exposto a concentração de 3 % foi selecionada para dar continuidade as etapas subsequentes.

Tabela 5 – Correlação entre os testes mecânicos e o número cirúrgico dos filamentos, segundo a NBR13904.

Amostra	Número Cirúrgico	Tensão média (N) NBR13904	Tensão de ruptura dos filamentos (N)
2 % Alginato	6 – 0	1,77	2,36 ± 0,21
3 % Alginato	5 – 0	3,73	3,36 ± 0,37
5 % Alginato	4 – 0	7,55	4,64 ± 0,30

Fonte: Autora, 2024.

4.2. FILAMENTOS DE ALGINATO COM OXIDO DE ZINCO

Com o objetivo de funcionalizar os fios de alginato e melhorar suas propriedades mecânicas, foram incorporadas aos filamentos, nanopartículas de óxido de zinco. A caracterização dos filamentos obtidos será descrita neste tópico.

4.2.1. PRODUÇÃO DOS FILAMENTOS

O processo de produção dos filamentos de alginato com óxido de zinco seguiu o mesmo padrão utilizado para produção dos filamentos contendo apenas alginato. Tendo em vista que os filamentos com concentração de 3 % de alginato apresentaram características mais condizentes com a NBR 13904, bem como, resultados mecânicos ligeiramente melhores, essa concentração foi selecionada para as etapas subsequentes e para a incorporação do óxido de zinco.

Foram realizados alguns testes preliminares na tentativa de incorporar baixas concentrações de óxido de zinco nos filamentos com concentração de 5 % de alginato, entretanto, ao final da preparação, verificou-se que ao adicionar o ZnO, a suspensão adquiriu uma consistência extremamente viscosa, o que impossibilitou o processo de fiação. Situação similar ocorreu ao tentar incorporar concentrações superiores a 6 % de ZnO (m/m) nos filamentos contendo 3 % de alginato em concentração. A suspensão apresentava uma viscosidade moderada, mas que possibilitaria o processo de fiação. Entretanto, em meio ao processo de extrusão, a suspensão começava a aglutinar na ponteira, formando grumos, como pode ser observado na Figura 22, tornando inviável a obtenção de filamentos com aspecto homogêneo. Dessa forma, optou-se por utilizar concentrações de 1 %, 2,5 % e 5 % de ZnO (m/m) em relação a massa de alginato presente em solução.

Figura 22 –Aspecto dos filamentos contendo 3 % de alginato e 10 % de ZnO.

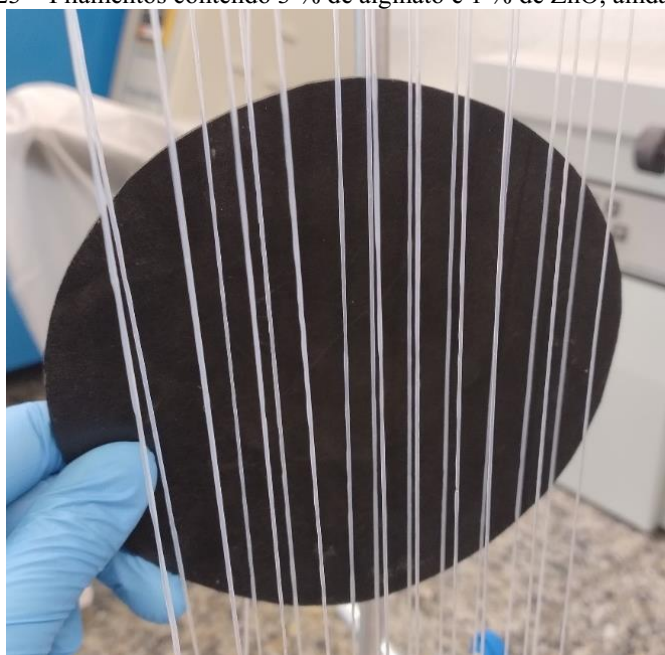


Fonte: Autora, 2024.

Em meio ao processo de extrusão dos filamentos, as suspensões desenvolvidas a partir das concentrações 1 % e 2,5 % de ZnO apresentaram uma boa fluidez. Já a suspensão contendo 5 % de ZnO apresentou uma viscosidade levemente mais elevada, o que acabava dificultando um pouco seu processo de fiação, entretanto, de forma geral todas as suspensões possibilitaram a realização de um processo contínuo, sem o rompimento dos fios.

Após o período de reticulação e da lavagem para remoção do excesso de cloreto de cálcio, os filamentos demonstraram firmeza e estabilidade em relação ao manuseio. Além disso, apresentavam um aspecto gelatinoso, opaco e esbranquiçado, devido à presença de ZnO em sua composição. Nessa etapa, em que os filamentos apresentavam uma espessura mais elevada, observou-se que os fios contendo 1 % de ZnO apresentavam leves deformidades em sua superfície, o que poderia ocasionar pontos de fragilidade em sua estrutura, como pode ser observado na Figura 23. Entretanto, os testes com essa concentração foram mantidos para fins de comparação.

Figura 23 – Filamentos contendo 3 % de alginato e 1 % de ZnO, ainda úmidos.



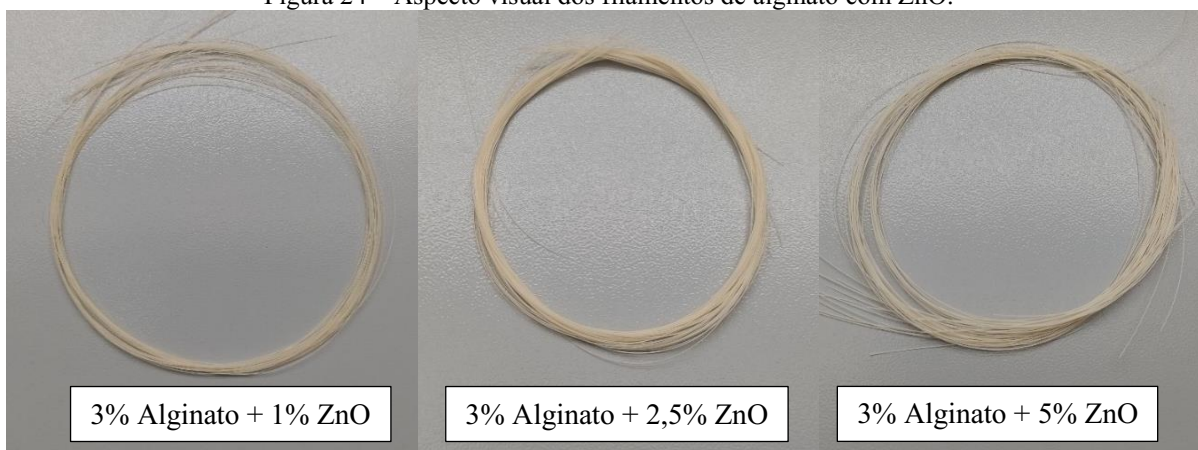
Fonte: Autora, 2024.

Ao final do processo de secagem, assim como nos filamentos de alginato puro, foi observada uma diminuição no diâmetro dos filamentos com ZnO, bem como um achatamento nas partes que ficaram em contato com os tubos de ensaio do suporte, as quais foram desprezadas nos ensaios de caracterização.

4.2.2. ASPECTO VISUAL

Os filamentos obtidos a partir da incorporação das nanopartículas apresentaram uma consistência rígida. Como mencionado no tópico anterior, foram observadas leves deformidades na superfície do filamento com 1 % de ZnO. No entanto após a secagem, em temperatura ambiente, não é possível identificar essas imperfeições a nível macroscópico, como pode ser observado no Figura 24. Já os filamentos contendo 2,5 % e 5 % de óxido de zinco apresentaram um aspecto bem homogêneo e regular, sem a presença de pontos frágeis ao longo de sua estrutura.

Figura 24 – Aspecto visual dos filamentos de alginato com ZnO.



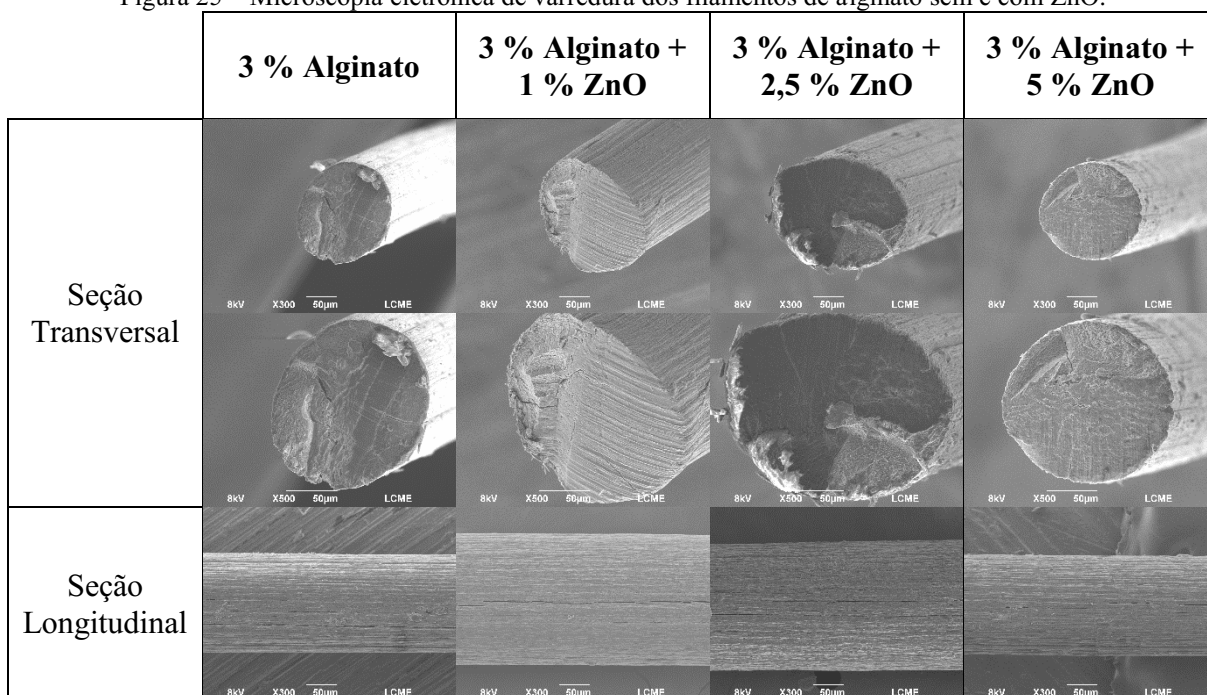
Fonte: Autora, 2024

4.2.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise morfológica dos filamentos contendo ZnO também foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e os resultados estão apresentados na Figura 25. Observa-se que as amostras obtidas apresentam uma microestrutura densa e bem homogênea, sem a presença aparente de aglomerações de nanopartículas de ZnO, demonstrando que a solvatação e dispersão das nanopartículas foi realizada de forma adequada e eficiente.

Ao longo da seção transversal das amostras observa-se mais uma vez a formação de algumas ranhuras que, como mencionado anteriormente, são oriundas do processo de fiação a úmido, bem como dos parâmetros utilizados. Ao observar a seção transversal das amostras obtidas, verifica-se que elas apresentam um formato circular bem definido e sem achatamentos.

Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura dos filamentos de alginato sem e com ZnO.



Fonte: Autora, 2024

4.2.4. ESPESSURA E DENSIDADE LINEAR

Os valores de espessura e densidade linear dos filamentos de alginato com óxido de zinco obtidos pela técnica de fiação a úmido são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Espessura e densidade linear dos filamentos de alginato sem e com ZnO.

Amostra	Espessura Média (mm)	Densidade Linear Média (Tex)
3 % Alginato	0,170 ± 0,003	45,15 ± 2,90
3 % Alginato + 1 % ZnO	0,185 ± 0,007	48,80 ± 1,20
3 % Alginato + 2,5 % ZnO	0,173 ± 0,004	42,08 ± 1,40
3 % Alginato + 5 % ZnO	0,186 ± 0,006	54,28 ± 2,03

Fonte: Autora, 2024.

Ao observar os dados obtidos, verifica-se que a concentração de 2,5 % de ZnO apresentou uma espessura similar ao filamento constituído apenas por alginato. Já os filamentos contendo 1 % e 5 % de ZnO demonstraram um ligeiro aumento em sua espessura e densidade linear. A ausência de uma tendência definida da espessura com o aumento da concentração de ZnO pode estar relacionada a diferenças de dispersão e regiões de aglomeração nos filamentos.

De forma análoga ao realizado anteriormente, os filamentos contendo ZnO também foram classificados quanto ao seu número cirúrgico para uma posterior correlação dos resultados mecânicos. Como pode ser observado na Tabela 7, assim como o filamento contendo 3 % alginato, todos os fios contendo ZnO se encaixaram no número cirúrgico 5 – 0, indicando que as variações de espessura observadas não influenciaram essa classificação.

Tabela 7 - Número cirúrgico dos filamentos de alginato sem e com ZnO, de acordo com a NBR 13904.

Amostra	Número Cirúrgico	Faixa de diâmetro (mm)
3 % Alginato	5 – 0	0,150 – 0,199
3 % Alginato + 1 % ZnO	5 – 0	0,150 – 0,199
3 % Alginato + 2,5 % ZnO	5 – 0	0,150 – 0,199
3 % Alginato + 5 % ZnO	5 – 0	0,150 – 0,199

Fonte: Autora, 2024.

4.2.5. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

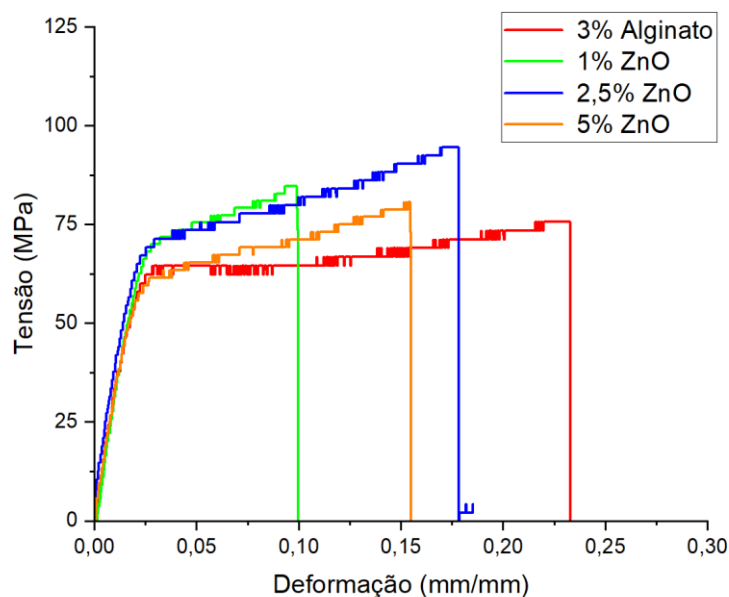
O comportamento mecânico dos filamentos de alginato contendo diferentes concentrações de ZnO estão descritos na Tabela 8 e no gráfico apresentado na Figura 26. Como a estrutura dos filamentos apresentava maior rigidez, esse teste também foi realizado sem a presença de nós na estrutura dos filamentos.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas dos filamentos de alginato sem e com ZnO.

Amostra	Força (N)	Alongamento ϵ (%)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
3 % Alginato	3,36 ± 0,37	20,70 ± 2,42	151,74 ± 20,15	2988,59 ± 38,17
3 % Alginato + 1 % ZnO	4,39 ± 0,44	8,10 ± 4,18	163,29 ± 19,47	3564,87 ± 37,53
3 % Alginato + 2,5 % ZnO	4,31 ± 0,27	17,48 ± 2,75	183,56 ± 12,92	3288,59 ± 35,93
3 % Alginato + 5 % ZnO	4,39 ± 0,57	15,47 ± 1,77	165,65 ± 23,41	3075,02 ± 31,42

Fonte: Autora, 2024.

Figura 26 – Gráfico das curvas representativas de Tensão *versus* Deformação para os filamentos de alginato e suas variações com diferentes concentrações de ZnO.



Fonte: Autora, 2024.

Verifica-se que a adição de ZnO influencia diretamente no alongamento dos filamentos de alginato. Nota-se que houve uma diminuição no alongamento dos fios com ZnO, sendo que a diminuição mais expressiva foi apresentada pelo fio com concentração de 1 % de ZnO, uma redução de aproximadamente 60 %. Os filamentos com 3 % e 5 % também apresentaram certa diminuição, entretanto os resultados foram similares entre si e a redução não foi tão expressiva, demonstrando que esses fios ainda apresentam certa ductilidade.

Nota-se que houve um aumento na tensão de ruptura dos filamentos, sendo que o melhor resultado foi apresentado pelo filamento contendo 2,5 % de ZnO, que apresentou um aumento de aproximadamente 21 %. Os filamentos com 1 % e 5 % apresentaram resultados ligeiramente menores e similares entre si. Outro fator que deve ser observado é a força de ruptura, constatase que mesmo com diferentes concentrações de ZnO, os filamentos apresentaram resultados semelhantes entre si, além disso, todos apresentaram um aumento superior a 20 %.

Observa-se também que todos os filamentos contendo ZnO apresentaram valores superiores para o módulo de elasticidade, indicando que todas as estruturas adquiriam maior rigidez com a incorporação das nanopartículas, sendo que os filamentos com 1 % apresentaram os maiores valores para essa propriedade. Vale ressaltar que os filamentos com 1 % de ZnO apresentaram uma superfície mais irregular, como foi descrito nos tópicos anteriores, o que pode ter contribuído para ocorrência de pontos frágeis em meio a estrutura, acarretando em maior rigidez e menores resultados de alongamento.

O aumento da tensão de ruptura e do módulo de elasticidade com a incorporação de nanopartículas pode ser atribuído ao efeito nanocompósito obtido a partir de uma dispersão homogênea e boa interação interfacial entre as partículas e a matriz de alginato. No entanto, o efeito de reforço também depende fortemente da quantidade de nanopartículas utilizadas. Em teores muito baixos, as partículas se distribuem esporadicamente na matriz, reduzindo o número de interações e levando a um efeito de reforço pequeno ou insignificante. Por outro lado, o aumento de nanopartículas atinge um limite onde a distância entre os nanocristais se torna muito próxima e eles começam a se sobrepor, enfraquecendo as interações e reduzindo a resistência à tração do nanocompósito (Demir *et al.*, 2023). A tendência de redução das propriedades na concentração de 5 % pode estar relacionada ao distanciamento do limite em que o efeito é positivo.

A correlação entre o número cirúrgico dos filamentos e a tensão média que os fios devem suportar, de acordo com a NBR13904 é apresentada na Tabela 9, onde se verifica que de acordo com os parâmetros exigidos pela norma, todos os filamentos com ZnO apresentam valores superiores à força requerida.

Tabela 9 – Correlação entre os testes mecânicos e o número cirúrgico dos filamentos, segundo a NBR13904.

Amostra	Número Cirúrgico	Tensão de média (N) NBR13904	Tensão de ruptura dos filamentos (N)
3 % Alginato	5 – 0	3,73	3,36 ± 0,37
3 % Alginato + 1 % ZnO	5 – 0	3,73	4,39 ± 0,44
3 % Alginato + 2,5 % ZnO	5 – 0	3,73	4,31 ± 0,27
3 % Alginato + 5 % ZnO	5 – 0	3,73	4,39 ± 0,57

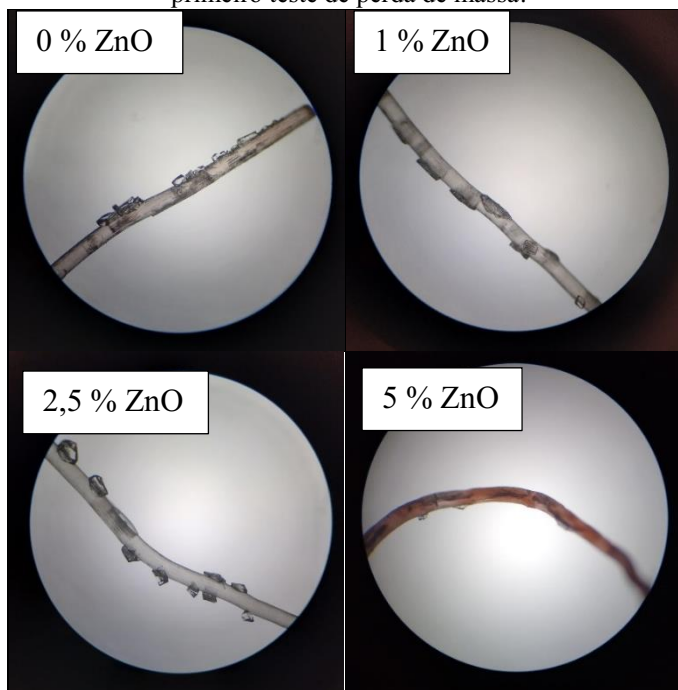
Fonte: Autora, 2024.

4.2.6. PERDA DE MASSA

Os valores de perda de massa dos filamentos em contato com a água e o FCS, tanto para 7 dias quanto para 14 dias, são apresentados na Tabela 9. Os resultados obtidos por meio desse teste são de suma importância para a compreensão da variabilidade das características mecânicas e da estabilidade dos filamentos quando em contato com meios fluidos.

Foi realizado um teste inicial com os filamentos em FCS, no qual estes permaneceram ao longo de 7 dias imersos na solução. Após esse período, os filamentos foram secos para que a perda de massa fosse aferida, entretanto, observou-se que os filamentos apresentavam uma massa superior à inicial registrada. Verificou-se, também, uma certa rugosidade em sua superfície. Diante do exposto, foi realizada uma breve análise dos filamentos em um microscópio óptico, cujas imagens estão ilustradas na Figura 27. A análise microscópica revelou a presença de partículas sólidas aderidas aos filamentos, as quais podem ser atribuídas aos sais do FCS que cristalizaram em meio ao processo de secagem dos filamentos após a imersão. Como resultado, houve o aumento da massa dos filamentos, fragilizando sua estrutura e tornando-os extremamente quebradiços.

Figura 27 – Imagens em microscópio óptico com um aumento de (100 x) dos filamentos de alginato após o primeiro teste de perda de massa.



Fonte: Autora, 2024.

Como não foi possível utilizar os dados do primeiro teste de perda de massa em FCS, o teste foi refeito inserindo uma etapa de lavagem após o tempo de imersão. Portanto, antes do período de secagem, os filamentos foram lavados abundantemente com água destilada para remoção dos sais oriundos da solução de FCS que ainda poderiam estar presentes na superfície do filamento. Após a secagem, os filamentos permaneceram íntegros e foi possível aferir a perda de massa. Os dados dos ensaios de perda de massa em FCS e água deionizada são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Perda de massa dos filamentos de alginato sem e com ZnO.

Amostra	Perda de massa em FCS (%)		Perda de massa em água deionizada (%)	
	7 dias	14 dias	7 dias	14 dias
3 % Alginato	45,37 ± 2,09	45,47 ± 3,71	4,70 ± 0,33	17,11 ± 3,73
3 % Alginato + 1 % ZnO	23,84 ± 1,13	48,88 ± 1,66	0,00 ± 0,00	2,71 ± 2,39
3 % Alginato + 2,5 % ZnO	41,60 ± 2,93	48,23 ± 1,79	0,00 ± 0,00	13,92 ± 2,50
3 % Alginato + 5 % ZnO	36,12 ± 0,21	50,98 ± 1,69	9,03 ± 4,35	11,70 ± 8,02

Fonte: Autora, 2024.

Em meio aos testes realizados em FCS, observa-se que, com exceção da amostra com 1 % de ZnO, os demais filamentos apresentaram uma perda de massa mais elevada e proeminente, principalmente nos primeiros 7 dias, tendo pouco acréscimo em 14 dias. Já os testes realizados em meio aquoso, apresentaram pouca variabilidade nos 7 dias iniciais, sendo que os filamentos com 1 % e 2,5 %, não apresentaram alteração mássica ao longo desse período.

Vale ressaltar que a perda de massa em meio aquoso demonstrou-se menos expressiva em comparação ao teste realizado com FCS, indicando que a presença de sais em solução corrobora para uma maior perda de massa dos filamentos (Motelica *et al.*, 2021). Isso ocorre porque o processo de reticulação da matriz, em que o sódio do alginato é substituído pelo cálcio, pode ser parcialmente revertido ao entrar novamente em contato com os íons sódio, que nesse caso, estão presentes no FCS como cloreto de sódio, bicarbonato de sódio e sulfato de sódio. A diminuição do grau de reticulação, deixa as cadeias mais disponíveis para a entrada dos solventes e, conseqüentemente, para a dissolução do alginato.

Observa-se que a presença de ZnO em baixas concentrações na estrutura filamentar acaba contribuindo para uma redução da perda de massa, tanto em FCS quanto em água deionizada. Esse comportamento também foi observado por Cleetus *et al.*, (2020) em meio ao desenvolvimento de hidrogéis de alginato de cálcio contendo 0,5 % e 1 % de ZnO, onde relata que durante os ensaios de perda de massa, o ZnO auxiliou a manter as características estruturais dos hidrogéis por um período mais prolongado. O autor atribui esse fato a um aumento da reticulação dos géis em virtude da presença de nanopartículas de ZnO.

4.2.7. ABSORÇÃO DE FLUÍDOS

A Tabela 11 apresenta os resultados de absorção para os filamentos de alginato com diferentes concentrações de ZnO.

Tabela 11 – Absorção de fluidos dos filamentos de alginato sem e com ZnO.

Amostra	Absorção em FCS (%)	Absorção em Água deionizada (%)
3 % Alginato	56,73 ± 2,24	32,05 ± 5,87
3 % Alginato + 1 % ZnO	71,78 ± 4,06	48,09 ± 2,18
3 % Alginato + 2,5 % ZnO	50,61 ± 3,56	29,57 ± 2,52
3 % Alginato + 5 % ZnO	49,50 ± 5,42	25,00 ± 3,95

Fonte: Autora, 2020.

Observa-se que, a concentração de 1 % de ZnO apresentou um aumento significativo na absorção tanto do FCS quanto de água, sugerindo que essa seria uma concentração adequada para melhorar a capacidade de absorção dos filamentos. Além disso, nota-se que, em ambos os casos, à medida que a concentração de ZnO aumenta, a absorção de fluidos vai diminuindo. Motelica *et al.*, (2021) também observaram esse comportamento ao desenvolver filmes de alginato de cálcio com ZnO, e sugere que, ao adentrarem na estrutura polimérica, as nanopartículas vão se interligando em meio a espaços vazios das moléculas de alginato de cálcio, o que acaba reduzindo o espaço disponível para penetração de água e de outros fluidos, e como consequência, acaba diminuindo a capacidade de absorção dessas estruturas.

Verifica-se, também, que os filamentos apresentaram maiores resultados de absorção em contato com o FCS, comportamento que também é descrito por Motelica *et al.*, (2021), que afirma que essa maior absorção decorre do fato do alginato apresentar afinidade com os íons presentes na solução de FCS.

Considerando a aplicação como fios de sutura, uma elevada absorção de água não é desejada, pois o intumescimento da estrutura quando em contato com os fluidos biológicos pode comprometer a segurança dos nós. De forma geral, tanto os resultados de absorção em FCS como em água podem ser considerados baixos, uma vez que fios de sutura comerciais de categute e de fios sintéticos de ácido poliglólico (PGA) apresentam graus de intumescimento de 120 % e 45 %, respectivamente (Vega-Cázarez *et al.*, 2018).

4.2.8. ATIVIDADE ANTIMICROBIANA

A atividade antimicrobiana dos filamentos contendo óxido de zinco, foram avaliadas por meio do teste de difusão em placas de ágar com colônias de bactérias *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*. No entanto, nenhum dos filamentos apresentou halo de inibição como pode ser observado na Figura 28, onde é possível observar os fios controle, contendo apenas alginato, na parte superior da placa de Petri, e os filamentos contendo a maior concentração de ZnO (5 %), na parte inferior, demonstrando que os fios desenvolvidos não possuem atividade antimicrobiana.

Figura 28 – Resultado do teste difusão de ágar das amostras com 5 % ZnO, contra *E. coli* e *S.aureus*.



Fonte: Autora, 2024.

Satriaji *et al.*, (2020) e Bakil *et al.*, (2020) reportaram um efeito antimicrobiano significativo ao desenvolver filmes nanocompósitos de alginato com ZnO, tanto contra bactérias gram-positivas quanto gram-negativas, todavia o substrato em questão apresentava massa e uma área de contato superiores se comparado aos filamentos, o que favorece a inibição de atividade microbiana.

Além disso, vale ressaltar que as propriedades das nanopartículas de ZnO dependem principalmente do método de síntese utilizado para sua produção e de fatores como morfologia, pureza do material utilizado e tendência a agregação (Czyżowska; Barbasz, 2022; Kumar *et al.*, 2013), fatores que pode ter contribuído para a obtenção de um resultado negativo.

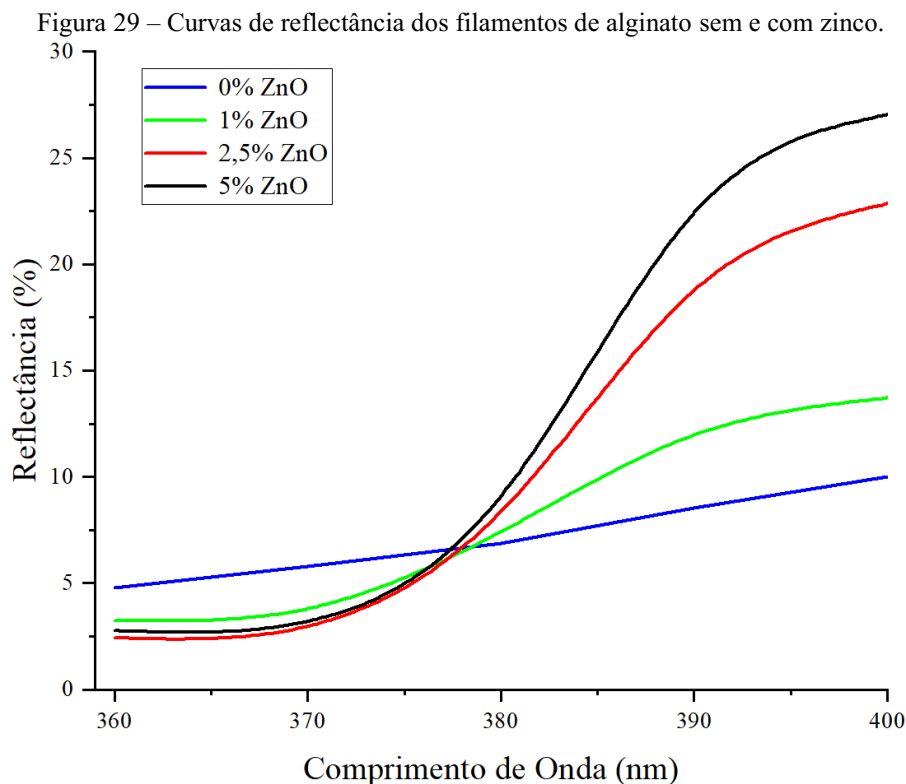
Outro fator que deve ser observado é a composição do alginato utilizado. Qin, (2008) e Abka-khajouei *et al.*, (2022) reportam que alginatos com maior teor de blocos G apresentam interações mais fortes com íons divalentes como o zinco, responsável pela ação antimicrobiana,

o que acaba dificultando sua liberação, diferentemente do que acontece com alginatos com maior teor de blocos M, que não apresentam interações tão forte e facilitam a liberação do zinco.

4.2.9. ANÁLISE DE REFLECTÂNCIA

Segundo Ghamsari *et al.*, (2017), a estrutura cristalina das nanopartículas de ZnO favorece a absorção da radiação ultravioleta (UV), que ao ser absorvida, é transformada em radiação infravermelha e pode ser dissipada na forma de calor sem oferecer riscos à saúde. Diante do que foi dito, pode-se dizer que um indicativo de efeito de proteção contra raios UV seria a redução do percentual de reflectância dos filamentos contendo ZnO. Dessa forma foram analisadas as curvas de reflectância, entre os comprimentos de onda 360 nm até 400 nm, dos fios funcionalizados com as nanopartículas de ZnO, em um espectrofotômetro de reflectância DATACOLOR 500. As curvas obtidas são apresentadas na Figura 29.

Observa-se que o fio controle apresenta uma reflectância de 4,80 % no comprimento de onda de 360 nm. Já o filamento contendo 1 % de ZnO demonstrou uma reflectância de 3,24 %. Enquanto o filamento contendo 2,5 % de ZnO apresentou uma reflectância de 2,42 % e o fio com 5 % de ZnO exibiu uma reflectância de 2,77 %.



Fonte: Autora, 2024.

Verifica-se que as amostras contendo nanopartículas de ZnO apresentaram uma redução na reflectância, sendo que a amostra com concentração de 2,5 % apresentou a maior redução, sendo considerada, neste caso o ponto ótimo de concentração, já que, o fio com 5 % de ZnO apresentou uma reflectância levemente superior. Dessa forma é possível associar a redução da reflectância, com um indicativo de que a incorporação das nanopartículas aumentou a absorção da radiação UV.

4.3. FILAMENTOS DE ALGINATO COM OXIDO DE ZINCO E GLICEROL

Nos capítulos anteriores, observou-se que os filamentos nanocompósitos de alginato apresentavam certa rigidez, característica que impossibilitava a realização de nós em meio a sua estrutura, o que inviabiliza sua aplicação como fio de sutura. Diante do exposto, optou-se por utilizar glicerol como agente plastificante.

4.3.1. PRODUÇÃO DOS FILAMENTOS

O processo de produção dos filamentos de alginato e óxido de zinco com glicerol, seguiram o mesmo padrão e parâmetros utilizados para produção dos filamentos anteriores. Como os fios com concentração 3 % de alginato e 2,5 % de ZnO apresentaram melhores características de processamento e propriedades interessantes, essas concentrações foram selecionadas para incorporação de glicerol. A incorporação do plastificante visa conceder maior ductilidade aos fios, tendo em vista que, devido a certa rigidez dos filamentos obtidos, até então, não foi possível a realização de nós em sua estrutura, detalhe indispensável para um bom fio de sutura cirúrgico.

Ao estudar o comportamento de diferentes concentrações de glicerol em filmes de alginato e pectina, Silva; Bierhalz; Kieckbusch, (2009) reportaram que os melhores resultados foram obtidos utilizando concentrações entre 5 % e 10 % de glicerol, sendo que concentrações inferiores a 3 % deram origem a estruturas quebradiças e concentrações superiores a 12 % acabavam afetando a integridade da estrutura. Hou *et al.*, (2022) também, observaram que a utilização de glicerol nas concentrações 0,75 % e 6 % contribuiu para a melhora da flexibilidade de filamentos nanocompósitos de alginato com nanocristais de quitina. Dessa forma optou-se por avaliar o efeito da incorporação do agente plastificante utilizando concentrações de 5 % e 10 % de glicerol em relação a massa de alginato presente em solução.

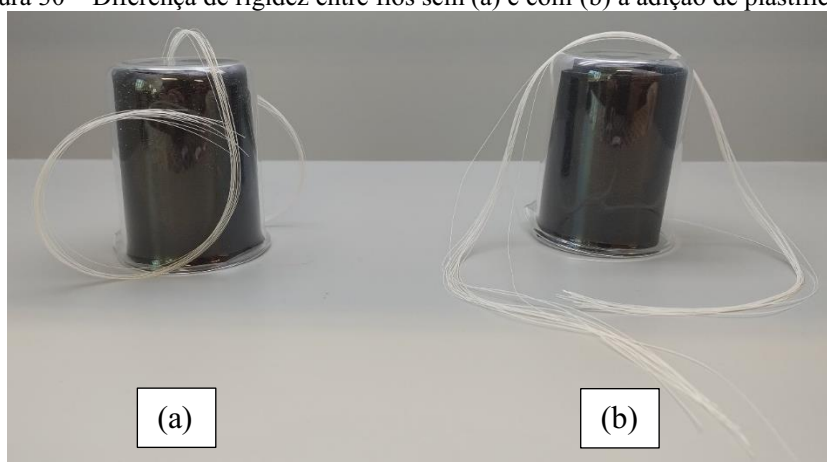
De modo geral, ambas as suspensões obtiveram uma boa fluidez em meio ao processo de extrusão dos filamentos, permitindo a realização de um processo contínuo, sem o rompimento dos filamentos. Verificou-se que, após as etapas de reticulação e lavagem, o filamento apresentava um aspecto mais frágil e emborrachado, sendo que seu manuseio tinha que ser mais cuidadoso, pois a estrutura era facilmente achatada mediante a aplicação de uma leve pressão. Apesar disso, os filamentos apresentaram uma superfície homogênea e sem deformidades ao longo de sua estrutura.

Ao final do processo de secagem em temperatura ambiente, período equivalente a 24h, verificou-se que os fios contendo glicerol não apresentaram uma redução tão significativa em seu diâmetro, como havia sido observado nos filamentos anteriores. Além disso, sua estrutura continuava sensível, fato que não impossibilitava o seu manuseio.

4.3.2. ASPECTO VISUAL

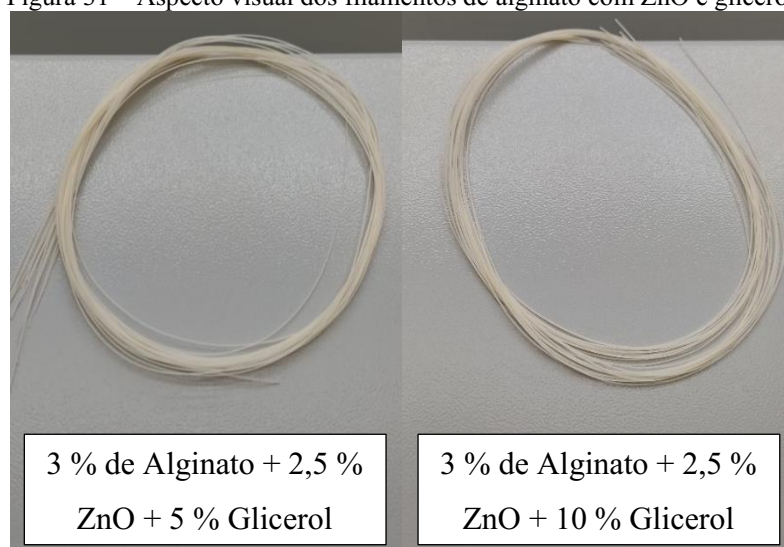
Os filamentos obtidos a partir da incorporação de glicerol apresentaram maior ductilidade, diferentemente da estrutura rígida e frágil apresentada pelos filamentos sem a presença de plastificante, como pode ser observado na Figura 30. Além disso, observa-se, por meio da Figura 31 que, os fios obtidos apresentaram um aspecto homogêneo e regular, como uma coloração mais esbranquiçada.

Figura 30 – Diferença de rigidez entre fios sem (a) e com (b) a adição de plastificante.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 31 – Aspecto visual dos filamentos de alginato com ZnO e glicerol.



Fonte: Autora, 2024

4.3.3. ESPESSURA E DENSIDADE LINEAR

Na Tabela 12 são apresentados os valores de espessura e densidade linear dos filamentos de alginato e suas variações com o ZnO e o plastificante glicerol.

Tabela 12 - Espessura e densidade linear dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO.

Amostra	Espessura Média (mm)	Densidade Linear Média (Tex)
3 % Alginato	0,170 ± 0,003	45,15 ± 2,90
3 % Alginato + 5 % glicerol	0,285 ± 0,014	88,86 ± 4,67
3 % Alginato + 10 % glicerol	0,271 ± 0,010	81,58 ± 7,88
3 % Alginato + 2,5 % ZnO	0,173 ± 0,013	42,08 ± 1,40
3 % Alginato + 2,5 % ZnO + 5 % glicerol	0,294 ± 0,013	88,36 ± 16,89
3 % Alginato + 2,5 % ZnO + 10 % glicerol	0,306 ± 0,014	100,26 ± 7,71

Fonte: Autora, 2024.

Devido à presença do glicerol, não foi possível obter uma medida precisa da espessura, pois a adição do plastificante deixou a estrutura do fio sensível. Sendo assim, o filamento não poderia ser excessivamente pressionado pelo micrometro em meio a análise para que a espessura fosse obtida, já que poderia ser esmagado. Os fios foram então, cuidadosamente

alocados no micrometro e a espessura foi aferida, de modo que a integridade da estrutura fosse mantida.

Observa-se que a incorporação do glicerol ocasionou um aumento expressivo na espessura e na densidade linear dos filamentos. Nota-se que os filamentos contendo ZnO e glicerol apresentaram uma espessura ligeiramente superior aos demais, o que já era esperado, tendo em vista que a incorporação de ZnO acaba elevando o percentual de sólidos em solução.

Os filamentos contendo glicerol também foram classificados quanto ao seu número cirúrgico. Entretanto, a Tabela 1 da NBR 13904 (Anexo A) utilizada para classificação do número cirúrgico dos filamentos, não apresenta uma delimitação para fios com espessura entre 0,250 a 0,299 mm. Sendo assim, para fins de correlação dos resultados mecânicos desta pesquisa, os filamentos que se enquadram nessa faixa de espessura, foram classificados com número cirúrgico 3 – 0, que engloba filamentos com espessura entre 0,300 a 0,339 mm. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 13, onde observa-se que todos os filamentos contendo glicerol se enquadram no número cirúrgico 3 – 0, em virtude de seu elevado diâmetro.

Tabela 13 - Número cirúrgico dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO, de acordo com a NBR 13904.

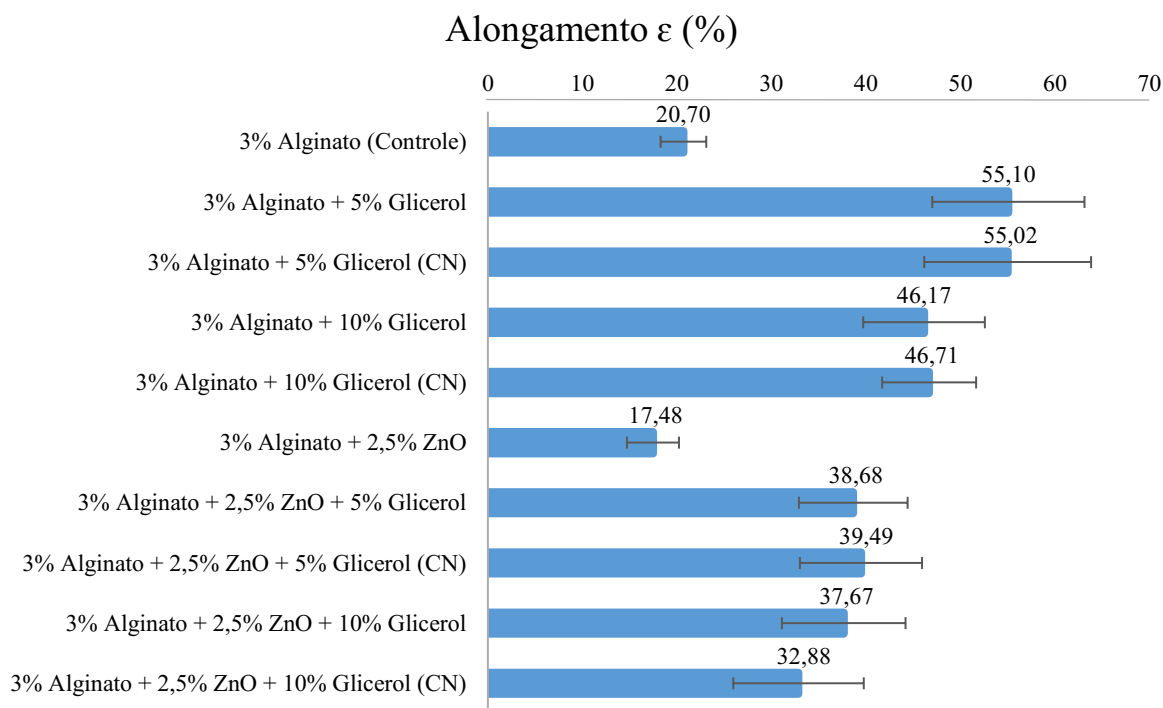
Amostra	Número Cirúrgico
3 % Alginato	5 – 0
3 % Alginato + 5 % glicerol	3 – 0
3 % Alginato + 10 % glicerol	3 – 0
3 % Alginato + 2,5 % ZnO	5 – 0
3 % Alginato + 2,5 % ZnO + 5 % glicerol	3 – 0
3 % Alginato + 2,5 % ZnO + 10 % glicerol	3 – 0

Fonte: Autora, 2024.

4.3.4. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

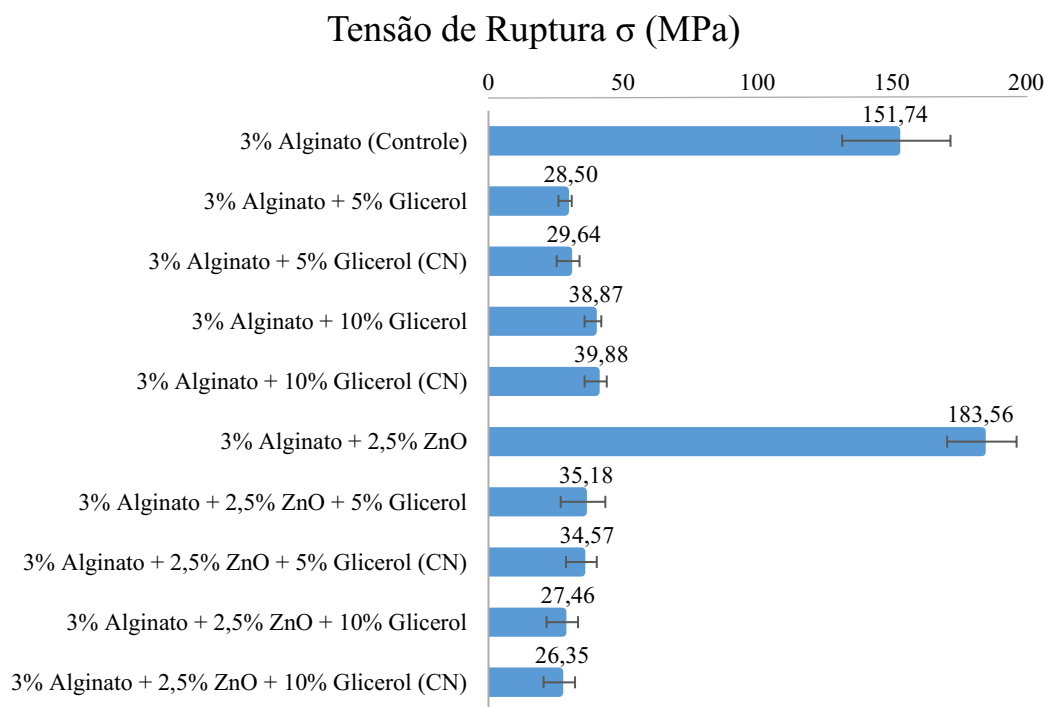
O comportamento mecânico dos filamentos de alginato contendo diferentes concentrações de ZnO, estão descritos nas Figuras 32, 33, 34 e 35 e no gráfico apresentado na Figura 36. A maior flexibilidade dos filamentos desenvolvidos com glicerol possibilitou a realização dos testes de tração sem e com a presença de nós em meio a essas estruturas.

Figura 32 - Alongamento dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO.



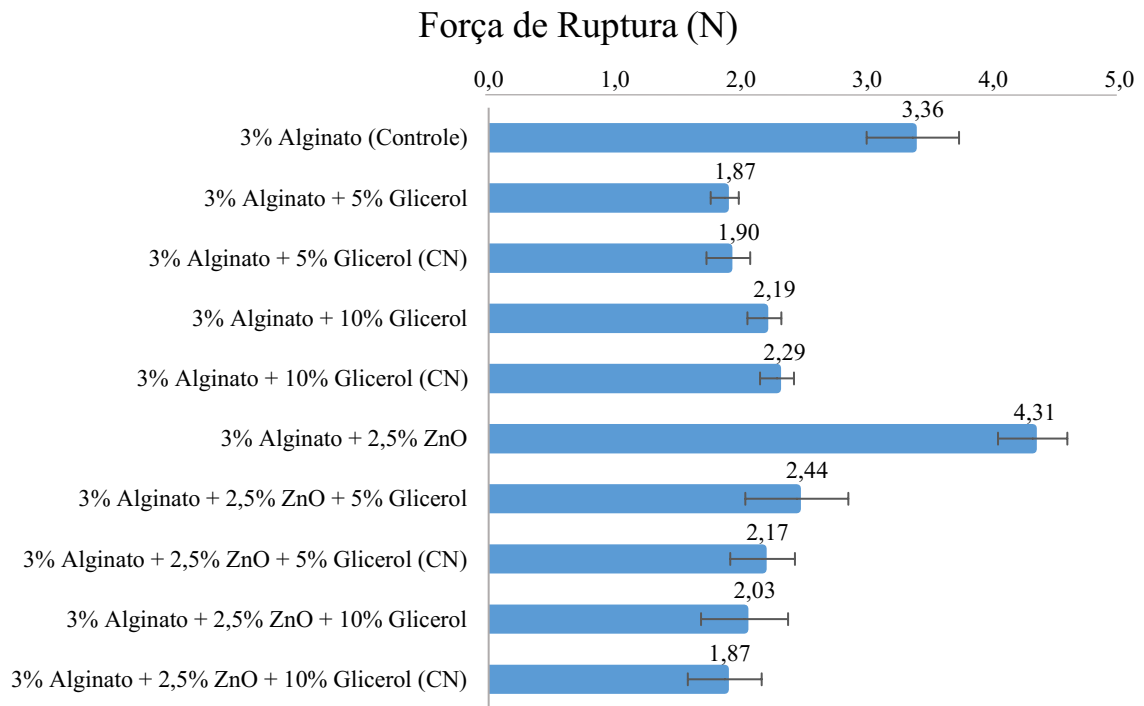
Fonte: Autora, 2024.

Figura 33 - Tensão de ruptura dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO.



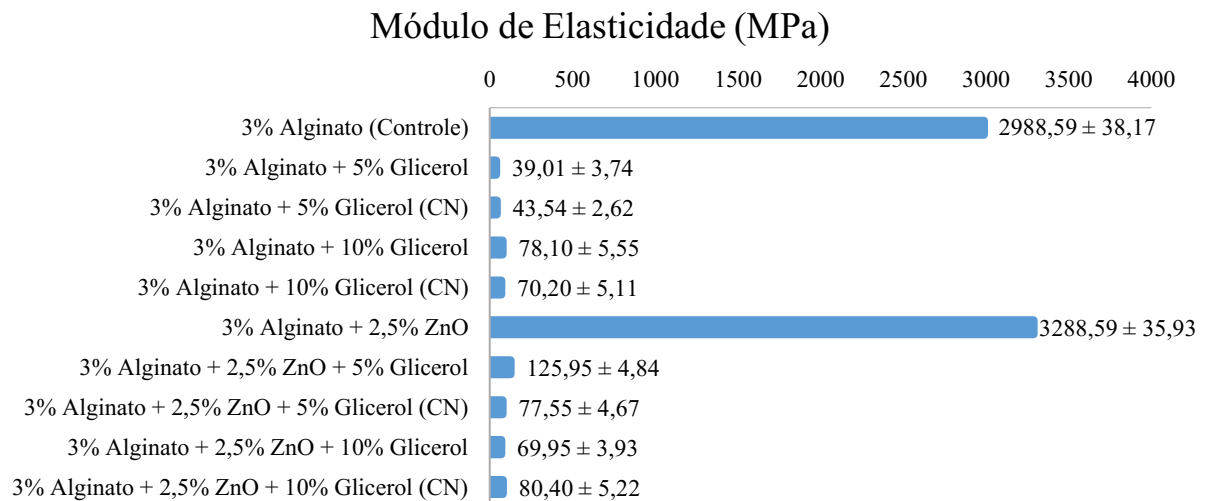
Fonte: Autora, 2024.

Figura 34 - Força de ruptura dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 35 - Módulo de elasticidade dos filamentos de alginato sem e com glicerol/ZnO.



Fonte: Autora, 2024.

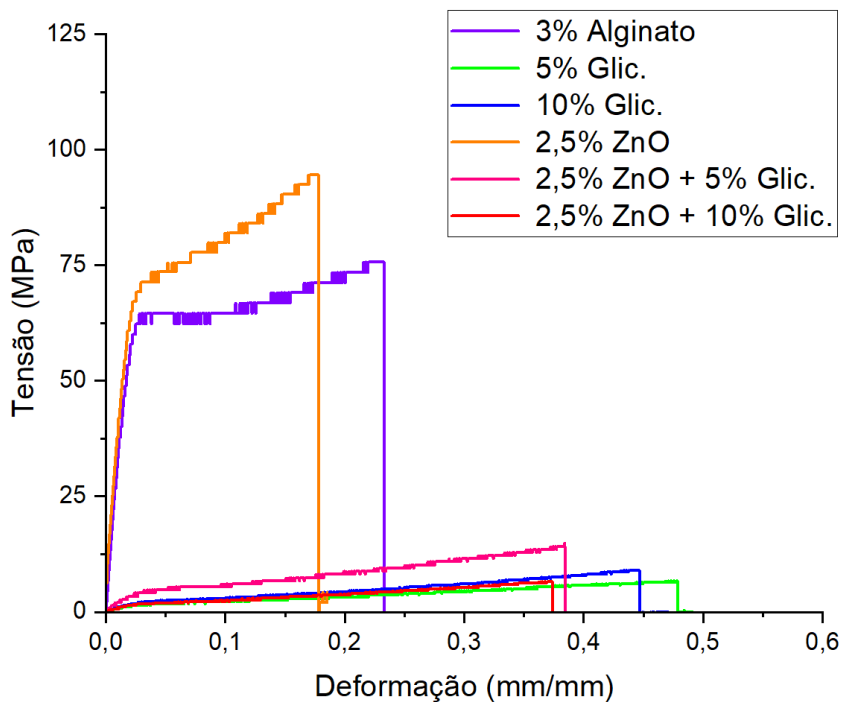
De maneira geral, verifica-se que a incorporação do plastificante impactou consideravelmente nas propriedades mecânicas dos filamentos. Observa-se que o alongamento dos fios na presença de glicerol apresentou um aumento de mais de 120 %, se comparados aos fios controle. O aumento do alongamento foi observado tanto para os filamentos sem ZnO como

para os filamentos nanocompósitos. No entanto, o aumento foi inferior para os filamentos contendo as nanopartículas.

Além disso, observa-se também uma redução nos valores de tensão de ruptura dos filamentos com plastificante. Vale ressaltar que, o fato desses filamentos apresentarem uma seção transversal maior, contribui para a obtenção de valores ainda menores. De forma geral, é esperado que o efeito plastificante reduza a tensão de ruptura das matrizes pelo fato de reduzirem as forças intermoleculares das cadeias do polímero (Silva; Bierhalz; Kieckbusch, 2009). Com relação a força de ruptura, verifica-se que a adição de glicerol resultou a em estruturas menos resistentes, impedindo que os filamentos suportassem tensões mais elevadas, como as que haviam sido suportadas pelos fios controle.

O módulo de elasticidade dos filamentos apresentou uma redução drástica, demonstrando que a adição de glicerol tornou as estruturas mais dúcteis. O gráfico apresentado na Figura 36 demonstra que a adição de plastificante mudou o comportamento mecânico dos fios.

Figura 36 – Gráfico das curvas representativas Tensão *versus* Deformação para o filamento de alginato e suas variações com diferentes concentrações de glicerol/ZnO.



Fonte: Autora, 2024.

De forma geral, percebe-se que o glicerol reduz a resistência dos filamentos ao aumentar a flexibilidade. Nota-se que concentrações de 10 % de glicerol, nos filamentos sem a presença de ZnO apresentaram resultados ligeiramente melhores do que os fios com 5 % de plastificante. Entretanto, esse mesmo comportamento não é observado na presença de ZnO, onde o aumento da concentração acarreta em resultados ligeiramente piores. Apesar disso, verifica-se que a presença de ZnO, contribuiu para a obtenção de melhores resultados mecânicos. Nota-se, também, que a presença de nós nas estruturas filamentosas, não impactou expressivamente os resultados, sendo que os testes realizados sem e com a presença de nós apresentaram resultados semelhantes. Este resultado é positivo, pois a segurança do nó é um fator crítico visando uma aplicação como sutura.

A correlação entre o número cirúrgico dos filamentos e a tensão média que os fios devem suportar, de acordo com a NBR13904 é apresentada na Tabela 14, onde se verifica que de acordo com os parâmetros exigidos pela norma, nenhum dos filamentos desenvolvidos com glicerol apresentam as características necessárias para aplicações como fio de sutura, se considerados os parâmetros do *catgut*. Cabe ressaltar que as normas são específicas para cada tipo de fio comercial e, como não há, fios de alginato, a comparação foi realizada com o fio de origem animal, que possui uma composição distinta. Os resultados apontam potencial para a utilização de glicerol como plastificante, porém, outras concentrações devem ser avaliadas de forma a não comprometer as propriedades de resistência de forma tão expressiva.

Tabela 14 – Correlação entre os testes mecânicos e o número cirúrgico dos filamentos, segundo a NBR13904.

Amostra	Número Cirúrgico	Tensão média (N) NBR13904	Tensão de ruptura dos filamentos (N)
3 % Alginato (Controle)	5 – 0	3,73	3,36 ± 0,37
3 % Alginato + 5 % glicerol	3 – 0	12,26	1,87 ± 0,41
3 % Alginato + 10 % glicerol	3 – 0	12,26	2,19 ± 0,35
3 % Alginato + 2,5 % ZnO (Controle)	5 – 0	3,73	4,31 ± 0,27
3 % Alginato + 2,5 % ZnO + 5 % glicerol	3 – 0	12,26	2,53 ± 0,41
3 % Alginato + 2,5 % ZnO + 10 % glicerol	3 – 0	12,26	2,06 ± 0,32

Fonte: Autora, 2024.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, verificou-se que o processo de fiação a úmido verticalizado, contribuiu para a obtenção de filamentos homogêneos com uma seção transversal circular bem definida. As três concentrações de alginato possibilitaram o desenvolvimento de filamentos densos e homogêneos, sem a presença de poros. Os resultados mecânicos demonstram que maiores concentrações do polímero contribuem para a melhora de propriedades mecânicas como, alongamento e força de ruptura.

A incorporação de ZnO nos filamentos de alginato não possibilitou a obtenção de filamentos com atividade antimicrobiana. Entretanto, os ensaios de reflectância dos fios apresentaram um indicativo de absorção de radiação UV.

Os ensaios de perda de massa demonstraram que a incorporação do ZnO em baixas concentrações auxiliou na manutenção das características estruturais dos filamentos, principalmente ao longo dos primeiros 7 dias. Após 14 dias, os testes realizados em FCS apresentaram uma perda de massa na faixa de 50 %. Enquanto que em meio aquoso, os filamentos mantiveram-se íntegros e estáveis e a perda de massa observada ficou na faixa de 13 %. Os ensaios de absorção de fluidos demonstraram que os filamentos com concentrações maiores, apresentaram uma redução no percentual de absorção de ambos os fluidos, característica interessante para o desenvolvimento de um bom fio de sutura.

Destaca-se a concentração de 2,5 % de ZnO, que apresentou boas condições de processabilidade e exibiu resultados ligeiramente melhores que a concentração de 5%. Apesar dos bons resultados, o processo de desenvolvimento dos filamentos com ZnO deve ser revisto, já que, todos os fios apresentaram certa rigidez.

A incorporação de glicerol aumentou o alongamento dos filamentos sem ZnO e com ZnO em aproximadamente 145 % e 120 %, respectivamente, permitindo a realização de nós nas estruturas filamentosas, detalhe que é de suma importância para o um bom fio de sutura. No entanto, as demais propriedades foram reduzidas e os valores de força de ruptura ficaram abaixo dos requisitos da NBR13904.

De modo geral, este estudo demonstrou resultados promissores para aplicações biomédicas, sendo que a adição de nanopartículas de ZnO pode ser benéfica para a obtenção de filamentos de alginato com melhores propriedades mecânicas. Entretanto a presença de glicerol deve ser cuidadosamente otimizada, de tal forma que conceda aos filamentos maior flexibilidade, sem comprometer suas propriedades mecânicas.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a influência da concentração de glicerol nas características dos filamentos, descobrir a concentração ideal.

Realizar testes de fator de proteção contra radiação ultravioleta, para confirmar se os filamentos realmente possuem essa propriedade.

REFERÊNCIAS

- ABKA-KHAJOU EI, Roya *et al.* Structures, Properties and Applications of Alginates. **Marine Drugs** **2022**, Vol. **20**, Page **364**, [s. l.], v. 20, n. 6, p. 364, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-3397/20/6/364/htm>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- ADERIBIGBE, Blessing Atim; BUYANA, Buhle. Alginate in Wound Dressings. **Pharmaceutics** **2018**, Vol. **10**, Page **42**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 42, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4923/10/2/42/htm>. Acesso em: 23 nov. 2023.
- AGÜERO, Lissette *et al.* Alginate microparticles as oral colon drug delivery device: A review. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 168, p. 32–43, 2017.
- AHMAD RAUS, Raha; WAN NAWAWI, Wan Mohd Fazli; NASARUDDIN, Ricca Rahman. Alginate and alginate composites for biomedical applications. **Asian Journal of Pharmaceutical Sciences**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 280–306, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1818087620306437>. Acesso em: 23 nov. 2023.
- BAKIL, Siti Natrah Abdul *et al.* Sodium alginate-zinc oxide nanocomposite film for antibacterial wound healing applications. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 6245–6252, 2020.
- BARTELS, V.T. **Handbook of Medical Textiles**. [S. l.]: Elsevier, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9781845696917/handbook-of-medical-textiles>. Acesso em: 25 maio 2024.
- BATISTA, Elisson Andrade. **Síntese e Caracterização de nanocristais de óxido de zinco**. 2015. 84 f. - Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15673/1/SintesesCaracterizacoesNanocristais.pdf>.
- BYRNE, Miriam; ALY, Al. The Surgical Suture. **Aesthetic Surgery Journal**, [s. l.], v. 39, n. Supplement_2, p. S67–S72, 2019. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1093/asj/sjz036>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. [S. l.: s. n.], 2012.
- CHEN, Zhongda *et al.* High strength and strain alginate fibers by a novel wheel spinning technique for knitting stretchable and biocompatible wound-care materials. **Materials Science and Engineering: C**, [s. l.], v. 127, p. 112204, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0928493121003441>. Acesso em: 31 jan. 2024.
- CI, Meiyu *et al.* The Effect of HPMC and CNC on the Structure and Properties of Alginate Fibers. **Fibers and Polymers**, [s. l.], v. 21, n. 10, p. 2179–2185, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12221-020-1264-z>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- CLEETUS, Carol M. *et al.* Alginate hydrogels with embedded zno nanoparticles for wound healing therapy. **International Journal of Nanomedicine**, [s. l.], v. 15, p. 5097–5111, 2020. Disponível em: <https://www.dovepress.com/alginate-hydrogels-with-embedded-zno-nanoparticles-for-wound-healing-t-peer-reviewed-fulltext-article-IJN>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- COSTA, Marcelo; ROSA, Jorge Marcos; DE LIMA, Apoliane. FIBRAS TÊXTEIS NO BRASIL: PROPRIEDADES E PERFIL ATUAL DAS PRINCIPAIS FIBRAS UTILIZADAS

NO SETÔR DO VESTUÁRIO. FIBRE IN BRAZIL: PROPERTIES AND PROFILE OF CURRENT PRINCIPAL FIBER USED IN THE CLOTHING SECTOR. [s. l.], p. 9, 2013.

CZYŻOWSKA, Agnieszka; BARBASZ, Anna. A review: zinc oxide nanoparticles – friends or enemies?. **International Journal of Environmental Health Research**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 885–901, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09603123.2020.1805415>. Acesso em: 21 nov. 2023.

DEMIR, Eyup Can *et al.* Towards better understanding the stiffness of nanocomposites via parametric study of an analytical model modeling parameters and experiments. **Journal of composite materials**, [s. l.], v. 57, n. 6, p. 1087–1104, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36974194/>. Acesso em: 16 jun. 2024.

DENG, Yaling *et al.* Alginate modification via click chemistry for biomedical applications. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 270, p. 118360, 2021.

DHARMARATHNE, Aruna *et al.* Investigating the Possibilities to Produce Alginate Filaments with Locally Available Seaweeds. In: , 2020. **2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)**. [S. l.]: IEEE, 2020. p. 459–464. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9185258/>. Acesso em: 31 jan. 2024.

DUMONT, Mélanie *et al.* Processing and antibacterial properties of chitosan-coated alginate fibers. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 190, p. 31–42, 2018.

EL-HADY, M. M.Abd; FAROUK, A.; SHARAF, S. Flame retardancy and UV protection of cotton based fabrics using nano ZnO and polycarboxylic acids. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 92, n. 1, p. 400–406, 2013.

FENG, Zhe Chuan. **Handbook of zinc oxide and related materials volume one, materials**. 1st. ed. Boca Raton, EUA: Taylor & Francis, 2012. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/b13068/handbook-zinc-oxide-related-materials-zhe-chuan-feng>.

FERREIRA, Alexandre; FERREIRA, Fernando Nunes; OLIVEIRA, Fernando Ribeiro. Têxteis Inteligentes – Uma breve revisão da literatura. [s. l.], 2014. Disponível em: www.cetiqt.senai.br/redige. Acesso em: 25 maio 2024.

FIEDOT-TOBOŁA, Marta *et al.* Deposition of Zinc Oxide on Different Polymer Textiles and Their Antibacterial Properties. **Materials (Basel, Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 5, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29710873/>. Acesso em: 9 jun. 2024.

GHAMSARI, Morteza Sasani *et al.* Impact of nanostructured thin ZnO film in ultraviolet protection. **International Journal of Nanomedicine**, [s. l.], v. 12, p. 207–216, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=dijn20>. Acesso em: 14 jun. 2024.

GOEL, Amit. Surgical Sutures - A Review. **Delhi Journal of Ophthalmology**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 159–162, 2016. Disponível em: https://journals.lww.com/djo/fulltext/2016/26030/surgical_sutures___a_review.3.aspx. Acesso em: 4 jun. 2024.

HE, Ying *et al.* Wet-spinning of fluorescent fibers based on gold nanoclusters-loaded alginate for sensing of heavy metal ions and anti-counterfeiting. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, [s. l.], v. 230, p. 118031, 2020.

HORROCKS, A. Richard; ANAND, Subhash C. Handbook of Technical Textiles: Second

Edition. **Handbook of Technical Textiles: Second Edition**, [s. l.], v. 1, p. 1–372, 2015.

HOSSAIN, Md Tanvir *et al.* Techniques, applications, and challenges in textiles for a sustainable future. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 100230, 2024.

HOU, Chengyu *et al.* High strength chitin nanocrystal/alginate filament prepared by wet-spinning in “green” coagulating bath. **Cellulose**, [s. l.], v. 29, n. 16, p. 8611–8621, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-022-04814-0>. Acesso em: 16 jun. 2024.

JING, Zhanxin *et al.* Tough, stretchable and compressive alginate-based hydrogels achieved by non-covalent interactions. **RSC Advances**, [s. l.], v. 10, n. 40, p. 23592–23606, 2020. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ra/d0ra03733h>. Acesso em: 15 jun. 2024.

KIM, Hyo Jeong *et al.* Review on cellulose nanocrystal-reinforced polymer nanocomposites: Processing, properties, and rheology. **Korea-Australia Rheology Journal** **2021 33:3**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 165–185, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13367-021-0015-z>. Acesso em: 25 nov. 2023.

KREUTZFELD, Victor. Produção de monofilamentos a base de alginato e nanocristais de celulose obtidos de resíduos de algodão. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/249913>. Acesso em: 4 jun. 2024.

KUMAR, Surabhi Siva *et al.* Synthesis, characterization and optical properties of zinc oxide nanoparticles. **International Nano Letters** **2013 3:1**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 1–6, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/2228-5326-3-30>. Acesso em: 22 nov. 2023.

KUMAR, N. Dhiraj; SRINIVASULU, K. A REVIEW ON PROPERTIES OF SURGICAL SUTURES AND APPLICATIONS IN MEDICAL FIELD. [s. l.], v. 2, p. 85–96, 2014. Disponível em: www.impactjournals.us. Acesso em: 4 jun. 2024.

LEE, Kuen Yong; MOONEY, David J. Alginate: Properties and biomedical applications. **Progress in Polymer Science**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 106–126, 2012.

LORD, Peter R. (Peter Reeves). **Handbook of yarn production : technology, science and economics**. [S. l.]: Woodhead Pub., 2003. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9781855736962/handbook-of-yarn-production>. Acesso em: 16 jun. 2024.

MAITY, Subhankar; SINGHA, Kunal; PANDIT, Pintu. Functional and Technical Textiles. **Functional and Technical Textiles**, [s. l.], p. 1–839, 2023.

MARANA, Naiara Letícia; SAMBRANO, Julio Ricardo; DE SOUZA, Aguinaldo Robinson. Propriedades eletrônicas, estruturais e constantes elásticas do ZnO. **Química Nova**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 810–815, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/SDgM6VhWvGGs447mCYpnsqy/>. Acesso em: 22 nov. 2023.

MARQUES, Margareth R.C.; LOEBENBERG, Raimar; ALMUKAINZI, May. Simulated Biological Fluids with Possible Application in Dissolution Testing. **Dissolution Technologies**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 15–28, 2011.

MATSUO, T. Fibre materials for advanced technical textiles. **Textile Progress**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 87–121, 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405160802133028>. Acesso em: 7 jun. 2024.

MAYRINCK, Caroline *et al.* Synthesis, properties and applications of nanostructured zinc

oxide. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 1185–1204, 2014.

MEDEIROS, Aldo Cunha; ARAÚJO-FILHO, Irami; CARVALHO, Marília Daniela Ferreira de. Fios de sutura. **JOURNAL OF SURGICAL AND CLINICAL RESEARCH**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 74–86, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/jscr/article/view/11437>. Acesso em: 4 jun. 2024.

MEDEIROS, Aldo Cunha; ARAÚJO-FILHO, Irami; FERREIRA DE CARVALHO, Marília Daniela. Fios de sutura Surgical sutures. **J Surg Cl Res**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 74–86, 2016.

MESSE DE FRANKFURT. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://techtexil.messefrankfurt.com/frankfurt/en/profile.html>. Acesso em: 26 nov. 2023.

MIRABEDINI, Azadeh *et al.* Development and Characterization of Novel Hybrid Hydrogel Fibers. **Macromolecular Materials and Engineering**, [s. l.], v. 300, n. 12, p. 1217–1225, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/mame.201500152>. Acesso em: 9 jun. 2024.

MISSFELD, Victor Fischer. Produção de filamentos à base de quitosana com nanopartículas de óxido de zinco para aplicações biomédicas. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/243743>. Acesso em: 22 nov. 2023.

MÓDULO DE ELASTICIDADE | MÓDULO DE YOUNG. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/modulo-de-elasticidade-ou-modulo-de-young/>. Acesso em: 3 jun. 2024.

MORRIS, H.; MURRAY, R. Medical textiles. **Textile Progress**, [s. l.], v. 52, n. 1–2, p. 1–127, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405167.2020.1824468>. Acesso em: 26 nov. 2023.

MOTELICA, Ludmila *et al.* Biodegradable alginate films with zno nanoparticles and citronella essential oil-a novel antimicrobial structure. **Pharmaceutics**, [s. l.], v. 13, n. 7, 2021.

NBR 13904 FIOS PARA SUTURA CIRÚRGICA. [s. l.], p. 1–15, 2003.

OZIPEK, B.; KARAKAS, H. Wet spinning of synthetic polymer fibers. *In: ADVANCES IN FILAMENT YARN SPINNING OF TEXTILES AND POLYMERS*. [S. l.]: Elsevier, 2014. p. 174–186. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978085709499550009X>. Acesso em: 8 set. 2023.

PAUL, Roshan. **High performance technical textiles**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.worldcat.org/title/1104330605>. Acesso em: 28 set. 2023.

PINO, Paolo *et al.* Antimicrobial Nano-Zinc Oxide Biocomposites for Wound Healing Applications: A Review. **Pharmaceutics 2023, Vol. 15, Page 970**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 970, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4923/15/3/970/htm>. Acesso em: 24 ago. 2024.

PUPPI, Dario; CHIELLINI, Federica. Wet-spinning of biomedical polymers: from single-fibre production to additive manufacturing of three-dimensional scaffolds. **Polymer International**, [s. l.], v. 66, n. 12, p. 1690–1696, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pi.5332>. Acesso em: 9 jun. 2024.

PUSCASELU, Roxana Gheorghita *et al.* Alginate: From Food Industry to Biomedical Applications and Management of Metabolic Disorders. **Polymers 2020, Vol. 12, Page 2417**, [s. l.], v. 12, n. 10, p. 2417, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/10/2417/htm>. Acesso em: 24 nov. 2023.

- QIN, Yimin. Alginate fibres: an overview of the production processes and applications in wound management. **Polymer International**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 171–180, 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pi.2296>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- RASHEED, Abher. Classification of Technical Textiles. **Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering**, [s. l.], p. 49–64, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-49224-3_3. Acesso em: 6 jun. 2024.
- REZENDE, Rodrigo A; MENDES, Ausenda. Análise Do Comportamento Mecânico Do Alginato Como Biomaterial Para a Fabricação De Scaffolds Na Engenharia De Tecidos. **Xii Congresso Brasileiro De Biomecânica**, [s. l.], n. April, p. 1747–1751, 2015.
- ROHANI SHIRVAN, Anahita; NOURI, Alireza; SUTTI, Alessandra. A perspective on the wet spinning process and its advancements in biomedical sciences. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 181, p. 111681, 2022.
- SAHOO, Deepti Rekha; BISWAL, Trinath. Alginate and its application to tissue engineering. **SN Applied Sciences** 2021 3:1, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 1–19, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-04096-w>. Acesso em: 23 nov. 2023.
- SANTOS, Natália Souza. Efeitos das nanopartículas de Óxido de Zinco (NPs ZnO) em alguns aspectos da sobrevivência, reprodução e desenvolvimento de *Biomphalaria glabrata* (Say, 1818) (Gastropoda: Pulmonata). [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/47488>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- SATRIAJI, Kukul Prawita *et al.* Antibacterial bionanocomposite films based on CaSO₄-crosslinked alginate and zinc oxide nanoparticles. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 24, p. 100510, 2020.
- SHARABI, Mirit *et al.* A new class of bio-composite materials of unique collagen fibers. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, [s. l.], v. 36, p. 71–81, 2014.
- SILVA, Lucas Souza da. Obtenção de filamentos de alginato de cálcio com revestimento de quitosana para aplicações biomédicas. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/244937>. Acesso em: 5 out. 2023.
- SILVA, Mariana Altenhofen da; BIERHALZ, Andréa Cristiane Krause; KIECKBUSCH, Theo Guenter. Alginate and pectin composite films crosslinked with Ca²⁺ ions: Effect of the plasticizer concentration. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 77, n. 4, p. 736–742, 2009.
- TREVISOL, T. C. *et al.* Alginate and carboxymethyl cellulose in monolayer and bilayer films as wound dressings: Effect of the polymer ratio. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 136, n. 3, p. 46941, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.46941>. Acesso em: 23 nov. 2023.
- VEGA-CÁZAREZ, Claudia A. *et al.* Preparation and Properties of Chitosan–PVA Fibers Produced by Wet Spinning. **Journal of Polymers and the Environment**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 946–958, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-017-1003-8>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- VERBIČ, Anja; GORJANC, Marija; SIMONČIČ, Barbara. Zinc Oxide for Functional Textile Coatings: Recent Advances. **Coatings** 2019, Vol. 9, Page 550, [s. l.], v. 9, n. 9, p. 550, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/9/550/htm>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- WANG, Qianqian *et al.* Characterization and functional assessment of alginate fibers prepared by metal-calcium ion complex coagulation bath. **Carbohydrate polymers**, [s. l.], v. 232, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31952621/>. Acesso em: 16 jun. 2024.

WANG, Li Jing. **Performance Testing of Textiles**. [S. l.]: Elsevier, 2016.

ZHANG, Dong. **Advances in Filament Yarn Spinning of Textiles and Polymers**. [S. l.]: Elsevier Ltd., 2014. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780857094995/advances-in-filament-yarn-spinning-of-textiles-and-polymers>. Acesso em: 4 jun. 2024.

ZHANG, Xiaolin *et al.* Fabrication, Property and Application of Calcium Alginate Fiber: A Review. **Polymers** **2022**, Vol. **14**, Page **3227**, [s. l.], v. 14, n. 15, p. 3227, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/15/3227/htm>. Acesso em: 25 nov. 2023.

ZHANG, Zhi; CHEN, Ying; GUO, Jiansheng. ZnO nanorods patterned-textile using a novel hydrothermal method for sandwich structured-piezoelectric nanogenerator for human energy harvesting. **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, [s. l.], v. 105, p. 212–218, 2019.

ZINCITA (ZINCITE) - ROCK IDENTIFIER. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://rockidentifier.com/pt/wiki/Zincite.html>. Acesso em: 22 nov. 2023.

ZORZI BUENO, Cecilia; MARIA MORAES, Ângela. Development of porous lamellar chitosan-alginate membranes: Effect of different surfactants on biomaterial properties. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 122, n. 1, p. 624–631, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.34192>. Acesso em: 6 nov. 2023.

ANEXO A – TABELA 1 – CATEGUTE CIRÚRGICO ESTÉRIL – DIÂMETRO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SOBRE NÓ.

Número		Diâmetro		Resistência à Tração			
Cirúrgico	Métrico	Mínimo mm	Máximo mm	Média		Valor individual	
				kgf	N	kgf	N
9-0	0,4	0,040	0,049	-	-	-	-
8-0	0,5	0,050	0,069	0,045	0,44	0,025	0,25
7-0	0,7	0,070	0,099	0,07	0,69	0,055	0,54
6-0	1	0,100	0,149	0,18	1,77	0,10	0,98
5-0	1,5	0,150	0,199	0,38	3,73	0,20	1,96
4-0	2	0,200	0,249	0,77	7,55	0,40	3,92
3-0	3	0,300	0,339	1,25	12,26	0,68	6,67
2-0	3,5	0,350	0,399	2,00	19,62	1,04	10,20
0	4	0,400	0,499	2,77	27,17	1,45	14,22
1	5	0,500	0,599	3,80	37,28	1,95	19,13
2	6	0,600	0,699	4,51	44,24	2,40	23,54
3	7	0,700	0,799	5,90	57,88	2,99	29,33
4	8	0,800	0,899	7,00	68,67	3,49	34,24

Fonte: NBR 13904 FIOS PARA SUTURA CIRÚRGICA, (2003)