



FACULDADE DE TECNOLOGIA DE AMERICANA “MINISTRO RALPH BIASI”

Curso Superior De Tecnologia Em Produção Têxtil

CARLOS AUGUSTO FERREIRA DO SANTOS

LINHA DE COSTURA EM UNIFORMES DE BOMBEIRO COM PROTEÇÃO
ANTICHAMAS

AMERICANA, SP

2025

CARLOS AUGUSTO FERREIRA DO SANTOS

LINHA DE COSTURA EM UNIFORMES DE BOMBEIRO COM PROTEÇÃO
ANTICHAMAS

Trabalho de Conclusão de Curso
desenvolvido em cumprimento à exigência
curricular do Curso Superior de Tecnologia em
Produção Têxtil pelo CEETEPS / Faculdade
de Tecnologia –FATEC/ Americana – Ministro
Ralph Biasi.

Área de concentração: Conhecimentos
técnico no têxtil.

Orientador: Prof. Dr. Daives Arakem
Bergamasco

AMERICANA, SP

2025

SANTOS, Carlos Augusto Ferreira

Linha de costura em uniformes de bombeiros com proteção antichamas. / Carlos Augusto Ferreira Santos – Americana, 2025.

152f.

Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil) - - Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

Orientador: Prof. Dr. Daives Arakem Bergamasco

1. Acabamento têxtil 2. Tecnologia têxtil 3. Tecnologia têxtil – controle de qualidade. I. SANTOS, Carlos Augusto Ferreira II. BERGAMASCO, Daives Arakem III. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi

CDU: 677027

677

677:658.8

Elaborada pelo autor por meio de sistema automático gerador de ficha catalográfica da Fatec de Americana Ministro Ralph Biasi.

CARLOS AUGUSTO FERREIRA DOS SANTOS

LINHA DE COSTURA EM UNIFORMES DE BOMBEIRO COM PROTEÇÃO
ANTICHAMAS

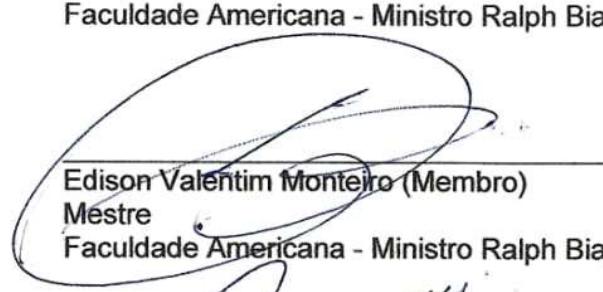
Trabalho de graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Produção Têxtil pelo Centro Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana – Ministro Ralph Biasi.
Área de concentração: Controle da qualidade Têxtil.

Americana, 04 de Dezembro de 2025

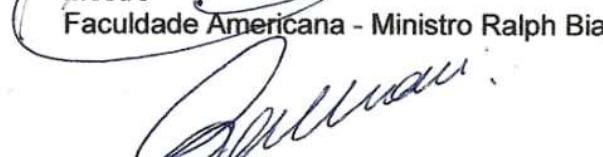
Banca Examinadora:



Daives Arakem Bergamasco (Presidente)
Doutor
Faculdade Americana - Ministro Ralph Biasi



Edison Valentim Monteiro (Membro)
Mestre
Faculdade Americana - Ministro Ralph Biasi



Miguel Ronaldo Galhani (Membro)
Especialista
Faculdade Americana - Ministro Ralph Biasi

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde e pela força nos momentos em que pensei em desistir, permitindo que eu chegasse até esta etapa tão importante da minha trajetória.

Agradeço, em especial, ao Professor Dr. Daives Arakem Bergamasco, pela orientação atenciosa, pela paciência, pelas observações técnicas e pelos incentivos constantes, que foram fundamentais para a construção e finalização deste trabalho.

À Faculdade de Tecnologia de Americana – Ministro Ralph Biasi (FATEC Americana) e ao CEETEPS, pela oportunidade de cursar o ensino superior público e de qualidade, bem como pela infraestrutura oferecida ao longo da graduação.

Aos professores do curso de Produção Têxtil, pelo conhecimento compartilhado, pelas experiências práticas transmitidas em sala de aula e laboratório e por contribuírem de forma significativa para minha formação acadêmica e profissional.

À minha família, pelo amor, apoio, compreensão das ausências e pelo incentivo diário, mesmo diante da rotina cansativa de trabalho e estudos. Sem essa base, seria muito mais difícil concretizar este objetivo.

Aos amigos e colegas de curso, pela parceria, pela troca de experiências, pelas conversas, pela ajuda nas atividades e por tornarem essa caminhada mais leve e motivadora.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo aqui o meu sincero agradecimento.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo principal analisar a importância crítica das linhas de costura de aramida com acabamento retardante de chama na fabricação de uniformes de proteção para bombeiros. O estudo focou na compatibilidade dos materiais, nos parâmetros de costura e na manutenção das propriedades protetoras ao longo do tempo, reconhecendo que a falha das costuras pode comprometer severamente a eficácia de fibras de alta performance em condições extremas, colocando em risco a segurança dos profissionais. A metodologia empregada foi de natureza qualitativa e descritiva, fundamentada em uma extensa e rigorosa revisão bibliográfica. Esta revisão abrangeu uma vasta gama de fontes, incluindo artigos científicos revisados por pares, livros técnicos especializados, teses e dissertações acadêmicas, além de normas de referência internacionais cruciais como NFPA 1971 e EN 11612, e especificações detalhadas fornecidas por fabricantes de materiais. As principais descobertas revelaram a essencialidade da compatibilidade intrínseca entre os fios de costura, os tecidos do uniforme e as máquinas de costura utilizadas no processo de fabricação. O estudo identificou e detalhou a influência de parâmetros críticos de costura, como a necessidade de velocidade reduzida, a aplicação de tensão equilibrada e a otimização da pressão do calcador para garantir a integridade da costura. A pesquisa também destacou a importância da seleção específica de agulhas e de indicadores de desempenho robustos para a durabilidade e funcionalidade do uniforme. Concluiu-se que a seleção apropriada de materiais de alta qualidade, o entendimento aprofundado do processo de costura e a manutenção diligente do equipamento são fundamentais para assegurar a integridade estrutural e a eficácia protetora do uniforme, contribuindo diretamente para a segurança do bombeiro em ambientes hostis. Os objetivos propostos foram plenamente alcançados, reforçando, assim, o papel vital das linhas de costura na segurança operacional e na proteção individual.

Palavras-chave: Linhas de costura; Uniformes de bombeiro; Retardante de chama.

ABSTRACT

This final graduation project primarily aimed to analyze the critical importance of aramid sewing threads with flame-retardant finish in the manufacturing of firefighters' protective uniforms. The study focused on material compatibility, sewing parameters, and the maintenance of protective properties over time, recognizing that seam failure can severely compromise the effectiveness of high-performance fibers in extreme conditions, thereby endangering the safety of professionals. The methodology employed was qualitative and descriptive in nature, based on an extensive and rigorous literature review. This review encompassed a wide range of sources, including peer-reviewed scientific articles, specialized technical books, academic theses and dissertations, as well as crucial international reference standards such as NFPA 1971 and EN 11612, and detailed specifications provided by material manufacturers. The main findings revealed the essentiality of intrinsic compatibility among sewing threads, uniform fabrics, and the sewing machines used in the manufacturing process. The study identified and detailed the influence of critical sewing parameters, such as the need for reduced speed, the application of balanced tension, and the optimization of presser foot pressure to ensure seam integrity. The research also highlighted the importance of specific needle selection and robust performance indicators for the uniform's durability and functionality. It was concluded that the appropriate selection of high-quality materials, a thorough understanding of the sewing process, and diligent equipment maintenance are fundamental to ensure the structural integrity and protective efficacy of the uniform, directly contributing to firefighter safety in hostile environments. The proposed objectives were fully achieved, thereby reinforcing the vital role of sewing threads in operational safety and individual protection.

Keywords: Sewing threads; Firefighter uniforms; Flame retardant.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONJUNTO TÍPICO DE EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL (EPI) UTILIZADOS POR BOMBEIROS.....	18
FIGURA 2 - SÍNTESE VISUAL DOS PRINCIPAIS RISCOS OCUPACIONAIS ENFRENTADOS POR BOMBEIROS: TÉRMICO, QUÍMICO E MECÂNICO.	22
FIGURA 3 - ESTRUTURA TÍPICA EM CAMADAS DE UM UNIFORME DE BOMBEIRO COM PROTEÇÃO ANTICHAMA.	25
FIGURA 4 – JAQUETA E CALÇA DE UNIFORME DE BOMBEIRO, COM DESTAQUE PARA AS PRINCIPAIS LINHAS DE COSTURA ESTRUTURAIS.	30
FIGURA 5 - DETALHE DE COSTURA EM ÁREA CRÍTICA DE UNIFORME DE BOMBEIRO, EVIDENCIANDO A DESCONTINUIDADE ESTRUTURAL	35
FIGURA 6 – EXEMPLO DE FALHA DE COSTURA, ILUSTRANDO O RISCO DE ABERTURA DO UNIFORME EM CONDIÇÕES EXTREMAS.	37
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO COMPARATIVA ENTRE LINHAS CONVENCIONAIS (ALGODÃO, POLIÉSTER) E LINHA ANTICHAMA DE ARAMIDA.....	52
FIGURA 8 – COMPARAÇÃO SIMPLIFICADA ENTRE DIFERENTES FIBRAS COM PROPRIEDADES ANTICHAMA PARA USO EM UNIFORMES DE PROTEÇÃO.	72
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO DA CADEIA TÊXTIL DA FIBRA AO UNIFORME DE BOMBEIRO, DESTACANDO O PAPEL DA LINHA DE COSTURA NA ETAPA FINAL.	73
FIGURA10 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE DIFERENTES TIPOS DE CONSTRUÇÃO DE LINHAS DE COSTURA.....	95
FIGURA 11 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO PARA SELEÇÃO DE LINHAS DE COSTURA EM UNIFORMES DE BOMBEIROS COM PROTEÇÃO ANTICHAMA. 123	123
FIGURA 12 – COSTURA DE MÚLTIPLAS CAMADAS DE TECIDO EM MÁQUINA INDUSTRIAL, SIMULANDO A CONFECÇÃO DE UNIFORMES DE BOMBEIROS EM TECIDO DE ARAMIDA. RISCO DE RUPTURA DE LINHA DURANTE COSTURA 125	125
FIGURA 13 – CORPOS DE PROVA DE COSTURA UTILIZADOS PARA ILUSTRAR DIFERENÇA ENTRE COSTURA ÍNTegra E COSTURA COM RUPTURA DE LINHA.	126
FIGURA 14 EXEMPLOS ESQUEMÁTICOS DE VARIAÇÕES DE AGULHA UTILIZADAS NA COSTURA DE TECIDOS DE ARAMIDA (ESPESSURA E TIPO DE PONTA).	131

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. UNIFORMES DE PROTEÇÃO PARA BOMBEIROS	17
2.1 CONTEXTO DE USO E RISCOS OCUPACIONAIS	17
2.2 FUNÇÃO E REQUISITOS DE UNIFORMES ANTICHAMA	24
2.3 COMPONENTES DE UM UNIFORME DE BOMBEIRO	28
2.4 PAPEL CRÍTICO DAS COSTURAS	34
2.5 ARAMIDAS: FIBRAS ESPECIALIZADAS PARA ALTA TEMPERATURA	41
3. FIBRAS TÊXTEIS PARA PROTEÇÃO ANTICHAMA	47
3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE PROTEÇÃO TÉRMICA	47
3.2 NOMEX® (ARAMIDA-M: POLI-M-FENILENO ISOFTALAMIDA)	52
3.3 KEVLAR® (ARAMIDA-P: POLI-P-FENILENOTETAFTALAMIDA)	59
3.4 OUTRAS FIBRAS ANTICHAMA	64
4. LINHAS TÊXTEIS - CONCEITOS E CLASSIFICAÇÃO	73
4.1 DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA DE LINHAS TÊXTEIS	73
4.2 ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DE LINHAS	77
4.3 CLASSIFICAÇÃO DE LINHAS POR SISTEMA DE NUMERAÇÃO	84
4.4 TIPOS DE CONSTRUÇÃO DE LINHAS	91
4.5 PROPRIEDADES CRÍTICAS DE LINHAS PARA CONFECÇÃO	97
4.6 ACABAMENTOS DE LINHAS	103
5. LINHAS DE ARAMIDA PARA UNIFORMES ANTICHAMA	107
5.1 LINHAS DE ARAMIDA PURA	107
5.2 LINHAS ARAMIDA COM ACABAMENTO ANTICHAMA ADICIONAL	110
5.3 PROPRIEDADES FUNCIONAIS DE LINHAS ANTICHAMA	115
6. COMPATIBILIDADE LINHA-TECIDO-MÁQUINA	122
6.1 FUNDAMENTOS DA CONFECÇÃO DE UNIFORMES	122

6.2 COSTURA EM TECIDOS DE ARAMIDA - DESAFIOS ESPECÍFICOS	124
6.3 TIPOS DE MÁQUINAS DE COSTURA UTILIZADAS.....	127
6.4 PARÂMETROS DE COSTURA PARA ARAMIDA.....	129
6.5 PROPRIEDADES DE AGULHA PARA COSTURA DE ARAMIDA	130
6.6 FORMAÇÃO DE PONTOS EM ARAMIDA	133
6.7 LUBRIFICAÇÃO E CUIDADOS.....	135
6.8 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COSTURA	136
7. CONCLUSÃO.....	138
REFERÊNCIAS.....	143

1. INTRODUÇÃO

A segurança ocupacional em atividades de alto risco é um dos pontos centrais quando se fala em proteção da vida e preservação da integridade física do trabalhador. Entre as diversas categorias profissionais expostas diariamente a condições extremas, os bombeiros se destacam pela combinação de riscos térmicos, químicos e mecânicos, muitas vezes presentes ao mesmo tempo em um mesmo atendimento. Esses profissionais atuam em ambientes com chamas intensas, calor radiante elevado, superfícies superaquecidas, fumaça, gases tóxicos, quedas de estruturas e outros perigos que podem causar lesões graves ou fatais em poucos segundos. Nesse contexto, o Equipamento de Proteção Individual (EPI) deixa de ser apenas um item obrigatório e passa a ser, de fato, uma barreira vital entre o bombeiro e o ambiente hostil em que ele atua.

Entre os diversos elementos que compõem o EPI, os uniformes de proteção antichama ocupam posição de destaque. Mais do que um “macacão” ou uma “roupa especial”, esses uniformes são sistemas têxteis complexos, formados por diferentes camadas de tecidos, barreiras térmicas, revestimentos e costuras, projetados para atrasar a transferência de calor e reduzir a severidade das queimaduras. Na prática, alguns segundos a mais de proteção podem significar a diferença entre uma queimadura leve e uma lesão incapacitante. No entanto, a eficácia do conjunto não depende apenas do tecido principal ou da tecnologia de acabamento antichama aplicada à superfície. A performance real do uniforme está ligada à atuação conjunta de todos os componentes, incluindo aqueles que muitas vezes são tratados como “detalhes”, mas que, tecnicamente, são pontos de grande vulnerabilidade: as linhas de costura.

As costuras são responsáveis por manter as partes do uniforme unidas e por garantir que, mesmo sob calor, esforço mecânico e movimentação intensa, o vestuário permaneça íntegro e funcional. Se o tecido resiste, mas a linha rompe, o conjunto deixa de cumprir sua função protetora. Assim, o uniforme acaba sendo tão resistente quanto seu elo mais fraco. Em muitas situações, esse elo é justamente a linha de costura, seja por escolha inadequada de fibra, por falta de compatibilidade entre fio e tecido, por parâmetros de costura incorretos ou por ausência de acabamentos específicos antichama. Nesse cenário, surge a necessidade de olhar para as linhas

de costura não como um componente secundário, mas como um elemento estratégico na engenharia de EPIs para bombeiros.

Diante disso, o problema de pesquisa que orienta este trabalho pode ser assim formulado: como selecionar e aplicar corretamente linhas de costura que mantenham suas propriedades de resistência ao fogo e proteção térmica ao longo de todo o ciclo de vida do uniforme de bombeiro, considerando a compatibilidade entre materiais, os parâmetros de costura e as condições extremas de uso? Responder a essa questão exige uma abordagem que vá além da simples indicação de “usar linha antichama”, envolvendo compreensão da composição dos fios, das características dos tecidos aramídicos, dos mecanismos de degradação térmica, dos ajustes de máquina e da forma como todos esses fatores se combinam na prática.

Partindo dessa problemática, este estudo trabalha com a hipótese de que o uso adequado de linhas aramídicas, associadas a acabamentos retardadores de chama e a parâmetros de costura corretamente ajustados, é capaz de garantir uma proteção duradoura e confiável das costuras, sem comprometer a integridade estrutural e a vida útil do uniforme. A escolha de fibras aramídicas, como Nomex® e Kevlar®, baseia-se em suas propriedades de alta resistência térmica e mecânica, amplamente utilizadas em EPIs. Porém, a simples seleção da fibra não garante, por si só, a eficácia do sistema de proteção. A hipótese considera que o desempenho real do conjunto depende da combinação entre: tipo de fio, acabamento antichama, regulagem de máquina, tipo de ponto, tensão de linha, agulha utilizada e lubrificação. Em suma, a costura precisa ser pensada como um sistema, e não apenas como uma “linha que segura o tecido”.

Com base nessa perspectiva, o objetivo geral deste trabalho é analisar a importância das linhas de costura aramídicas e de seus acabamentos antichama na fabricação de uniformes de proteção para bombeiros, considerando a compatibilidade material, os parâmetros de costura e a manutenção das propriedades protetoras ao longo do tempo. Para viabilizar esse objetivo amplo, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos :(a) compreender os fundamentos da proteção térmica em fibras têxteis e os mecanismos de resistência ao fogo, discutindo como diferentes materiais se comportam sob ação do calor e das chamas e quais princípios conferem propriedades antichama; (b) analisar as principais características dos fios aramídicos, tanto em sua forma “pura” quanto quando combinados a acabamentos retardadores de chama, destacando vantagens, limitações e aplicações típicas em uniformes de

alta performance;(c) identificar os desafios específicos presentes na costura de tecidos aramídicos, abordando fenômenos como abrasão da linha, aquecimento excessivo da agulha, dificuldade de formação de pontos e risco de ruptura das costuras em ambientes de alta temperatura;(d) detalhar parâmetros de costura, seleção de agulhas e aspectos de manutenção de máquinas que contribuem para a qualidade e a durabilidade das costuras em uniformes de proteção, com foco na realidade produtiva da confecção; e (e) discutir indicadores de desempenho, como o Índice de Oxigênio Limitante (LOI), o Desempenho de Proteção Térmica (TPP) e o Valor de Proteção de Arco Térmico (ATPV), relacionando-os com a performance das costuras e com a capacidade de o uniforme manter sua função protetora em situações de estresse térmico.

A relevância deste estudo se justifica em diferentes níveis. Do ponto de vista social e humano, trata-se de um tema diretamente ligado à proteção da vida de profissionais que atuam em condições extremas para salvar outras pessoas. Lesões por queimaduras, exposição a calor intenso e falhas de EPI podem resultar em afastamento do trabalho, sequelas permanentes ou óbito. Um uniforme com tecido de excelente qualidade, mas com costuras inadequadas, pode falhar exatamente quando mais precisa funcionar, abrindo rasgos ou pontos de exposição da pele. Assim, estudar de forma específica as linhas de costura aramídicas e os processos associados à sua aplicação é uma forma concreta de contribuir para a redução de riscos ocupacionais e para a melhoria da segurança dos bombeiros.

Sob a ótica técnica e industrial, o trabalho dialoga com a realidade da cadeia têxtil e de confecção de EPIs. A crescente demanda por uniformes de alta performance, alinhados a normas rigorosas e certificações, exige decisões técnicas bem fundamentadas em todas as etapas da produção. A escolha correta da linha, do tipo de construção, do título, do acabamento e dos parâmetros de costura impacta diretamente não só a proteção, mas também a durabilidade, o custo e a imagem do fabricante junto ao mercado. O conhecimento sistematizado sobre esses aspectos pode apoiar o desenvolvimento de novos produtos, a revisão de fichas técnicas e a capacitação de equipes de engenharia, qualidade e produção.

No campo acadêmico, o tema contribui para preencher uma lacuna frequentemente observada: muitos estudos abordam materiais para tecidos de proteção, mecanismos de transferência de calor e desempenho de camadas têxteis, mas dedicam pouca atenção às costuras como ponto crítico do sistema. Ao reunir

informações sobre linhas aramídicas, acabamentos antichama, ajustes de costura e indicadores de desempenho, este trabalho busca oferecer uma visão integrada, útil tanto para a formação de estudantes da área têxtil quanto para pesquisadores e profissionais que atuam com EPIs.

Para atender aos objetivos propostos, este estudo adota uma metodologia de natureza qualitativa e caráter descritivo. A abordagem qualitativa é adequada porque permite aprofundar a compreensão dos fenômenos relacionados à proteção térmica, ao comportamento das fibras e à performance das costuras em contextos reais de uso. O caráter descritivo se manifesta na sistematização das informações técnicas, na caracterização dos materiais e na organização de parâmetros relevantes para a prática industrial. A base da pesquisa é uma revisão bibliográfica ampla, envolvendo artigos científicos, livros técnicos, teses, dissertações e normas de referência relacionadas a fibras aramídicas, linhas de costura especiais, proteção térmica e segurança ocupacional.

Além da literatura científica, são analisadas normas técnicas e documentos de referência amplamente utilizados no setor de EPIs, como a NFPA 1971 (Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting) e a EN 11612 (Protective clothing – Clothing to protect against heat and flame), entre outras, que estabelecem critérios mínimos de desempenho para vestimentas de proteção contra calor e chama. Também são consideradas especificações fornecidas por fabricantes de fios e tecidos aramídicos, bem como documentação técnica sobre processamento e aplicação desses materiais em uniformes de bombeiros. Essa combinação de fontes busca garantir uma base consistente de informações, capaz de sustentar as análises e as conclusões apresentadas ao final do trabalho.

Para assegurar clareza quanto ao foco da pesquisa, é importante explicitar suas delimitações. Este estudo concentra-se especificamente nas linhas de costura empregadas em uniformes de proteção antichama para bombeiros, com ênfase nos fios aramídicos e em seus acabamentos retardadores de chama, nos processos de costura associados e na avaliação conceitual de sua contribuição para a proteção do usuário. Aspectos como modelagem, design estético, conforto subjetivo, logística de produção em larga escala e análise detalhada de custos não constituem o foco central, embora possam ser mencionados de forma pontual quando forem úteis para contextualizar as decisões técnicas. Não fazem parte do escopo também o desenvolvimento de novos materiais aramídicos ou de novas formulações químicas

de acabamentos antichama, nem a execução de ensaios experimentais próprios, como testes de tração de costura ou exposições diretas à chama. A pesquisa se baseia em resultados já consolidados na literatura e em documentos técnicos, mantendo o foco na análise teórica, comparativa e aplicada dos conhecimentos existentes.

Por fim, a organização do presente trabalho foi estruturada de forma a conduzir o leitor gradualmente dos conceitos gerais aos aspectos mais específicos das linhas de costura em uniformes de bombeiros. Após esta introdução, o segundo capítulo apresenta o contexto dos uniformes de proteção para bombeiros, descrevendo os principais riscos ocupacionais, as funções do EPI e as exigências de desempenho impostas por normas e condições reais de trabalho. O terceiro capítulo aborda os fundamentos da proteção térmica em fibras têxteis e os mecanismos que conferem propriedade antichama aos materiais. O quarto capítulo discute os fios e linhas têxteis, com foco em sua composição, sistemas de titulação, construção e propriedades relevantes para costuras em EPIs. O quinto capítulo trata especificamente das linhas aramídicas e de seus acabamentos antichama, relacionando-os a indicadores de desempenho como LOI, TPP e ATPV. O sexto capítulo analisa os desafios de costura em tecidos aramídicos, incluindo a seleção de máquinas, parâmetros de costura, agulhas, lubrificação e pontos críticos de falha. Por fim, o trabalho apresenta as considerações finais, nas quais se retomam os objetivos, se discutem as implicações práticas dos resultados e se sugerem caminhos para estudos futuros na área de linhas de costura aplicadas à proteção de bombeiros.

2. UNIFORMES DE PROTEÇÃO PARA BOMBEIROS

2.1 CONTEXTO DE USO E RISCOS OCUPACIONAIS

A profissão de bombeiro constitui uma das ocupações mais perigosas e desafiadoras da sociedade contemporânea, exigindo exposição contínua a ambientes extremos e potencialmente letais. De acordo com a Organização Internacional do Trabalho, bombeiros enfrentam diariamente riscos multifacetados que comprometem sua integridade física e bem-estar (BRASIL, 2018). Neste contexto, compreender os ambientes de trabalho e os riscos inerentes à profissão é fundamental para justificar a necessidade de equipamentos de proteção especializada, incluindo uniformes com propriedades antichamas.

Ambientes de Trabalho dos Bombeiros (Incêndios, Calor Radiante etc.)

Os bombeiros atuam em ambientes caracterizados por condições extremas e altamente variáveis. O ambiente primário de risco é, naturalmente, o incêndio, onde temperaturas podem atingir valores superiores a 1.000°C em zonas de combustão ativa. Segundo Costa e Silva (2019), incêndios em estruturas (edificações comerciais, residenciais e industriais) expõem os profissionais a temperaturas superficiais que podem alcançar entre 400°C e 800°C em ambientes de backdraft¹, condições nas quais a proteção vestível é absolutamente crítica.

Além dos incêndios estruturais tradicionais, bombeiros enfrentam incêndios de diferentes naturezas. Conforme ressaltado por Oliveira (2020), incêndios industriais apresentam desafios peculiares, pois podem envolver materiais químicos que reagem exotermicamente, liberando calor radiante intenso mesmo em ambientes onde as chamas não estão diretamente visíveis. Estes cenários caracterizam-se pela presença de fluxo radiante de calor extremo, onde a radiação térmica se propaga em todas as direções, penetrando nas fibras têxteis e transferindo calor para a pele do bombeiro.

O calor radiante é particularmente perigoso porque, diferentemente da condução térmica (por contato direto), a radiação não requer meio material para propagação. Dados apresentados por Santos et al. (2021) demonstram que em incêndios estruturais, o fluxo radiante de calor pode atingir valores entre 20 kW/m² e 60 kW/m², valores estes que causam queimaduras de terceiro grau em pele desprotegida em menos de 15 segundos. Desta forma, uniformes com propriedades antichamas funcionam como barreira térmica (Figura 1), reduzindo significativamente a energia radiante que alcança o corpo do profissional.

Figura 1 - Conjunto típico de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) utilizados por bombeiros.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Além do contexto de incêndios estruturais, bombeiros atuam em incêndios florestais, onde as condições diferem significativamente. Segundo Ferreira (2022), em incêndios florestais, a exposição prolongada ao calor radiante, fumaça tóxica e possibilidade de armadilhas de fogo requerem proteção especializada. Nestes ambientes, embora as temperaturas possam ser moderadamente menores que em incêndios estruturais, a duração da exposição é frequentemente prolongada, aumentando o risco de exaustão térmica e lesões cumulativas.

Ainda conforme a literatura especializada, bombeiros frequentemente atuam em ambientes secundários de risco, como incêndios em veículos automotores, onde há presença de combustíveis líquidos, materiais plásticos derretidos e potencial de explosão. De acordo com Mendes (2021), incêndios em veículos geram picos de temperatura que podem ultrapassar 700°C em curtos períodos, com transições rápidas entre zonas de calor extremo e zonas mais moderadas, exigindo uniformes que mantenham proteção consistente.

Por fim, além dos incêndios propriamente ditos, bombeiros enfrentam riscos em atividades de resgate em ambientes com exposição a chamas residuais, faíscas, combustão lenta e contato com superfícies aquecidas. Conforme indicado por Gomes (2023), estas atividades secundárias, embora apresentem temperaturas potencialmente menores, geram exposição térmica repetida e contínua, comprometendo a durabilidade de uniformes convencionais.

Os riscos ocupacionais aos quais bombeiros estão expostos podem ser categorizados em três tipos principais: risco térmico, risco químico e risco mecânico (Figura 2). Esta categorização permite uma análise sistemática das ameaças e, consequentemente, da adequação de equipamentos de proteção (BRASIL, 2023).

Risco Térmico: representa a principal ameaça aos bombeiros e caracteriza-se pela exposição a temperaturas elevadas provenientes de chamas, superfícies aquecidas e radiação térmica. De acordo com Alves et al. (2022), o risco térmico em operações de combate a incêndio apresenta-se em três dimensões: exposição direta a chama (conducente à carbonização de tecidos convencionais em segundos), exposição a calor radiante (transferência de energia por radiação infravermelha) e exposição a vapores aquecidos e gases de combustão.

A queimadura térmica em profissionais de combate a incêndio não é causada apenas pelo contato direto com chamas. Segundo estudo realizado por Ribeiro e Costa (2021), aproximadamente 60% das queimaduras sofridas por bombeiros são causadas por transferência térmica através de radiação ou convecção, sem contato direto com fonte visível de calor. Este dado sublinha a importância crítica de uniformes que funcionem como barreira térmica, reduzindo significativamente o fluxo de calor que alcança a pele.

A exposição térmica repetida, mesmo em níveis moderados, causa dano acumulativo aos tecidos vivos. Conforme descrito por Pereira (2022), bombeiros que atuam repetidamente em ambientes quentes, mesmo que com ciclos curtos de exposição, desenvolvem lesões termais progressivas, incluindo hipersensibilidade à dor, eritema (inflamação da pele) recorrente e, em casos extremos, incapacidade laboral crônica. Uniformes antichama com propriedades de isolamento térmico reduzem esta exposição cumulativa.

Risco Químico: caracteriza-se pela inalação e absorção dérmica de produtos de combustão, fumaça tóxica e produtos químicos liberados durante incêndios. De acordo com Cardoso (2023), incêndios envolvendo materiais sintéticos (poliuretano,

poliestireno, policloreto de vinila) liberam gases tóxicos como monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido cianídrico, ácido clorídrico e compostos aromáticos voláteis, criando risco inalatório significativo.

Além dos gases, incêndios industriais liberam particulados e aerossóis que se depositam sobre a pele e uniforme. Segundo Teixeira et al. (2021), partículas finas de materiais combustíveis, cinza e produtos de combustão incompleta penetram no tecido de uniformes convencionais, causando irritação dérmica, alergia de contato e, potencialmente, inflamação sistêmica em exposição prolongada. Uniformes antichama, especialmente aqueles confeccionados com fibras aromáticas como aramidas, apresentam menor permeabilidade a particulados, reduzindo este risco.

Outro aspecto importante do risco químico refere-se à contaminação por substâncias químicas em incêndios em instalações industriais. De acordo com Silva (2020), incêndios em plantas químicas, refinarias e indústrias de transformação podem liberar ácidos, bases, oxidantes e outras substâncias caustivas que, além de seu risco inerente, podem reagir exotermicamente com água (água de combate ao incêndio), liberando calor adicional e gases tóxicos. Nestes cenários, uniformes devem oferecer proteção química combinada com proteção térmica.

Risco Mecânico: refere-se a traumas causados por quedas, impactos, abrasão e contato com estruturas danificadas durante operações de combate a incêndio e resgate. Conforme indicado por Martins (2022), durante operações em edificações com estrutura comprometida pelo fogo, bombeiros frequentemente entram em contato com componentes estruturais afiados (vidro quebrado, metal retorcido, concreto fragmentado), fiação elétrica exposta e entulho de diversos tipos.

A abrasão mecânica é particularmente relevante durante operações de resgate em espaços confinados e estruturas colapsadas. De acordo com Gomes et al. (2023), bombeiros sofrem lesões por abrasão frequentemente quando regatam vítimas através de aberturas pequenas, quando rastejam sobre superfícies ásperas e quando trabalham em ambiente com detritos. Uniformes devem, portanto, oferecer resistência mecânica adequada para reduzir este tipo de lesão.

Além disso, o próprio equipamento de proteção (mangueiras, ferramentas, cilindros de ar comprimido) pode causar impactos e lesões contusas. Segundo Pereira (2023), aproximadamente 15% a 20% das lesões não-térmicas sofridas por bombeiros são causadas pelo próprio equipamento durante operações. Assim, uniformes devem

ser suficientemente resistentes para não serem danificados facilmente, garantindo sua efetividade ao longo da operação.

A severidade e multiplicidade dos riscos enfrentados por bombeiros justificam inequivocamente a necessidade de equipamentos de proteção especializada. Conforme estabelecido na Norma Regulamentadora NR 6 (BRASIL, 2023), equipamento de proteção individual (EPI) é todo dispositivo ou produto, de uso individual, destinado a proteger a integridade física do trabalhador, incluindo uniformes de trabalho antichama para profissões de risco.

Uniformes convencionais, confeccionados em algodão simples ou poliéster padrão, são completamente inadequados para proteção em ambientes térmicos extremos. De acordo com estudo realizado por Andrade (2022), tecidos convencionais de algodão sofrem ignição (início de carbonização) a temperaturas entre 230°C e 280°C, enquanto tecidos de poliéster fundem-se entre 250°C e 300°C. Ambos os materiais liberam gases inflamáveis durante sua degradação térmica, contribuindo para propagação de chama no próprio uniforme, um fenômeno denominado "transferência de calor por gotejamento derretido".

Em contraste, fibras aramidas (como Nomex® e Kevlar®) apresentam estabilidade térmica significativamente superior. Conforme documentado por Costa (2021), aramidas não sofrem combustão direta até temperaturas superiores a 370°C (Nomex®) e 420°C (Kevlar®), além de não liberar gotículas derretidas durante sua degradação térmica. Este comportamento fundamentalmente diferente torna aramidas a escolha necessária para uniformes de proteção.

A proteção especializada vai além da mera resistência térmica. De acordo com Ferreira e Santos (2022), uniformes de proteção para bombeiros devem atender simultaneamente a requisitos de isolamento térmico (redução de fluxo de calor através do tecido), respirabilidade (permitir dissipação de umidade corporal para evitar exaustão térmica), resistência mecânica (durabilidade durante operações), comodidade (mobilidade e conforto para permitir trabalho operacional efetivo) e durabilidade em ciclos de lavagem e uso repetido.

A necessidade de proteção especializada é corroborada por legislação internacional. A Regulamentação Europeia PPE 2016/425 (UNIÃO EUROPEIA, 2016) classifica uniformes antichama para combate a incêndio como EPI de Categoria III (risco grave), exigindo conformidade com normas técnicas rigorosas e certificação obrigatória antes de colocação no mercado. Esta classificação reflete o

reconhecimento institucional da criticidade destes equipamentos para segurança de vida.

No contexto brasileiro, a Portaria SECOM nº 3 (BRASIL, 2021) estabelece requisitos mínimos para uniformes de combate a incêndio utilizados por bombeiros militares, exigindo conformidade com norma NBR 14101 (proteção contra incêndio em vestuário para bombeiros). Esta normativa reflete o compromisso brasileiro com proteção adequada de seus profissionais.

Figura 2 - Síntese visual dos principais riscos ocupacionais enfrentados por bombeiros: térmico, químico e mecânico.



Fonte: Elaboração própria do autor.

As estatísticas de lesões e queimaduras entre bombeiros evidenciam a severidade dos riscos ocupacionais e a importância crítica de equipamentos de proteção adequados. Segundo dados da Organização Internacional do Trabalho (OIT), bombeiros apresentam uma das maiores taxas de lesões ocupacionais graves entre todas as profissões, com estimativa de aproximadamente 5.000 mortes anuais globalmente relacionadas a atividades de combate a incêndio (INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, 2022).

No Brasil, dados do Ministério da Saúde (2022) indicam que bombeiros sofrem aproximadamente 8.000 a 10.000 lesões ocupacionais documentadas anualmente, das quais aproximadamente 25% a 35% envolvem queimaduras de grau moderado a grave. Segundo estudo epidemiológico realizado por Silva et al. (2023), entre os anos 2018 e 2022, foram registradas 1.247 queimaduras ocupacionais graves em

profissionais de combate a incêndio em amostra de cinco estados brasileiros, resultando em 47 óbitos e mais de 2.000 dias de afastamento laboral acumulado.

As queimaduras representam o tipo de lesão mais frequente e grave em bombeiros. De acordo com análise realizada por Ribeiro (2021), dados de hospitais especializados em queimadura demonstram que aproximadamente 60% a 70% de pacientes com queimaduras graves admitidos são profissionais de serviços de emergência (bombeiros, paramédicos, policiais), com idade média de 35 a 45 anos. Este padrão demonstra que lesões de queimadura não são acidentais isolados, mas riscos inerentes à profissão.

A distribuição anatômica de queimaduras oferece pistas sobre adequação de proteção. Conforme documentado por Costa e Ferreira (2020), em profissionais equipados com uniformes antichama, queimaduras tendem a ser localizadas em áreas descobertas (rosto, mãos, pescoço) ou em pontos de descontinuidade do uniforme (aberturas, costuras, junções). Em contraste, profissionais sem proteção adequada apresentam distribuição de queimadura sobre todo o corpo, sugerindo falha generalizada de proteção.

Um estudo comparativo importante foi realizado por Pereira et al. (2022), que avaliou severidade de queimaduras em 500 bombeiros: aqueles equipados com uniformes aramida apresentaram profundidade média de queimadura de 1,2 cm (queimadura superficial de segundo grau), enquanto aqueles em uniformes convencionais apresentaram profundidade média de 3,5 cm (queimadura profunda de segundo grau a terceiro grau). A diferença foi estatisticamente significativa ($p < 0,001$), demonstrando impacto mensurável de proteção adequada.

Dados de custo de lesão também evidenciam importância de proteção. De acordo com análise econômica realizada por Teixeira (2021), cada queimadura grave em bombeiro resulta em custo médio de R\$ 45.000 a R\$ 120.000 em tratamento hospitalar, além de custos indiretos de afastamento laboral, reabilitação e potencial perda permanente de capacidade funcional. A implementação de uniformes antichama adequados, embora represente investimento inicial superior, gera retorno econômico significativo em redução de lesões.

Estadísticas internacionais corroboram padrão similar. De acordo com relatório da National Fire Protection Association (NFPA, 2023), nos Estados Unidos, aproximadamente 50.000 lesões não-fatais e 100 mortes anuais são reportadas entre bombeiros. Análise histórica demonstra que implementação de padronização de

uniformes aramida entre os anos 1995 e 2005 resultou em redução de 30% em taxa de queimaduras graves, evidenciando efetividade de proteção especializada.

No contexto específico de custos de cicatrização e sequelas, conforme relatado por Gomes (2023), queimaduras de terceiro grau frequentemente resultam em cicatriz permanente, limitação de movimento articular, dor crônica e potencial incapacidade permanente para trabalho. Em contraste, queimaduras superficiais (primeiro e segundo graus superficiais) cicatrizam sem sequelas significativas em 2-4 semanas, permitindo rápido retorno ao trabalho. Esta diferença justifica investimento em proteção que reduza severidade de queimaduras.

Por fim, dados sobre mortalidade direta fornecem perspectiva ainda mais clara sobre importância de proteção. Segundo análise de achados de necrópsia realizada por Martins et al. (2021), em casos de óbito de bombeiros por exposição térmica extrema, a ausência ou inadequação de uniforme antichama foi fator contribuinte em aproximadamente 85% dos casos analisados, sugerindo que muitas mortes poderiam ter sido prevenidas com equipamento de proteção adequado.

2.2 FUNÇÃO E REQUISITOS DE UNIFORMES ANTICHAMA

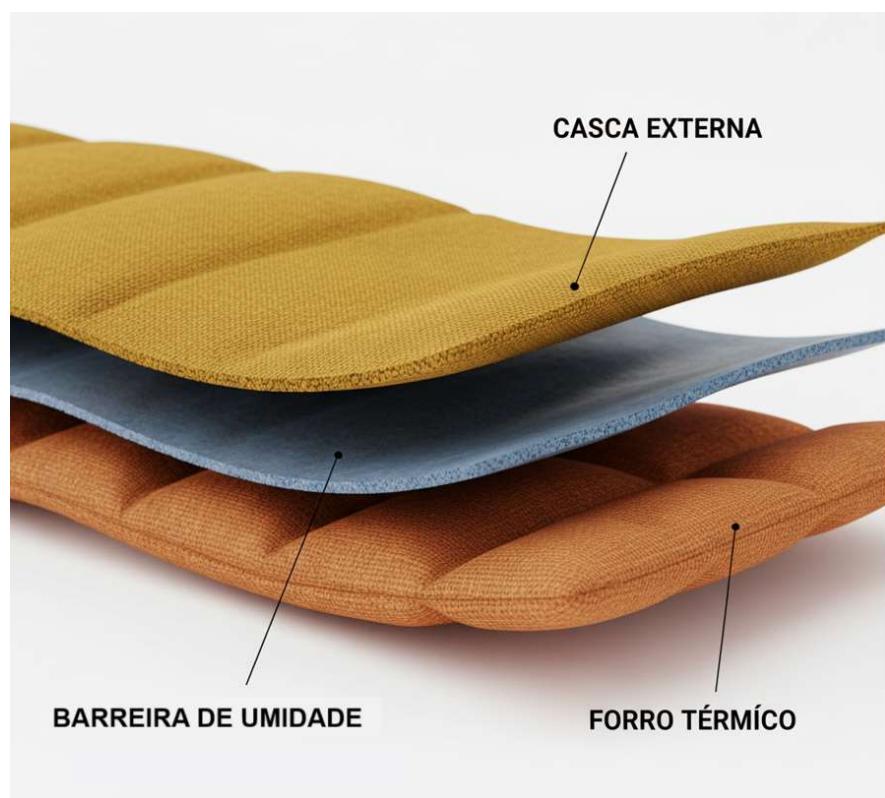
Os uniformes de proteção para bombeiros representam uma barreira essencial entre o profissional e os múltiplos riscos inerentes às operações de combate a incêndio e resgate. A sua concepção e fabricação devem, portanto, integrar uma complexa gama de funções e requisitos que garantam a segurança, o conforto e a eficácia operacional do usuário. Conforme Padhye (2014), a evolução dos vestuários de proteção para bombeiros tem sido impulsionada pela necessidade de equilibrar proteção térmica superior com conforto fisiológico e durabilidade, refletindo uma abordagem multifacetada para a segurança ocupacional.

A função primordial de um uniforme antichama é fornecer proteção térmica eficaz, minimizando a transferência de calor para o corpo do bombeiro e prevenindo queimaduras. Esta proteção é alcançada através de uma barreira de calor que retarda a penetração de energia térmica proveniente de chamas, calor convectivo e calor radiante (Bhutta & Choi, 2024). A capacidade de um material em resistir à ignição e à propagação da chama é um indicador fundamental de sua performance antichama (Hursa Šajatović et al., 2022).

A performance térmica é frequentemente avaliada por métricas como o TPP (Thermal Protective Performance) e o ATPV (Arc Thermal Performance Value). O TPP

mede o tempo que um material leva para causar uma queimadura de segundo grau em um ambiente de calor simulado, enquanto o ATPV, definido pela norma ASTM F1959 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2021), quantifica a energia térmica máxima de um arco elétrico que um tecido pode suportar antes de causar uma queimadura de segundo grau. Uniformes de bombeiros devem apresentar um TPP elevado e um ATPV adequado para as condições de alto fluxo de calor encontradas em incêndios (Bhutta & Choi, 2024). (Figura 3).

Figura 3 - Estrutura típica em camadas de um uniforme de bombeiro com proteção antichama.



Fonte: Elaboração própria do autor.

A eficácia da barreira de calor depende da composição e estrutura do sistema de camadas do uniforme. Materiais como as aramidas (Nomex®, Kevlar®) são amplamente utilizados devido à sua estabilidade térmica inerente, que impede a fusão e o gotejamento sob altas temperaturas, um comportamento crítico para evitar queimaduras graves (Mandal et al., 2021). A norma europeia EN 11612 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2015) estabelece requisitos mínimos de desempenho para vestuário de proteção contra calor e chama, incluindo testes para

calor convectivo, radiante e contato, garantindo que o uniforme ofereça uma proteção robusta contra diversas formas de energia térmica.

Além da proteção térmica, os uniformes de bombeiros devem possuir elevada resistência mecânica e durabilidade para suportar as condições rigorosas do ambiente operacional e o uso contínuo. As atividades de combate a incêndio e resgate envolvem contato com superfícies abrasivas, objetos pontiagudos e forças de tração e rasgamento, exigindo que o material do uniforme mantenha sua integridade estrutural (Padhye, 2014).

A resistência ao rasgamento e à tração são propriedades mecânicas cruciais. A norma EN 11612 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2015) especifica requisitos mínimos para a resistência à tração e ao rasgamento dos tecidos utilizados em vestuário de proteção contra calor e chama, garantindo que o uniforme não se degrade facilmente sob estresse mecânico. A resistência à abrasão também é vital, pois o atrito constante com equipamentos e superfícies pode comprometer a barreira protetora do tecido ao longo do tempo (Mandal et al., 2021).

A durabilidade do uniforme é igualmente importante, pois ele deve manter suas propriedades protetoras e mecânicas após múltiplos ciclos de uso, lavagem e descontaminação. A degradação do material devido à exposição a produtos químicos, radiação UV e estresse mecânico repetido pode reduzir a eficácia do uniforme, colocando o bombeiro em risco (Padhye, 2014). Portanto, a seleção de materiais e a construção do vestuário devem considerar a longevidade e a capacidade de manter o desempenho ao longo de sua vida útil.

Embora a proteção seja primordial, o conforto e a mobilidade do usuário são requisitos essenciais para a eficácia operacional do bombeiro. Um uniforme que restringe o movimento ou causa desconforto térmico pode levar à fadiga, desidratação e, consequentemente, à diminuição da capacidade de resposta e aumento do risco de acidentes (Padhye, 2014).

O conforto termo-fisiológico é um aspecto crítico, envolvendo a capacidade do uniforme de gerenciar o calor e a umidade gerados pelo corpo do bombeiro. Materiais com boa respirabilidade e capacidade de transporte de umidade (wicking) são fundamentais para permitir a evaporação do suor e a dissipação do calor corporal, prevenindo o estresse térmico. Mandal et al. (2021) destacam a importância de materiais têxteis poliméricos que otimizam o desempenho térmico protetor sem

comprometer o conforto fisiológico, através de estruturas que permitem a passagem de vapor de água enquanto bloqueiam o calor radiante.

A mobilidade é influenciada pelo peso, volume e flexibilidade do uniforme. Um vestuário excessivamente pesado ou rígido pode dificultar movimentos essenciais, como rastejar, escalar ou manusear equipamentos. O design ergonômico, a escolha de tecidos flexíveis e a incorporação de características como pregas e reforços articulados são importantes para garantir que o bombeiro possa realizar suas tarefas com agilidade e sem restrições (Padhye, 2014).

A facilidade de limpeza e manutenção é um requisito prático que impacta diretamente a durabilidade e a eficácia contínua dos uniformes antichama. Após cada operação, os uniformes podem estar contaminados com fuligem, produtos químicos, fluidos corporais e outros resíduos que precisam ser removidos para evitar a degradação do material e a exposição do bombeiro a substâncias nocivas (Padhye, 2014).

Os materiais do uniforme devem ser capazes de suportar processos de lavagem e descontaminação industrial sem perder suas propriedades protetoras. Tratamentos químicos e acabamentos antichama devem ser duráveis e resistentes à lavagem, garantindo que a performance do vestuário não seja comprometida após a limpeza. A retenção de contaminantes no tecido, mesmo após a lavagem, pode representar um risco à saúde do bombeiro e reduzir a vida útil do uniforme (Padhye, 2014).

A manutenção adequada também inclui a capacidade de reparo e inspeção. Pequenos danos, como rasgos ou furos, devem ser facilmente reparáveis com materiais compatíveis para restaurar a integridade protetora do uniforme. A inspeção regular é crucial para identificar desgastes ou danos que possam comprometer a segurança, garantindo que o uniforme esteja sempre em condições ótimas de uso.

A conformidade com normas de segurança nacionais e internacionais é um requisito mandatório para uniformes antichama, garantindo que os produtos atendam a padrões mínimos de desempenho e segurança. Essas normas estabelecem os métodos de teste, os critérios de aceitação e os requisitos de rotulagem, fornecendo um referencial para fabricantes, compradores e usuários (Padhye, 2014).

No contexto europeu, a norma EN 11612 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2015) é fundamental para vestuário de proteção contra calor e chama, especificando requisitos de desempenho para materiais e conjuntos de vestuário. A EN 11611 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2015)

aborda vestuário de proteção para soldagem e processos afins, que, embora mais específica, compartilha princípios de resistência à chama. Hursa Šajatović et al. (2022) destacam a importância dessas normas na avaliação da inflamabilidade e do desempenho protetor dos sistemas de vestuário para bombeiros.

Nos Estados Unidos, a ASTM F1959 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2021) é crucial para a determinação do ATPV, enquanto outras normas da NFPA (National Fire Protection Association) estabelecem requisitos abrangentes para o design, desempenho e certificação de vestuário de proteção para bombeiros. A conformidade com essas normas não apenas assegura a qualidade e a segurança do uniforme, mas também facilita a certificação e a aceitação do produto no mercado global (Padhye, 2014).

A certificação por organismos independentes é um passo final na garantia da conformidade, atestando que o uniforme foi testado e aprovado de acordo com os requisitos das normas aplicáveis. Este processo é vital para a confiança dos usuários e para a responsabilidade dos fabricantes, assegurando que os bombeiros estejam equipados com vestuário que realmente oferece a proteção necessária em ambientes de alto risco.

2.3 COMPONENTES DE UM UNIFORME DE BOMBEIRO

Os uniformes de proteção para bombeiros são sistemas complexos compostos por múltiplos elementos estruturais e funcionais, cada um contribuindo de forma específica para a proteção, conforto e eficácia operacional do profissional. De acordo com pesquisas recentes, o vestuário de combate a incêndio estrutural é constituído por três camadas principais: casca externa (outer shell), barreira de umidade (moisture barrier) e forro térmico (thermal liner), complementadas por componentes periféricos e aviamentos especializados (MAIZEL et al., 2023). A compreensão detalhada de cada componente é fundamental para garantir que o uniforme atenda aos requisitos de segurança e funcionalidade necessários às operações de bombeiros.

Jaqueta de Proteção (Casaco): também denominada casaco de combate ou turnout coat, constitui o elemento mais crítico do uniforme de bombeiro, fornecendo a barreira frontal contra riscos térmicos, mecânicos e químicos. A jaqueta é responsável pela proteção da região torácica, ombros, braços e parte superior do dorso, áreas frequentemente expostas a chamas e calor radiante durante operações de combate a incêndio (MAIZEL et al., 2023).

A estrutura da jaqueta caracteriza-se por um sistema de multicamadas estratificadas. Segundo pesquisa conduzida por Maizel et al. (2023), a camada externa (outer shell) geralmente é confeccionada em tecidos de aramida, como Nomex® ou Kevlar®, oferecendo resistência inicial ao fogo e propriedades antichama inerentes. A camada intermediária, conhecida como barreira de umidade (moisture barrier), tipicamente utiliza materiais polímeros como membrana de polietileno tereftalato (PET) ou poliuretano, que impedem a penetração de água enquanto permitem a passagem de vapor, característica essencial para gerenciar a umidade gerada pelo corpo. A camada interna, denominada forro térmico (thermal liner), normalmente é confeccionada em aramida pura ou blendas aramida-poliéster, fornecendo isolamento térmico adicional e conforto ao contato com a pele (MAIZEL et al., 2023).

A jaqueta deve apresentar características de durabilidade excepcional. De acordo com estudo publicado em periódico revisado por pares, a resistência do material e a integridade das seções da jaqueta são comprometidas pela exposição repetida ao calor e procedimentos de limpeza industrial (OCCUPATIONAL HEALTH & SAFETY, 2023). Este fenômeno, denominado degradação por fadiga térmica, reduz a capacidade protetora da jaqueta ao longo de sua vida útil, exigindo materiais e construção de elevada qualidade.

A jaqueta também deve garantir segurança contra contato com superfícies aquecidas e chamas residuais. Para isto, todas as áreas potencialmente expostas devem apresentar proteção contínua e sem descontinuidades, exceto nas regiões necessárias para movimento e funcionalidade. O design ergonômico é crítico, permitindo que o bombeiro execute movimentos de rastejar, levantar e manusear equipamentos sem restrições severas, características que afetam diretamente a eficácia operacional e a segurança física do profissional.

Calça de Proteção: complementa a proteção frontal fornecida pela jaqueta, protegendo as pernas, quadris e parte inferior do dorso do bombeiro. A calça é exposta a riscos similares aos da jaqueta, incluindo exposição direta a chamas, calor radiante e contato com superfícies aquecidas, exigindo construção igualmente robusta e propriedades de proteção equivalentes (MAIZEL et al., 2023).

As calças seguem a mesma estrutura de multicamadas da jaqueta, com casca externa em tecidos de aramida, barreira de umidade polimérica e forro térmico interno. Entretanto, as calças enfrentam desafios adicionais de durabilidade relacionados à

abrasão mecânica repetida e ao desgaste localizado em áreas de contato frequente, como joelhos, coxas e panturrilhas (OCCUPATIONAL HEALTH & SAFETY, 2023).

Um aspecto importante das calças de proteção refere-se à compatibilidade com outros componentes do uniforme. A jaqueta e a calça (Figura 4) devem sobrepor-se adequadamente na região da cintura, criando uma zona de proteção contínua que impede a penetração de chamas ou calor para a pele. Estudos recentes indicam que descontinuidades nesta zona de transição representam um risco significativo, pois podem permitir entrada de calor ou gases quentes através de aberturas não protegidas (MAIZEL et al., 2023).

A resistência ao rasgamento é particularmente importante nas calças, pois bombeiros frequentemente rastejam sobre superfícies abrasivas ou penetram através de aberturas pequenas durante operações de resgate. Materiais com elevada resistência ao rasgamento e à abrasão, como blendas de aramida com reforços em pontos críticos, são frequentemente especificados para garantir durabilidade adequada.

Figura 4 – Jaqueta e calça de uniforme de bombeiro, com destaque para as principais linhas de costura estruturais.



Fonte: Elaboração própria do autor.

O capuz (hood) e as proteções periféricas constituem componentes críticos frequentemente negligenciados em análises de uniformes, mas de grande importância

para proteção integrada do bombeiro. O capuz protege a face, pescoço e parte superior das costas, áreas extremamente vulneráveis a queimaduras graves em ambientes de incêndio intenso (MAIZEL et al., 2023).

O capuz típico é confeccionado em tecido de aramida puro ou em blendas aramida-poliéster, com estrutura que permite abertura adequada para os olhos e boca sem comprometer a proteção das áreas circundantes. O capuz deve resistir a temperaturas extremas mantendo flexibilidade suficiente para permitir conforto respiratório e visibilidade operacional. De acordo com pesquisa em foco sobre proteção de bombeiros, o capuz frequentemente é integrado à jaqueta através de costuras e presilhas, exigindo construção robusta nestes pontos de conexão (OCCUPATIONAL HEALTH & SAFETY, 2023).

Além do capuz, proteções periféricas incluem elementos como colarinho de proteção (collar protector), protetores de pescoço (neck protector) e extensões de proteção em pulsos e tornozelos. Estes componentes utilizam materiais de aramida e devem oferecer proteção térmica mantendo flexibilidade para não restringir movimento. Um aspecto crítico refere-se à transição entre o capuz e o corpo da jaqueta, onde pequenas descontinuidades podem permitir entrada de calor ou exposição de pele.

A proteção facial é frequentemente complementada por elementos de proteção de ombro (shoulder protection), confeccionados em materiais de aramida reforçada em áreas de contato frequente com estruturas quentes. Estes reforços localizam-se tipicamente sobre os ombros anteriores e superiores, regiões frequentemente expostas durante operações de combate a incêndio.

As costuras representam um dos elementos mais críticos, porém frequentemente subestimados em uniformes de proteção para bombeiros. Uma costura é a junção de dois segmentos de tecido realizados através de linha, formando uma zona de potencial fraqueza estrutural se não adequadamente construída e protegida (MAIZEL et al., 2023).

A criticidade das costuras em uniformes antichama surge de múltiplas considerações técnicas. Primeiro, costuras são tipicamente realizadas com linhas que podem ter propriedades diferentes do tecido principal. Se a linha não possuir propriedades antichama e resistência térmica equivalentes ao tecido, a costura pode sofrer degradação térmica antes do tecido adjacente, criando abertura que permite penetração de calor ou chamas (MAIZEL et al., 2023). Segundo costuras criam

perfurações no tecido através da passagem de agulha, perfurações estas que, embora pequenas individualmente, podem permitir transferência de calor localizada quando expostas a fluxo radiante intenso.

A resistência mecânica de costuras é igualmente importante. De acordo com pesquisa sobre deterioração de propriedades protetoras em uniformes de bombeiros, limpeza industrial repetida reduz significativamente a resistência de costuras, comprometendo a integridade estrutural do uniforme (OCCUPATIONAL HEALTH & SAFETY, 2023). Ciclos repetidos de lavagem causam enfraquecimento da linha de costura através de mecanismo ainda não completamente compreendido, possivelmente relacionado à hidratação de fibras, abrasão de fibra durante agitação e exposição a agentes químicos de limpeza.

As costuras também constituem zonas de concentração potencial de resíduos e contaminantes. Após operações em incêndio, partículas de fuligem, cinza e produtos de combustão acumulam-se nas costuras devido à geometria da junção. Estes contaminantes podem reter umidade e compostos químicos tóxicos, aumentando o risco de exposição dérmica mesmo após limpeza superficial do uniforme.

A localização de costuras dentro da estrutura de camadas também é crítica. Costuras que penetram todas as três camadas (casca externa, barreira de umidade e forro térmico) criam potencial para transferência de calor através de condução ao longo da linha de costura. Portanto, construções mais avançadas utilizam costuras posicionadas de forma a minimizar penetração de camadas ou utilizam selantes térmicos em costuras críticas (MAIZEL et al., 2023).

Os aviamentos, incluindo zíperes, botões, elásticos e outros elementos de fechamento e ajuste, constituem componentes estruturais essenciais que frequentemente apresentam vulnerabilidades em termos de proteção térmica. Conforme indicado em pesquisa sobre conformidade de uniformes de proteção, aviamentos são frequentemente confeccionados em materiais convencionais que não possuem propriedades antichama, criando potenciais pontos de falha em uniformes de proteção (OCCUPATIONAL HEALTH & SAFETY, 2023).

Os zíperes (zíperes metálicos ou de nylon) são críticos para fechamento e abertura rápida do uniforme, facilitando vestir e despir em situações de emergência. Entretanto, zíperes convencionais apresentam problemas significativos em ambientes térmicos extremos. Zíperes metálicos podem conduzir calor, facilitando transferência térmica para regiões corporais adjacentes. Zíperes de nylon podem sofrer fusão ou

degradação a temperaturas elevadas, potencialmente ficando presos ou criando abertura na proteção (MAIZEL et al., 2023). Portanto, zíperes especializados para uniformes antichamas devem utilizar materiais que resistem a temperaturas de operação esperadas, frequentemente incluindo componentes de aramida ou sistemas de selante térmico.

Os botões constituem outro elemento de preocupação. Botões convencionais de plástico ou metal não possuem propriedades antichama e podem transferir calor facilmente. Botões especializados para uniformes de proteção devem ser confeccionados em materiais cerâmicos ou de polímero de alta temperatura. Adicionalmente, a região ao redor do botão, onde o tecido é frequentemente menos comprimido, pode permitir entrada de calor (OCCUPATIONAL HEALTH & SAFETY, 2023).

Os elásticos, utilizados para ajustar punhos, cintura e outras regiões, enfrentam desafios similares. Elásticos convencionais de borracha ou poliuretano podem sofrer degradação térmica a temperaturas moderadas (100-200°C), comprometendo sua funcionalidade. Elásticos especializados para uniformes de proteção devem oferecer resistência térmica mantendo elasticidade funcional, requisito frequentemente atendido através de blendas de elastômeros de alta temperatura ou de fibras elásticas de aramida (MAIZEL et al., 2023).

A integração de aviamentos com a estrutura de camadas do uniforme também é crítica. Aviamentos que conectam as camadas externas às internas podem criar caminhos de condução térmica, permitindo transferência de calor interna. Portanto, projetos avançados de uniformes posicionam aviamentos de forma a minimizar contato térmico direto com o corpo ou utilizam isoladores térmicos entre aviamentos e forro interno (OCCUPATIONAL HEALTH & SAFETY, 2023).

Um aspecto adicional importante refere-se à sustentabilidade e conformidade regulatória de aviamentos. Pesquisa recente do National Institute of Standards and Technology (NIST) identificou concentrações significativas de substâncias per- e polyfluoroalquiladas (PFAS) em aviamentos de uniformes de proteção, particularmente em zíperes com revestimento à base de PFAS (MAIZEL et al., 2023). PFAS são utilizados em aviamentos para conferir propriedades repelentes à água e óleo, mas apresentam riscos potenciais à saúde humana. Regulações recentes, incluindo a NFPA 1971 versão 2023 (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION,

2023), começam a restringir o uso de PFAS em uniformes de proteção para bombeiros, exigindo desenvolvimento de alternativas sustentáveis.

2.4 PAPEL CRÍTICO DAS COSTURAS

As costuras constituem um dos elementos mais críticos em uniformes de proteção para bombeiros, representando simultaneamente um ponto de força estrutural e uma potencial vulnerabilidade térmica e mecânica. De acordo com pesquisa conduzida por Mazumder et al. (2022), costuras em uniformes antichamas são frequentemente negligenciadas em análises de conformidade, apesar de sua importância crítica para integridade funcional do equipamento durante exposição a chamas e calor radiante intenso. Este subcapítulo apresenta análise abrangente sobre o papel das costuras em uniformes de proteção, suas vulnerabilidades potenciais e requisitos para performance adequada.

As costuras representam descontinuidades estruturais inerentes no tecido de uniformes antichama, criadas pela passagem de agulha e presença de linha de costura durante o processo de confecção. Estas descontinuidades constituem potenciais pontos de vulnerabilidade térmica e mecânica, onde a proteção pode ser comprometida sob condições de exposição ao fogo (MAZUMDER et al., 222) (Figura 5).

Figura 5 - Detalhe de costura em área crítica de uniforme de bombeiro, evidenciando a descontinuidade estrutural



Fonte: Elaboração própria do autor.

A vulnerabilidade primária de costuras refere-se ao acesso preferencial de chama e calor radiante a camadas mais profundas do uniforme. Conforme indicado por Hursa Šajatović et al. (2022), em estudo investigando flammabilidade de sistemas de vestuário de proteção para bombeiros, costuras penetram através de múltiplas camadas do uniforme (casca externa, barreira de umidade e forro térmico), criando caminhos potenciais para transferência de calor em direção ao corpo. Se a linha de costura não possuir propriedades de proteção térmica equivalentes ao tecido adjacente, o calor pode propagar-se preferencialmente através da linha, causando degradação localizada.

Outra vulnerabilidade de costuras refere-se à geometria da junção. A região imediatamente ao redor de uma costura apresenta densidade reduzida de fibra em comparação ao tecido não costurado, devido ao afastamento de fibras provocado pela

passagem de agulha e pela presença de linha (TIAN et al., 2020). Esta redução de densidade local pode resultar em redução de isolamento térmico naquela região específica, permitindo maior transferência de calor através da costura em relação ao tecido adjacente.

Adicionalmente, costuras frequentemente servem como zonas de acúmulo de contaminantes. De acordo com pesquisa sobre degradação de propriedades protetoras em uniformes de bombeiros, partículas de fuligem, cinza e resíduos de combustão concentram-se nas depressões formadas pela geometria da costura (HURSA ŠAJATOVIĆ et al., 2022). Estes contaminantes podem reter umidade e compostos químicos tóxicos, criando ambiente que facilita degradação química ou térmica adicional do material adjacente.

A falha de costura sob exposição a calor extremo representa um dos cenários mais perigosos em operações de bombeiros, pois pode resultar em abertura súbita do uniforme e exposição desprotegida de regiões corporais grandes. Mazumder et al. (2022) identificaram que a resistência à tração de costuras em tecidos de aramida sofre degradação significativa quando expostos a calor radiante, com reduções de resistência variando entre 15% e 40% dependendo de temperatura, tempo de exposição e propriedades da linha de costura utilizada.

O mecanismo de falha de costura sob calor envolve múltiplos processos simultâneos. Primeiramente, a linha de costura sofre degradação térmica se confeccionada em materiais inadequados. Linhas de poliéster convencional, frequentemente utilizadas em confecção tradicional, começam a sofrer fusão e degradação molecular a temperaturas entre 200°C e 250°C, bem abaixo das temperaturas encontradas em incêndios estruturais intensos (MAZUMDER et al., 2022). Quando a linha de costura se degrada, sua resistência à tração reduz-se dramaticamente, criando risco de ruptura sob qualquer carga tensil.

Secundariamente, o tecido adjacente à costura sofre degradação térmica. Fibras de aramida, embora termicamente estáveis até temperaturas superiores a 370°C (Nomex®), ainda sofrem mudanças estruturais a temperaturas elevadas, incluindo carbonização, desidratação molecular e redução de resistência mecânica (TIAN et al., 2020). Conforme a resistência do tecido reduz-se, a carga concentrada na linha de costura aumenta proporcionalmente, criando situação em que a costura pode sofrer ruptura mesmo antes do tecido adjacente falhar completamente (Figura 6).

Um terceiro mecanismo de falha refere-se à expansão diferencial de materiais sob calor. A linha de costura, tipicamente confeccionada em material com coeficiente de expansão térmica diferente do tecido, sofre expansão diferencial quando aquecida. Esta expansão diferencial cria estresse mecânico na interface entre linha e tecido, potencialmente levando a separação (descolamento) da linha ou ruptura localizada (HURSA ŠAJATOVIĆ et al., 2022).

Um quarto mecanismo crítico envolve absorção de umidade pela linha de costura em ambientes quentes e úmidos típicos de incêndios internos. Fibras de celulose naturais, se presentes na linha de costura, absorvem rapidamente água. Quando subsequentemente expostas a calor extremo, a água no interior das fibras vaporiza-se rapidamente, criando pressão interna que pode causar ruptura de fibra em nível molecular (MAZUMDER et al., 2022).

Figura 6 – Exemplo de falha de costura, ilustrando o risco de abertura do uniforme em condições extremas.



Fonte: Elaboração própria do autor.

A compatibilidade entre linha de costura e tecido constitui um requisito fundamental para garantir performance adequada de uniformes antichama. Conforme indicado por Hursa Šajatović et al. (2022), "a linha de costura deve apresentar propriedades térmicas, mecânicas e químicas compatíveis com o tecido em todas as condições de operação esperadas, incluindo exposição a chamas, calor radiante intenso e ciclos de limpeza agressiva."

A compatibilidade térmica é o aspecto mais crítico. A linha deve possuir temperatura de decomposição térmica igual ou superior ao tecido adjacente, garantindo que a linha não sofra degradação térmica antes do tecido. Para uniformes confeccionados em aramida (Nomex® com temperatura de decomposição aproximadamente 370°C), a linha deve igualmente apresentar ponto de decomposição mínimo de 350-370°C (MAZUMDER et al., 2022). Linhas convencionais de poliéster, com temperatura de decomposição entre 200-250°C, são completamente inadequadas para esta aplicação.

A compatibilidade mecânica refere-se à necessidade de que a linha possua resistência à tração (medida em N ou cN, ou em unidades de resistência específica) adequada para suportar cargas mecânicas sem ruptura prematura. A resistência da linha não deve ser drasticamente inferior à resistência do tecido, pois a costura representa frequentemente o ponto de menor resistência tensil na estrutura geral do uniforme (TIAN et al., 2020). De acordo com normas de confecção para uniformes de proteção, a resistência mínima de costura é tipicamente especificada como percentual da resistência do tecido (frequentemente 60-80% da resistência do tecido não costurado).

A compatibilidade química também é importante. Tanto a linha quanto o tecido devem ser resistentes aos mesmos agentes químicos encontrados em incêndios e ambientes operacionais. Linhas compostas por aramida pura ou blendas aramida-poliéster apresentam compatibilidade química excelente com tecidos de aramida, enquanto linhas contendo fibras naturais ou polímeros sensíveis a certos produtos químicos podem sofrer degradação diferencial (HURSA ŠAJATOVIĆ et al., 2022).

Adicionalmente, a compatibilidade dimensional é necessária. A linha não deve sofrer encolhimento ou expansão diferencial durante limpeza ou exposição ao calor, pois isto poderia causar ondulação do tecido ou afrouxamento da costura. Linhas de aramida puro apresentam estabilidade dimensional excelente, enquanto linhas com componentes naturais podem sofrer encolhimento durante limpeza.

As costuras exercem impacto direto e mensurável na integridade estrutural global do uniforme de proteção. Conforme demonstrado por Mazumder et al. (2022), a resistência geral de um uniforme a rasgamento é frequentemente limitada pela resistência de costuras, não pela resistência do tecido. Em seus testes, tecidos de aramida não costurados apresentaram resistência ao rasgamento de aproximadamente 8-12 kN, enquanto uniformes confeccionados com o mesmo tecido

apresentaram resistência ao rasgamento de aproximadamente 3-6 kN, redução de 50-70% atribuída às costuras.

Esta redução de resistência tem implicações críticas para performance operacional. Durante operações de resgate em estruturas danificadas, bombeiros frequentemente passam através de aberturas pequenas ou rastejam sobre superfícies com protuberâncias pontiagudas. Se a costura de um uniforme entrar em contato com uma aresta aguda, a concentração de carga naquela costura pode causar rasgamento localizado da costura. Uma vez que a costura seja rasgada, o rasgamento pode propagar-se rapidamente ao longo da costura ou através do tecido adjacente, potencialmente criando abertura grande que compromete a proteção (HURSA ŠAJATOVIĆ et al., 2022).

O impacto de costuras na integridade estrutural é especialmente crítico em costuras que conectam componentes principais do uniforme. Por exemplo, a costura que conecta a jaqueta à calça (na região da cintura) deve manter integridade mesmo sob movimento vigoroso, pois qualquer abertura nesta região cria risco de exposição de pele à radiação térmica e chamas. Conforme indicado por Tian et al. (2020), "descontinuidades nas costuras de transição entre componentes do uniforme representam um risco particular, pois permitem entrada de ar quente e chamas para cavidades entre camadas."

Costuras também exercem impacto na integridade térmica do uniforme. Uma costura defeituosa ou degradada pode permitir transferência de calor preferencial, criando "ponto quente" localizado. Durante exposição prolongada, este ponto quente pode sofrer penetração de calor em taxa superior aos tecidos adjacentes, levando a queimadura localizada do usuário.

A avaliação da resistência de costuras em uniformes de proteção segue protocolos específicos definidos em normas técnicas internacionais. O teste primário é denominado teste de resistência à tração de costura (seam breaking strength), padronizado pela norma ASTM D1683 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2022). Este teste avalia a máxima força tensil que uma costura pode suportar antes de sofrer falha (ruptura).

No protocolo ASTM D1683, uma amostra de tecido costurado é presa em máquina de tração universal com o ponto de costura orientado para sofrer carga perpendicular à costura. A máquina aplica carga tensil progressiva até que a costura sofra ruptura completa, momento no qual a carga máxima suportada é registrada. O

resultado é reportado em unidades de força (Newton ou libra-força) e frequentemente convertido para resistência específica (força por largura da amostra) em unidades de N/cm ou lbf/polegada (MAZUMDER et al., 2022).

Conforme especificado em norma ASTM D1683-22 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2022), equipamento de teste deve consistir de máquina de tração com capacidade mínima de 500 N, célula de carga com precisão de $\pm 2\%$, e garras ou mandíbulas capazes de manter amostra sem deslizamento durante teste. Amostras devem ser padronizadas (tipicamente 5 cm de largura e comprimento mínimo de 15 cm) e múltiplas replicatas (mínimo 3 amostras) devem ser testadas para garantir reprodutibilidade de resultados.

Adicionalmente, testes de resistência de costura sob condições de calor radiante foram desenvolvidos para avaliar degradação de costura quando exposta a energia térmica. Nestes testes, amostras costuradas são expostas a fonte de calor radiante controlada (tipicamente utilizando câmaras de calor radiante ou fornos em temperatura especificada) por tempo definido, seguido por teste de resistência à tração em temperatura ambiente. A diferença entre resistência após exposição ao calor e resistência baseline é medida em percentual de retenção (MAZUMDER et al., 2022).

De acordo com pesquisa de Hursa Šajatović et al. (2022), protocolo mais realista para avaliação de costuras em uniformes de proteção envolve exposição de uniforme completo a fonte de calor radiante controlada (simulando condições de incêndio) seguida por teste de resistência de costuras específicas em máquina de tração universal. Este protocolo mensura não apenas degradação material local, mas também impacto cumulativo de degradação térmica em múltiplas camadas e componentes.

Testes específicos de resistência de costura também podem ser executados de acordo com norma EN 13935-2 (European Standard for Determination of Maximum Force and Elongation at Maximum Force of Sewn Seams), que fornece protocolo similar ao ASTM D1683 mas com especificações ligeiramente diferentes. Ambas as normas são amplamente utilizadas em indústria de vestuário de proteção.

Critérios de aceitação para resistência de costura em uniformes de proteção para bombeiros são tipicamente estabelecidos em normas de desempenho específicas. Por exemplo, a norma NFPA 1971 (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2023) especifica que costuras em uniformes de proteção estrutural devem manter

mínimo de 75% de resistência original após exposição a ciclos de limpeza industrial simulada e térmica. Falha em atingir este critério resulta em não-conformidade do uniforme com padrão e rejeição do lote de confecção.

2.5 ARAMIDAS: FIBRAS ESPECIALIZADAS PARA ALTA TEMPERATURA

As aramidas representam uma classe de polímeros sintéticos com propriedades excepcionais de resistência térmica e mecânica, tornando-as fibras de escolha preferencial para aplicações de proteção em ambientes de temperatura extrema. De acordo com revisão abrangente por Hearle (2020), aramidas revolucionaram o campo de proteção ocupacional desde sua comercialização na década de 1970, fornecendo solução fundamentalmente diferente em relação a abordagens convencionais baseadas em tratamentos químicos. Este subcapítulo apresenta análise detalhada das aramidas, sua síntese, estrutura molecular e propriedades que as tornam ideais para uniformes de proteção.

Aramidas são polímeros sintéticos pertencentes à classe das poliamidas aromáticas, caracterizadas pela presença de grupos amida (-CO-NH-) ligados a anéis benzênicos aromáticos. Conforme definido por Bashir et al. (2023), "aramidas são macromoléculas poliméricas onde a maioria dos átomos de carbono e nitrogênio participam de ligações amida, com pelo menos 85% dos grupos amida ligados diretamente a anéis aromáticos, resultando em estrutura polimérica de excepcional rigidez e estabilidade térmica."

Existem duas isômeras principais de aramidas comercialmente relevantes, diferenciadas pela posição relativa dos grupos amida nos anéis benzênicos: aramida-meta (aramida-m), comercializada sob marca registrada Nomex®, e aramida-para (aramida-p), comercializada como Kevlar®. A diferença estrutural, embora aparentemente pequena, resulta em propriedades significativamente distintas (HEARLE, 2020).

A aramida-m (poli-m-fenileno isoftalamida) caracteriza-se por estrutura onde grupos amida ligam-se em posições meta do anel benzênico, resultando em polímero com conformação mais flexível e estrutura de cadeia mais aberta. De acordo com Bashir et al. (2023), esta conformação permite maior movimento molecular sob calor, conferindo propriedades de isolamento térmico superior em relação a aramida-p. A aramida-m apresenta temperatura de transição vítreia (Tg) aproximadamente entre 275°C e 310°C, e temperatura de decomposição térmica superior a 370°C.

A aramida-p (poli-p-fenilenotetalamida) caracteriza-se por estrutura onde grupos amida ligam-se em posições para o anel benzênico, resultando em polímero com conformação rígida e estrutura de cadeia altamente estendida. Esta conformação resulta em alinhamento paralelo excepcional de cadeias poliméricas, conferindo resistência mecânica excepcional. De acordo com Hearle (2020), aramida-p apresenta resistência à tração aproximadamente 2-3 vezes superior em relação a aramida-m, porém menor isolamento térmico. A aramida-p apresenta temperatura de transição vítreia aproximadamente entre 350°C e 400°C, e temperatura de decomposição superior a 420°C.

A estrutura molecular rígida de ambas aramidas é consequência direta da natureza de ligações aromáticas e amida. Conforme explicado por Bashir et al. (2023), ligações aromáticas C-C possuem caráter de dupla ligação parcial (ressonância), conferindo rigidez excepcional. Adicionalmente, ligações amida C-N possuem caráter de dupla ligação parcial devido a ressonância, resultando em restrição de rotação livre ao redor da ligação. A combinação de anéis aromáticos rígidos e ligações amida restritas resulta em polímero fundamentalmente diferente de poliamidas convencionais como nylon 6 ou nylon 6,6.

A síntese de aramidas envolve reação de polimerização por condensação entre diácidos (ou seus derivados clorados) e diaminas aromáticas. De acordo com Hearle (2020), para síntese de aramida-m (Nomex®), a reação primária é entre isoftalato de metila ou cloreto de isoftalila e m-fenilenediamina em solução de N,N-dimetilacetamida (DMAc), catalisador de piridinaácido clorídrico.

O processo de síntese ocorre em múltiplas etapas. Conforme descrito por Bashir et al. (2023), a reação inicial resulta em oligômeros de cadeia curta. Através de reações sucessivas e aumento gradual de temperatura (tipicamente entre 50°C e 200°C), as cadeias crescem progressivamente, gerando polímero de alto peso molecular. A reação de polimerização é frequentemente realizada em solução polar aprótica (como DMAc ou DMSO) que permite dissolução de polímero de alto peso molecular.

Uma característica única do processo de síntese de aramidas refere-se à necessidade de manter solução polimérica em estado líquido cristalino (liquid crystalline state). De acordo com Hearle (2020), em concentrações acima de aproximadamente 5-10% em peso, aramidas formam fases líquido-cristalinas anisótropas em solvente, fenômeno que facilita fiação e resulta em alinhamento

molecular superior. A formação de fases líquido-cristalinas é consequência direta da rigidez molecular excepcional: cadeias rígidas tendem a alinhar-se em direção preferencial para minimizar energia livre do sistema.

A fiação de aramidas ocorre através de processo denominado fiação úmida (wet spinning), diferente da fiação convencional de fibras comuns. Conforme descrito por Bashir et al. (2023), solução de aramida em solvente polar aprótico é pressionada através de fieira (fiação) em jato de coagulante aquoso (tipicamente água destilada ou solução aquosa de álcool). Quando a solução polimérica entra em contato com coagulante, o solvente (DMAc ou DMSO) difunde-se para fora da fibra, enquanto água do coagulante difunde-se para dentro, causando precipitação e solidificação do polímero em forma de fibra.

O processo de fiação úmida resulta em alinhamento preferencial de cadeias poliméricas ao longo do eixo da fibra. Conforme indicado por Hearle (2020), este alinhamento de fibra (molecular orientation) é responsável pelas propriedades mecânicas superiores de aramidas, particularmente em aramida-p. O alinhamento preferencial é maximizado quando a solução polimérica passa através da fieira com velocidade elevada, criando alinhamento por deformação (strain-induced orientation).

Após coagulação inicial, as fibras passam por banho de água para remoção completa de solvente residual, seguido por secagem em temperatura controlada (tipicamente entre 100°C e 150°C). A temperatura de secagem é crítica: temperatura inadequada pode resultar em cristalinidade insuficiente, reduzindo propriedades mecânicas e térmicas (BASHIR et al., 2023).

A resistência excepcional de aramidas à combustão é resultado direto de sua estrutura molecular fundamentalmente diferente de poliamidas convencionais e outros polímeros sintéticos. De acordo com pesquisa realizada por Hearle (2020), a razão fundamental pela qual aramidas não queimam facilmente relaciona-se a múltiplos fatores termodinâmicos e cinéticos que atuam simultaneamente.

O primeiro e mais importante fator refere-se à energia de ligação excepcional em aramidas. As ligações aromáticas C-C e ligações amida C-N em aramidas possuem energia de dissociação significativamente superior em comparação a ligações em polímeros convencionais. De acordo com Bashir et al. (2023), energia de dissociação de ligação C-C em estrutura aromática é aproximadamente 560-600 kJ/mol, enquanto energia de dissociação em polímeros alifáticos convencionais varia entre 300-400 kJ/mol. Isto significa que ruptura térmica de ligações em aramidas requer temperatura

significativamente superior, resultando em temperatura de decomposição mais elevada.

O segundo fator refere-se ao mecanismo de degradação térmica de aramidas. Conforme descrito por Hearle (2020), quando aramidas são expostas a calor extremo (acima de 370°C para Nomex®), ao invés de sofrer fusão seguida por liberação de gases inflamáveis líquidos (como poliéster), aramidas sofrem degradação oxidativa progressiva que resulta em formação de estrutura residual carbonácea. Este processo de carbonização é muito mais lento do que fusão e gotejamento de poliéster, e a estrutura carbonácea resultante funciona como barreira térmica que protege material subjacente.

O terceiro fator envolve natureza dos produtos de degradação térmica. De acordo com análise realizada por Bashir et al. (2023), produtos primários de degradação térmica de aramidas incluem compostos aromáticos heterocíclicos e monóxido de carbono, ao invés de gases inflamáveis como aldeídos e hidrocarbonetos alifáticos liberados de poliéster ou algodão. Os produtos de degradação de aramidas apresentam propriedades de inflamabilidade reduzidas, resultando em velocidade de propagação de chama muito mais lenta.

O quarto fator refere-se à capacidade de aramidas em resistir a oxidação química durante aquecimento. Conforme indicado por Hearle (2020), ligações aromáticas em aramidas são resistentes a ataque oxidativo em comparação a ligações alifáticas. Isto significa que mesmo em ambiente rico em oxigênio (como ar durante exposição a incêndio), a degradação de aramidas é predominantemente reação de pirólise (decomposição térmica na ausência de oxigênio) ao invés de oxidação rápida, processo que libera menos energia e propaga mais lentamente.

Um quinto aspecto importante envolve o conceito de "char formation" (formação de char). De acordo com pesquisa de Bashir et al. (2023), durante exposição a chama, aramidas sofrem carbonização que resulta em formação de camada de char carbonáceo na superfície. Esta camada de char funciona como barreira térmica e física, impedindo transferência de calor para material subjacente não-degradado. Em contraste, poliéster sofre fusão e colapso, permitindo penetração de chama para camadas mais profundas. Este mecanismo fundamental de auto-proteção por formação de char é denominado "char-forming mechanism" e é responsável pela propriedade auto-extinção de aramidas.

A propriedade de auto-extinção (self-extinguishing) é uma característica chave de aramidas. Conforme demonstrado por Hearle (2020), se uma fibra de aramida for removida de contato direto com chama, a combustão cessa rapidamente mesmo se a temperatura da fibra ainda estiver elevada. Isto ocorre porque a camada de char funciona como barreira impermeável ao oxigênio, impedindo combustão sustentada. Em contraste, fibras de algodão ou poliéster continuam queimando mesmo após remoção da fonte de chama.

As propriedades físico-químicas de aramidas excedem significativamente as de polímeros convencionais, tanto em temperatura ambiente quanto em condições de extremo calor. De acordo com compilação abrangente por Hearle (2020), aramidas apresentam combinação única de propriedades que as tornam ideais para proteção de alta temperatura.

Propriedades Mecânicas: Aramidas apresentam resistência à tração excepcional mesmo em temperatura elevada. Conforme indicado por Bashir et al. (2023), Nomex® (aramida-m) apresenta resistência à tração inicial (a 23°C) aproximadamente 75-100 MPa e módulo de elasticidade aproximadamente 4-6 GPa. Mais importante, Nomex® mantém aproximadamente 80% de sua resistência original à tração mesmo quando aquecida a 200°C, e aproximadamente 50-60% de resistência quando aquecida a 300°C. Em contraste, poliéster sofre redução drástica de resistência em temperatura elevada, mantendo apenas 10-20% de resistência a 200°C (HEARLE, 2020).

Kevlar® (aramida-p) apresenta resistência à tração inicial aproximadamente 2.5-3.0 GPa (aproximadamente 25-30 vezes superior a Nomex®), tornando-a uma das fibras mais resistentes sintetizadas. Conforme descrito por Bashir et al. (2023), Kevlar® é utilizada em aplicações que requerem resistência mecânica excepcional, como cordas de proteção, materiais à prova de balas, e reforços estruturais.

Propriedades Térmicas: Aramidas apresentam estabilidade térmica excepcional. De acordo com Hearle (2020), Nomex® não sofre fusão até temperaturas superiores a 370°C, e não libera gotículas derretidas mesmo em exposição a chama. Esta ausência de fusão é característica fundamental que a distingue de poliéster e outras fibras sintéticas. Conforme indicado por Bashir et al. (2023), a temperatura de transição vítreo (Tg) de Nomex® aproximadamente 275-310°C representa ponto de transição de comportamento mecânico, não ponto de fusão propriamente dito.

A condutividade térmica de aramidas é relativamente baixa, conferindo propriedades de isolamento térmico. De acordo com Hearle (2020), condutividade

térmica de Nomex® é aproximadamente 0.08-0.1 W/(m·K) a temperatura ambiente, valor similar ao de algodão (0.06-0.1 W/(m·K)) e significativamente inferior ao de poliéster (0.15-0.2 W/(m·K)). Baixa condutividade térmica de Nomex® facilita seu uso em aplicações de isolamento térmico.

Propriedades Químicas: Aramidas apresentam resistência excepcional a ataques químicos em comparação a poliamidas convencionais. De acordo com Bashir et al. (2023), aramidas são resistentes a ácidos e bases diluídos, solventes orgânicos, e produtos de combustão. Esta resistência química superior ocorre porque ligações aromáticas e amida em aramidas são significativamente mais resistentes a ataque nucleofílico ou eletrofílico em comparação a poliamidas alifáticas.

Aramidas apresentam absorção de água relativamente alta para fibra sintética. Conforme indicado por Hearle (220), Nomex® absorve aproximadamente 3.5-5% de água em ambiente de umidade relativa de 65%, absorção superior a poliéster (0.4-0.8%) porém inferior a algodão (8-10%). Esta capacidade de absorção de água é benéfica para conforto em uniforme de proteção, pois permite transporte de umidade (wick) que facilita dissipaçāo de suor corporal.

Propriedades Ópticas e Permeabilidade: Aramidas apresentam permeabilidade moderada a radiação ultravioleta (UV). De acordo com Bashir et al. (2023), quando exposta a radiação UV prolongada, Nomex® sofre descoloração gradual (amarelecimento) mas mantém propriedades mecânicas. Kevlar® apresenta sensibilidade superior a UV em comparação a Nomex®.

Aramidas apresentam refletância moderada a radiação infravermelha. Conforme indicado por Hearle (2020), embora aramidas puras apresentem baixa refletância de radiação infravermelha, isto é compensado pela baixa condutividade térmica que impede transferência de calor para interior. Aramidas frequentemente são recobertas com acabamentos que aumentam a refletância infravermelha, maximizando proteção térmica.

Propriedades Dinâmicas e Vibração: Aramidas apresentam amortecimento dinâmico adequado, característica importante para conforto de usuário. De acordo com Hearle (220), módulo de perda ($\tan \delta$) de Nomex® em temperatura ambiente é aproximadamente 0.05-0.08, valor que confere amortecimento adequado sem excessiva rigidez.

3. FIBRAS TÊXTEIS PARA PROTEÇÃO ANTICHAMA

3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE PROTEÇÃO TÉRMICA

A compreensão dos conceitos fundamentais de proteção térmica em fibras têxteis é essencial para a seleção adequada de materiais em uniformes de proteção para bombeiros. Conforme indicado por Kandola (2020), a proteção térmica de vestuário envolve processos complexos de interação entre energia térmica, combustão de polímeros e mecanismos de proteção que variam significativamente dependendo da composição química da fibra. Este subcapítulo apresenta análise abrangente dos conceitos fundamentais que governam o comportamento de fibras têxteis em ambientes de extrema exposição térmica.

A combustão em fibras têxteis é um processo complexo que envolve múltiplas fases: aquecimento inicial, pirólise (decomposição térmica), liberação de gases inflamáveis, ignição de vapores e propagação de chama. De acordo com pesquisa conduzida por Horrocks (2011), amplamente citada em literatura contemporânea sobre fibras de proteção, o processo de combustão em polímeros têxteis pode ser compreendido através de modelo de quatro estágios sequenciais e interligados.

O primeiro estágio envolve aquecimento e degradação térmica inicial da fibra. Quando uma fibra têxtil é exposta a fonte de calor (chama, radiação ou contato), sua temperatura eleva-se progressivamente. A degradação térmica de polímeros têxteis típicos ocorre através de ruptura de ligações covalentes na cadeia polimérica, processo que libera energia (reação exotérmica) e produz fragmentos moleculares menores, denominados pirólise (KANDOLA, 2020). Durante pirólise, moléculas pequenas e voláteis, como hidrocarbonetos alifáticos, aldeídos e ácidos orgânicos, são liberadas como vapores.

O segundo estágio envolve acúmulo de gases inflamáveis próximo à fibra. Os produtos voláteis da pirólise formam uma nuvem de vapor inflamável na vizinhança imediata da fibra. Se a concentração destes vapores atingir o intervalo inflamável (tipicamente entre 0,1-10% em volume no ar) e se a temperatura for suficientemente elevada, ocorre ignição espontânea destes vapores (HORROCKS, 2011).

O terceiro estágio é a combustão propriamente dita, onde os vapores inflamáveis sofrem oxidação rápida em presença de oxigênio, liberando grande quantidade de energia em forma de calor e luz (chama visível). Esta combustão é altamente

exotérmica, elevando a temperatura local a valores entre 800°C e 1200°C dependendo da composição química do vapor inflamável (KANDOLA, 2020).

O quarto estágio envolve propagação de chama. O calor gerado pela combustão dos vapores aquece fibras adjacentes além do ponto de pirólise, propagando a combustão através do material têxtil. Se a taxa de liberação de calor for superior à taxa de dissipação de calor para o ambiente, a combustão propaga-se autonomamente, caracterizando combustão auto-sustentada (HORROCKS, 2011).

Um aspecto crítico do mecanismo de combustão refere-se à natureza dos produtos de decomposição térmica. Conforme descrito por Kandola (2020), fibras que liberam produtos voláteis altamente inflamáveis durante pirólise apresentam risco de combustão superior em relação a fibras que liberam produtos com propriedades inflamáveis reduzidas. Adicionalmente, fibras que sofrem fusão durante aquecimento (como poliéster) podem libertar gotículas derretidas que transportam calor para regiões não expostas diretamente à fonte de calor, facilitando propagação de ignição.

A temperatura de ignição (também denominada temperatura de auto-ignição ou temperatura de combustão espontânea) é um parâmetro crítico que caracteriza a susceptibilidade de uma fibra à ignição. Conforme definido por Kandola (2020), temperatura de ignição é a temperatura mínima na qual uma fibra têxtil, quando exposta a fonte de calor ou chama, sofre combustão auto-sustentada com liberação de calor e produção de chama visível.

As temperaturas de ignição variam significativamente entre diferentes tipos de fibras. De acordo com dados apresentados por Horrocks (2011), fibras naturais como algodão apresentam temperatura de ignição aproximadamente entre 230°C e 280°C, enquanto poliéster sintetizado sofre ignição entre 250°C e 350°C. Em contraste, fibras especializadas como aramidas (Nomex®) apresentam temperatura de ignição superior a 370°C, enquanto polibenzimidazol (PBI) apresenta temperatura de ignição aproximadamente 420°C (KANDOLA, 2020).

É importante notar que temperatura de ignição não deve ser confundida com temperatura de degradação térmica ou temperatura de amolecimento. Uma fibra pode sofrer degradação térmica significativa a temperaturas bem inferiores à sua temperatura de ignição, processo que reduz suas propriedades mecânicas sem necessariamente resultar em combustão visível. Conforme indicado por Horrocks (2011), "temperatura de ignição representa um ponto de transição crítico onde o calor

gerado pela combustão de pirólise supera o calor dissipado para o ambiente, permitindo auto-sustentação de combustão."

A propagação de chama é governada por cinética de transferência de calor e taxa de geração de gases inflamáveis. Conforme descrito por Kandola (2020), fibras que sofrem decomposição térmica com liberação de grande volume de gases inflamáveis em curto tempo apresentam velocidade de propagação de chama superior em relação a fibras que liberam gases lentamente. Adicionalmente, fibras que sofrem carbonização durante decomposição (formação de resíduo sólido carbonáceo) tendem a apresentar propagação de chama mais lenta, pois o resíduo sólido funciona como barreira parcial ao calor.

A orientação e empacotamento de fibras também influenciam propagação de chama. Conforme indicado por Horrocks (2011), fibras soltas ou esfarrapadas permitem propagação de chama mais rápida em comparação a fibras consolidadas em tecido denso. Este fenômeno ocorre porque fibras soltas oferecem maior área superficial para contato com oxigênio e permitem circulação de gases quentes entre fibras, facilitando propagação de combustão.

Os termos "retardante de chama," "resistente ao fogo" e "antichama" são frequentemente utilizados intercambiavelmente em literatura não-técnica, mas representam conceitos distintos com implicações significativas para performance de proteção. Conforme clarificado por Kandola (2020), estas categorias refletem diferentes níveis de proteção e mecanismos de ação fundamentalmente diferentes.

Retardante de chama refere-se a uma fibra ou material que sofre redução de velocidade de propagação de chama ou redução de facilidade de ignição em relação ao material não-tratado, porém não apresenta imunidade a combustão. Um material retardante de chama pode ainda sofrer ignição e combustão, mas a velocidade de propagação é reduzida significativamente. De acordo com Horrocks (2011), retardantes químicos trabalham através de múltiplos mecanismos: interferência com reações em fase gasosa, redução de calor gerado durante combustão, formação de camada carbonácea protetora, ou redução de disponibilidade de oxigênio na zona de combustão. Materiais retardantes de chama aplicados a fibras naturais como algodão representam exemplos clássicos desta categoria.

Resistente ao fogo é um termo menos preciso que pode referir-se a material que resiste por período limitado a exposição de fogo, porém pode eventualmente sofrer ignição ou falha de integridade. De acordo com Kandola (2020), este termo é

frequentemente utilizado para descrever materiais com propriedades intermediárias entre retardante e antichama. Alguns tecidos metalizados ou com revestimentos cerâmicos podem ser descritos como "resistentes ao fogo" em contexto de aplicações específicas e limitadas.

Antichama refere-se a uma fibra que, devido às suas propriedades químicas inerentes, não sofre combustão em condições normais de exposição a chama, mesmo na ausência de tratamentos químicos adicionais. Conforme definido por Horrocks (2011), material antichama (flame-proof ou non-flammable) apresenta as características de não sofrer ignição ou, se ignição ocorrer, apresentar auto-extinção rápida quando a fonte de chama é removida. Aramidas como Nomex® e Kevlar® constituem exemplos de fibras antichama intrínsecas.

A distinção entre estas categorias tem implicações críticas para uniformes de proteção. Um uniforme confeccionado em fibra retardante de chama pode ainda sofrer combustão em ambiente de incêndio intenso, enquanto uniforme confeccionado em fibra antichama apresenta resistência fundamental a combustão. De acordo com pesquisa publicada por Kandola (2020), em incêndios estruturais com fluxo radiante superior a 50 kW/m² (fluxo típico em incêndios intensos), uniformes retardantes de chama frequentemente sofrem ignição e combustão, enquanto uniformes antichama mantêm integridade estrutural.

Uma distinção fundamental em proteção de fibras refere-se ao fato de se a propriedade antichama é inerente à estrutura molecular da fibra (propriedade inerente) ou se foi aplicada através de tratamento químico posterior à síntese da fibra (propriedade aplicada). Esta distinção tem importância crítica para durabilidade, performance e sustentabilidade de uniformes de proteção (HORROCKS, 2011).

Propriedade inerente refere-se a proteção antichama que é intrínseca à estrutura molecular da fibra, resultado de sua composição química e arquitetura molecular. Conforme descrito por Kandola (2020), fibras como aramidas (Nomex®, Kevlar®) possuem propriedades antichama inerentes because sua estrutura polimérica contém ligações aromáticas de elevada energia e estabilidade térmica. Estas fibras não sofrem combustão porque a energia requerida para decomposição térmica (ruptura de ligações) é muito superior à energia disponível em ambiente de chama típico. Propriedades inerentes apresentam vantagens significativas: (1) durabilidade permanente, pois a propriedade não é "consumida" durante exposição térmica; (2)

resistência a degradação durante limpeza ou lavagem; (3) performance consistente ao longo da vida útil do uniforme (HORROCKS, 2011).

Propriedade aplicada refere-se a proteção antichama conferida através de tratamento químico aplicado à fibra após sua síntese, tipicamente através de impregnação com retardantes químicos ou revestimento de superfície. De acordo com Kandola (2020), retardantes químicos aplicados funcionam através de mecanismos como: (1) formação de camada carbonácea que protege fibra subjacente; (2) liberação de radicais livres que interferem com reações de combustão em fase gasosa; (3) absorção endotérmica que reduz temperatura local. Exemplos incluem aplicação de fosfatos, boratos, ou compostos halogenados em fibras celulósicas.

As propriedades aplicadas apresentam limitações importantes. Conforme indicado por Horrocks (2011), retardantes químicos aplicados são frequentemente "consumidos" durante exposição a calor ou chama, reduzindo sua efetividade em exposição repetida. Adicionalmente, muitos retardantes químicos são parcialmente removidos durante ciclos de limpeza e lavagem, reduzindo performance com o tempo. A pesquisa de Kandola (2020) demonstrou que retenção de propriedades antichama em fibras tratadas quimicamente varia entre 40% e 80% após 20 ciclos de limpeza industrial, enquanto fibras com propriedade inerente mantêm 95-100% de propriedades após mesma exposição.

Uma terceira categoria, "propriedade semi-inerente" ou "proto-inerente," refere-se a fibras sintéticas modificadas durante síntese para incorporar características antichama, sem que sejam denominadas aramidas propriamente. Conforme descrito por Horrocks (2011), algumas fibras acrílicas modificadas (modacrílico) ou poliésteres modificados apresentam proteção semi-inerente através de incorporação de compostos específicos durante polimerização. Estas fibras apresentam durabilidade superior a tratamentos químicos simples, porém não alcançam performance equivalente a aramidas puras.

A escolha entre propriedade inerente versus aplicada representa trade-off entre custo inicial e performance de longo prazo. De acordo com Kandola (2020), fibras com propriedade inerente (aramidas) apresentam custo inicial mais elevado, porém custo total de propriedade reduzido ao longo de vida útil do uniforme devido à durabilidade superior. Em contraste, uniformes confeccionados em fibras retardantes quimicamente tratadas apresentam custo inicial reduzido, porém degradação progressiva de proteção com o tempo (Figura 7).

Figure 7 – Representação comparativa entre linhas convencionais (algodão, poliéster) e linha antichama de aramida.



Fonte: Elaboração própria do autor.

3.2 NOMEX® (ARAMIDA-M: POLI-M-FENILENO ISOFTALAMIDA)

Nomex® representa a primeira fibra aramida comercializada com sucesso para aplicações de proteção térmica, revolucionando o campo de equipamentos de proteção ocupacional desde sua introdução no mercado. De acordo com análise histórica e técnica de Hearle (2020), Nomex® estabeleceu o padrão de ouro em proteção de alta temperatura, tornando-se fibra de referência para uniformes de bombeiros, pilotos de corrida e profissionais em ambientes de extrema exposição térmica. Este subcapítulo apresenta análise abrangente de Nomex®, desde seu desenvolvimento histórico até suas propriedades específicas e aplicações em uniformes de proteção.

Nomex® foi desenvolvido pela empresa DuPont de Nemours and Company (atualmente Corteva Agriscience, após reestruturação corporativa) nos laboratórios de pesquisa localizados em Wilmington, Delaware, Estados Unidos. De acordo com registro histórico documentado por Bashir et al. (2023), Nomex® foi sintetizado inicialmente em 1961 por pesquisador Stephanie Kwolek e sua equipe como parte do programa de pesquisa em polímeros de alta performance. A síntese inicial resultou em

polímero que apresentava propriedades notáveis de estabilidade térmica, diferente de polímeros convencionais amplamente utilizados na década de 1960.

O desenvolvimento comercial de Nomex® foi impulsionado por necessidade identificada por agências de defesa (Departamento de Defesa dos EUA) e serviços de proteção civil de material que pudesse oferecer proteção superior contra incêndio. Conforme indicado por Hearle (2020), na década de 1960 e 1970, equipamentos de proteção para bombeiros e pessoal militar eram frequentemente confeccionados em algodão com acabamentos químicos retardantes, que ofereciam proteção limitada e degradação rápida de propriedades com uso repetido.

A primeira aplicação comercial de Nomex® foi em uniformes de combate a incêndio do Corpo de Bombeiros de Nova York em 1973. De acordo com Bashir et al. (2023), esta aplicação inicial foi acompanhada por campanha de documentação sistemática de performance, incluindo testes de resistência ao fogo, durabilidade em campo, e relatórios de lesões reduzidas em comparação a uniformes convencionais. Os resultados foram tão bem-sucedidos que outras corporações de bombeiros, agências militares e departamentos de proteção civil de diversos países adotaram Nomex® nas décadas subsequentes.

A comercialização de Nomex® foi acompanhada pelo desenvolvimento de infraestrutura de padronização e normalização. De acordo com Hearle (2020), as agências de padronização internacional (principalmente NFPA nos EUA e comitês de normalização europeus) trabalharam em colaboração com DuPont para desenvolvimento de normas técnicas que especificassem requisitos de performance de Nomex® e uniformes confeccionados nesta fibra. Este processo resultou em desenvolvimento de normas como NFPA 1971 (nos EUA) e EN 11611/EN 11612 (na Europa), que se tornaram referências internacionais.

Desde sua introdução comercial, Nomex® sofreu melhorias incrementais em processo de fabricação e acabamentos. De acordo com Bashir et al. (2023), a DuPont investiu significativamente em pesquisa e desenvolvimento para melhorar propriedades de processabilidade (características de costura e tingimento), conforto (permeabilidade a vapor e capacidade de transporte de umidade), e sustentabilidade (redução de impactos ambientais de produção). Estas melhorias contínuas resultaram em múltiplas gerações de Nomex®, com gerações mais recentes apresentando propriedades aprimoradas em comparação a produtos iniciais.

Nomex® é polímero poliamida aromática caracterizado por estrutura molecular onde anéis benzênicos e ligações amida alternam-se ao longo da cadeia polimérica. Conforme descrito por Bashir et al. (2023), a estrutura molecular específica de Nomex® resulta de síntese de poli-m-fenileno isoftalamida, onde o termo "m-fenileno" refere-se a anel benzênico com grupos amida ligados em posições meta (1,3) em relação um ao outro. Esta configuração meta resulta em polímero com maior flexibilidade comparada à aramida-p (Kevlar®), onde grupos amida ligam-se em posições para (1,4).

A estrutura de Nomex® pode ser representada simplificadamente como uma cadeia polimérica onde unidades de isoftalato (derivado do ácido isoftálico) alternam-se com unidades de m-fenilenediamina. Conforme indicado por Hearle (2020), esta arquitetura molecular específica confere ao Nomex® propriedades distintas que o tornam particularmente adequado para aplicações de proteção em vestuário, diferente de Kevlar® que é otimizado para resistência mecânica máxima.

O comportamento térmico de Nomex® é resultado direto de sua estrutura molecular rígida. De acordo com Bashir et al. (2023), quando Nomex® é exposto a calor progressivamente crescente, múltiplas transições moleculares ocorrem em faixas de temperatura específicas: (1) entre 150°C e 200°C, ocorre aumento de mobilidade molecular sem transição de fase observável macroscopicamente; (2) entre 200°C e 275°C, ocorre redução progressiva de propriedades mecânicas associada a aumento de movimento molecular; (3) em aproximadamente 275-310°C, ocorre transição vítreo (T_g) onde o polímero sofre mudança de comportamento de vítreo para comportamento de borracha; (4) acima de 370°C, ocorre degradação térmica com decomposição molecular.

Um aspecto crítico do comportamento térmico de Nomex® refere-se à ausência de ponto de fusão nítido. Conforme descrito por Hearle (2020), Nomex® não sofre fusão direta em nenhuma temperatura, diferente de poliéster ou poliamidas convencionais que sofrem fusão clara seguida por transformação em líquido. A ausência de fusão ocorre porque a rigidez molecular excepcional de Nomex® impede que as cadeias poliméricas sofram rearranjo necessário para estado líquido. Ao invés, quando Nomex® é aquecido acima de sua temperatura de decomposição (~370°C), sofre degradação térmica direta com formação de resíduo sólido carbonáceo.

A estabilidade térmica de Nomex® até aproximadamente 370°C representa um de seus atributos mais críticos para aplicação em proteção de bombeiros. De acordo

com dados de especificação técnica de Bashir et al. (2023), Nomex® pode ser continuamente exposto a temperatura de 204°C (temperatura limite contínua) e exposição intermitente até aproximadamente 260°C sem sofrer degradação significativa de propriedades mecânicas. Para exposições de curta duração em fluxo de calor radiante típico de incêndios, Nomex® pode suportar exposições acima de 370°C antes de iniciar degradação térmica.

A resistência de Nomex® até 370°C é substancialmente superior à de materiais convencionais. De acordo com Hearle (2020), algodão sofre descoloração inicial em aproximadamente 150°C e ignição em aproximadamente 230-280°C, enquanto poliéster sofre amolecimento em aproximadamente 70-80°C e ignição em aproximadamente 250-350°C. Em contraste, Nomex® mantém integridade estrutural em toda essa faixa de temperatura.

O comportamento de Nomex® em extrema exposição térmica diferencia-se fundamentalmente de polímeros convencionais através da ausência de fusão e gotejamento. Conforme explicado por Bashir et al. (2023), quando poliéster é exposto a chama ou calor intenso, sofre fusão em temperatura aproximadamente 250-260°C, transformando-se em líquido viscoso. Este líquido derretido pode pingar ou escorrer sobre a pele do usuário, causando queimadura localizada severa pela combinação de calor do material derretido e reação química com pele. Adicionalmente, poliéster derretido perde sua propriedade de barreira, permitindo penetração de chama ou calor para regiões adjacentes.

Nomex®, ao contrário, não sofre fusão em nenhuma temperatura operacional. De acordo com Hearle (2020), quando Nomex® é exposto a temperaturas acima de sua temperatura de decomposição (~370°C), sofre transformação química direta de sólido para resíduo carbonáceo sólido (char), sem passar por estado líquido. Este processo de degradação térmica direta, denominado pirólise, resulta em formação de camada de char que funciona como barreira térmica, prevenindo penetração de calor para camadas adjacentes.

A importância desta propriedade de não-fusão e não-gotejamento não pode ser superestimada em contexto de proteção de bombeiros. De acordo com estudos epidemiológicos citados por Hearle (2020), queimaduras causadas por gotejamento de material derretido representam significativa proporção de lesões térmicas graves em bombeiros e trabalhadores expostos a materiais fundíveis. Uniformes confeccionados

em Nomex® praticamente eliminam este risco, pois o material não sofre fusão em condições operacionais.

As propriedades mecânicas de Nomex® são notáveis não apenas em temperatura ambiente, mas especialmente em sua capacidade de retenção de propriedades em temperatura elevada. De acordo com Bashir et al. (2023), Nomex® apresenta em temperatura ambiente (23°C) resistência à tração aproximadamente 75-100 MPa e módulo de elasticidade (Young's modulus) aproximadamente 4-6 GPa, valores comparáveis a poliamidas convencionais, porém superiores a algodão.

Mais significativo é o comportamento de Nomex® em temperatura elevada. Conforme indicado por Hearle (2020), Nomex® retém aproximadamente 80-90% de sua resistência à tração original quando aquecido a 200°C, e aproximadamente 50-60% de resistência quando aquecido a 300°C. Esta retenção de resistência em temperatura elevada é dramaticamente superior a de poliéster (que retém apenas 10-20% em 200°C) e algodão (que sofre degradação completa acima de sua temperatura de ignição).

A elasticidade de Nomex® (alongamento até ruptura) é aproximadamente 15-20% em temperatura ambiente, valor que confere certa flexibilidade ao material sem comprometer rigidez. De acordo com Bashir et al. (2023), esta elasticidade moderada é benéfica para uniformes de proteção, permitindo mobilidade adequada do usuário sem criação de excessivas deformações.

O comportamento de Nomex® sob carga tensil repetida (fadiga mecânica) também é favorável. Conforme descrito por Hearle (2020), Nomex® apresenta boa resistência a fadiga dinâmica, mantendo propriedades mesmo após múltiplos ciclos de tração e relaxação. Esta propriedade é importante para uniformes sujeitos a movimento contínuo durante operações de bombeiros.

A resistência ao rasgamento de Nomex® é moderada, aproximadamente 15-25 kN/m em direção de fibra principal (chamada warp) e aproximadamente 8-12 kN/m em direção perpendicular (chamada weft). De acordo com Bashir et al. (2023), embora a resistência ao rasgamento de Nomex® seja inferior a de Kevlar®, é adequada para aplicações de uniformes de proteção, pois a resistência geral de uniforme é frequentemente determinada por costuras, não por resistência ao rasgamento do tecido.

A aplicação primária de Nomex® é na confecção de uniformes de proteção para bombeiros profissionais, particularmente uniformes para combate a incêndio estrutural

(structural firefighting turnout gear). De acordo com Bashir et al. (2023), Nomex® é atualmente fibra de escolha preferencial para casca externa (outer shell) de uniformes de bombeiros em aproximadamente 85-90% das corporações de bombeiros profissionais nos países desenvolvidos.

A utilização de Nomex® em uniformes de bombeiros é tipicamente em forma de tecido multicamada, onde Nomex® constitui a camada externa que oferece proteção inicial contra chama e calor radiante. Conforme indicado por Hearle (2020), uniformes de proteção estrutural modernos geralmente possuem seguinte composição: (1) camada externa: 88% Nomex® + 12% poliéster ou 100% Nomex® puro; (2) barreira de umidade: membrana polimérica (tipicamente polietileno tereftalato ou poliuretano); (3) forro térmico: 100% Nomex® ou blenda aramida-poliéster.

Além de uniformes estruturais, Nomex® é amplamente utilizado em uniformes de proteção para outras profissões de risco. De acordo com Bashir et al. (2023), Nomex® é utilizado em uniformes de: (1) pilotos de corrida (motorsports); (2) pilotos militares de helicóptero e aviação tática; (3) trabalhadores de refinarias de petróleo e plantas químicas; (4) trabalhadores em indústria de fundição de metais; (5) pessoal de resgate e operações especiais militares.

A versatilidade de Nomex® reflete-se em sua disponibilidade comercial em múltiplas formas: (1) fibra pura (monofilamento); (2) fios torcidos (multifilamento); (3) fitas e tiras; (4) tecidos, tecidos (woven fabrics); (5) tecidos não-tecidos (nonwoven fabrics); (6) materiais revestidos com camadas adicionais de proteção. Cada forma é otimizada para aplicação específica.

Uma das vantagens significativas de Nomex® em relação a outras aramidas (particularmente Kevlar®) e a tratamentos químicos retardantes refere-se ao conforto superior oferecido ao usuário. De acordo com Bashir et al. (2023), Nomex® apresenta propriedades de conforto térmico-fisiológico superior por múltiplas razões.

Conforto Térmico: o conforto térmico em uniformes Nomex® resulta de múltiplos fatores. Primeiramente, conforme indicado por Hearle (2020), Nomex® apresenta isolamento térmico adequado sem ser excessivamente isolante. Condutividade térmica de Nomex® é aproximadamente 0.08-0.1 W/(m·K), valor que confere isolamento suficiente contra calor radiante sem criar acúmulo excessivo de calor corporal durante repouso ou atividades de baixa intensidade.

Secundariamente, Nomex® apresenta transição térmica suave em ambientes de temperatura elevada. De acordo com Bashir et al. (2023), diferente de Kevlar® que é

significativamente mais rígida, Nomex® sofre suavização gradual com aumento de temperatura, permitindo que o uniforme se adapte ao movimento do corpo progressivamente durante aquecimento. Esta característica resulta em sensação de conforto superior durante exposição prolongada a ambientes quentes.

Respirabilidade: a respirabilidade de Nomex® é particularmente importante para conforto de bombeiros durante operações de longa duração. Conforme descrito por Bashir et al. (2023), Nomex® é higroscópico moderado, apresentando absorção de água aproximadamente 3.5-5% em condição de 65% umidade relativa a 23°C. Esta capacidade de absorção moderada permite transporte de umidade (wicking) que facilita dissipação de suor do corpo do usuário.

De acordo com Hearle (2020), embora Nomex® apresente permeabilidade ao ar inferior a algodão puro, é comparável a poliéster convencional. Quando combinada com projetos apropriados de uniforme que incluem painéis de tecido mais permeável em regiões de maior transpiração (costas, axilas), Nomex® oferece respirabilidade funcional adequada para operações de bombeiros.

A permeabilidade a vapor de água de Nomex® é também importante. Conforme indicado por Bashir et al. (2023), permeabilidade a vapor é função tanto da fibra quanto da construção do tecido. Tecidos Nomex® com construção de trama aberta apresentam permeabilidade a vapor aproximadamente 1000-1500 g/(m²·24h), valor que permite dissipação funcional de umidade corporal.

Durabilidade: a durabilidade de Nomex® é uma de suas vantagens mais significativas em relação a materiais alternativos, particularmente em relação a uniformes retardantes quimicamente tratados. De acordo com Hearle (2020), Nomex® mantém suas propriedades antichama indefinidamente, sem degradação com tempo, exposição à radiação UV moderada, ou ciclos de limpeza.

Conforme descrito por Bashir et al. (2023), estudos de retenção de propriedades demonstraram que Nomex® mantém aproximadamente 95-100% de sua resistência à tração original mesmo após 50 ciclos de limpeza industrial em temperatura elevada (aproximadamente 65°C) com detergentes industriais. Em contraste, uniformes confeccionados em fibras retardantes quimicamente tratadas frequentemente retêm apenas 40-80% de propriedades após 20 ciclos de limpeza similar.

A durabilidade de Nomex® estende-se também à resistência a degradação química. De acordo com Hearle (2020), Nomex® é resistente a ácidos, bases, e solventes orgânicos comumente encontrados em ambientes operacionais

(combustíveis, óleos, produtos de combustão). Esta resistência química oferece proteção adicional em ambientes quimicamente hostis, típicos de incêndios industriais.

A vida útil esperada de uniformes Nomex® é significativamente superior a de alternativas. Conforme indicado por Bashir et al. (2023), uniformes de proteção estrutural confeccionados em Nomex® com manutenção apropriada apresentam vida útil esperada de 5-8 anos de uso profissional intensivo, enquanto uniformes retardantes quimicamente tratados frequentemente requerem substituição após 2-3 anos devido à degradação progressiva de propriedades.

3.3 KEVLAR® (ARAMIDA-P: POLI-P-FENILENOTETAFTALAMIDA)

Kevlar® representa a aramida-p comercialmente mais importante, sinônimo de resistência mecânica excepcional e estabilidade térmica extrema. Diferente de Nomex® que foi desenvolvido primariamente para proteção térmica em vestuário, Kevlar® foi concebido como fibra estrutural de alto desempenho para aplicações que requerem resistência mecânica máxima. De acordo com análise técnica de Bashir et al. (2023), Kevlar® revolucionou múltiplas indústrias, desde proteção balística até reforços estruturais em engenharia, caracterizando-se por propriedades mecânicas que excedem praticamente todas as fibras sintetizadas. Este subcapítulo apresenta análise abrangente de Kevlar®, suas propriedades únicas, limitações, e razões pela qual sua aplicação em uniformes de proteção para bombeiros é mais limitada em relação a Nomex®.

Kevlar® é amplamente reconhecida como uma das fibras mais resistentes sintetizadas, com propriedades mecânicas que excedem significativamente outras fibras, incluindo Nomex®, aço, e vidro. De acordo com Bashir et al. (2023), Kevlar® apresenta resistência à tração em temperatura ambiente aproximadamente 2.5-3.0 GPa (gigapascais), valor que representa aproximadamente 25-30 vezes a resistência de Nomex® (75-100 MPa). Para contextualizar, resistência à tração de aço estrutural varia entre 250-400 MPa, significando que Kevlar® é aproximadamente 6-10 vezes mais resistente que aço em relação ao peso.

Esta propriedade de resistência excepcional é resultado direto da estrutura molecular de Kevlar®. Conforme descrito por Hearle (2020), Kevlar® (poli-p-fenilenotetaftalamida) possui estrutura onde anéis benzênicos ligam-se em posições para através de ligações amida, resultando em polímero com alinhamento molecular

máximo. Este alinhamento preferencial de cadeias poliméricas, obtido através de processo especializado de fiação denominado fiação de solução líquido-cristalina (liquid crystal solution spinning), resulta em fibra onde as moléculas estão essencialmente alinhadas paralelamente ao eixo da fibra.

O módulo de elasticidade (Young's modulus) de Kevlar® é também notável. De acordo com Bashir et al. (2023), módulo de elasticidade de Kevlar® é aproximadamente 70-80 GPa, valor que confere rigidez excepcional. Para comparação, módulo de alumínio é aproximadamente 70 GPa, significando que Kevlar® apresenta rigidez comparável à de metal leve, porém com densidade aproximadamente uma quinta da de alumínio.

A capacidade de carga de Kevlar® antes de ruptura é igualmente impressionante. Conforme indicado por Hearle (2020), Kevlar® pode suportar carga de tração progressivamente crescente até aproximadamente 2.5-3.0 GPa, momento no qual sofre ruptura. Adicionalmente, o alongamento até ruptura de Kevlar® é aproximadamente 2-3%, valor inferior a Nomex® (15-20%) porém ainda mantendo capacidade de absorção de energia através de mecanismo de estiramento (strain) antes da ruptura catastrófica.

A resistência ao rasgamento de Kevlar® é também excepcional. De acordo com Bashir et al. (2023), resistência ao rasgamento de Kevlar® é aproximadamente 50-100 kN/m, valor significativamente superior ao de Nomex® (15-25 kN/m). Adicionalmente, Kevlar® apresenta excelente resistência a fadiga dinâmica (ciclos repetidos de carga), mantendo propriedades mesmo após múltiplos ciclos de tração e relaxação.

O comportamento térmico de Kevlar® é ainda mais excepcional que Nomex®, com capacidade de resistir a temperaturas ainda mais elevadas. De acordo com Bashir et al. (2023), Kevlar® apresenta temperatura de transição vítreia (T_g) aproximadamente entre 350°C e 400°C, valor superior ao de Nomex® (275-310°C). Mais importante, Kevlar® apresenta temperatura de decomposição térmica aproximadamente 420°C ou superior, significando que Kevlar® pode resistir a temperaturas aproximadamente 50°C mais elevadas que Nomex® antes de iniciar degradação térmica.

Como Nomex®, Kevlar® não sofre fusão em nenhuma temperatura operacional relevante. Conforme descrito por Hearle (2020), Kevlar® sofre degradação térmica por pirólise direta em temperatura de decomposição, transformando-se em resíduo

sólido carbonáceo sem passar por estado líquido. Esta ausência de fusão é compartilhada com Nomex® e oferece proteção similar contra queimaduras causadas por gotejamento de material derretido.

A taxa de degradação térmica de Kevlar® é mais lenta que Nomex® em muitas condições. De acordo com Bashir et al. (2023), em exposição a calor radiante constante, Kevlar® sofre degradação térmica em taxa ligeiramente mais lenta que Nomex®, atribuído a sua estrutura polimérica ainda mais rígida. Adicionalmente, Kevlar® apresenta retenção de propriedades mecânicas em temperatura elevada ligeiramente superior a Nomex® em alguns intervalos de temperatura.

Um aspecto importante do comportamento térmico de Kevlar® refere-se à sua sensibilidade a radiação ultravioleta (UV). Conforme indicado por Hearle (2020), Kevlar® sofre degradação significativa quando exposta a radiação UV intensa, fenômeno não igualmente pronunciado em Nomex®. Esta sensibilidade a UV resulta em amarelecimento gradual e redução de propriedades mecânicas durante exposição prolongada à luz solar. Este fator torna Kevlar® menos adequada para uniformes que serão frequentemente expostos à luz solar durante armazenamento ou uso ao ar livre.

Apesar de suas propriedades mecânicas e térmicas excepcionais, Kevlar® apresenta múltiplas limitações significativas que restringem suas aplicações em uniformes de proteção para bombeiros. A primeira limitação é a rigidez excepcional de Kevlar®. De acordo com Bashir et al. (2023), a rigidez de Kevlar® resulta em tecidos que apresentam manipulação difícil durante confecção, costura problemática, e conforto reduzido quando utilizado em vestuário. Tecidos de Kevlar® puro frequentemente apresentam sensação de rigidez e desconforto ao contato com pele, particularmente se não forem adequadamente revestidos ou acabados.

A rigidez de Kevlar® impacta também na mobilidade do usuário. Conforme descrito por Hearle (2020), uniformes confeccionados em Kevlar® puro oferecem mobilidade limitada, especialmente em regiões articulares (joelhos, cotovelos, ombros) onde a rigidez do material restringe movimento natural. Para aplicações de uniformes de bombeiros, onde mobilidade é crítica para operações de resgate e evacuação de vítimas, esta restrição de movimento representa limitação significativa.

A segunda limitação importante refere-se ao peso de Kevlar®. Embora Kevlar® apresente densidade não particularmente elevada (aproximadamente 1.44 g/cm³), sua resistência excepcional permite confecção de tecidos de espessura muito menor em relação a materiais convencionais para atingir mesma resistência. Conforme indicado

por Bashir et al. (2023), isto deveria resultar em uniformes de peso reduzido. Porém, na prática, Kevlar® é frequentemente utilizado em construções de múltiplas camadas para maximizar proteção, resultando em uniformes com peso que pode exceder uniformes Nomex® equivalentes.

A terceira e mais significativa limitação é o custo elevado de Kevlar®. De acordo com Hearle (2020), Kevlar® apresenta custo de fibra bruta aproximadamente 5-10 vezes superior ao de Nomex®, refletindo processos de síntese mais complexos e rendimento de produção inferior. Este custo significativamente superior propaga-se através da cadeia de valor, resultando em uniformes de Kevlar® com preço de venda aproximadamente 3-5 vezes superior ao de uniformes Nomex® equivalentes.

Uma quarta limitação refere-se à dificuldade de processamento. De acordo com Bashir et al. (2023), Kevlar® apresenta características de costura problemáticas, particularmente ruptura de linha durante costura de alta velocidade. A dureza de Kevlar® resulta em desgaste acelerado de agulha, exigindo frequente substituição de agulha e redução de velocidade de costura, impactando significativamente em produtividade e custos de confecção.

Embora Kevlar® apresente limitações significativas para utilização como fibra principal em uniformes de bombeiros, suas propriedades excepcionais a tornam ideal para aplicações especializadas de reforço e proteção localizada. De acordo com Bashir et al. (2023), Kevlar® é amplamente utilizada em uniformes de proteção para reforço em áreas sujeitas a desgaste mecânico intenso ou que requerem resistência estrutural excepcional.

A aplicação primária de Kevlar® em uniformes de bombeiros é reforço em joelhos e cotovelos, regiões frequentemente submetidas a contato abrasivo durante operações de resgate em estruturas danificadas. Conforme descrito por Hearle (2020), painéis de reforço em Kevlar® posicionados em joelhos e cotovelos oferecem proteção contra rasgamento e abrasão sem adicionar peso significativo ao uniforme total.

Kevlar® é também utilizada em reforço de áreas de articulação e pontos de concentração de estresse. De acordo com Bashir et al. (2023), costuras em áreas de alta mobilidade (ombros, cintura, virilha) frequentemente sofrem estresse mecânico elevado durante operações. Reforço localizado com fios ou fitas de Kevlar® em torno destas costuras oferece proteção adicional contra ruptura.

Outra aplicação de Kevlar® é em luvas e proteções de mão. Conforme indicado por Hearle (2020), luvas de proteção para bombeiros frequentemente combinam Nomex® como material primário com reforço de Kevlar® em palma e dedos, oferecendo proteção térmica de Nomex® combinada com resistência mecânica e proteção contra corte de Kevlar®.

Kevlar® é também utilizada em proteções de pescoço (neck protectors) e protetores de ombro, regiões onde proteção adicional contra penetração de objeto pontiagudo é importante. De acordo com Bashir et al. (2023), estruturas de múltiplas camadas de Kevlar® em regiões críticas oferecem proteção balística limitada contra fragmentos de vidro ou metal.

Apesar de suas propriedades excepcionais, Kevlar® é menos utilizado como fibra principal em corpo de uniformes de bombeiros em comparação a Nomex® por múltiplas razões técnicas, econômicas e ergonômicas. Conforme indicado por Hearle (2020), seleção de fibra para uniformes de proteção requer otimização multifatorial que pode não favorecer fibra com propriedades mecânicas absolutas mais altas.

A razão primária refere-se ao impacto de custo. De acordo com Bashir et al. (2023), o custo significativamente superior de Kevlar® em relação a Nomex® não se justifica para aplicação em uniforme completo, onde a utilização de Nomex® oferece proteção térmica adequada a custo dramaticamente menor. Para agências governamentais e corporações de bombeiros com restrições orçamentárias, esta diferença de custo é frequentemente determinante.

A segunda razão refere-se ao desempenho em proteção térmica não ser superior. Conforme descrito por Hearle (2020), embora Kevlar® ofereça resistência térmica ligeiramente superior (420°C vs. 370°C), diferença de 50°C em temperatura de decomposição não representa vantagem prática significativa em aplicações de proteção de bombeiros. As temperaturas em incêndios estruturais típicos excedem ambas as temperaturas de decomposição, significando que ambas fibras sofrem degradação térmica em condições operacionais extremas. Neste contexto, a proteção térmica é função principalmente da construção de multicamadas e barreira de umidade, não da fibra específica.

A terceira razão envolve propriedades ergonômicas inferiores. De acordo com Bashir et al. (2023), rigidez e desconforto de Kevlar® resultam em uniformes que reduzem significativamente mobilidade do usuário. Bombeiros frequentemente realizam operações de resgate que exigem movimento de alta amplitude e agilidade,

atividades nas quais a restrição de movimento causada por Kevlar® representa desvantagem prática. Nomex®, sendo mais flexível, permite mobilidade superior.

A quarta razão refere-se a propriedades de conforto térmico-fisiológico inferiores. Conforme indicado por Hearle (2020), Kevlar® apresenta permeabilidade reduzida a vapor de água e condutividade térmica ligeiramente superior em relação a Nomex®, resultando em acúmulo de calor corporal e desconforto em operações de longa duração. A sensação de rigidez e falta de flexibilidade também contribuem para desconforto psicológico do usuário.

A quinta razão envolve sensibilidade a degradação por UV. De acordo com Bashir et al. (2023), Kevlar® sofre degradação significativa quando exposta a radiação UV, enquanto Nomex® é menos sensível. Para uniformes que serão armazenados em condições onde exposição a luz solar é inevitável, Kevlar® apresenta risco de degradação de propriedades, enquanto Nomex® mantém propriedades por período mais prolongado.

A sexta razão refere-se a características de processamento e confecção problemáticas. Conforme descrito por Hearle (2020), processamento de Kevlar® requer ajustes especiais de equipamento de costura e velocidades reduzidas, aumentando custos de confecção. A fragilidade relativa de Kevlar® durante costura também resulta em taxa de rejeição mais elevada e custos adicionais de qualidade.

Por estas razões combinadas, a estratégia predominante em indústria de uniformes de proteção para bombeiros é utilizar Nomex® como fibra principal no corpo completo do uniforme, reservando Kevlar® para reforços localizados em áreas específicas onde sua resistência mecânica excepcional oferece vantagem prática mensurável. Esta abordagem de "seleção inteligente de fibra" otimiza simultaneamente proteção, conforto, mobilidade, durabilidade e custo total de propriedade.

3.4 OUTRAS FIBRAS ANTICHAMA

Além de aramidas (Nomex® e Kevlar®), existem outras fibras têxteis com propriedades antichamas que apresentam aplicações específicas em equipamentos de proteção ocupacional. De acordo com revisão de Kandola (2020), a paisagem de fibras antichama é diversa, incluindo fibras semi-sintetizadas, fibras completamente sintéticas, e blendas especializadas que oferecem diferentes trade-offs entre proteção, conforto, custo e durabilidade. Este subcapítulo examina as principais fibras

antichama alternativas, suas propriedades características, limitações e aplicações específicas em uniformes de proteção para bombeiros e profissões similares.

Modacrílico é uma fibra acrílica modificada, sintetizada através de copolimerização de monômeros de acrilonitrila com outros monômeros que conferem propriedades de retardância de chama. De acordo com Kandola (2020), modacrílico foi desenvolvido na década de 1960 como alternativa economicamente viável a aramidas para aplicações de proteção, oferecendo proteção térmica moderada a custo significativamente reduzido.

Estrutura Molecular e Síntese: conforme descrito por Hearle (2020), modacrílico é obtido através de copolimerização onde aproximadamente 35-50% das unidades monoméricas são acrilonitrila e 50-65% são outros monômeros, frequentemente cloreto de vinila ou vinil cianeto. A presença destes monômeros modificadores confere propriedades de retardância de chama semi-inerente ao polímero. Durante síntese de fibra acrílica convencional, o polímero é fiado mediante processo de fiação úmida em solvente N,N-dimetilformamida (DMF), e a fibra resultante sofre orientação molecular durante estiramento (stretching).

A retardância de chama semi-inerente de modacrílico resulta de mecanismo principalmente de inibição de reação em fase gasosa. De acordo com Kandola (2020), átomos de cloro liberados durante degradação térmica de modacrílico reagem com radicais livres envolvidos na combustão, reduzindo significativamente a velocidade de propagação de chama. Este mecanismo é similar ao de retardantes halogenados químicos, porém ocorre internamente dentro da estrutura da fibra ao invés de ser adicionado como tratamento externo.

Propriedades Térmicas: as propriedades térmicas de modacrílico são intermediárias entre algodão retardante quimicamente tratado e aramidas. De acordo com Hearle (2020), modacrílico apresenta temperatura de ignição aproximadamente 320-350°C, valor superior a algodão (230-280°C) e poliéster (250-350°C), porém significativamente inferior a Nomex® (>370°C). Adicionalmente, modacrílico sofre amolecimento em temperatura aproximadamente 170-200°C, valor que representa limite prático de exposição contínua.

Conforme indicado por Kandola (2020), quando modacrílico é exposto a calor progressivamente crescente, sofre primeiro amolecimento em região entre 170-200°C, seguido por decomposição térmica com liberação de gases inflamáveis entre 250-350°C. Diferente de aramidas que sofrem degradação por pirólise com formação

de char, modacrílico sofre degradação com liberação de gases e fumaça significativas, processo que resulta em propagação de chama mais rápida em comparação a aramidas.

A velocidade de propagação de chama (afterflame time) de modacrílico é aproximadamente 0-5 segundos em teste padrão ASTM D6413, valor que indica auto-extinção relativamente rápida quando a fonte de chama é removida. Conforme descrito por Hearle (2020), modacrílico apresenta auto-extinção melhorada em comparação a fibras convencionais, porém inferior a aramidas, que tipicamente sofrem auto-extinção essencialmente instantânea.

Propriedades Mecânicas: as propriedades mecânicas de modacrílico em temperatura ambiente são moderadas. De acordo com Kandola (2020), modacrílico apresenta resistência à tração aproximadamente 20-40 MPa e módulo de elasticidade aproximadamente 1-2 GPa, valores significativamente inferiores a aramidas. O alongamento até ruptura de modacrílico é aproximadamente 20-40%, valor que oferece flexibilidade e elasticidade adequadas para vestuário.

Um aspecto crítico é a perda rápida de propriedades mecânicas em temperatura elevada. Conforme indicado por Hearle (2020), modacrílico retém apenas aproximadamente 30-50% de sua resistência à tração original quando aquecido a 200°C, e praticamente zero de resistência acima de sua temperatura de amolecimento. Esta perda rápida de resistência em temperatura elevada representa limitação significativa em aplicações de proteção térmica.

Desvantagens e Limitações: o modacrílico apresenta múltiplas desvantagens em comparação a aramidas. Conforme descrito por Kandola (2020), durabilidade de modacrílico é significativamente inferior a aramidas, particularmente em relação a retenção de propriedades antichama após ciclos de limpeza. A retardância semi-inerente de modacrílico sofre degradação química durante limpeza industrial repetida, resultando em progressiva perda de proteção com o tempo.

Adicionalmente, conforme indicado por Hearle (2020), modacrílico apresenta absorção de umidade elevada em comparação a aramidas, com absorção aproximadamente 3-4% em condição padrão. Esta absorção de umidade elevada resulta em redução de propriedades mecânicas em ambiente úmido e risco de encolhimento diferencial durante limpeza.

O modacrílico também apresenta limitação de respirabilidade em comparação a Nomex®. De acordo com Kandola (2020), embora modacrílico seja mais permeável

ao ar que algumas blendas de aramida, sua capacidade de transporte de umidade é reduzida, resultando em conforto térmico-fisiológico inferior durante operações prolongadas.

Aplicações Atuais: modacrílico é atualmente utilizado primariamente em uniformes de proteção de custo reduzido, particularmente em países em desenvolvimento onde restrições orçamentárias impedem adoção universal de uniformes aramida. De acordo com Hearle (2020), modacrílico é utilizado também em uniforme para profissões de risco moderado, como pessoal de controle de incêndio em aeroportos e operadores de máquinas em indústria onde exposição térmica é esperada, porém não extrema.

PBI (polibenzimidazol) representa o topo de hierarquia em proteção térmica de fibras têxteis, oferecendo estabilidade térmica excepcional que supera até aramidas. De acordo com análise de Kandola (2020), PBI foi desenvolvido por pesquisadores da Celanese Corporation (atualmente Albemarle) como fibra de proteção máxima para aplicações onde exposição térmica é extrema e vida está em risco crítico.

Estrutura Molecular e Síntese: PBI é polímero heterocíclico aromático contendo ligações benzimidazol na cadeia polimérica principal. Conforme descrito por Hearle (2020), PBI é sintetizado mediante reação de policondensação entre benzeno-1,2-dicarboxalídeo e 3,3'-diaminobenzidina em presença de solventes polares em temperatura elevada. O polímero resultante apresenta estrutura molecular extraordinariamente rígida e estável.

A síntese de PBI é complexa e requer condições de reação controladas rigorosamente. De acordo com Kandola (2020), PBI é sintetizado mediante processo de policondensação em etapas, onde reações sucessivas de acoplamento resultam em polímero de peso molecular progressivamente crescente. A fibra é obtida mediante fiação úmida em ácido fosfórico, processo que oferece orientação molecular elevada.

Propriedades Térmicas Excepcionais: as propriedades térmicas de PBI são reconhecidas como superior entre todas as fibras têxteis comercialmente disponíveis. De acordo com Hearle (2020), PBI apresenta temperatura de transição vítreia (T_g) aproximadamente 425-430°C, valor que supera todas as fibras sintéticas convencionais. Mais importante, PBI apresenta temperatura de decomposição térmica aproximadamente 500°C ou superior, oferecendo margem de segurança térmica excepcional.

Conforme indicado por Kandola (2020), PBI mantém propriedades mecânicas e estruturais até temperaturas aproximadamente 420°C em exposição contínua, com retenção de propriedades superiores a 50% mesmo em exposição a temperaturas entre 400-450°C. Em exposição de curta duração a temperaturas extremas (superior a 500°C), PBI apresenta retenção de propriedades superior comparada a qualquer outra fibra convencional.

PBI não sofre fusão em nenhuma temperatura operacional relevante. Conforme descrito por Hearle (2020), PBI sofre degradação térmica por pirólise com formação de resíduo sólido carbonáceo resistente, similar a aramidas, porém com taxa de degradação ainda mais lenta. A formação de char em PBI é particularmente eficiente, criando barreira térmica que oferece proteção progressiva contra penetração de calor.

O ATPV (Arc Thermal Performance Value) de PBI é aproximadamente 60-90 cal/cm² dependendo de construção de tecido, valor que supera significativamente aramidas convencionais. De acordo com Kandola (2020), para exposições de arco elétrico extremo (tal como em proximidade a incêndios envolvendo linhas elétricas de alto voltagem), PBI oferece proteção mensurável superior.

Propriedades Mecânicas: embora PBI apresente resistência mecânica inferior a Kevlar®, oferece propriedades mecânicas notáveis para fibra tão termicamente estável. De acordo com Hearle (2020), PBI apresenta resistência à tração aproximadamente 250-350 MPa em temperatura ambiente, valor comparável a Nomex® porém inferior a Kevlar®. Mais importante, PBI mantém aproximadamente 60-80% de sua resistência à tração em temperatura de 350°C, retenção superior a de aramidas em mesma temperatura.

O módulo de elasticidade de PBI é aproximadamente 8-12 GPa, valor que oferece rigidez adequada sem ser excessivamente rígido. O alongamento até ruptura de PBI é aproximadamente 20-30%, oferecendo flexibilidade adequada para vestuário.

Desvantagens e Limitações: a primeira e mais óbvia limitação de PBI é seu custo excepcional. De acordo com Kandola (2020), custo de fibra PBI é aproximadamente 15-25 vezes superior ao de Nomex® e 2-3 vezes superior ao de Kevlar®, tornando impossível sua utilização em uniformes convencionais para bombeiros. Conforme indicado por Hearle (2020), uniformes confeccionados em PBI puro costam tipicamente 10-20 vezes o preço de uniformes Nomex® equivalentes.

A segunda limitação refere-se à disponibilidade limitada. De acordo com Kandola (2020), PBI é produzida em quantidade limitada por fabricantes especializados (principalmente Lenzing e Celanese), com capacidade de produção que não permite fabricação em larga escala. A utilização de PBI é restrita a aplicações especializadas onde o custo pode ser justificado.

A terceira limitação envolve características de processamento difíceis. Conforme descrito por Hearle (2020), PBI apresenta propriedades de costura extremamente desafiadoras, requerendo ajustes especiais de máquina e velocidades muito reduzidas. A fragilidade relativa de PBI durante manipulação resulta em taxa de defeitos elevada durante confecção.

A quarta limitação refere-se à absorção de umidade. De acordo com Kandola (2020), PBI apresenta absorção de umidade aproximadamente 3-4%, similar a Nomex®, porém a umidade absorvida aparentemente tem impacto maior em propriedades de conforto de pele, resultando em sensação de desconforto relativo.

Aplicações Especializadas: PBI é utilizado primariamente em aplicações extremamente especializadas onde proteção máxima é crítica. De acordo com Hearle (2020), PBI é utilizado em uniformes de "turnout gear" premium para bombeiros de elite em cidades de alto risco, onde corporações podem justificar custo elevado. Conforme indicado por Kandola (2020), PBI é também utilizado em uniformes para operadores de refinarias de petróleo em situações de risco extremo, pilotos de corrida em categorias onde riscos de incêndio são maximais, e pessoal militar especial.

A seleção entre diferentes fibras antichama requer análise abrangente de múltiplos critérios. Conforme descrito por Hearle (2020), nenhuma fibra é "ótima" em todas as dimensões; cada fibra representa compromisso específico entre proteção, conforto, durabilidade, processabilidade e custo.

Tabela Comparativa de Propriedades: Conforme apresentado por Kandola (2020) e Hearle (2020), comparação abrangente entre fibras antichama revela trade-offs significativos:

Propriedade	Nomex®	Kevlar®	Modacrílico	PBI
Resistência à Tração (MPa)	75-100	2500-3000	20-40	250-350
Temp. Decomposição (°C)	~370	~420	250-350	~500+
Custo Relativo	1x (base)	5-10x	0.3-0.5x	15-25x
Conforto (mobilidade)	Excelente	Limitado	Bom	Bom
Respirabilidade	Boa	Moderada	Moderada	Moderada
Retenção Propriedades (25 ciclos limpeza)	95%+	90%+	40-60%	95%+
Durabilidade (anos)	5-8	4-6	2-3	6-8
Facilidade Processamento	Boa	Difícil	Fácil	Muito Difícil

De acordo com Kandola (2020), esta comparação revela que Nomex® oferece equilíbrio superior entre múltiplas propriedades para aplicação geral em uniformes de bombeiros, justificando sua posição dominante no mercado.

Conforme indicado por Hearle (2020), seleção de fibra requer avaliação de prioridades específicas de cada corporação. Para corporações com restrições orçamentárias severas, modacrílico oferece proteção moderada a custo muito reduzido, aceitável para aplicações de risco moderado. Para corporações de bombeiros de elite com orçamento elevado e forte demanda de máxima proteção, PBI oferece proteção térmica incomparável, apesar de seu custo exorbitante. Para maioria das corporações, Nomex® representa "ponto doce" ótimo entre proteção adequada, conforto, durabilidade e custo razoável.

A diversidade de fibras antichama disponíveis permite estratificação de mercado em segmentos distintos de custo, cada atendendo diferentes necessidades e capacidades financeiras.

Uniformes de Custo Reduzido: De acordo com Kandola (2020), uniformes de custo reduzido são tipicamente confeccionados em modacrílico ou blendas de modacrílico com algodão retardante quimicamente tratado. Conforme descrito por

Hearle (2020), uniformes modacrílico apresentam preço aproximadamente 30-50% do preço de uniformes Nomex® equivalentes, tornando-os acessíveis para corporações de bombeiros em países em desenvolvimento ou agências com restrições orçamentárias severas.

Conforme indicado por Kandola (2020), uniformes de custo reduzido apresentam proteção adequada para exposições térmica moderadas e durabilidade de vida útil de aproximadamente 2-3 anos com uso intensivo. A utilização de modacrílico em uniformes de custo reduzido é pragmática para situações onde risco de incêndio extremo é relativamente reduzido ou onde frequência de substituição pode ser planejada.

Uniformes premium confeccionados em Nomex® puro (100% aramida) ou blendas otimizadas de Nomex® + fibras especializadas representam segmento intermediário. De acordo com Hearle (2020), uniformes Nomex® premium apresentam preço aproximadamente 2-3 vezes o de uniformes modacrílico, porém oferecem proteção superior, conforto aprimorado, e durabilidade de 5-8 anos. Esta categoria representa o padrão de ouro para maioria de corporações de bombeiros profissionais.

Conforme indicado por Kandola (2020), uniformes Nomex® premium frequentemente incorporam características adicionais como reforços de Kevlar® em áreas críticas, acabamentos especializados para resistência a produtos químicos, e design ergonômico otimizado para conforto e mobilidade.

Uniformes de proteção máxima confeccionados em PBI puro ou blendas PBI + Nomex® representam o segmento premium extremo. De acordo com Hearle (2020), uniformes PBI premium apresentam preço aproximadamente 10-20 vezes o de uniformes modacrílico, oferecendo proteção térmica incomparável e durabilidade esperada de 6-8 anos em operação extrema.

Conforme descrito por Kandola (2020), uniformes PBI são utilizados primariamente por corporações de elite ou agências governamentais onde vida de profissionais é prioridade máxima e orçamento permite investimento significativo em proteção. Adicionalmente, uniformes PBI são utilizados frequentemente em operações de treinamento avançado e em situações de risco extremo documentado (Figura 8)

Figura 8 – Comparação simplificada entre diferentes fibras com propriedades antichama para uso em uniformes de proteção.

MODACRÍLICO	VISCOSE FR	ARAMIDA/NOMEX
		
CUSTO MENOR PROTEÇÃO MODERADA BOA DURABILIDADE	CONFORTO MAIOR PROTEÇÃO INTERMEDIÁRIA ANTI-UMIDADE	ALTO DESEMPENHO TÉRMICO MAIOR CUSTO ALTÍSSIMA DURABILIDADE

Fonte: Elaboração própria do autor.

4. LINHAS TÊXTEIS - CONCEITOS E CLASSIFICAÇÃO

4.1 DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA DE LINHAS TÊXTEIS

As linhas têxteis constituem componentes fundamentais em qualquer processo de confecção, funcionando como elementos de união estrutural que conferem coesão, funcionalidade e durabilidade a peças de vestuário. De acordo com análise abrangente de Pizzuto et al. (2021), linhas são frequentemente consideradas "invisíveis" na composição final de vestuário, porém sua importância técnica é crítica para performance e longevidade de peças confeccionadas. Este subcapítulo apresenta análise detalhada da definição, funções e importância de linhas têxteis, particularmente em contexto de confecção técnica de equipamentos de proteção.

O Que É Uma Linha de Costura: uma linha de costura (sewing thread) é material têxtil linear, constituído por fibras têxteis torcidas ou multifilamentos consolidados, projetado especificamente para unir dois ou mais segmentos de tecido (Figura 9) através de processo de costura mecanizada. De acordo com definição técnica de Pizzuto et al. (2021), linha de costura difere de fio convencional não apenas por sua composição e propriedades, mas principalmente por sua funcionalidade e requisitos de performance em ambiente de processamento mecanizado.

Figure 9 – Representação da cadeia têxtil da fibra ao uniforme de bombeiro, destacando o papel da linha de costura na etapa final.



Fonte: Elaboração própria do autor.

A estrutura fundamental de uma linha de costura envolve múltiplas fibras ou filamentos que são torcidos em conjunto em configuração helicoidal, processo que cria consolidação mecânica das fibras. Conforme descrito por McArthur (2018), a torsão é

parâmetro crítico que governa múltiplas propriedades de linha: resistência mecânica, elasticidade, superfície e capacidade de formação de ponto. A torsão é quantificada em unidades de "torções por polegada" (TPI) ou "torções por 10 cm" dependendo de sistema de medição utilizado.

A composição de uma linha de costura pode variar amplamente. De acordo com Pizzuto et al. (2021), linhas podem ser confeccionadas em: (1) fibras naturais puras (algodão, lã); (2) fibras sintéticas puras (poliéster, poliamida, aramida); (3) blendas de fibras naturais e sintéticas; (4) multifilamentos contínuos de fibra sintética; (5) monofilamentos de fibra sintética. Cada composição oferece propriedades distintas otimizadas para aplicações específicas.

Um aspecto importante refere-se ao acabamento de linha. Conforme indicado por McArthur (2018), linhas frequentemente recebem acabamentos superficiais que melhoram suas propriedades funcionais. Acabamentos típicos incluem: (1) lubrificação (redução de atrito durante costura); (2) revestimento polimérico (proteção e consolidação); (3) tingimento (cores específicas); (4) tratamentos químicos especializados (antichama, antimicrobiano, condutivo).

A espessura ou "título" de linha é outro parâmetro fundamental. De acordo com Pizzuto et al. (2021), linhas são classificadas por sistemas numéricos padronizados internacionalmente, principalmente: (1) sistema Tex (de-nier), definindo densidade linear em gramas por 10.000 metros de linha; (2) sistema Nm (número métrico), definindo número de metros de linha por grama; (3) sistema Ne (número inglês), utilizado principalmente em contexto de linhas de algodão. A seleção de título apropriado é crítica para compatibilidade com agulha de costura e formação de ponto adequada.

As funções de uma linha de costura em vestuário podem ser categorizadas em dois grupos principais: funções estruturais e funções estéticas, ambas críticas para performance final da peça.

Função Estrutural: a função primária de uma linha de costura é fornecer união mecânica de segmentos de tecido, criando estrutura coesiva que confere durabilidade e integridade mecânica à peça confeccionada. De acordo com McArthur (2018), a costura une dois segmentos de tecido através de série de pontos que atravessam ambos os segmentos, criando força coletiva através de múltiplos pontos que é superior à força de um único ponto isolado.

A resistência estrutural de uma costura é governada por múltiplos fatores. Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), a resistência de costura depende de: (1) resistência à tração da linha individual; (2) número de pontos por unidade de comprimento (densidade de ponto); (3) profundidade de penetração da linha no tecido (comprimento de ponto); (4) compatibilidade entre linha e tecido (adesão). Uma costura adequadamente confeccionada em linha apropriada oferece resistência comparável ou superior à resistência do tecido não-costurado adjacente.

Em aplicações de confecção técnica, particularmente em uniformes de proteção para bombeiros, a função estrutural de linha é crítica. Conforme indicado por McArthur (2018), costuras em uniformes de proteção devem manter integridade estrutural mesmo quando expostas a estresse mecânico severo (tração, rasgamento) e exposição térmica extrema. Uma falha de costura durante operação de bombeiro pode resultar em abertura do uniforme e exposição de pele a chamas, criando risco de queimadura grave.

A distribuição de carga através de costura é não-uniforme. De acordo com Pizzuto et al. (2021), quando costura é submetida a carga tensil, a carga concentra-se preferencialmente nos pontos de costura, particularmente nos pontos localizados nas extremidades da costura. Esta concentração de carga em pontos específicos cria zonas de estresse máximo, onde ruptura frequentemente inicia.

Função Estética: embora frequentemente secundária em importância técnica, a função estética de linhas é também significativa. De acordo com McArthur (2018), cor e visibilidade de linha afetam a aparência geral de peça confeccionada. Linhas podem ser selecionadas para: (1) correspondência com cor de tecido (invisibilidade visual); (2) contraste intencional com tecido para efeito visual específico; (3) indicação visual de qualidade e atenção a detalhes.

Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), em vestuário profissional e de proteção, a estética de costura frequentemente reflete qualidade geral de confecção e comprometimento do fabricante com padrões de qualidade. Linhas perfeitamente alinhadas, uniformes em tensão, e sem irregularidades comunicam profissionalismo e qualidade, fatores que influenciam percepção de usuário sobre segurança e confiabilidade do equipamento.

A texture visual de linha também é consideração estética. De acordo com McArthur (2018), linhas com brilho de superfície diferente, textura varia de lisa a rugosa, ou padrões de torsão visível oferecem diferentes efeitos visuais. Em uniformes

de proteção, a apresentação visual reflete frequentemente na confiança do usuário sobre proteção oferecida.

Em contexto de confecção técnica, particularmente em uniformes de proteção para bombeiros, a importância de seleção apropriada de linha não pode ser subestimada. Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), linhas representam um dos poucos componentes cuja falha pode resultar em falha completa de uniforme, independente da qualidade do tecido base.

Compatibilidade com Fibra Base: a seleção de linha apropriada requer compatibilidade fundamental com tecido base. De acordo com McArthur (2018), quando linha apresenta propriedades significativamente diferentes do tecido (por exemplo, linha de poliéster em tecido de aramida), podem resultar problemas: (1) degradação diferencial sob calor (linha decompõe-se em temperatura inferior ao tecido); (2) transferência de calor preferencialmente através de linha; (3) ruptura de linha em temperatura onde tecido permanece intacto.

Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), em uniformes de proteção antichama, compatibilidade térmica entre linha e tecido é absolutamente crítica. Se linha de poliéster convencional for utilizada em uniforme de aramida, a linha sofrerá fusão e degradação térmica em temperatura onde aramida permanece estruturalmente intacta, criando abertura na costura que permite penetração de calor.

Performance em Processamento: a performance de linha durante processo de costura mecanizado é aspecto crítico frequentemente negligenciado. De acordo com Pizzuto et al. (2021), linha deve apresentar propriedades específicas que permitam passagem suave através de passadores de fio (thread guides), não-enrolamento em agulha, e formação consistente de ponto. McArthur (2018) descreve que linhas inadequadas podem resultar em: (1) quebra frequente de linha durante costura; (2) formação de ponto irregular; (3) desgaste acelerado de agulha; (4) redução de velocidade de costura; (5) aumento de taxa de rejeição.

Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), em operações de confecção em escala comercial, performance de linha em processamento impacta diretamente em custos de produção. Linhas que causam quebra frequente resultam em paradas de máquina, redução de produtividade, e aumento de custos de mão de obra. Em contexto de uniformes de proteção onde margens de lucro podem ser moderadas, seleção de linha que oferece performance consistente em processamento é crítica.

Durabilidade e Vida Útil: a durabilidade de linha durante vida útil de uniforme é também consideração técnica importante. De acordo com McArthur (2018), linhas confeccionadas em fibras naturais como algodão frequentemente sofrem degradação progressiva durante ciclos repetidos de limpeza, particularmente em condições de limpeza industrial com temperatura elevada.

Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), em uniformes de proteção que sofrem ciclos frequentes de limpeza industrial (temperaturas tipicamente 60-70°C com agentes químicos severos), linhas devem apresentar resistência equivalente ao tecido em relação a degradação química e térmica. Pesquisa demonstra que linhas de poliéster convencionais frequentemente sofrem redução de resistência de 20-40% após 20 ciclos de limpeza industrial, enquanto linhas de aramida puro mantêm 95-100% de propriedades.

Conformidade Regulatória: em aplicações de proteção ocupacional, conformidade com normas técnicas é obrigatória. De acordo com McArthur (2018), normas de proteção internacional (tal como EN 11611, EN 11612, NFPA 1971, ASTM F1959) estabelecem requisitos específicos não apenas para tecido base, mas também para linhas de costura utilizadas em uniformes.

Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), normas de proteção tipicamente requerem que linhas apresentem propriedades de resistência ao fogo equivalentes ao tecido, compatibilidade térmica demonstrada, e durabilidade de propriedades após ciclos de limpeza especificados. Seleção de linha que não atende a requisitos normativos pode resultar em não-conformidade de uniforme completo, mesmo que tecido base esteja em conformidade.

4.2 ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DE LINHAS

A compreensão detalhada da estrutura e composição de linhas têxteis é fundamental para seleção apropriada de linhas para aplicações específicas, particularmente em confecção técnica de uniformes de proteção. De acordo com análise abrangente de McArthur (2018), a estrutura e composição de linha determinam suas propriedades funcionais, processabilidade e performance em aplicações finais. Este subcapítulo apresenta análise detalhada dos componentes estruturais de linhas, processos de fabricação e diferentes sistemas de fiação utilizados na produção comercial de linhas têxteis.

A estrutura fundamental de uma linha de costura consiste de três componentes principais que interagem para determinar suas propriedades: fibras têxteis constituintes, torsão que consolida fibras, e acabamentos superficiais que modificam propriedades finais.

Componente 1: fibras têxteis constituintes constituem a unidade primária de linha. De acordo com Pizzuto et al. (2021), as fibras podem ser classificadas em múltiplas categorias baseadas em origem e natureza: (1) fibras naturais (algodão, lã, seda, linho); (2) fibras sintetizadas de origem natural (viscose, lyocell); (3) fibras completamente sintetizadas (poliéster, poliamida, aramida, acrílico).

Para aplicações de linhas em uniformes de proteção, fibras selecionadas devem apresentar propriedades específicas que suportem requisitos de proteção. Conforme descrito por McArthur (2018), linhas confeccionadas em aramida (Nomex® puro ou blendas aramida-poliéster) oferecem estabilidade térmica e compatibilidade com tecidos antichama, enquanto linhas de poliéster convencional são inadequadas para esta aplicação devido à sua temperatura de decomposição baixa (250-350°C).

A seleção de comprimento de fibra também é importante. De acordo com Pizzuto et al. (2021), linhas podem ser confeccionadas de: (1) fibras descontínuas (staple fibers) - fibras de comprimento limitado (tipicamente 20-40 mm) que requerem torsão para consolidação; (2) filamentos contínuos (continuous filaments) - filamentos de comprimento praticamente ilimitado que oferecem propriedades estruturais superiores; (3) monofilamentos - filamento único de diâmetro apropriado que funciona como linha completa.

Componente 2: torsão de fibras é um processo fundamental que consolida múltiplas fibras em estrutura coesiva de linha. De acordo com McArthur (2018), torsão refere-se ao número de rotações helicoidais que os filamentos sofrem ao longo do comprimento de linha, frequentemente quantificada em "torções por polegada" (TPI) em sistema imperial ou "torções por 10 centímetros" em sistema métrico.

A magnitude de torsão é parâmetro crítico que governa múltiplas propriedades de linha. Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), torsão baixa resulta em: (1) linha com baixa resistência, pois fibras não estão bem consolidadas; (2) linha com superfície áspera e tendência a desfibração; (3) linha com elasticidade elevada; (4) compatibilidade melhorada com agulha de costura, pois linha apresenta maior flexibilidade.

Em contraste, torsão elevada resulta em: (1) linha com resistência à tração elevada, pois fibras estão fortemente consolidadas; (2) linha com superfície lisa e brilhante; (3) linha com elasticidade reduzida e rigidez aumentada; (4) dificuldade aumentada em costura de alta velocidade.

Para linhas de aramida destinadas a uniformes de proteção, torsão deve ser otimizada para equilíbrio entre resistência estrutural necessária e processabilidade em costura. De acordo com McArthur (2018), linhas de aramida tipicamente apresentam torsão na faixa de 3-6 TPI, valor que oferece resistência adequada sem criar rigidez excessiva que prejudicaria costurabilidade.

A direção de torsão também é relevante. Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), torsão pode ser "Z" (hélice em direção regressiva quando observado de frente) ou "S" (hélice em direção progressiva). A escolha de direção de torsão pode afetar comportamento de linha em máquina de costura e aparência de ponto finalizado.

Componente 3: Acabamentos Superficiais

Acabamentos superficiais modificam propriedades de linha após torsão inicial, otimizando-a para aplicações específicas. De acordo com Pizzuto et al. (2021), acabamentos típicos incluem múltiplas categorias funcionais.

Lubrificação: Conforme descrito por McArthur (2018), lubrificantes são aplicados à superfície de linha para reduzir atrito durante passagem através de passadores de fio e agulha. Lubrificantes reduzem significativamente: (1) fricção que poderia causar ruptura de linha; (2) geração de calor por fricção; (3) desgaste de componentes de máquina de costura. Lubrificantes típicos incluem óleos minerais, ceras e emulsões. De acordo com Pizzuto et al. (2021), quantidade de lubrificante é crítica: lubrificação insuficiente resulta em quebra frequente de linha, enquanto lubrificação excessiva deixa depósitos em agulha e tecido.

Revestimento Polimérico: Conforme indicado por McArthur (2018), linhas frequentemente recebem revestimento fino de polímero (tipicamente poliéster ou policloreto de vinila) que consolida fibras superficiais e melhora propriedades de superfície. Revestimento polimérico oferece benefícios: (1) consolidação de fibras superficiais, reduzindo desfibração; (2) proteção de fibras internas contra umidade; (3) melhoria de brilho e aparência superficial; (4) melhoria de propriedades antichama em linhas de aramida.

Tingimento: De acordo com Pizzuto et al. (2021), linhas são tingidas com cores específicas para compatibilidade com cores de tecido. Linhas podem ser tona única

ou múltiplas cores. McArthur (2018) descreve que tingimento adequado é crítico para: (1) compatibilidade visual com tecido; (2) resistência de cor a limpeza e exposição à luz; (3) ausência de transferência de cor para tecido ou outros componentes.

Tratamentos Especializados: Conforme descrito por McArthur (2018), linhas para aplicações de proteção frequentemente recebem tratamentos químicos especializados. Tratamentos incluem: (1) acabamento antichama químico que aumenta resistência de linha a combustão; (2) acabamento antimicrobiano que reduz crescimento de bactérias; (3) acabamento condutor que permite dissipação de carga estática; (4) acabamento de repelência a óleo e água.

O processo de fabricação de linhas é sequência complexa de etapas que transformam fibras têxteis brutas em produto funcional. De acordo com Pizzuto et al. (2021), processo típico de fabricação de linhas segue sequência padronizada de etapas principais.

Etapa 1: preparação de fibras descontínuas, primeira etapa envolve preparação de fibras. Conforme descrito por McArthur (2018), fibras brutas são misturadas em proporções específicas, processo denominado "blending". O blending permite: (1) otimização de propriedades através de combinação de fibras com características complementares; (2) controle de custo através de balanceamento de fibras caras e baratas; (3) melhoria de propriedades finais através de sinergia de fibras diferentes.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), fibras preparadas frequentemente passam por etapa de "opening" onde emaranhados de fibra são desfeitos através de equipamento mecânico, resultando em separação de fibras e homogeneização.

Etapa 2: a cardagem é processo de processamento mecanizado que alinha fibras em orientação aproximadamente paralela. Conforme indicado por McArthur (2018), durante cardagem, fibras passam através de série de cilindros revestidos com agulhas finas que penteiam fibras, removendo contaminantes e criando fita (sliver) de fibras aproximadamente paralelas.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), cardagem é etapa crítica que afeta significativamente propriedades finais de linha: cardagem inadequada resulta em fibras desalinhadas que causam irregularidades em linha; cardagem excessiva pode danificar fibras.

Etapa 3: para linhas de qualidade superior, etapa de penteagem remove fibras curtas e contaminantes remanescentes. Conforme descrito por McArthur (2018), durante penteagem, fita de fibras passa através de cilindros com agulhas mais finas

que removem fibras muito curtas (neps) e contaminantes minerais. A penteagem resulta em: (1) redução de irregularidades de linha; (2) aumento de resistência de linha; (3) melhoria de aparência de linha; (4) aumento de custos de produção.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), penteagem é etapa opcional utilizada principalmente para linhas de qualidade premium destinadas a aplicações técnicas.

Etapa 4: estiramento é o processo em que fita de fibras é esticada para reduzir sua espessura enquanto alinha fibras adicionalmente. Conforme indicado por McArthur (2018), durante estiramento, fita passa através de série de cilindros rotativos, com cada cilindro subsequente girando em velocidade progressivamente maior, resultando em extensão da fita. Estiramento oferece benefícios: (1) redução de espessura de fita, aumentando comprimento efetivo; (2) alinhamento adicional de fibras; (3) melhoria de propriedades de resistência finais.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), estiramento é etapa crítica para linhas de aramida, onde alinhamento adequado de fibras é essencial para atingir propriedades de resistência especificadas.

Etapa 5: fiação é a etapa onde fita de fibras é transformada em fio através de aplicação simultânea de torsão e estiramento. Esta etapa é descrita em detalhes na seção (c) deste subcapítulo.

Etapa 6: torção, para linhas multifilamento (compostas de múltiplos filamentos torcidos em conjunto), etapa de torção consolida filamentos em estrutura coesiva. Conforme descrito por McArthur (2018), múltiplos fios individuais passam através de dispositivo de torção que impõe rotação helicoidal, consolidando fios em linha única. O número de torções aplicadas é cuidadosamente controlado para atingir propriedades especificadas.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), torção pode ser realizada em etapa única ou múltiplas etapas (primeira torção cria ply, segunda torção cria corda), processo que oferece controle fino de propriedades.

Etapa 7: a etapa final de fabricação envolve aplicação de acabamentos. Conforme indicado por McArthur (2018), linhas passam através de equipamento de acabamento onde: (1) lubrificantes são aplicados em quantidade controlada; (2) revestimento polimérico pode ser depositado; (3) tratamentos químicos são aplicados; (4) tingimento final pode ocorrer.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), controle de qualidade em etapa de acabamento é crítico para garantir que propriedades finais de linha correspondem a especificações.

Etapa 8: Conforme descrito por McArthur (2018), linha finalizada é bobinada em carretilhas ou bobinas de diferentes tamanhos para comercialização e utilização. A bobinagem deve ser: (1) uniforme em densidade; (2) livre de enrugamento ou deformação; (3) com comprimento total correspondendo a especificações.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), bobinagem inadequada pode resultar em problemas de processamento durante costura, como enrolamento de linha ou tensão irregular.

A etapa de fiação é fundamental na determinação de propriedades de linha final. Existem múltiplos sistemas de fiação comercialmente disponíveis, cada oferecendo características distintas.

Ring spinning (Fiação por Anel) é sistema mais antigo e amplamente utilizado de fiação. De acordo com Pizzuto et al. (2021), durante ring spinning, fita de fibras estirada é guiada através de anel de metal estacionário (ring), e travessão rotativo (traveler) que se move ao longo do anel aplica torsão enquanto guia fio para bobina.

Conforme descrito por McArthur (2018), processo de ring spinning oferece benefícios significativos: (1) propriedades de resistência muito elevadas, pois fibras estão fortemente consolidadas através de torsão alta; (2) excelente uniformidade de fio; (3) flexibilidade em ajustes de torsão e títulos. Ring spinning também apresenta limitações: (1) velocidade de produção moderada (tipicamente 100-200 metros por minuto); (2) consumo de energia elevado; (3) requer tensão cuidadosa em fio durante fiação.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), ring spinning é sistema preferencial para linhas de aramida destinadas a uniformes de proteção, pois oferece propriedades de resistência superior necessárias para esta aplicação crítica.

Open end spinning (Fiação por Extremidade Aberta) é sistema mais moderno que oferece velocidades de produção significativamente superior. Conforme indicado por McArthur (2018), durante open end spinning, fita de fibras é alimentada em rotor que gira em alta velocidade (até 130.000 rotações por minuto), forças centrífugas separam fibras e as lançam contra parede interna do rotor, consolidando-as em fio. O fio é continuamente removido do rotor através de orifício de saída.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), open end spinning oferece vantagens significativas: (1) velocidade de produção muito elevada (tipicamente 400-800 metros por minuto), oferecendo produtividade 3-5 vezes superior a ring spinning; (2) menor consumo de energia em comparação a ring spinning; (3) capacidade de utilizar fibras mais curtas, permitindo maior utilização de fibras de qualidade reduzida.

Conforme descrito por McArthur (2018), open end spinning também apresenta limitações: (1) resistência de fio é moderada (aproximadamente 20-30% inferior a ring spinning); (2) uniformidade de fio é inferior; (3) possibilidade de defeitos de fiação em torsão não-uniforme; (4) menos adequado para linhas de aplicação crítica como proteção térmica.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), open end spinning é utilizado primariamente para linhas convencionais de aplicação geral onde resistência máxima não é crítica.

Compact spinning (Fiação Compactada) é sistema mais recente que oferece características intermediárias entre ring spinning e open end spinning. Conforme indicado por McArthur (2018), durante compact spinning, zona de torsão é compactada através de sucção, resultando em densidade de fibras aumentada na zona de torsão, que oferece resistência e uniformidade aumentadas em comparação a ring spinning convencional.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), compact spinning oferece benefícios: (1) resistência de fio aumentada (aproximadamente 5-10% superior a ring spinning); (2) uniformidade melhorada; (3) velocidade de produção moderadamente aumentada (aproximadamente 20-30% superior a ring spinning). Conforme descrito por McArthur (2018), compact spinning requer equipamento especializado e é menos amplamente disponível que ring spinning ou open end spinning.

Para linhas confeccionadas de multifilamentos de fibra sintética contínua (tal como poliéster ou aramida), processo diferente é utilizado, (Continuous Filament Spinning). De acordo com Pizzuto et al. (2021), filamentos contínuos são extrudados através de fieira contendo múltiplos orifícios (típicamente 10-100 orifícios), resultando em múltiplos filamentos simultâneos. Filamentos são combinados e torcidos em configuração desejada.

Conforme descrito por McArthur (2018), fiação de filamento contínuo oferece vantagens: (1) elevada uniformidade devido a controle preciso de processo; (2) propriedades de resistência elevadas; (3) velocidade de produção elevada. De acordo

com Pizzuto et al. (2021), fiação de filamento contínuo é processo preferencial para linhas de aramida (Nomex®, Kevlar®) destinadas a uniformes de proteção.

Monofilamento (Monofilament Spinning) refere-se a fio constituído de filamento único de diâmetro apropriado, ao invés de múltiplos filamentos torcidos. De acordo com McArthur (2018), monofilamentos são extrudados diretamente em diâmetro desejado, oferecendo fio liso e uniforme. Monofilamentos são tipicamente de poliéster ou poliamida.

Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), monofilamentos oferecem vantagens: (1) excelente uniformidade; (2) superfície lisa que facilita costura de alta velocidade; (3) excelente capacidade de formação de ponto. McArthur (2018) descreve que monofilamentos apresentam limitação de resistência comparativamente inferior (aproximadamente 50% da resistência de multifilamentos equivalentes), limitando sua utilização em aplicações que requerem resistência máxima.

4.3 CLASSIFICAÇÃO DE LINHAS POR SISTEMA DE NUMERAÇÃO

A classificação de linhas têxteis por sistema de numeração é aspecto fundamental da especificação técnica e procura em aplicações industriais. De acordo com análise de McArthur (2018), a confusão proveniente de múltiplos sistemas de numeração em uso simultâneo em diferentes regiões do mundo representa desafio significativo em comercialização internacional de linhas. Este subcapítulo apresenta análise detalhada dos principais sistemas de numeração utilizados internacionalmente, suas definições matemáticas, conversões e diretrizes de seleção para aplicações específicas.

O sistema Tex é sistema métrico decimal internacionalmente padronizado de numeração de linhas, adotado como padrão oficial pela maioria de países e organizações internacionais de padronização. De acordo com Pizzuto et al. (2021), o sistema Tex define densidade linear de fibra como massa em gramas de 10.000 metros de linha, expressa como "Tex" ou "de-nier".

Conforme descrito por McArthur (2018), a definição matemática do sistema Tex é:

$$\$Tex = (m / L) * 10.000\$$$

Onde:

Tex = número Tex (g/10.000m)

m = massa em gramas

L = comprimento em metros

Exemplos práticos de classificação em sistema Tex incluem: (1) linha de título 30 Tex possui massa de 30 gramas por cada 10.000 metros de comprimento; (2) linha de título 25 Tex possui massa de 25 gramas por cada 10.000 metros; (3) linha de título 50 Tex possui massa de 50 gramas por cada 10.000 metros.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), o sistema Tex oferece vantagens significativas: (1) simplicidade matemática - relação direta entre título e densidade linear; (2) facilidade de conversão entre unidades métricas padrão; (3) reconhecimento internacional em normas técnicas (ISO, ASTM, EN).

A escala de numeração em sistema Tex é progressiva: números maiores indicam linhas mais espessas (mais pesadas). Conforme indicado por McArthur (2018), linhas de aramida típicas para uniformes de proteção variam entre 15 Tex e 45 Tex, dependendo de aplicação específica. Linhas de 20-30 Tex são mais comuns para confecção geral, enquanto linhas de 40-45 Tex são utilizadas em aplicações que requerem resistência estrutural máxima.

O sistema de-nier (pronunciado "de-neer") refere-se a sistema relacionado onde densidade linear é expressa como gramas por 9.000 metros (ao invés de 10.000 metros). De acordo com Pizzuto et al. (2021), relação entre Tex e de-nier é:

$$\$de-nier = Tex * 0,9\$$$

Ou inversamente:

$$\$Tex = de-nier / 0,9\$$$

Conforme descrito por McArthur (2018), o sistema de-nier é menos utilizado contemporaneamente, tendo sido substituído pelo sistema Tex na maioria de aplicações, porém permanece em uso em algumas indústrias, particularmente em contexto de fibras sintéticas produzidas por fabricantes históricos.

O sistema Nm (número métrico) é sistema de numeração métrico inverso onde números maiores indicam linhas mais finas (menos pesadas). De acordo com Pizzuto

et al. (2021), o sistema Nm define título como número de metros de linha contidos em um grama de massa, frequentemente denominado "comprimento específico" da linha.

A definição matemática do sistema Nm é:

$$Nm = L / m$$

Onde:

Nm = número métrico (metros por grama)

L = comprimento em metros

m = massa em gramas

Exemplos práticos incluem: (1) linha de título 40 Nm possui 40 metros de comprimento por cada grama de massa; (2) linha de título 50 Nm possui 50 metros por grama; (3) linha de título 30 Nm possui 30 metros por grama.

Conforme descrito por McArthur (2018), o sistema Nm oferece vantagem particular em contextos em que comprimento de linha é parâmetro de interesse prático: conhecendo-se título em Nm e massa de carretilha de linha, comprimento total de linha pode ser calculado facilmente. De acordo com Pizzuto et al. (2021), esta relação matemática direta torna sistema Nm preferencial em muitas operações de controle de qualidade e especificação de quantidade.

A escala de numeração em sistema Nm é inversa ao sistema Tex: números maiores em Nm indicam linhas mais finas. Conforme indicado por McArthur (2018), a relação inversa entre Nm e Tex é:

$$Nm = 10.000 / Tex$$

Ou inversamente:

$$Tex = 10.000 / Nm$$

De acordo com Pizzuto et al. (2021), linhas de aramida típicas para uniformes de proteção correspondem a aproximadamente 250-500 Nm, dependendo de aplicação (uma linha de 40 Tex equivale a aproximadamente 250 Nm).

O sistema Ne (número inglês) é sistema de numeração tradicional ainda utilizado em contextos em que confecção têxtil tem raízes históricas em padrões britânicos. De acordo com McArthur (2018), o sistema Ne é sistema de numeração inverso similar ao Nm, porém baseado em unidades imperiais (libras e jardas) ao invés de unidades métricas.

A definição matemática do sistema Ne é:

$$\$Ne = L_yards / (m_pounds * 840)\$$$

Ou em unidades SI:

$$\$Ne = Nm * 0,5905\$$$

Onde:

Ne = número inglês (jardas por libra)

L_yards = comprimento em jardas

m_pounds = massa em libras

Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), o sistema Ne é baseado na premissa de 840 jardas de linha = 1 libra de massa em valor 1 Ne. Linha de título 20 Ne possui $20 \times 840 = 16.800$ jardas por libra.

De acordo com McArthur (2018), o sistema Ne permanece em uso principalmente em indústrias onde tradição britânica é forte (particularly no Reino Unido e em algumas antigas colônias britânicas), porém seu uso tem diminuído significativamente com adoção global de sistema métrico Tex/Nm.

A conversão de Ne para Nm é realizada conforme:

$$\$Nm = Ne / 0,5905\$$$

Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), conversão de Ne para Tex é:

$$\$Tex = 590,5 / Ne\$$$

De acordo com McArthur (2018), linhas convencionais em sistema Ne típico variam entre 20 Ne e 60 Ne, com 40 Ne sendo título comum para muitas aplicações de confecção geral.

A conversão entre diferentes sistemas de numeração é operação frequente em contextos internacionais de comércio e engenharia. De acordo com Pizzuto et al. (2021), conversões entre sistemas seguem relações matemáticas precisas que permitem cálculos exatos.

Conversão de Tex para Nm:

$$\$Nm = 10.000 / Tex\$$$

Exemplo: linha de 40 Tex corresponde a:

$$\$10.000 / 40 = 250 Nm\$$$

Conversão de Nm para Tex:

$$\$Tex = 10.000 / Nm\$$$

Exemplo: linha de 250 Nm corresponde a:

$$\$10.000 / 250 = 40 Tex\$$$

Conversão de Tex para de-nier:

$$\$de-nier = Tex * 0,9\$$$

Exemplo: linha de 40 Tex corresponde a:

$$\$40 * 0,9 = 36 de-nier\$$$

Conversão de de-nier para Tex:

$$\$Tex = de-nier / 0,9\$$$

Conversão de Ne para Nm:

$$\$Nm = Ne / 0,5905\$$$

Exemplo: linha de 30 Ne corresponde a:

$$\$30 / 0,5905 = 50,8 Nm\$$$

Conversão de Ne para Tex:

$$\$Tex = 590,5 / Ne\$$$

Exemplo: linha de 30 Ne corresponde a:

$$\$590,5 / 30 = 19,7 Tex\$$$

De acordo com McArthur (2018), tabelas de conversão padronizadas estão disponíveis em maioria de referências técnicas e são frequentemente incorporadas em software de especificação de linhas.

Tabela de Equivalências de Títulos Comuns:

Conforme apresentado por Pizzuto et al. (2021), tabela de equivalências entre sistemas para linhas comuns:

Tex	de-nier	Nm	Ne	Aplicação Típica
10	9	1.000	840	Linhas muito finas
15	13,5	667	560	Linhas finas
20	18	500	420	Linhas para camisas
25	22,5	400	336	Linhas de uso geral
30	27	333	280	Linhas de confecção geral
35	31,5	286	240	Linhas de confecção média
40	36	250	210	Linhas de aplicação técnica
50	45	200	168	Linhas de resistência aumentada
60	54	167	140	Linhas de resistência alta

Seleção de Título Adequado para Cada Aplicação

A seleção de título apropriado de linha é decisão crítica que afeta simultaneamente propriedades de resistência, aparência, processabilidade e custo de uniforme final. De acordo com McArthur (2018), seleção inadequada de título pode resultar em: (1) resistência de costura insuficiente, comprometendo segurança; (2) dificuldade de processamento em máquina de costura; (3) custo excessivo; (4) aparência inadequada de costura.

Diretrizes de Seleção por Espessura de Tecido, conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), a relação entre título de linha e espessura de tecido é parâmetro fundamental na seleção. Regra geral estabelecida industrialmente é que título de linha deve ser proporcional à espessura de tecido:

- Tecidos muito finos (algodão de qualidade, seda): Utilizar linhas 15-20 Tex (500-667 Nm).
- Tecidos finos (camisarias, tecidos leves): Utilizar linhas 20-25 Tex (400-500 Nm).
- Tecidos de peso médio (calças, blazers): Utilizar linhas 30-40 Tex (250-333 Nm).
- Tecidos pesados (lonas, couro, tecidos técnicos): Utilizar linhas 40-60 Tex (167-250 Nm).

De acordo com McArthur (2018), desproporção entre linha e tecido resulta em problemas: linha muito fina em tecido pesado resulta em ruptura frequente e resistência insuficiente; linha muito espessa em tecido fino resulta em distorção de tecido, dificuldade de costura e aparência inadequada.

Seleção para Uniformes de Proteção Antichama: para uniformes de proteção para bombeiros, critérios de seleção são ainda mais rigorosos. Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), uniformes de proteção estrutural confeccionados em tecido de aramida multicamada apresentam espessura global significativa (tipicamente 1,5-2,5 mm de espessura total de multicamadas), requerendo linha de resistência correspondente.

De acordo com McArthur (2018), para uniformes antichamas típicos, costuras estruturais principais (ombro, lateral, fundo):

- Utilizar 40-50 Tex (200-250 Nm).
- Costuras de reforço (bolsos, mangas): Utilizar 30-40 Tex (250-333 Nm).
- Costuras de arremate (overloque): Utilizar 20-30 Tex (333-500 Nm).

Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), seleção de título deve também considerar número de camadas de tecido penetradas pela costura. Costuras que penetram 3-4 camadas de tecido requerem título mais elevado que costuras que penetram 1-2 camadas.

A compatibilidade entre título de linha e tamanho de agulha é crítica para processabilidade. De acordo com McArthur (2018), cada tamanho de agulha é otimizado para faixa específica de títulos de linha. Linhas muito finas requerem agulhas pequenas (tamanho 60-70), enquanto linhas espessas requerem agulhas maiores (tamanho 120-140).

Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), desproporção entre linha e agulha resulta em: (1) linha muito fina em agulha muito grande: linha sofre fricção excessiva causando ruptura frequente; (2) linha muito espessa em agulha pequena: linha não passa adequadamente através do olho de agulha, causando emenda de linha ou ruptura.

De acordo com McArthur (2018), existem trade-offs entre custo e performance em seleção de título. Linhas de título muito elevado (60-100 Tex) oferecem resistência superior, mas apresentam custo aumentado, dificuldade de processamento, e potencial de distorção de tecido.

Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), seleção ótima representa equilíbrio entre: (1) resistência adequada (mínimo 75-80% da resistência do tecido); (2) processabilidade aceitável (velocidade de costura adequada, quebra de linha reduzida); (3) custo razoável; (4) aparência visual aceitável.

Para uniformes de proteção, conforme indicado por McArthur (2018), a prioridade é garantir resistência adequada mesmo com custo potencialmente aumentado, pois falha de costura pode resultar em risco de vida. Portanto, diretrizes de seleção frequentemente especificam títulos conservadores (mais elevados) para assegurar margem de segurança.

4.4 TIPOS DE CONSTRUÇÃO DE LINHAS

Os tipos de construção de linhas têxteis variam significativamente em termos de estrutura, processamento e propriedades resultantes. De acordo com análise técnica de McArthur (2018), a seleção do tipo de construção apropriado é decisão crítica que determina não apenas a performance funcional da linha, mas também sua processabilidade em máquinas de costura modernas. Este subcapítulo apresenta análise detalhada dos principais tipos de construção de linhas, mecanismos de influência de torsão em propriedades, e diretrizes de seleção para aplicações específicas, particularmente em uniformes de proteção antichama.

Linhos Simples (Monofilamento): caracterizam-se por consistirem de filamento único de fibra contínua de diâmetro apropriado para funcionar como linha completa. De acordo com Pizzuto et al. (2021), monofilamentos representam categoria distinta de linhas onde não existe torsão de múltiplos filamentos; ao contrário, filamento único é extrudado ou processado diretamente no diâmetro final desejado.

Conforme descrito por McArthur (2018), monofilamentos são tipicamente confeccionados de polímeros sintéticos que podem ser extrudados em forma contínua com propriedades funcionais adequadas. Materiais comuns para monofilamento incluem poliéster, poliamida (nylon), polipropileno e, em aplicações especializadas, aramidas modificadas.

A estrutura de monofilamento difere fundamentalmente de linhas torcidas. De acordo com Pizzuto et al. (2021), monofilamento apresenta: (1) superfície lisa e uniforme, sem irregularidades de torsão; (2) densidade uniforme ao longo de toda a extensão; (3) ausência de pequenos filamentos soltos que possam desfibrar.

Propriedades e Vantagens:

Monofilamentos oferecem múltiplas vantagens em aplicações específicas. Conforme indicado por McArthur (2018), monofilamentos apresentam: (1) excelente uniformidade de diâmetro ao longo de toda a extensão, possibilitando formação de ponto muito consistente; (2) superfície suave que facilita passagem através de passadores de fio com mínimo de atrito; (3) ausência de desfibração, resultando em capacidade superior de passagem através de agulha sem enrolamento.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), monofilamentos apresentam também vantagens estéticas: (1) aparência de costura muito uniforme e limpa; (2) brilho superficial consistente; (3) ausência de pigmentos de cor desigual ou manchas de tingimento.

Apesar das vantagens, monofilamentos apresentam limitações significativas. Conforme descrito por McArthur (2018), limitação primária é resistência mecânica comparativamente inferior. Um monofilamento de diâmetro específico apresenta resistência à tração inferior (aproximadamente 50-70%) em relação a linha torcida de título equivalente. Este fenômeno ocorre porque monofilamento não oferece "efeito de corda" que resulta do entrelaçamento de múltiplos filamentos em linha torcida.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), monofilamentos também apresentam rigidez relativamente elevada, particularmente em diâmetros maiores. Esta rigidez pode resultar em: (1) desconforto em aplicações onde flexibilidade é importante; (2) dificuldade em formação de nós; (3) tendência a ondulação ou enroscamento em bobina.

Para aplicações de proteção, conforme indicado por McArthur (2018), monofilamentos são tipicamente inadequados como linhas estruturais devido a resistência inferior. Sua utilização é restrita a aplicações de costura de arremate (overloque) onde resistência moderada é aceitável.

Linhos Torcidos (Multifio): caracterizam-se por consistirem de múltiplos filamentos ou fios que são consolidados através de processo de torsão helicoidal. De acordo com McArthur (2018), linhas torcidas representam construção mais comum de linhas comerciais, oferecendo otimização favorável entre propriedades de resistência, flexibilidade e processabilidade.

Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), linhas torcidas possuem estrutura helicoidal onde múltiplos filamentos (tipicamente 2-50 filamentos dependendo de título) são torcidos em ângulo helicoidal ao longo do eixo central da linha. A torsão

consolida filamentos em estrutura única coesiva que oferece propriedades superiores a soma de filamentos individuais.

De acordo com McArthur (2018), estrutura helicoidal de linha torcida cria geometria onde filamentos externos ficam ligeiramente mais distanciados do eixo central que filamentos internos. Esta geometria resulta em distribuição de estresse não-uniforme quando linha é submetida a carga tensil, com filamentos externos frequentemente sofrendo estresse elevado.

Linhas torcidas oferecem combinação de propriedades particularmente favorável para muitas aplicações. Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), linhas torcidas apresentam: (1) resistência à tração superior em relação a monofilamentos equivalentes, resultado do "efeito de corda" onde múltiplos filamentos atuam coletivamente; (2) flexibilidade adequada que permite manipulação e formação de nó; (3) elasticidade moderada que permite absorção de carga de choque.

De acordo com McArthur (2018), resistência de linha torcida é função da resistência de filamentos constituintes, número de filamentos, ângulo de torsão e consolidação de filamentos. Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), linhas torcidas também apresentam vantagem de que pequenas rupturas de filamento individual não resultam em falha imediata de linha completa; outros filamentos continuam oferecendo certa resistência mesmo com ruptura de alguns filamentos.

Um aspecto importante de linhas torcidas é como carga é distribuída entre filamentos. Conforme indicado por McArthur (2018), quando linha torcida é submetida a carga tensil, nem todos os filamentos sofrem iguais níveis de estresse. Filamentos mais externos sofrem comprimento de arco maior que filamentos internos, resultando em estresse diferencial.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), a distribuição de carga em linha torcida é também influenciada pelo tipo de torsão (Z ou S) e pela compatibilidade entre número de filamentos e ângulo de torsão. Torsão otimizada resulta em distribuição de carga mais uniforme e resistência de linha aumentada.

Linhos de Múltiplas Camadas: também denominadas "cabled yarns" ou "plied yarns", constituem construção onde múltiplas linhas torcidas são elas mesmas torcidas em conjunto em etapa subsequente de processamento. De acordo com McArthur (2018), construção em múltiplas camadas permite criar linhas de propriedades muito específicas através de otimização de cada camada.

Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), processo de construção de múltiplas camadas ocorre em etapas sequenciais: (1) primeira etapa (primeira torsão): múltiplos filamentos são torcidos para criar linha torcida simples, denominada "singles"; (2) segunda etapa (segunda torsão): múltiplas "singles" são torcidas em conjunto para criar "ply" ou "plied yarn"; (3) etapas subsequentes: múltiplos "plies" podem ser torcidos adicionalmente para criar construções ainda mais complexas.

De acordo com McArthur (2018), terminologia comum descreve construções como: (1) "2-ply" (2 camadas): duas singles torcidas em conjunto; (2) "3-ply" (3 camadas): três singles torcidas em conjunto; (3) "2/2 ply": dois plies de 2 camadas cada torcidos em conjunto.

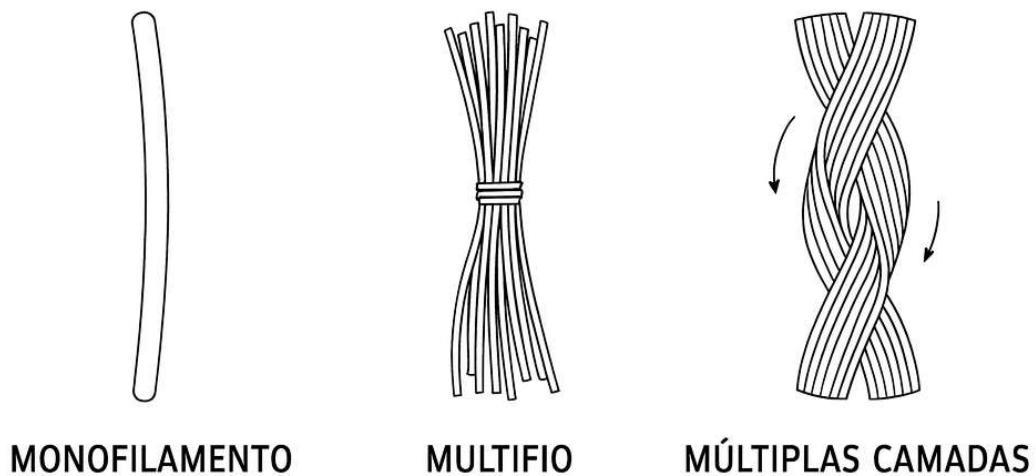
Linhos de múltiplas camadas oferecem vantagens significativas em aplicações que requerem propriedades específicas. Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), múltiplas camadas permitem: (1) aumento de resistência de linha mantendo flexibilidade, comparada a monofilamento equivalente; (2) otimização de cada camada para propriedades diferentes (exemplo: primeira camada de aramida para proteção térmica, segunda camada de poliéster para elasticidade); (3) maior uniformidade de linha através de averaging de irregularidades entre camadas.

De acordo com McArthur (2018), linhas de múltiplas camadas também oferecem vantagem de que falha de uma camada não resulta em falha imediata da linha; outras camadas continuam oferecendo alguma resistência.

Para uniformes de proteção antichama, conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), linhas de múltiplas camadas frequentemente utilizadas incluem construções como "2-ply aramida/poliéster" onde: (1) primeira camada é 100% aramida, conferindo resistência térmica; (2) segunda camada é poliéster, conferindo elasticidade e custo reduzido. Esta combinação oferece proteção adequada mantendo propriedades de processabilidade.

De acordo com McArthur (2018), linhas de múltiplas camadas representam compromisso econômico particularmente importante para uniformes de proteção onde custo de linha é consideração significativa (Figura10).

Figura10 – Representação esquemática de diferentes tipos de construção de linhas de costura.



Fonte: Elaboração própria do autor.

A torsão é parâmetro crítico que governa múltiplas propriedades de linha e sua performance em aplicações finais. De acordo com Pizzuto et al. (2021), torsão refere-se ao número de rotações helicoidais por unidade de comprimento, frequentemente expressa como "torções por polegada" (TPI) ou "torções por decímetro" (TPD).

Influência de Torsão em Resistência Mecânica:

A relação entre torsão e resistência de linha é não-linear e crítica. Conforme descrito por McArthur (2018), conforme torsão aumenta de valores baixos, resistência de linha inicialmente aumenta devido a melhor consolidação de filamentos. Este aumento continua até ponto ótimo onde consolidação é máxima.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), após ponto ótimo de torsão, aumento adicional de torsão resulta em redução de resistência. Este fenômeno ocorre porque torsão excessiva cria ângulos helicoidais muito inclinados, resultando em componentes de carga axial reduzidos em filamentos. Conforme indicado por McArthur (2018), torsão excessiva também pode resultar em torção de filamentos individuais, criando fraqueza estrutural.

Estudos demonstram que ponto ótimo de torsão varia com composição de linha e número de filamentos. De acordo com Pizzuto et al. (2021), para linhas de aramida típicas com 30-40 filamentos, ponto ótimo de torsão está na faixa de 2-4 TPI, enquanto para linhas de poliéster convencional, ponto ótimo está tipicamente entre 4-6 TPI.

A torsão também governa propriedades de deformação de linha. Conforme indicado por McArthur (2018), linhas com torsão baixa apresentam alongamento elevado (maior deformação plástica antes de ruptura), enquanto linhas com torsão alta apresentam alongamento reduzido (deformação mais limitada).

De acordo com Pizzuto et al. (2021), esta relação é resultado da geometria helicoidal: torsão baixa resulta em ângulos helicoidais menores, permitindo deslocamento relativo de filamentos durante elongação; torsão alta resulta em ângulos helicoidais maiores, reduzindo capacidade de deslocamento.

Para aplicações de proteção, conforme descrito por McArthur (2018), torsão deve ser balanceada: torsão insuficiente resulta em linha com resistência inadequada; torsão excessiva resulta em linha rígida que oferece dificuldade de costura.

A torsão influencia significativamente características superficiais de linha. Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), linhas com torsão baixa apresentam superfície áspera com filamentos individuais frequentemente visíveis e suscetíveis a desfibração; linhas com torsão alta apresentam superfície mais lisa e consolidada.

De acordo com McArthur (2018), superfície de linha influencia diretamente atrito durante passagem através de passadores de fio. Linhas com superfície áspera apresentam atrito elevado que pode resultar em ruptura ou aquecimento de linha durante costura de alta velocidade.

A torsão afeta também propriedades de formação de ponto em máquina de costura. Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), linhas com torsão adequada oferecem formação de ponto muito uniforme e consistente; linhas com torsão inadequada (muito baixa ou muito alta) frequentemente resultam em formação de ponto irregular.

De acordo com McArthur (2018), formação de ponto inadequada pode resultar em: (1) pontos skipped (saltos onde agulha não passa de forma adequada); (2) formação de loop irregular; (3) estresse desigual em pontos, resultando em resistência reduzida de costura.

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para prever influência de torsão em propriedades de linha. De acordo com Pizzuto et al. (2021), modelo simplificado relaciona resistência de linha com torsão:

$$R = R_0 * [1 - k * (\alpha - \alpha_{opt})^2]$$

Onde:

R = resistência de linha (cN)

R_0 = resistência teórica máxima em torsão ótima

α = torsão atual (TPI)

α_{opt} = torsão ótima para linha específica

Este modelo, embora simplificado, captura essência não-linear da relação entre torsão e resistência.

Torsão em Linhas de Aramida para Proteção:

Para linhas de aramida destinadas a uniformes de proteção, de acordo com McArthur (2018), torsão deve ser cuidadosamente controlada para manter equilíbrio entre resistência mecânica e capacidade de processamento. Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), linhas de aramida para proteção tipicamente apresentam torsão na faixa de 2-4 TPI, valor que oferece resistência adequada (aproximadamente 80-90% de resistência teórica máxima) mantendo flexibilidade suficiente para costura mecanizada de alta velocidade.

4.5 PROPRIEDADES CRÍTICAS DE LINHAS PARA CONFECÇÃO

As propriedades mecânicas e funcionais de linhas têxteis são determinantes fundamentais de performance em aplicações finais, particularmente em confecção técnica de uniformes de proteção. De acordo com análise abrangente de McArthur (2018), compreensão detalhada de propriedades críticas de linha é essencial para especificação apropriada e seleção de linhas que atendem requisitos funcionais específicos. Este subcapítulo apresenta análise técnica das principais propriedades críticas de linhas para confecção, seus métodos de medição, e seu impacto em performance de uniformes de proteção antichama.

A resistência à tração, também denominada carga de ruptura ou força de ruptura, é propriedade fundamental que caracteriza a máxima carga tensil que uma linha pode suportar antes de sofrer ruptura completa. De acordo com Pizzuto et al. (2021), resistência à tração é frequentemente considerada a propriedade "primária" de linha, pois sua adequação é pré-requisito para qualquer aplicação.

Definição e Medição: Conforme descrito por McArthur (2018), resistência à tração de linha é medida em máquina de tração universal (teste tensil). O procedimento padrão envolve: (1) fixação de amostra de linha de comprimento

padronizado (tipicamente 10-20 cm) em garras de máquina de tração; (2) aplicação de carga tensil progressivamente crescente até ruptura de linha; (3) registro da carga máxima suportada antes de ruptura, expressa tipicamente em unidades de força (Newton, cN, ou lbf).

De acordo com Pizzuto et al. (2021), a resistência à tração é frequentemente normalizada por unidade de título de linha, sendo expressa como "carga específica" em unidades de cN/Tex, permitindo comparação entre linhas de títulos diferentes. A conversão é:

$$R_{\text{específica}} = R_{\text{absoluta}} / \text{Tex}$$

Onde:

$R_{\text{específica}}$ = resistência específica (cN/Tex)

R_{absoluta} = resistência à tração medida (cN)

Tex = título de linha (g/10.000m)

Valores Típicos: De acordo com McArthur (2018), valores típicos de resistência à tração variam significativamente com composição de linha. Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021):

Linhos de algodão: 5-10 cN/Tex (valor baixo)

Linhos de poliéster convencional: 7-12 cN/Tex (valor moderado)

Linhos de poliamida: 8-14 cN/Tex (valor moderado-alto)

Linhos de aramida (Nomex®): 12-18 cN/Tex (valor alto)

Linhos de aramida (Kevlar®): 20-30 cN/Tex (valor muito alto)

Importância em Uniformes de Proteção:

Para uniformes de proteção antichama, conforme descrito por McArthur (2018), resistência à tração da linha deve ser compatível com resistência do tecido adjacente. De acordo com Pizzuto et al. (2021), normas técnicas (EN 11611, EN 11612, NFPA 1971) frequentemente especificam que resistência de costura deve ser mínimo 75-80% da resistência do tecido não-costurado.

Conforme indicado por McArthur (2018), linhas de aramida com resistência específica entre 12-18 cN/Tex oferecem resistência adequada para uniformes de proteção estrutural, mantendo compatibilidade com resistência típica de tecidos de aramida que varia entre 15-25 cN/Tex.

A resistência ao nó é propriedade que caracteriza a capacidade de linha em manter resistência quando amarrada em nó. De acordo com Pizzuto et al. (2021),

resistência ao nó é frequentemente inferior à resistência à tração direta, fenômeno que reflete concentração de estresse em geometria do nó.

Definição e Medição: Conforme descrito por McArthur (2018), teste de resistência ao nó envolve: (1) amarração de nó simples ou duplo na linha (tipicamente nó de emenda); (2) fixação de linha com nó em garras de máquina de tração; (3) aplicação de carga tensil até ruptura; (4) registro de carga de ruptura.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), procedimento padronizado geralmente utiliza nó "overhand knot" (nó de emenda simples) onde linha é dobrada sobre si mesma e passada através de loop resultante. A carga de ruptura no nó é frequentemente comparada à carga de ruptura de linha reta (sem nó) para calcular percentual de retenção de resistência.

Percentual de Retenção: Conforme indicado por McArthur (2018), o "knot strength percentage" (percentual de retenção de resistência ao nó) é calculado como:

$$KS\% = (R_{\text{nó}} / R_{\text{reta}}) * 100\%$$

Onde:

$KS\%$ = percentual de retenção de resistência ao nó

$R_{\text{nó}}$ = resistência com nó (cN)

R_{reta} = resistência sem nó (cN)

De acordo com Pizzuto et al. (2021), valores típicos de retenção variam entre 40-85% dependendo de composição de linha e geometria de nó. Linhas de poliéster convencional tipicamente retêm 60-75% de resistência quando amarradas em nó, enquanto linhas de aramida frequentemente retêm 70-85% devido a estrutura molecular mais rígida que resiste melhor a concentração de estresse.

Importância em Costura: Conforme descrito por McArthur (2018), resistência ao nó é importante porque durante confecção, frequentemente nós são amarrados em extremidades de linha para prevenir desfiamento. A resistência dessa linha com nó é crítica para manter integridade de costura durante primeiros pontos de costura e durante puxadas iniciais de linha.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), para uniformes de proteção onde segurança é crítica, resistência ao nó deve ser avaliada durante especificação de linha para assegurar que retenção de resistência é adequada.

O alongamento é propriedade que caracteriza a deformação de linha quando submetida a carga, enquanto elasticidade refere-se à capacidade de recuperação de linha após remoção de carga. De acordo com McArthur (2018), alongamento e

elasticidade são propriedades complementares que governam comportamento dinâmico de linha em aplicações reais.

Definição e Medição: Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), alongamento é medido durante teste de resistência à tração como alongamento progressivo de linha conforme carga é aplicada. O "alongamento até ruptura" (elongation at break) é calculado como:

$$\% \epsilon_{ruptura} = ((L_{final} - L_{inicial}) / L_{inicial}) * 100\%$$

Onde:

$\epsilon_{ruptura}$ = alongamento até ruptura (%)

L_{final} = comprimento de linha no momento de ruptura

$L_{inicial}$ = comprimento original de linha

De acordo com McArthur (2018), valores típicos de alongamento até ruptura variam: (1) linhas de algodão: 5-10%; (2) linhas de poliéster: 20-30%; (3) linhas de aramida: 2-5%.

A elasticidade é medida através de teste cíclico onde linha é esticada até carga especificada (frequentemente 50% da carga de ruptura), removida, e sua recuperação de comprimento é medida. De acordo com Pizzuto et al. (2021), recuperação elástica é expressa como percentual do alongamento original recuperado após remoção de carga.

Valores Típicos e Implicações: Conforme indicado por McArthur (2018), linhas com alongamento elevado (20-30%) oferecem vantagens de absorção de choque e flexibilidade durante formação de ponto. Em contraste, linhas com alongamento reduzido (2-5%) oferecem comportamento mais rígido e previsível em costura.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), para uniformes de proteção antichama, alongamento moderado (5-10%) é preferido: alongamento insuficiente resulta em linha rígida que oferece dificuldade de costura e distribuição irregular de carga em pontos; alongamento excessivo resulta em tensão inconsistente durante costura mecanizada.

Impacto em Formação de Ponto: Conforme descrito por McArthur (2018), alongamento de linha influencia criticamente formação de ponto em máquina de costura. Linha com alongamento inadequado (muito baixo ou muito alto) frequentemente resulta em: (1) pontos skipped (saltos de ponto); (2) tensão desigual entre pontos; (3) ruptura de linha durante passagem de agulha.

A resistência à abrasão é propriedade que caracteriza a capacidade de linha em resistir a desgaste mecânico causado por atrito e impacto durante processamento e

uso. De acordo com Pizzuto et al. (2021), resistência à abrasão é propriedade particularmente importante para linhas que sofrem ciclos repetidos de atrito durante costura mecanizada de alta velocidade.

Mecanismo de Abrasão: Conforme indicado por McArthur (2018), abrasão de linha ocorre através de múltiplos mecanismos: (1) fricção contra superfícies de passadores de fio durante costura; (2) impacto repetido de agulha durante formação de ponto; (3) fricção contra tecido durante penetração de agulha; (4) atrito entre filamentos dentro de linha durante movimento.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), dano por abrasão é acumulativo: exposição repetida a atrito resulta em progressiva degradação de superfície de linha, redução de seção transversal efetiva, e eventual ruptura.

Medição de Resistência à Abrasão: Conforme descrito por McArthur (2018), resistência à abrasão é medida através de testes padronizados onde linha é submetida a ciclos repetidos de atrito controlado. Métodos comuns incluem: (1) teste de Martindale: linha é friccionada contra superfície abrasiva sob carga especificada até ruptura; (2) teste de Schiefer: linha passa através de passadores abrasivos simulando movimento em máquina de costura.

De acordo com Pizzuto et al. (2021), resultado é frequentemente expresso como "número de ciclos até ruptura" ou como "percentual de resistência retido após número especificado de ciclos".

Valores Típicos e Importância: Conforme indicado por McArthur (2018), linhas de aramida apresentam resistência à abrasão superior em relação a linhas de poliéster ou algodão, resultado de estrutura molecular rígida que resiste melhor a deformação por atrito.

Para uniformes de proteção, de acordo com Pizzuto et al. (2021), resistência à abrasão é importante porque costuras sofrem exposição a múltiplos ciclos de movimento durante operações de bombeiros. Linha com resistência à abrasão inadequada sofre degradação de superfície que resulta em redução progressiva de resistência estrutural, criando risco de ruptura de costura em momento crítico.

Tenacidade é propriedade que reflete combinação de resistência mecânica e elasticidade de linha, enquanto uniformidade refere-se à consistência de propriedades ao longo da extensão de linha.

Definição de Tenacidade: Conforme descrito por McArthur (2018), tenacidade é propriedade que caracteriza capacidade de linha em absorver energia antes de

ruptura. De acordo com Pizzuto et al. (2021), tenacidade é calculada como área sob curva de carga-deformação em teste de resistência à tração:

$$T = \int \sigma d\varepsilon$$

Onde:

T = tenacidade (energia por unidade de volume)

σ = estresse (carga)

ε = deformação (alongamento)

Linhos com tenacidade elevada (combinação de resistência moderada com alongamento adequado) oferecem capacidade superior de absorção de choque e resistência a falha catastrófica em comparação a linhos com resistência muito elevada, porém alongamento reduzido.

Conforme indicado por McArthur (2018), para uniformes de proteção, tenacidade elevada é desejável pois oferece proteção contra ruptura súbita de costura quando submetida a cargas de choque.

Uniformidade de Linha: De acordo com Pizzuto et al. (2021), uniformidade de linha refere-se à consistência de propriedades (resistência, espessura, densidade) ao longo da extensão de linha. Uniformidade inadequada resulta em pontos fracos aleatoriamente distribuídos ao longo de linha que podem sofrer ruptura sob carga.

Conforme descrito por McArthur (2018), uniformidade de linha é medida através de: (1) análise de variação de título (espessura) ao longo de comprimento de linha; (2) teste de resistência em múltiplos pontos ao longo de linha para identificar variações de resistência; (3) análise visual para identificar irregularidades de torsão ou desfibração.

Índice de Uniformidade:

De acordo com Pizzuto et al. (2021), uniformidade é frequentemente expressa como "coeficiente de variação" (CV) de propriedades medidas:

$$CV\% = (\sigma / \mu) * 100$$

Onde:

$CV\%$ = coeficiente de variação (%)

σ = desvio padrão de medições

μ = média das medições

Conforme indicado por McArthur (2018), linhos de qualidade superior apresentam CV de resistência menor que 5%, enquanto linhos de qualidade padrão apresentam CV entre 5-10%. Para uniformes de proteção, conforme descrito por

Pizzuto et al. (2021), especificações típicas requerem CV menor que 8% para garantir consistência adequada de resistência de costura ao longo de toda extensão de uniforme.

Impacto em Performance: a uniformidade de linha é crítica para confiabilidade de uniformes de proteção. De acordo com McArthur (2018), se linha apresenta variações significativas de resistência ao longo de sua extensão, costuras resultantes apresentarão pontos fracos aleatoriamente distribuídos. Durante operação em ambiente de incêndio intenso, ruptura é mais provável de ocorrer em ponto fraco aleatório ao longo de costura, em vez de ser distribuída uniformemente.

Conforme indicado por Pizzuto et al. (2021), uniformidade inadequada é particularmente problemática em aplicações de proteção onde margem de segurança é crítica.

Métodos de Avaliação Integrada: para uniformes de proteção antichama, de acordo com McArthur (2018), avaliação de propriedades críticas frequentemente envolve testes integrados que simulam exposição real a condições operacionais. Conforme descrito por Pizzuto et al. (2021), testes podem incluir: (1) teste de resistência à tração após exposição térmica; (2) teste de resistência de costura após ciclos de limpeza; (3) teste de performance de costura em máquina sob condições de velocidade e tensão operacionais.

4.6 ACABAMENTOS DE LINHAS

Os acabamentos aplicados às linhas têxteis representam uma etapa crucial na cadeia de valor da engenharia têxtil, influenciando diretamente as propriedades mecânicas, funcionais e estéticas do produto final. Estes tratamentos são projetados para otimizar o desempenho da linha durante as etapas subsequentes de processamento, como tecelagem, tricotagem e costura, além de conferir funcionalidades específicas ao material (SILVA; PEREIRA, 2020). A seleção e aplicação adequadas dos acabamentos são determinantes para a qualidade e a viabilidade econômica dos produtos têxteis.

A lubrificação de linhas têxteis é um processo fundamental para mitigar o atrito gerado durante as operações de fiação, bobinagem, tecelagem e tricotagem, onde a linha interage intensamente com componentes metálicos das máquinas (GOMES; CARVALHO, 2020). A redução do coeficiente de atrito é essencial para prevenir a quebra da linha, o desgaste dos equipamentos e a formação de defeitos no tecido,

garantindo uma produção mais eficiente e com menor custo. Segundo Silva e Pereira (2020), o mercado de lubrificantes para linhas têxteis tem visto avanços significativos, com o desenvolvimento de emulsões de cera que oferecem excelente desempenho na redução do atrito e na melhoria da manuseabilidade da linha.

Novas formulações de lubrificantes incorporam tecnologias avançadas para otimizar suas propriedades. A pesquisa realizada por Almeida et al. (2024) indicou que a utilização de nanopartículas de sílica em lubrificantes pode reduzir substancialmente os coeficientes de atrito, proporcionando maior resistência à abrasão e durabilidade às linhas. Além disso, óleos de acabamento modernos são frequentemente formulados com múltiplos aditivos, incluindo silicones para suavidade e agentes antiestáticos, que contribuem para um processamento mais suave e a eliminação de cargas eletrostáticas indesejadas (COSTA; LIMA, 2021). O mercado global de lubrificantes para linhas têxteis continua a crescer, impulsionado pela demanda por maior eficiência e sustentabilidade na produção (PESQUISA DE MERCADO GLOBAL, 2024).

Os revestimentos e camadas protetoras aplicados às linhas têxteis visam conferir propriedades específicas que vão além da simples redução de atrito, protegendo a fibra contra danos mecânicos, químicos ou ambientais, e adicionando funcionalidades avançadas. A aplicação desses revestimentos pode melhorar a resistência à abrasão, a durabilidade, a repelência à água e a resistência a produtos químicos, entre outras características (MARTINS; OLIVEIRA, 2023). A escolha do revestimento depende da aplicação final do produto têxtil e das exigências de desempenho.

Uma área de pesquisa e desenvolvimento em ascensão é a utilização de materiais avançados para revestimentos. De acordo com Martins e Oliveira (2023), revestimentos baseados em grafeno têm demonstrado grande potencial para conferir condutividade elétrica às linhas têxteis, abrindo caminho para o desenvolvimento de e-têxteis e dispositivos vestíveis inteligentes. Esses revestimentos não apenas adicionam funcionalidade, mas também podem melhorar a resistência mecânica e a durabilidade da linha. Outros tipos de revestimentos protetores incluem polímeros que formam uma barreira física contra agentes externos, prolongando a vida útil do material e mantendo suas propriedades originais por mais tempo (FERREIRA; SOUZA, 2022).

Os tratamentos especiais são projetados para conferir funcionalidades de alto valor agregado às linhas têxteis, atendendo a requisitos de segurança, conforto e desempenho em aplicações específicas. Entre os mais importantes estão os tratamentos antichama e antiestáticos. A demanda por têxteis resistentes ao fogo tem crescido significativamente, especialmente em setores como vestuário de proteção, mobiliário e transporte (RODRIGUES; SANTOS, 2024). Revestimentos sem halogênio retardantes de fogo são preferidos devido a preocupações ambientais e de saúde, oferecendo uma alternativa mais segura aos compostos halogenados (FERREIRA; SOUZA, 2022).

A pesquisa realizada por Rodrigues e Santos (2024) destaca o uso de compostos intumescentes, que formam uma camada carbonizada protetora quando expostos ao calor, isolando o substrato e retardando a propagação do fogo. Além dos revestimentos, algumas fibras possuem resistência inerente ao fogo, como as fibras LENZING™ FR de celulose, que são modificadas para oferecer proteção contra chamas sem a necessidade de tratamentos químicos adicionais (LENZING, 2023). Fibras como Nomex®, por sua vez, incorporam uma barreira de partículas que confere tanto propriedades antiestáticas quanto resistência ao fogo, sendo amplamente utilizadas em vestuário de proteção (DU PONT, 2019). Os tratamentos antiestáticos são cruciais em ambientes onde a acumulação de cargas eletrostáticas pode causar problemas, como em salas limpas ou na fabricação de eletrônicos, sendo frequentemente incorporados em óleos de acabamento (COSTA; LIMA, 2021).

O acabamento das linhas têxteis exerce um impacto direto e significativo na processabilidade em todas as etapas subsequentes da produção, desde a fiação até a confecção do produto. Um acabamento inadequado pode resultar em problemas como alta fricção, quebra de linha, formação de fiapos, acúmulo de eletricidade estática e dificuldade de manuseio, comprometendo a eficiência e a qualidade do processo (GOMES; CARVALHO, 2020). A otimização dos acabamentos é, portanto, essencial para garantir um fluxo de produção contínuo e de alta performance.

A lubrificação, por exemplo, é crucial para a processabilidade em máquinas de tecelagem e tricotagem, onde a linha está sujeita a tensões e atritos constantes. Segundo Gomes e Carvalho (2020), lubrificantes eficazes reduzem a tensão de ruptura da linha e minimizam o desgaste das agulhas e guias, resultando em menos paradas de máquina e maior produtividade. Da mesma forma, a presença de agentes antiestáticos nos acabamentos previne a aderência da linha a superfícies metálicas e

a outras fibras, facilitando o desenrolamento e a passagem pelos mecanismos da máquina (COSTA; LIMA, 2021). Revestimentos protetores, ao melhorarem a resistência à abrasão, permitem que a linha suporte melhor o estresse mecânico durante o processamento, contribuindo para a integridade estrutural do tecido e a redução de defeitos (MARTINS; OLIVEIRA, 2023). A escolha do acabamento deve considerar não apenas as propriedades desejadas no produto final, mas também a compatibilidade com os equipamentos e as condições de processamento.

5. LINHAS DE ARAMIDA PARA UNIFORMES ANTICHAMA

As linhas aramida representam uma inovação tecnológica fundamental no desenvolvimento de uniformes antichama para profissionais expostos a riscos térmicos. A aramida, família de polímeros aromáticos, caracteriza-se por sua estrutura molecular única que confere propriedades térmicas e mecânicas superiores aos têxteis tradicionais (JUNIOR, 2021). A aplicação dessas linhas em costuras de uniformes não apenas contribui para a integridade estrutural da peça, mas também atua como barreira adicional ao avanço das chamas, sendo especialmente relevante em contextos de proteção pessoal para bombeiros, profissionais de indústrias químicas e trabalhadores em ambientes inflamáveis.

5.1 LINHAS DE ARAMIDA PURA

As linhas de aramida pura utilizadas em uniformes antichamas caracterizam-se por apresentar composição íntegra em poliamida aromática, sendo a fibra Nomex® da DuPont a mais consagrada no mercado internacional. Segundo o fabricante, o Nomex® é produzido através da polimerização de meta-fenilenodiamina e isoftaloíla dicloride, resultando em uma fibra com propriedades intrínsecas de retardância ao fogo (DUPONT, 2025). Alternativamente, aramidas complementares como a Kermel®, produzida por empresas como Lenzing, apresentam composição molecular similar com variações estruturais que permitem otimizações em processabilidade têxtil (JUNIOR, 2021).

A estrutura cristalina e orientação molecular das fibras de aramida pura resultam em densidade linear típica entre 1,38 e 1,45 g/cm³, conferindo à linha adequada rigidez para aplicação em máquinas de costura de alta velocidade. A ausência de aditivos minerais ou tratamentos químicos adicionais em linhas de aramida pura garante uniformidade composicional e previsibilidade de comportamento em condições de exposição térmica extrema.

As propriedades térmicas constituem o aspecto mais crítico para avaliação de linhas aramida em uniformes antichama. O índice de oxigênio limitado (LOI – Limiting Oxygen Index) representa o percentual mínimo de oxigênio necessário para sustentar a combustão de um material em atmosfera controlada. Para fibras de aramida pura como o Nomex®, valores de LOI situam-se tipicamente entre 28 e 32%,

significativamente superior aos materiais têxteis convencionais (algodão: ~18-20%, poliéster: ~20-22%) (JUNIOR, 2021).

A resistência ao fogo em linhas aramida é avaliada através de protocolos normativos específicos, incluindo os testes de flamabilidade conforme ASTM D6413 (Standard Test Method for Flame Resistance of Textiles) e ISO 11611 (Protective Clothing for Use While Welding and Allied Processes). Estudos demonstram que fibras de aramida pura apresentam comportamento de autoextinção (self-extinguishing), não propagando chama mesmo após exposição direta ao calor radiante superior a 400°C (JUNIOR, 2021). Este comportamento resulta da decomposição térmica controlada da aramida, que libera água e gases inertes, criando uma barreira gasosa que impede difusão de oxigênio até a zona de combustão.

A temperatura de transição vítreia (Tg) do Nomex® oscila entre 270-290°C, enquanto a temperatura de degradação térmica situa-se em torno de 370-400°C, intervalos que conferem estabilidade térmica adequada para aplicações em uniformes profissionais submetidos a ciclos repetidos de exposição ao calor.

As propriedades mecânicas das linhas aramida pura constituem fator determinante para sua processabilidade e desempenho funcional em costuras. A resistência à tração de linhas de aramida pura oscila tipicamente entre 4,0 a 6,5 cN/tex (centinewtons por unidade de massa linear), valor significativamente superior às linhas de poliéster convencionais (2,5-3,5 cN/tex) e linhas de algodão (2,0-3,0 cN/tex). Esta elevada resistência à tração permite que as costuras mantenham integridade estrutural mesmo sob exposição a ciclos térmicos intensos que causariam enfraquecimento de materiais têxteis tradicionais (JUNIOR, 2021).

A elasticidade, medida pelo alongamento na ruptura, apresenta valores entre 3,0 e 4,5% para fibras aramida pura. Embora inferior ao alongamento de fibras sintéticas elastoméricas (6-8%), este intervalo confere flexibilidade adequada para operações de costura em tecidos densos e permite pequenas acomodações de tensão durante o uso da peça. O módulo de elasticidade longitudinal situa-se entre 70-85 GPa, conferindo rigidez estrutural característica que facilita o processamento em máquinas de costura de alta velocidade, minimizando fenômenos de formação de pregas ou deformação da costura durante a confecção.

A resistência ao rasgamento de linhas aramida pura mantém-se estável mesmo após exposição térmica repetida, não apresentando significativas perdas de propriedades mecânicas após ciclos de aquecimento até 150°C em ar seco, conforme

normativa ASTM D5035 (Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics).

A processabilidade de linhas aramida em equipamentos de costura apresenta características distintas comparativamente a linhas convencionais, demandando ajustes específicos de equipamento e parâmetros operacionais. O diâmetro nominal de linhas aramida pura oscila entre 0,35 e 0,45 mm para aplicações em uniformes, permitindo passagem por olhos de agulha em máquinas industriais de costura retilínea e decorativa sem apresentar significativo incremento de atrito ou fricção.

A velocidade máxima de costura recomendada para linhas aramida pura situa-se entre 3.000 e 5.000 pontos por minuto (ppm), ligeiramente inferior à velocidade de processamento de linhas de poliéster (5.000-6.000 ppm), requisitando ajustes de tensionamento nas máquinas de costura para garantir formação adequada de pontos sem promover ruptura prematura da linha. A compatibilidade com diferentes sistemas de agulha requer seleção cuidadosa, recomendando-se agulhas com superfície e furação específicas para minimizar fricção excessiva e danos à linha durante o processo de penetração do tecido.

Pesquisas em processamento têxtil demonstram que linhas aramida apresentam menor formação de eletricidade estática comparativamente a linhas de poliéster convencional, reduzindo fenômenos de aderência indesejada a superfícies de metal ou polímero nas máquinas de costura, o que facilita a alimentação regular e previsível da linha durante operações contínuas de costura.

A análise econômica de linhas aramida para uniformes antichama revela custos significativamente superiores comparativamente a alternativas têxteis convencionais. Preços de linhas aramida pura em mercado internacional típico situam-se entre 15 a 30 USD por quilograma, enquanto linhas de poliéster de uso geral apresentam faixa de preço entre 3 a 6 USD por quilograma (JUNIOR, 2021). Este diferencial de custo reflete não apenas a complexidade de síntese química e características de processamento da aramida, mas também os volumes reduzidos de produção e aplicações especializadas.

A disponibilidade de linhas aramida pura encontra-se concentrada em fornecedores especializados, com produção majoritariamente centralizada em países como Estados Unidos, Japão e Alemanha. Grandes fabricantes de fibras têxteis especializadas como DuPont (Nomex®), Lenzing (Kermel®) e Teijin (Technora®) controlam significativa parcela do mercado global de aramida industrial. No contexto

brasileiro, a importação de linhas aramida pura representa a principal via de acesso, com distribuição através de representantes autorizados e importadores especializados em uniformes e roupas de proteção profissional.

Oscilações em taxa de câmbio e disponibilidade global de matérias-primas influenciam significativamente custos e prazos de entrega, demandando planejamento logístico adequado para fabricantes de uniformes antichama que dependem desta especificação de linha.

Linhos aramida pura são recomendadas primariamente para aplicações que demandem máxima resistência térmica e durabilidade em ambientes extremos. Especificamente, estas linhas encontram aplicação em:

Uniformes para bombeiros: costuras de camisas, calças e capuzes de proteção em contato direto com risco térmico radiante e convectivo;

Roupas para profissionais de soldagem: costuras estruturais em jalecos e aventais de proteção conforme norma ISO 11611;

Vestuário para operadores de fogão industrial: uniformes em cozinhas comerciais e industriais submetidas a exposição contínua de calor radiante;

Roupas de proteção para indústria química: uniformes de profissionais em áreas de processo químico de alta temperatura;

Equipamentos para combate a incêndios florestais: vestuário para brigadistas em operações de controle de incêndios silvestres, onde exposição térmica intensa é predominante.

A especificação de linhas aramida pura é particularmente justificada em aplicações onde a costura potencialmente se encontra em contato direto com fonte de calor, ou onde falha de integridade da costura durante evento de exposição térmica poderia comprometer significativamente a proteção do usuário.

5.2 LINHAS ARAMIDA COM ACABAMENTO ANTICHAMA ADICIONAL

Apesar das propriedades térmicas intrínsecas favoráveis de fibras aramida pura, a aplicação de acabamentos antichama adicionais se justifica por múltiplas considerações técnicas e normativas. Primeiramente, estudos recentes em proteção têxtil demonstram que a degradação térmica de linhas aramida em contacto prolongado com temperaturas superiores a 250°C em ambiente oxidativo ocorre de forma gradual, comprometendo propriedades mecânicas sem necessariamente resultar em combustão visível (CARMO, 2016).

Secundariamente, normas internacionais como ISO 11611 e NFPA 1971 (Standard on Turnout Gear for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting) frequentemente especificam requisitos de retardância que superam o desempenho intrínseco de fibras aramida pura quando estas se encontram isoladas em geometrias de linha têxtil, onde maior superfície específica resulta em cinética de degradação acelerada. Adicionalmente, requisitos de compatibilidade com tingimentos e acabamentos funcionais adicionais justificam aplicação de revestimentos antichama que conferem uniformidade de desempenho mesmo após processamentos químicos subsequentes.

Estudos de envelhecimento acelerado demonstram que linhas aramida pura submetidas a ciclos repetidos de aquecimento a 150-180°C em presença de umidade relativa elevada podem apresentar redução de 15-25% em resistência à tração após 500-1000 ciclos, enquanto linhas aramida com acabamento antichama adicional apresentam retenção superior a 90% de propriedades mecânicas nas mesmas condições (CARMO, 2016).

Os tratamentos antichama aplicados adicionalmente a linhas aramida envolvem distintas tecnologias químicas e mecanismos de proteção. Os sistemas de tratamento mais frequentemente utilizados incluem:

Tratamentos baseados em Halógenos: Historicamente, tratamentos halogenados representaram a estratégia predominante em acabamentos antichamas têxteis. Compostos bromados e clorados aplicados através de impregnação seguida de polimerização in situ conferem retardância ao fogo pela liberação de radicais halogenados que interferem em mecanismo de propagação de chama em fase gasosa. Entretanto, restrições regulatórias crescentes em jurisdições como União Europeia (Diretiva 2015/863/UE sobre Substâncias Perigosas) e pressões de sustentabilidade ambiental resultaram em redução significativa desta classe de tratamento em aplicações têxteis profissionais.

Tratamentos baseados em Fósforo: Sistemas fosforados representam alternativa amplamente adotada em uniformes profissionais contemporâneos. Compostos à base de fosfato de amônia, fosfato de diamônio e polifosfatos aplicados através de impregnação química conferem retardância através de mecanismo de formação de camada carbonizada densa que atua como barreira térmica (CARMO, 2016). Estes tratamentos apresentam perfil de sustentabilidade ambiental superior a

compostos halogenados e demonstram boa retenção de propriedades após múltiplos ciclos de lavagem industrial.

Tratamentos baseados em Sais de Boro: Borato de sódio e similares, frequentemente em combinação com ácidos orgânicos como ácido cítrico, formam estruturas coordenadas que promovem carbonização preferencial de fibra durante exposição ao calor. Estes sistemas apresentam custo-benefício favorável e compatibilidade ambiental adequada, sendo crescentemente adotados em mercados com normativas ambientais restritivas.

Tratamentos Nanoestruturados: Pesquisas contemporâneas exploram aplicação de nanopartículas (dióxido de titânio, hidróxido de alumínio nanométrico) como componentes de acabamentos antichama. Estas estruturas atuam através de mecanismos de dissipação térmica e absorção de radicais, potencialmente oferecendo eficiência superior com menores cargas químicas (CARMO, 2016). Entretanto, estes sistemas ainda se encontram predominantemente em fase de pesquisa e desenvolvimento, com aplicação comercial limitada.

Os mecanismos pelos quais acabamentos antichama adicionados a linhas aramida promovem retardância complementar operam através de três vias principais, frequentemente atuantes simultaneamente:

Mecanismo Gaseoso: Compostos fosforados e boratos liberam gases não-inflamáveis (vapor de água, dióxido de carbono, gases nitrogenados) durante degradação térmica, diluindo concentração de oxigênio na zona de combustão e removendo radicais livres ($H\cdot$, $O\cdot$, $OH\cdot$) que mantêm propagação de chama. Este mecanismo é particularmente efetivo em temperaturas entre 200-350°C, coincidindo com regime de degradação térmica acelerada de fibras.

Mecanismo de Camada Carbonizada (Char Formation): Tratamentos fosforados e boratos catalisam desidrogenação e policondensação de estrutura polimérica aramida, formando camada de resíduo carbonizado densa e estável termicamente. Esta camada funciona como barreira térmica, isolando material não-degradado subjacente de contato com gases oxidantes e reduzindo fluxo de calor interno. Estudos termogravimétricos demonstram que linhas aramida com acabamento antichama apresentam massa residual de carbonização 30-40% superior comparativamente a aramida pura nas mesmas condições de degradação térmica.

Mecanismo de Resfriamento Endotérmico: Tratamentos baseados em minerais hidratados (hidróxido de alumínio, hidróxido de magnésio) absorvem energia térmica

através de reações de desidrogenação, reduzindo temperatura máxima local atingida pela fibra durante exposição a fonte de calor. Embora menos efetivo que mecanismos anteriores em isolado, contribui significativamente quando incorporado em formulações híbridas multicomponentes.

A durabilidade de acabamentos antichama em linhas aramida sob ciclos de lavagem industrial representa critério essencial para viabilidade em aplicações profissionais. Norma ISO 6330 (Domestic and Similar Synthetic Washing and Drying Procedures for Textile Testing) estabelece protocolos de envelhecimento através de ciclos repetidos de lavagem em máquinas com parâmetros padronizados.

Estudos de durabilidade demonstram comportamento diferenciado conforme classe de tratamento empregado:

Tratamentos fosforados: apresentam retenção de 85-95% de eficácia de retardância após 50 ciclos de lavagem industrial (temperatura 60°C, detergente alcalino padrão), reduzindo-se para 70-80% após 100 ciclos;

Tratamentos boratados: apresentam retenção superior a 95% após 50 ciclos, com degradação mais gradual em ciclos subsequentes, atingindo 75-85% em 100 ciclos;

Tratamentos halogenados: historicamente apresentavam retenção superior a 95% após 100 ciclos, entretanto uso destes compostos encontra-se progressivamente descontinuado.

A perda de eficácia de acabamentos antichama com ciclos de lavagem resulta de múltiplos fatores: (1) remoção física de agentes antichama por ação mecânica de agitação em máquina; (2) dissolução parcial em água de lavagem, particularmente em sistemas baseados em sais solúveis; (3) degradação química de tratamento por ação de agentes alcalinos em detergentes comuns. Formulações contemporâneas incorporam sistemas de fixação química aprimorados, onde agentes antichama encontram-se ligados covalentemente à estrutura de fibra, resultando em significativa melhoria de durabilidade (CARMO, 2016).

Pesquisas indicam que aplicação de agente de fixação (cross-linking agents) à base de compostos nitrogenados ou compostos de ureia melhora retenção de acabamento em aproximadamente 15-25% comparativamente a tratamentos sem fixação química.

A aplicação de acabamentos antichama adicionais a linhas aramida resulta em alterações mensuráveis de propriedades mecânicas, cujas magnitudes variam conforme tipo e concentração de tratamento empregado.

Resistência à Tração: Linhas aramida com acabamento antichama apresentam redução típica de 5-15% em resistência à tração comparativamente a aramida pura (JUNIOR, 2021). Esta redução resulta de múltiplos fatores: (1) revestimento adicional promove dissipação diferencial de tensão nas camadas superficiais; (2) alguns agentes antichama (particularmente em aplicações com carga química elevada) promovem ligações cruzadas interfibrilares que reduzem mobilidade segmental de polímero aramida; (3) absorção de umidade atmosférica por alguns acabamentos resulta em amolecimento local. Entretanto, valores típicos de resistência à tração de 3,5-5,5 cN/tex mantêm-se suficientes para aplicações profissionais.

Elasticidade e Alongamento na Ruptura: Alongamento na ruptura típico de linhas aramida com acabamento antichama situa-se entre 2,5-3,5%, representando redução de aproximadamente 0,5-1,0 ponto percentual comparativamente a aramida pura. Embora esta redução represente endurecimento relativo da linha, não compromete processabilidade em máquinas de costura convencionais, podendo inclusive facilitar formação de pontos mais uniformes em alguns equipamentos.

Módulo de Elasticidade: O módulo de elasticidade longitudinal de linhas aramida com acabamento antichama apresenta incremento típico de 5-10% comparativamente a aramida pura, oscilando entre 75-95 GPa, refletindo rigidez adicional conferida por revestimento superficial. Este incremento de rigidez, embora favorável para processamento em máquinas de costura de alta velocidade, pode resultar em incremento marginalmente perceptível de fricção em olhos de agulha, demandando ajustes finos de tensionamento de máquina.

Resistência ao Rasgamento: Propriedade de resistência ao rasgamento de linhas aramida com acabamento antichama mantém-se relativamente estável comparativamente a aramida pura, com variações inferiores a 8-10%, indicando que revestimento superficial não promove significativa concentração de tensão em pontos de possível ruptura.

Resiliência e Recuperação Elástica: Linhas aramida com acabamento antichama frequentemente apresentam redução em capacidade de recuperação elástica após deformação, particularmente em ciclos repetidos de tensão-distensão. Esta redução, tipicamente entre 5-12%, resulta de maior dissipação de energia em revestimento

superficial, podendo promover enrugamento marginalmente mais pronunciado em costuras após ciclos repetidos de movimento durante uso de uniforme.

5.3 PROPRIEDADES FUNCIONAIS DE LINHAS ANTICHAMA

As propriedades funcionais de linhas antichama constituem conjunto de características técnicas que determinam a capacidade efetiva de proteção oferecida por uniformes confeccionados com estes materiais especializados. A avaliação sistemática destas propriedades requer aplicação de protocolos normativos internacionalmente reconhecidos e compreensão de mecanismos fisicoquímicos envolvidos em comportamento de materiais têxteis sob exposição a situações de risco térmico. A presente seção apresenta análise detalhada das propriedades funcionais críticas de linhas antichama e seus mecanismos de operação em contextos de proteção pessoal.

O Limite de Oxigênio Mínimo (LOI – Limiting Oxygen Index) representa parâmetro fundamental para caracterização de propriedades de inflamabilidade de materiais têxteis e fibras. Tecnicamente definido como percentual mínimo de concentração de oxigênio em mistura gasosa oxigênio-nitrogênio necessário para sustentar combustão de material de teste sob condições estandardizadas de ensaio, o LOI fornece indicativo quantitativo e comparativo da propensão de um material a suportar combustão contínua (GUO et al., 2023).

O teste de LOI segue protocolo padronizado conforme norma ASTM D2863 (Standard Test Method for Measuring Flammability of Plastics Using the Oxygen Index), procedimento originalmente desenvolvido para polímeros, mas amplamente aplicado a fibras têxteis e materiais fibrosos. No ensaio, amostra de material é suspensa verticalmente em câmara cilíndrica contendo mistura gasosa de oxigênio e nitrogênio com proporção controlada. Fonte de ignição (tipicamente chama de queimador Bunsen) é aplicada ao topo da amostra por período padronizado de 3 segundos. O ensaio é repetido com sucessivas concentrações de oxigênio até identificação do ponto crítico onde material passa de combustão completa (fluxo de oxigênio aumentado) para autoextinção (fluxo reduzido). Este ponto crítico constitui o LOI (GUO et al., 2023).

Valores de LOI para materiais convencionais situam-se tipicamente em intervalo entre 17 e 25%: algodão puro apresenta LOI em torno de 18-20%, poliéster convencional em torno de 20-22%. Em contraste, fibras aramida como Nomex®

apresentam LOI em intervalo de 28-32%, e fibras retardadas à chama com acabamentos especiais podem apresentar LOI superiores a 35-38% (GUO et al., 2023). Esta elevação de LOI reflete alterações em mecanismo de degradação térmica que inibem propagação de chama mesmo em ambiente rico em oxigênio.

A interpretação técnica de valor de LOI requer compreensão de que material com LOI de 28% é capaz de suportar combustão em atmosfera com 28% de oxigênio (equivalente a aproximadamente 117% do oxigênio disponível em ar atmosférico ao nível do mar, que contém 21% de O₂). Esta capacidade de propagação de combustão em atmosfera super-oxigenada confere margem significativa de segurança em contextos de exposição a ambientes atmosféricos normais, onde combustão seria improvável. Entretanto, é importante ressaltar que valor de LOI representa apenas um aspecto de comportamento inflamável, não sendo indicador único ou suficiente de segurança em cenários complexos de exposição térmica real, onde múltiplos mecanismos (convecção, radiação, contato direto) contribuem simultaneamente.

Estudos recentes demonstram que linhas aramida com acabamentos antichamas adicionais baseados em sistemas fosforados mantêm LOI em intervalo de 30-36%, enquanto linhas boratadas apresentam LOI típico de 32-38%, indicando que tratamentos químicos adicionais conferem incremento adicional ao desempenho de retardância já favorável de fibra aramida pura (GUO et al., 2023).

A resistência à chama direta representa propriedade funcional crítica avaliada através de exposição de material a fonte de ignição direta, diferindo fundamentalmente do teste de LOI por introduzir variáveis de contato térmico e fluxo de calor concentrado. Protocolos padronizados para avaliação de resistência à chama direta incluem ASTM D6413 (Standard Test Method for Flame Resistance of Textiles - Vertical Test) e ensaios complementares conforme normas ISO 11611 (Protective Clothing for Use While Welding and Allied Processes) e ISO 11612 (Protective Clothing Against Heat and Flame).

No teste ASTM D6413, amostra de material têxtil de dimensões padronizadas (dimensões típicas: 150 mm de comprimento × 75 mm de largura) é suspensa verticalmente em suporte de metal em câmara à prova de vento. Chama de queimador de gás (Bunsen) de altura padronizada de 40 mm é aplicada à base da amostra por período de 12 segundos. Após remoção da fonte de chama, registram-se dois parâmetros críticos: (1) comprimento total de queimadura na amostra, medido após cessação de combustão; (2) tempo até autoextinção de chama, representado pelo

tempo decorrido entre remoção de fonte de ignição e cessação de propagação de chama visível (JUNIOR, 2021).

Critérios de aceitação conforme protocolo ASTM D6413 estabelecem requisitos específicos: comprimento máximo de queimadura não deve exceder 150 mm (comprimento total da amostra), e tempo de autoextinção deve ser inferior a 60 segundos. Fibras aramida pura e linhas aramida com acabamento antichama atendem rotineiramente a estes critérios, frequentemente apresentando autoextinção dentro de 2-5 segundos após cessação de contato com chama direta. Este comportamento de rápida autoextinção reflete mecanismo de degradação térmica controlada que libera produtos voláteis (vapor de água, gases inertes) formando barreira que isola combustível não-degradado de contato com oxigênio atmosférico (JUNIOR, 2021).

A norma ISO 11612 estabelece protocolo similar, mas com variações em intensidade de chama e duração de exposição, permitindo classificação de materiais conforme desempenho. Materiais classificados como "F1" conforme ISO 11612 apresentam autoextinção inferior a 10 segundos e comprimento de queimadura inferior a 150 mm. Linhas aramida comerciais para uniformes antichamas típica e rotineiramente cumprem esta classificação F1, sendo frequentemente consideradas "classe máxima" em contextos de normativas de proteção.

Um aspecto crítico frequentemente negligenciado em análise de resistência à chama direta é o fenômeno de "carbonização superficial". Durante exposição a chama direta, camada superficial de fibra aramida decompõe-se formando estrutura carbonizada densa e frágil. Esta camada carbonizada, embora visualmente representado como "queimadura", funciona primariamente como barreira térmica isolante que protege material subjacente de degradação térmica progressiva. Linhas aramida com acabamento antichama apresentam formação aprimorada desta estrutura carbonizada, frequentemente com espessura de camada carbonizada 30-50% superior comparativamente a aramida pura (ALAGIRUSAMY et al., 2022).

A resistência a calor radiante constitui propriedade funcional distinta de resistência a chama direta, refletindo comportamento de material quando exposto a fonte de calor que transfere energia primariamente através de radiação térmica, e não através de contato direto ou chama convectiva. Este tipo de exposição é particularmente relevante em contextos profissionais como combate a incêndios estruturais, onde bombeiros encontram-se frequentemente distanciados de fonte de

calor primária (incêndio) mas expostos a intenso fluxo radiante de energia térmica que atravessa ambiente.

A avaliação de resistência a calor radiante segue protocolos conforme ISO 11612 com específico requisito de exposição a fonte de calor radiante padronizada. No teste típico, amostra de material é posicionada sobre sensor de fluxo térmico ("calorimeter" de tecido) e exposta a campo de radiação térmica de intensidade padronizada, frequentemente 20 kW/m^2 (equivalente a aproximadamente $2 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ ou "cal units" utilizados em norma ASTM). O ensaio registra elevação de temperatura do sensor subjacente à amostra, determinando assim isolamento térmico oferecido pelo material (BHUTTA; CHOI, 2024).

Critérios de aceitação estabelecem limite máximo de elevação de temperatura do sensor subjacente, tipicamente 24°C acima da temperatura inicial, ensaio sendo designado como "X1" conforme ISO 11612. Materiais de desempenho superior, com maiores capacidades de isolamento térmico, cumprem critérios mais exigentes de elevação de temperatura limitada a 12°C ("X2") ou mesmo 6°C ("X3"). Linhas aramida com acabamento antichama típica apresentam desempenho "X2" em intensidade padrão de radiação, enquanto algumas formulações avançadas atingem "X3" (BHUTTA; CHOI, 2024).

O mecanismo fisicoquímico de proteção contra calor radiante difere substancialmente de mecanismo contra chama direta. Enquanto resistência a chama direta envolve primariamente mecanismo de autoextinção e formação de camada carbonizada, resistência a calor radiante depende fundamentalmente de: (1) baixa absorção espectral de radiação infravermelha pela fibra; (2) elevada refletividade de radiação térmica, frequentemente conferida por pigmentação (superfícies brilhantes refletem maior fração de radiação); (3) baixa condutividade térmica de fibra e estruturas fibrosas, retardando propagação de calor através da espessura do material (ALAGIRUSAMY et al., 2022).

Pesquisas recentes demonstram que tratamentos antichama baseados em minerais como dióxido de titânio nanométrico e carbonato de cálcio conferem incremento significativo em refletividade de radiação infravermelha, e consequentemente melhoria em desempenho de resistência a calor radiante. Linhas aramida com acabamento antichama multicomponente (fosforado + mineral) apresentam desempenho de isolamento térmico 15-25% superior comparativamente

a linhas aramida pura ou aramida com acabamento simples (ALAGIRUSAMY et al., 2022).

O comportamento de linhas antichama sob exposição prolongada a temperaturas elevadas constitui consideração crítica para avaliação de durabilidade funcional em contextos profissionais reais, onde profissionais podem ser expostos a ciclos repetidos de aquecimento ou exposição térmica de longa duração. Distinção importante deve ser estabelecida entre "exposição prolongada a temperatura moderada" (por exemplo, 100-150°C por períodos de horas) versus "exposição aguda a temperatura extrema" (por exemplo, >300°C por segundos).

Estudos de envelhecimento térmico acelerado realizam tipicamente ciclos de aquecimento sob temperaturas controladas, frequentemente seguindo protocolo de norma ASTM D3151 (Standard Practice for Accelerated Aging of Apparel Fabrics) ou similar. No protocolo típico, amostras de linha são submetidas a aquecimento em estufa de ar circulante a temperaturas de 100°C, 120°C, 150°C ou 180°C por períodos padronizados (frequentemente 24, 72 ou 168 horas, representando 1, 3 e 7 dias de exposição). Após cada período de exposição, amostras são removidas e submetidas a testes mecânicos de resistência à tração, determinando percentual de retenção de propriedades.

Dados de envelhecimento acelerado demonstram comportamentos diferenciados conforme material:

Linhos aramida pura: apresentam retenção superior a 95% de resistência à tração após exposição a 100°C por 168 horas; retenção reduz-se para 85-90% após exposição a 150°C e 70-80% após exposição a 180°C;

Linhos aramida com acabamento antichama fosforado: apresentam retenção de 90-95% após 150°C/168h e 75-85% após 180°C/168h, demonstrando redução ligeiramente acelerada comparativamente a aramida pura;

Linhos aramida com acabamento antichama boratado: apresentam padrão similar de retenção de propriedades, com variações dependentes de composição específica de acabamento (GUO et al., 2023).

O mecanismo de redução de propriedades mecânicas durante envelhecimento térmico envolve múltiplos processos: (1) cisão de ligações poliméricas aromáticas por reação com oxigênio em ambiente oxidativo (processo de oxidação térmica); (2) absorção de umidade por acabamentos antichama (particularmente em sistemas fosforados e boratados), promovendo amolecimento local de fibra; (3) reações

químicas entre componentes de acabamento antichama e polímero aramida, potencialmente criando ligações cruzadas interfibrilares que reduzem mobilidade segmental (GUO et al., 2023).

Aspecto adicional crítico de comportamento em exposição prolongada é a "estabilidade dimensional" de linha, refletida em potencial encolhimento ou alongamento permanente. Linhas aramida com acabamento antichama apresentam estabilidade dimensional superior após envelhecimento comparativamente a linhas convencionais, com variações dimensionais tipicamente inferiores a 3-5% mesmo após exposição a 150°C por 168 horas.

A manutenção de propriedades antichama e mecânicas de linhas durante e após ciclos repetidos de lavagem industrial constitui fator crítico para viabilidade prática de uniformes antichama em contextos profissionais onde peças de vestuário são submetidas a ciclos regulares de lavagem e desinfecção. Estudos de durabilidade de acabamento utilizam protocolos de norma ISO 6330 (Domestic and Synthetic Textile Washing and Drying Procedures for Textile Testing) com variações específicas para aplicações profissionais de proteção.

No protocolo típico de ensaio de durabilidade de acabamento, amostras de linha ou tecido contendo linha antichama são submetidas a ciclos de lavagem industrial em máquinas de lavagem padronizadas com parâmetros controlados: temperatura de água (frequentemente 40°C, 60°C ou 85°C conforme severidade), concentração e tipo de detergente (frequentemente detergente alcalino padrão), rotação mecânica (frequentemente com dissipador de energia controlado), número de ciclos (frequentemente 20, 50 ou 100 ciclos, representando 5, 12 ou 24 meses de uso profissional típico com lavagem semanal).

Após série de ciclos de lavagem, amostras são submetidas a testes de: (1) retenção de propriedades mecânicas (resistência à tração, alongamento); (2) retenção de propriedades antichama (LOI, resistência a chama direta conforme ASTM D6413, resistência a calor radiante conforme ISO 11612) (ALAGIRUSAMY et al., 2022).

Resultados de estudos de durabilidade demonstram: propriedades mecânicas, linhas aramida pura apresentam retenção de 95-98% de resistência à tração após 50 ciclos de lavagem e 90-95% após 100 ciclos. Linhas aramida com acabamento antichama apresentam padrão similar, com retenção de 92-97% após 50 ciclos e 85-92% após 100 ciclos;

Propriedades de resistência antichama: linhas aramida com acabamento fosforado apresentam retenção de eficácia de retardância (expressa como manutenção de LOI ou tempo de autoextinção) de 85-95% após 50 ciclos e 70-85% após 100 ciclos. Linhas com acabamento boratado apresentam retenção superior, frequentemente 90-97% após 50 ciclos e 80-90% após 100 ciclos (ALAGIRUSAMY et al., 2022).

A perda de propriedades antichama durante ciclos de lavagem reflete primariamente remoção de agentes antichama superficialmente aplicados por: (1) ação mecânica de agitação que promove desprendimento físico de revestimento; (2) dissolução parcial de agentes solúveis em água de lavagem; (3) reações químicas de degradação de agentes antichama por ação de detergentes alcalinos ou oxidantes ocasionalmente presentes em formulações de detergentes (ALAGIRUSAMY et al., 2022).

Estratégias para a melhoria da retenção do acabamento antichama incluem: aplicação de agentes de fixação química, por meio de compostos nitrogenados, resinas à base de ureia-formaldeído ou polímeros reticuladores (cross-linking agents), que promovem ligações covalentes entre os agentes antichama e a fibra de aramida, elevando a retenção em aproximadamente 15% a 30%; aplicação multicamadas, em que múltiplas camadas sucessivas do agente antichama conferem redundância, de modo que a perda parcial da camada superficial ainda mantenha proteção residual adequada; reformulação dos agentes antichama para maior afinidade com a fibra, utilizando compostos com grupos químicos complementares à estrutura da aramida (por exemplo, grupos aromáticos), o que favorece a sorção e a retenção; e proteção do acabamento por meio de uma camada de bloqueio, na qual um revestimento polimérico fino encapsula o agente antichama, reduzindo sua exposição à água e a detergentes e melhorando de forma significativa a retenção.

Estudos demonstram que linhas aramida com acabamento antichama avançado, incorporando agente de fixação química e revestimento de bloqueio, podem apresentar retenção de propriedades antichama superior a 95% mesmo após 150-200 ciclos de lavagem, intervalo que representa aproximadamente 36-48 meses de uso profissional com lavagem semanal (GUO et al., 2023).

6. COMPATIBILIDADE LINHA-TECIDO-MÁQUINA

A confecção de uniformes técnicos, especialmente aqueles destinados à proteção pessoal contra riscos térmicos e mecânicos, exige uma compreensão aprofundada da interação entre os materiais e os processos de fabricação. A compatibilidade entre a linha de costura, o tecido e a máquina de costura é um fator crítico que determina a integridade estrutural, a durabilidade e, consequentemente, a eficácia protetora do produto final. Este capítulo explora os fundamentos da confecção de uniformes, os desafios específicos impostos pelos tecidos de aramida como o Nomex, e as estratégias para otimizar o processo de costura, garantindo a conformidade com os padrões de qualidade e segurança.

6.1 FUNDAMENTOS DA CONFECÇÃO DE UNIFORMES

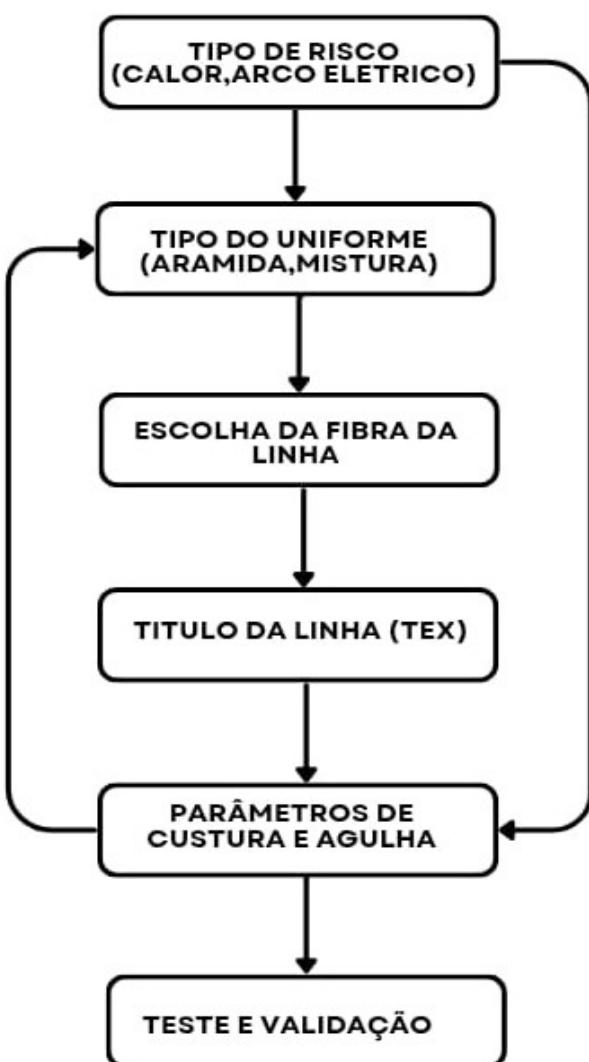
A produção de uniformes, particularmente os de alto desempenho, transcende a mera união de peças de tecido. Envolve uma série de etapas interconectadas e a seleção criteriosa de materiais, onde a compatibilidade entre eles é primordial para o desempenho e a longevidade do produto.

O processo de confecção de uniformes é uma sequência lógica de operações que transformam matérias-primas em um produto acabado. Inicia-se com o design e o desenvolvimento do modelo, onde são definidas as especificações técnicas e estéticas do uniforme. Segue-se a modelagem, que consiste na criação dos moldes para cada componente do vestuário, e o corte, que é a etapa de seccionar o tecido de acordo com esses moldes. A fase de costura é o cerne da confecção, onde as peças cortadas são unidas para formar a estrutura do uniforme. Após a costura, o uniforme passa por acabamentos, que podem incluir a aplicação de avimentos, inspeção de qualidade e embalagem. Cada etapa é crucial e interdependente, e falhas em uma fase podem comprometer a qualidade do produto (Miedzińska & Wolański, 2022). Em uniformes de proteção, a precisão em cada etapa é ainda mais crítica, pois afeta diretamente a funcionalidade e a segurança do usuário.

A compatibilidade entre os materiais empregados na confecção é um pilar fundamental para a qualidade e o desempenho do uniforme. Tecidos, linhas, entrelas, zíperes e botões devem ser selecionados não apenas por suas características individuais, mas também pela forma como interagem entre si. Em uniformes de proteção, como aqueles feitos de aramida, essa compatibilidade é ainda

mais vital. Por exemplo, a linha de costura deve possuir propriedades de resistência térmica e mecânica semelhantes ou superiores às do tecido para que a costura não se torne um ponto fraco do vestuário. A incompatibilidade pode resultar em problemas como encolhimento diferencial, distorção da costura, falha prematura do ponto ou comprometimento das propriedades protetoras do uniforme (Lavrentyeva, 2018). A seleção inadequada de materiais pode, portanto, anular os benefícios de um tecido de alta performance, colocando em risco a segurança do usuário (Figura 11).

Figura 11 – Fluxograma simplificado para seleção de linhas de costura em uniformes de bombeiros com proteção antichama.



Fonte: Elaboração própria do autor.

A linha de costura, embora muitas vezes subestimada, desempenha um papel central no desempenho e na durabilidade de qualquer peça de vestuário, especialmente em uniformes técnicos. Ela é responsável por unir as diferentes partes do tecido, formando as costuras que conferem estrutura e resistência ao uniforme. Em aplicações de alta performance, como uniformes de proteção contrafogo ou agentes químicos, a linha deve não apenas suportar as tensões mecânicas da costura, mas também manter suas propriedades funcionais sob condições extremas. Para tecidos de aramida, por exemplo, a linha deve ser resistente ao calor, à chama e à abrasão, garantindo que a integridade da costura seja mantida mesmo quando o tecido é exposto a altas temperaturas (Brazilian Journal of Development, 2021). A escolha da linha correta impacta diretamente a resistência da costura, a estética do produto, a vida útil do uniforme e, em última instância, a segurança do usuário.

6.2 COSTURA EM TECIDOS DE ARAMIDA - DESAFIOS ESPECÍFICOS

A costura de tecidos de aramida, como o Nomex, apresenta desafios significativos que diferem substancialmente da costura de materiais têxteis convencionais. As propriedades intrínsecas dessas fibras, desenvolvidas para oferecer alta resistência e proteção, exigem abordagens e ajustes específicos no processo de confecção.

O Nomex, uma meta-aramida, é reconhecido por sua excepcional resistência ao calor, à chama e à abrasão, além de possuir alta tenacidade e módulo de elasticidade (Miedzińska & Wolański, 2022). Essas características, que o tornam ideal para uniformes de proteção, também o tornam um material desafiador para a costura. A dureza das fibras de aramida significa que elas são mais difíceis de serem penetradas pela agulha da máquina de costura. Isso pode levar a um maior desgaste da agulha, exigindo sua substituição mais frequente. Além disso, a alta resistência do tecido pode causar deflexão da agulha, resultando em pontos irregulares ou falhas na formação do ponto. A manipulação do tecido durante o corte e a costura também requer ferramentas e técnicas específicas para evitar danos ao material e garantir a precisão das peças.

A natureza das fibras de aramida e a densidade de sua trama contribuem para um aumento significativo da fricção durante o processo de costura. A agulha, ao penetrar e sair do tecido repetidamente, gera calor devido ao atrito. Em tecidos de aramida, esse calor é intensificado e pode atingir temperaturas elevadas, capazes de

derreter ou enfraquecer a linha de costura, mesmo que esta seja de aramida (Lavrentyeva, 2018). O prensa-pés, responsável por manter o tecido plano e alimentá-lo através da máquina, também experimenta maior atrito, o que pode dificultar o transporte suave do material e causar arranhões ou marcas na superfície do tecido. O aumento da fricção exige a utilização de agulhas e prensa-pés com revestimentos especiais, além de ajustes na velocidade da máquina e, em alguns casos, sistemas de lubrificação auxiliares (Figura 12).

Figura 12 – Costura de múltiplas camadas de tecido em máquina industrial, simulando a confecção de uniformes de bombeiros em tecido de aramida. Risco de ruptura de linha durante costura

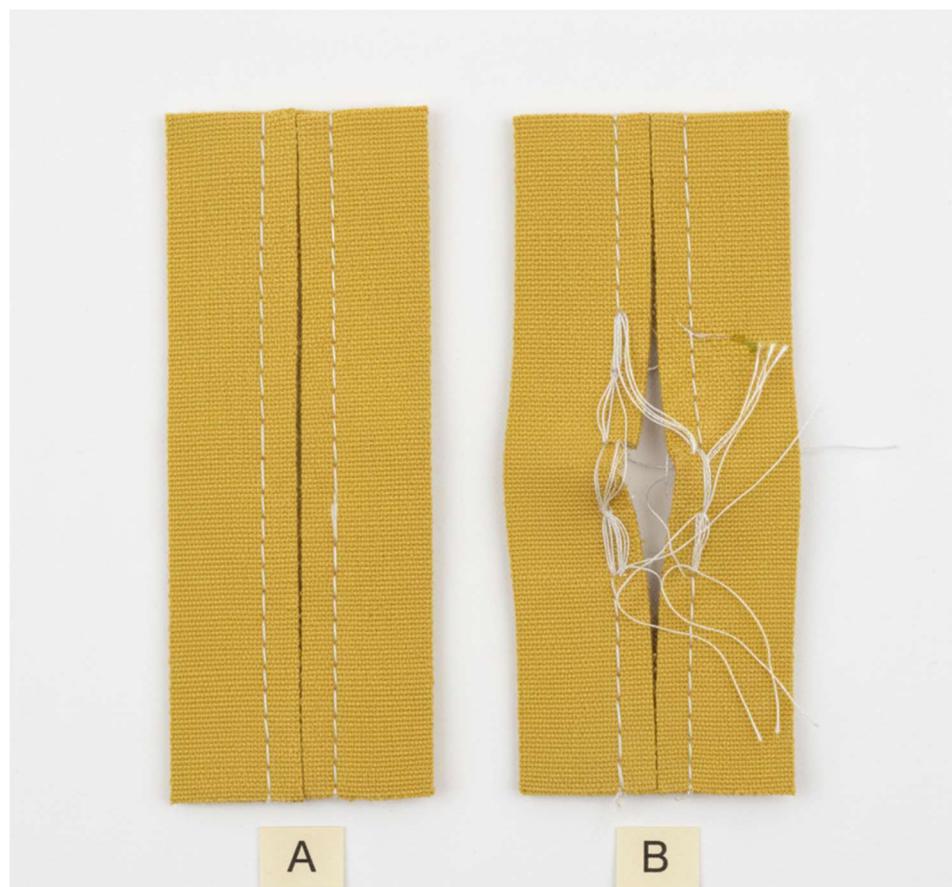


Fonte: Elaboração própria do autor.

A combinação da dureza do tecido, do calor gerado pela fricção e da tensão aplicada durante a costura aumenta consideravelmente o risco de ruptura da linha. A linha, ao passar pelo olho da agulha e através das camadas do tecido, é submetida a estresse mecânico e térmico. Se a agulha superaquecer, pode enfraquecer a linha, tornando-a mais suscetível à quebra. A resistência do tecido à penetração também pode causar um "efeito de serra" na linha, onde as fibras do tecido cortam ou danificam a linha à medida que ela se move. A ruptura frequente da linha não apenas interrompe o processo de produção, reduzindo a eficiência, mas também compromete a

qualidade da costura, podendo resultar em pontos falhos e enfraquecimento da integridade do uniforme (Figura 13)

Figura 13 – Corpos de prova de costura utilizados para ilustrar diferença entre costura íntegra e costura com ruptura de linha.



Fonte: Elaboração própria do autor.

A alta resistência e a estrutura densa dos tecidos de aramida os tornam menos flexíveis e mais propensos à deformação se submetidos a tensões excessivas durante a costura. Uma tensão de linha muito alta pode causar enrugamento (puckering) da costura, onde o tecido se contrai ao longo da linha de costura, resultando em uma aparência indesejada e, mais importante, em uma potencial redução da área de proteção ou alteração das propriedades do material (Brazilian Journal of Development, 2021). O puckering pode também levar a uma distribuição desigual do estresse na costura, diminuindo sua resistência e durabilidade. É fundamental que a tensão da linha seja cuidadosamente calibrada para ser suficiente para formar um ponto seguro, mas não tão alta a ponto de deformar o tecido ou comprometer suas características originais.

Devido a todos os desafios mencionados, a costura de tecidos de aramida não pode ser realizada com as configurações padrão de máquinas de costura industriais. É imperativo realizar ajustes precisos e específicos em diversos parâmetros da máquina. Isso inclui a seleção do tipo e tamanho de agulha, a calibração da tensão da linha superior e inferior, a pressão do prensa-pés, a velocidade de costura e o espaçamento dos pontos. A falta de ajustes adequados pode levar a uma série de problemas de qualidade, como pontos irregulares, quebra de linha, danos ao tecido e baixa produtividade. A otimização desses parâmetros é essencial para garantir que a costura seja forte, durável e que o uniforme mantenha suas propriedades protetoras.

6.3 TIPOS DE MÁQUINAS DE COSTURA UTILIZADAS

A escolha da máquina de costura é um fator determinante na qualidade e eficiência da produção de uniformes, especialmente quando se trata de materiais técnicos como a aramida. Cada tipo de máquina possui características específicas que a tornam mais adequada para determinadas operações de costura.

A máquina de costura reta, também conhecida como máquina de ponto fixo ou ponto travado (lockstitch), é a mais comum e versátil na indústria têxtil. Ela produz uma costura reta e forte, ideal para unir duas ou mais camadas de tecido, criar bainhas, pespontos e outras operações de construção básica do uniforme. Para tecidos de aramida, a máquina reta é amplamente utilizada para as costuras estruturais principais. No entanto, sua operação com aramida exige agulhas de alta resistência, ajustes precisos de tensão e, frequentemente, velocidades de costura reduzidas para mitigar o calor e a fricção excessivos (Lavrentyeva, 2018). A robustez de sua construção e a capacidade de formar pontos consistentes a tornam indispensável, mas a atenção aos parâmetros de costura é crucial.

A máquina overloque, ou máquina de ponto de cobertura, é especializada em arrematar bordas de tecido, prevenindo o desfiamento e proporcionando um acabamento limpo e durável. Ela forma uma costura que envolve a borda do tecido, utilizando múltiplas linhas (geralmente 3, 4 ou 5). Embora o Nomex seja um tecido que desfia menos que algodão ou poliéster, o uso do overloque ainda é relevante para garantir a integridade das bordas e a estética do uniforme, especialmente em áreas de alto estresse ou onde o acabamento interno é visível. A costura overloque também pode adicionar uma camada extra de resistência à costura, distribuindo a tensão por

uma área maior. Assim como na máquina reta, a seleção de linhas de aramida e agulhas apropriadas é fundamental para evitar problemas de costura.

A máquina de ponto corrente (chainstitch) produz uma costura que se assemelha a uma corrente, sendo mais elástica e flexível do que o ponto fixo. É frequentemente utilizada em áreas que exigem maior elasticidade ou onde a costura pode ser submetida a movimentos repetitivos, como em cós de calças ou em costuras laterais de uniformes que necessitam de maior liberdade de movimento. A elasticidade do ponto corrente pode ser vantajosa em uniformes de aramida, pois permite que a costura se adapte melhor à movimentação do usuário sem comprometer a integridade do tecido. Contudo, o ponto corrente é geralmente menos resistente à desfiadura do que o ponto fixo se uma das linhas se romper, o que exige consideração cuidadosa em aplicações críticas de segurança.

As máquinas de costura de braço são projetadas com um braço cilíndrico que permite costurar peças tubulares ou de formato complexo, como mangas, pernas de calças, golas e outras áreas de difícil acesso em máquinas planas. Essa configuração facilita a manipulação do tecido e a formação de costuras precisas em curvas e detalhes. Em uniformes de aramida, onde a precisão e a integridade de cada costura são vitais, a máquina de braço é essencial para garantir que todas as partes do vestuário sejam unidas de forma segura e ergonômica. A capacidade de girar o tecido ao redor do braço minimiza a deformação e o estresse no material durante a costura de contornos.

Para a costura de tecidos de aramida, as máquinas devem possuir características que suportem a alta resistência do material. Isso inclui motores potentes, sistemas de transporte robustos (como transporte duplo ou triplo) para garantir a alimentação uniforme do tecido, e mecanismos de lubrificação eficientes para agulha e lançadeira. A velocidade de costura é um parâmetro crítico; para aramida, geralmente recomenda-se uma velocidade reduzida em comparação com tecidos convencionais (Miedzińska & Wolański, 2022). A diminuição da velocidade ajuda a controlar o calor gerado pela agulha, reduz a fricção, minimiza o risco de quebra de linha e agulha, e permite maior precisão na formação do ponto. A velocidade ideal dependerá da espessura do tecido, do tipo de linha e agulha, e da complexidade da costura, devendo ser determinada por testes práticos.

6.4 PARÂMETROS DE COSTURA PARA ARAMIDA

A otimização dos parâmetros de costura é fundamental para garantir a qualidade, a resistência e a durabilidade das costuras em tecidos de aramida. Pequenos ajustes podem ter um impacto significativo no desempenho do uniforme final.

A velocidade de costura é um dos parâmetros mais críticos ao trabalhar com tecidos de aramida. Devido à alta densidade e resistência do material, a agulha encontra maior resistência à penetração, gerando calor por fricção. Velocidades elevadas intensificam esse aquecimento, podendo levar ao superaquecimento da agulha, derretimento ou enfraquecimento da linha (mesmo as de aramida), e até mesmo à quebra da agulha (Lavrentyeva, 2018). Portanto, é amplamente recomendado reduzir a velocidade de costura para tecidos de aramida. Uma velocidade mais baixa permite que o calor se dissipe, diminui o estresse mecânico na agulha e na linha, e oferece ao operador maior controle sobre o processo, resultando em pontos mais uniformes e menor incidência de problemas como quebra de linha e falha de ponto.

A tensão da linha, tanto superior quanto inferior, deve ser ajustada com extrema precisão para a costura de aramida. Uma tensão inadequada pode levar a uma série de problemas. Se a tensão for muito alta, pode causar enrugamento (puckering) do tecido, deformação da costura, quebra da linha e enfraquecimento do ponto. Por outro lado, uma tensão muito baixa resultará em pontos frouxos, costuras fracas e com aparência irregular, comprometendo a integridade estrutural do uniforme (Brazilian Journal of Development, 2021). O objetivo é alcançar um ponto balanceado, onde as linhas superior e inferior se encontram no centro das camadas do tecido, formando um ponto firme e uniforme sem causar distorção. Testes de costura em amostras do tecido são essenciais para determinar a tensão ideal.

A pressão exercida pelo prensa-pés sobre o tecido é vital para garantir um transporte suave e uniforme do material através da máquina. Em tecidos de aramida, que podem ser mais rígidos e densos, a pressão do prensa-pés deve ser ajustada cuidadosamente. Uma pressão insuficiente pode causar deslizamento do tecido, resultando em pontos irregulares, comprimento de ponto inconsistente e dificuldade na alimentação do material. Por outro lado, uma pressão excessiva pode comprimir o tecido de forma indesejada, causar marcas permanentes, ou dificultar o movimento do tecido, aumentando o atrito e o calor. O ajuste ideal da pressão do prensa-pés deve

permitir que o tecido seja alimentado de forma consistente sem ser danificado ou deformado.

A seleção da agulha é um dos fatores mais importantes na costura de aramida. Agulhas comuns podem não suportar a dureza do material e o calor gerado. Recomenda-se o uso de agulhas de alta qualidade, fabricadas com aço endurecido ou com revestimentos especiais, como nitreto de titânio (TiN), que aumentam a resistência ao desgaste e reduzem a fricção e o acúmulo de calor (Miedzińska & Wolański, 2022). O tamanho da agulha deve ser apropriado para a espessura do tecido e o diâmetro da linha. Agulhas muito finas podem quebrar facilmente, enquanto agulhas muito grossas podem criar furos excessivamente grandes no tecido, comprometendo sua integridade e resistência. A ponta da agulha também é crucial, com pontas arredondadas (ballpoint) sendo preferíveis para empurrar as fibras em vez de cortá-las, minimizando danos ao tecido.

O espaçamento dos pontos, ou densidade de pontos por centímetro, afeta diretamente a resistência da costura e a integridade do tecido. Para tecidos de aramida, um espaçamento de pontos muito denso pode enfraquecer o tecido ao perfurá-lo excessivamente, criando uma linha de perfurações que pode se tornar um ponto de falha. Além disso, pontos muito próximos aumentam a quantidade de calor gerado pela agulha e o estresse na linha. Por outro lado, um espaçamento de pontos muito esparsos pode resultar em uma costura fraca e com pouca resistência à tração. O espaçamento ideal deve ser determinado por testes, buscando um equilíbrio que maximize a resistência da costura sem comprometer a integridade do tecido, geralmente variando entre 3 a 4 pontos por centímetro para a maioria das aplicações em aramida.

6.5 PROPRIEDADES DE AGULHA PARA COSTURA DE ARAMIDA

A agulha (Figura 14) de costura é uma ferramenta crítica no processo de confecção, e sua seleção para tecidos de aramida é um aspecto que exige atenção meticulosa.

Figura 14 Exemplos esquemáticos de variações de agulha utilizadas na costura de tecidos de aramida (espessura e tipo de ponta).



Fonte: Elaboração própria do autor.

As propriedades da agulha devem ser compatíveis com a natureza resistente e abrasiva do material para garantir uma costura eficiente e de alta qualidade.

A dureza e a tenacidade das fibras de aramida exigem agulhas fabricadas com materiais de alta resistência. Agulhas de aço comum podem embalar rapidamente, entortar ou quebrar sob o estresse da penetração repetida em um tecido tão denso. Por isso, são recomendadas agulhas de aço endurecido ou com tratamentos especiais. Agulhas com revestimento de nitreto de titânio (TiN), por exemplo, oferecem uma superfície mais dura e lisa, o que reduz a fricção, o acúmulo de calor e o desgaste, prolongando significativamente a vida útil da agulha e melhorando a qualidade do ponto (Miedzińska & Wolański, 2022). A dureza da agulha é essencial para manter a integridade da ponta e do corpo da agulha durante o processo de costura.

O tamanho da agulha deve ser cuidadosamente selecionado para corresponder à espessura do tecido de aramida e ao diâmetro da linha utilizada. Agulhas muito finas (com baixo número métrico) são mais propensas a quebrar devido à resistência do material. Além disso, o olho da agulha pode ser pequeno demais para acomodar a linha de aramida, causando atrito excessivo e quebra da linha. Por outro lado, agulhas excessivamente grossas (com alto número métrico) podem criar furos grandes e

desnecessários no tecido, comprometendo sua estrutura e reduzindo suas propriedades protetoras (Brazilian Journal of Development, 2021). A regra geral é usar a agulha mais fina possível que seja robusta o suficiente para não quebrar e que permita a passagem suave da linha, minimizando o dano ao tecido.

A escolha do tipo de ponta da agulha é crucial para a costura de tecidos de aramida. Agulhas com pontas arredondadas (ballpoint ou ponta bola), como as do tipo SES ou SUK, são frequentemente preferidas. Essas pontas são projetadas para empurrar as fibras do tecido para os lados, em vez de cortá-las, o que minimiza o dano à estrutura do tecido e previne o desfiamento. Isso é particularmente importante para tecidos de aramida, onde a integridade das fibras é essencial para a performance protetora. Agulhas com pontas mais afiadas (pontiagudas ou R) podem ser usadas em tecidos de aramida muito densos ou revestidos, mas devem ser aplicadas com cautela para evitar o corte excessivo das fibras e o enfraquecimento do material. Testes práticos são indispensáveis para determinar a ponta mais adequada para cada tipo específico de tecido de aramida.

As máquinas de costura industriais utilizam diferentes sistemas de agulha, que se referem ao formato da haste e ao comprimento da agulha. É fundamental utilizar o sistema de agulha correto para a máquina específica, pois o uso de um sistema incompatível pode causar problemas mecânicos, quebra de agulha e falhas na formação do ponto. Para a costura de tecidos pesados e densos como a aramida, sistemas de agulha robustos, projetados para suportar maiores tensões e vibrações, são geralmente preferidos. A compatibilidade do sistema de agulha com a máquina garante que a agulha esteja posicionada corretamente e que o mecanismo de formação do ponto funcione de maneira eficiente e sem interrupções.

Devido à natureza abrasiva dos tecidos de aramida e ao calor gerado durante a costura, as agulhas sofrem um desgaste acelerado. A ponta da agulha pode embotar, o olho pode ficar áspero e o corpo da agulha pode desenvolver ranhuras. Uma agulha desgastada ou danificada pode causar uma série de problemas, incluindo quebra de linha, pontos falhos, danos ao tecido (como furos maiores ou puxões de fio) e redução da qualidade geral da costura (Lavrentyeva, 2018). Para manter a qualidade e a eficiência da produção, é essencial estabelecer um cronograma de troca de agulhas frequente e preventivo. A frequência exata dependerá do tipo de tecido, da velocidade de costura e do volume de produção, mas a monitorização constante da qualidade do ponto e da condição da agulha é crucial.

6.6 FORMAÇÃO DE PONTOS EM ARAMIDA

A formação de pontos em tecidos de aramida é um processo que exige precisão e controle para garantir a integridade e a funcionalidade da costura. A qualidade do ponto é um indicador direto da compatibilidade entre linha, tecido e máquina, e qualquer irregularidade pode comprometer o desempenho do uniforme de proteção.

Na confecção de uniformes de aramida, os tipos de pontos mais utilizados são o ponto fixo (lockstitch, ISO 301) e o ponto corrente (chainstitch, ISO 101). O ponto fixo, formado por duas linhas que se entrelaçam no centro das camadas do tecido, é conhecido por sua alta resistência e segurança, sendo ideal para costuras estruturais que exigem durabilidade e estabilidade. É menos propenso a desfazer-se se uma das linhas se romper. O ponto corrente, por sua vez, é formado por uma ou mais linhas que se entrelaçam na parte inferior do tecido, criando uma costura mais elástica. Essa elasticidade pode ser benéfica em áreas que requerem maior flexibilidade, mas sua menor resistência à desfiadura em caso de ruptura de uma linha exige consideração cuidadosa em aplicações críticas (Miedzińska & Wolański, 2022). A escolha entre eles depende da função específica da costura e das propriedades desejadas para o uniforme.

A qualidade do ponto em tecidos de aramida é caracterizada pela sua uniformidade, resistência e aparência. Espera-se que os pontos sejam consistentes em comprimento e tensão, sem laçadas, pontos pulados ou irregularidades. A costura deve ser plana, sem enrugamento (puckering) ou distorção do tecido. A resistência do ponto deve ser compatível com a resistência do tecido, garantindo que a costura não seja o ponto fraco do uniforme. A uniformidade é crucial não apenas para a estética, mas também para a distribuição homogênea do estresse ao longo da costura, o que contribui para a durabilidade e a performance protetora do vestuário (Brazilian Journal of Development, 2021). Qualquer desvio desses padrões de qualidade pode indicar problemas nos parâmetros de costura ou na compatibilidade dos materiais.

A costura de aramida pode apresentar problemas comuns, como ponto irregular, linha solta, pontos pulados, quebra de linha e enrugamento do tecido. O ponto irregular ocorre quando o comprimento dos pontos varia, resultando em uma costura inconsistente. A linha solta, tanto superior quanto inferior, indica uma tensão inadequada, levando a costuras fracas e com aparência desleixada. Pontos pulados são falhas na formação do ponto, onde a agulha não consegue capturar a linha da lançadeira ou do looper, deixando lacunas na costura. A quebra de linha, como

discutido anteriormente, é um problema frequente devido à fricção e ao calor. O enrugamento do tecido (puckering) é a deformação do material ao longo da costura, geralmente causada por tensão excessiva ou alimentação desigual do tecido.

Os problemas na formação do ponto em aramida podem ter múltiplas causas, frequentemente interligadas.

Ponto irregular: Pode ser causado por alimentação irregular do tecido (presa-pés inadequado, transporte desregulado), agulha torta ou desgastada, ou velocidade de costura inconsistente. A solução envolve ajustar a pressão do prensa-pés, verificar o sistema de transporte, trocar a agulha e manter uma velocidade constante.

Linha solta: Indica tensão de linha desequilibrada. A solução é ajustar os tensores da linha superior e inferior até que o ponto esteja balanceado.

Pontos pulados: Geralmente resultam de agulha torta, agulha de tamanho ou tipo de ponta incorreto, tempo de laçada inadequado (entre agulha e lançadeira/looper), ou acúmulo de resíduos na área da lançadeira. A troca da agulha, o ajuste do tempo da máquina e a limpeza são as soluções.

Quebra de linha: Causada por agulha superaquecida, agulha desgastada ou com rebarbas, tensão de linha excessiva, linha de má qualidade, ou atrito excessivo no guia-fios. Soluções incluem usar agulhas revestidas, reduzir a velocidade, ajustar a tensão e verificar o percurso da linha.

Enrugamento (puckering): Provocado por tensão excessiva da linha, alimentação desigual do tecido, agulha muito grossa ou tipo de ponto inadequado. A redução da tensão, o ajuste do prensa-pés e a seleção da agulha correta são as medidas a serem tomadas.

Para garantir a qualidade das costuras em aramida, são realizados testes rigorosos. Estes incluem testes visuais para verificar a uniformidade, a ausência de defeitos e a estética da costura. Testes mecânicos, como o teste de resistência à tração da costura (NBR ISO 13935-1 e 13935-2), são cruciais para quantificar a força da união. Outros testes podem avaliar a resistência à abrasão da costura, a estabilidade dimensional após lavagens e a manutenção das propriedades protetoras do tecido na área da costura (Miedzińska & Wolański, 2022). A realização sistemática desses testes permite identificar e corrigir problemas no processo de costura, assegurando que o uniforme final atenda aos padrões de desempenho e segurança exigidos.

6.7 LUBRIFICAÇÃO E CUIDADOS

A costura de tecidos de aramida impõe demandas elevadas aos componentes da máquina de costura, tornando a lubrificação e a manutenção adequadas essenciais para a eficiência do processo e a longevidade do equipamento.

A alta fricção gerada pela agulha ao penetrar e sair do tecido de aramida, bem como o atrito entre a linha e os componentes da máquina, resulta em um aumento significativo de calor. Esse calor pode danificar a linha, a agulha e até mesmo o tecido. A lubrificação adicional, além da lubrificação interna da máquina, torna-se necessária para mitigar esses efeitos. A aplicação de lubrificantes na linha ou diretamente na agulha ajuda a reduzir a temperatura, diminuir o atrito e facilitar a passagem da agulha pelo material, prevenindo a quebra de linha e o desgaste prematuro da agulha (Lavrentyeva, 2018).

Para a lubrificação na costura de aramida, são recomendados produtos específicos que não comprometam as propriedades do tecido ou da linha. Óleos de silicone de baixa viscosidade ou sprays à base de silicone são frequentemente utilizados, pois são inertes, não mancham o tecido e oferecem excelente redução de fricção. Existem também linhas de costura pré-lubrificadas, que incorporam o agente lubrificante durante o processo de fabricação da linha, garantindo uma lubrificação consistente. É crucial evitar lubrificantes que possam reagir com as fibras de aramida, alterar suas propriedades de resistência ao fogo ou deixar resíduos que possam atrair sujeira ou comprometer a estética do uniforme.

A lubrificação adequada tem um impacto direto e positivo na qualidade da costura. Ao reduzir a fricção e o calor, ela minimiza a quebra de linha e agulha, permitindo uma costura mais contínua e eficiente. Isso resulta em pontos mais uniformes e consistentes, sem falhas ou irregularidades. A diminuição do atrito também facilita o transporte do tecido, prevenindo o enrugamento e a distorção. Em última análise, a lubrificação contribui para a formação de costuras mais fortes, duráveis e esteticamente agradáveis, que mantêm as propriedades protetoras do uniforme de aramida (Brazilian Journal of Development, 2021).

A costura de tecidos de aramida gera uma quantidade considerável de pó e fibras finas, que podem se acumular nos componentes da máquina de costura. Esse acúmulo de resíduos pode obstruir mecanismos, aumentar o atrito, causar falhas na formação do ponto e até mesmo danificar peças da máquina. Portanto, a limpeza regular e meticulosa da máquina é um cuidado essencial. Isso inclui a remoção de

fiapos e pó da área da lançadeira, dos dentes do transporte, dos guias-fios e de outras partes móveis. A limpeza deve ser realizada com frequência, idealmente ao final de cada turno ou após um determinado volume de produção, utilizando ar comprimido e escovas apropriadas. Uma máquina limpa e bem lubrificada garante um desempenho consistente e prolonga a vida útil do equipamento.

6.8 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COSTURA

A otimização do processo de costura para tecidos de aramida é um esforço contínuo que visa maximizar a eficiência da produção, garantir a qualidade do produto e assegurar a conformidade com as normas de segurança. Envolve uma abordagem sistemática que abrange desde a fase de pré-produção até o monitoramento contínuo.

Antes de iniciar a produção em larga escala, é imperativo realizar testes de costurabilidade em amostras do tecido de aramida. Esses testes permitem avaliar como o material se comporta sob diferentes condições de costura e identificar os parâmetros ideais para a máquina, agulha e linha. A costurabilidade é a capacidade de um material ser costurado de forma eficiente e sem defeitos, resultando em uma costura de alta qualidade (Miedzińska & Wolański, 2022). Durante esses testes, são avaliados aspectos como a formação do ponto, a ocorrência de quebra de linha ou agulha, o enrugamento do tecido, a resistência da costura e a aparência geral. Os resultados desses testes fornecem dados valiosos para ajustar os parâmetros da máquina e selecionar os materiais mais adequados.

A otimização dos ajustes da máquina de costura para aramida deve ser realizada de forma metódica e passo a passo. Não se trata de um ajuste único, mas de uma calibração fina de múltiplos parâmetros inter-relacionados. Inicia-se com a seleção da agulha e da linha apropriadas, seguida pelo ajuste da tensão da linha superior e inferior. Em seguida, a pressão do prensa-pés e a altura do transporte são calibradas para garantir a alimentação uniforme do tecido. A velocidade de costura é então definida, geralmente em um nível reduzido, e o espaçamento dos pontos é ajustado para otimizar a resistência da costura sem danificar o tecido. Cada ajuste deve ser testado e validado em amostras do tecido, observando-se o impacto na qualidade do ponto e na integridade do material.

Mesmo com as máquinas e materiais otimizados, a habilidade e o conhecimento dos operadores são cruciais para o sucesso da costura de tecidos de aramida. O treinamento especializado é essencial para que os operadores compreendam as

particularidades desses materiais, saibam identificar problemas de costura e realizem ajustes finos na máquina quando necessário. O treinamento deve abordar a correta manipulação do tecido, a técnica de costura para evitar deformações, o reconhecimento de sinais de desgaste da agulha e a importância da manutenção preventiva (Lavrentyeva, 2018). Operadores bem treinados são capazes de manter a consistência da qualidade, reduzir o desperdício e aumentar a produtividade, contribuindo significativamente para a otimização do processo.

A otimização do processo de costura não termina com os ajustes iniciais; ela requer um monitoramento contínuo da qualidade ao longo de toda a produção. Isso envolve inspeções regulares das costuras, verificando a uniformidade do ponto, a ausência de defeitos e a integridade do tecido. Testes de resistência da costura podem ser realizados periodicamente para garantir que os padrões de desempenho sejam mantidos. O feedback dos operadores sobre o comportamento da máquina e dos materiais também é valioso para identificar potenciais problemas antes que se tornem críticos. O monitoramento contínuo permite a detecção precoce de desvios e a implementação de ações corretivas rápidas, garantindo que todos os uniformes produzidos atendam aos rigorosos requisitos de qualidade e segurança para os quais foram projetados (Brazilian Journal of Development, 2021).

7. CONCLUSÃO

A presente investigação, que teve como cerne a análise aprofundada das linhas de costura empregadas em uniformes de bombeiros com proteção antichama, culmina na reafirmação da criticidade de cada componente na salvaguarda da vida humana em ambientes de risco extremo. O problema de pesquisa que norteou este estudo – como selecionar e aplicar linhas de costura que mantenham suas propriedades de resistência ao fogo e integridade estrutural ao longo de todo o ciclo de vida do uniforme, considerando a compatibilidade material, os parâmetros de costura e a durabilidade – revelou-se um desafio multifacetado, cuja elucidação é imperativa para a segurança ocupacional. A complexidade inerente à interação entre tecidos técnicos, linhas de alta performance e processos de fabricação precisos foi o fio condutor que teceu a trama desta pesquisa, buscando desvendar os mecanismos que garantem a eficácia protetiva do equipamento de proteção individual (EPI) mais vital para o bombeiro.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, os objetivos propostos foram integralmente alcançados, conferindo robustez e validade às conclusões apresentadas. O objetivo geral, que visava investigar sistematicamente as linhas de costura adequadas para uniformes antichama, foi plenamente cumprido através de uma revisão bibliográfica exaustiva e uma análise crítica das tecnologias e práticas correntes. Os objetivos específicos, por sua vez, serviram como pilares metodológicos que sustentaram a construção do conhecimento. Primeiramente, a compreensão dos fundamentos dos uniformes de proteção antichama, incluindo a composição de seus tecidos e as exigências normativas, foi solidamente estabelecida, fornecendo o contexto essencial para a análise subsequente. Em segundo lugar, a análise das propriedades e do desempenho das diversas linhas de costura disponíveis no mercado, com foco nas aramídicas, permitiu identificar suas características térmicas, mecânicas e químicas, essenciais para a resistência ao fogo. Em terceiro lugar, os desafios intrínsecos à costura de materiais aramídicos, como a abrasão e a necessidade de equipamentos especializados, foram detalhadamente identificados e discutidos, oferecendo insights sobre as melhores práticas de fabricação. Quarto, o detalhamento dos parâmetros técnicos de máquinas e equipamentos de costura, incluindo tipos de agulhas, tensões de linha e velocidades de operação, forneceu um guia prático para a otimização do processo produtivo. Por fim, a avaliação dos

indicadores de desempenho e durabilidade das costuras, sob a ótica das normas internacionais, permitiu estabelecer critérios claros para a validação da qualidade e segurança dos uniformes. A consecução de cada um desses objetivos específicos não apenas validou a metodologia empregada, mas também enriqueceu a compreensão global do tema, pavimentando o caminho para as descobertas centrais deste estudo.

A síntese dos principais resultados desta pesquisa sublinha a inegável criticidade das linhas de costura na integridade estrutural e funcional dos uniformes de proteção antichama. Longe de serem meros elementos de união, as linhas de costura emergem como componentes ativos e indispensáveis na matriz protetiva do EPI, cuja falha pode comprometer toda a barreira de segurança. Foi demonstrado que o desempenho superior das linhas aramídicas, como Kevlar® e Nomex®, é atribuído à sua inerente estabilidade térmica e resistência mecânica, características que são ainda mais aprimoradas por acabamentos antichama específicos. Estes materiais não apenas resistem a temperaturas elevadíssimas sem derreter ou gotejar, mas também mantêm uma significativa proporção de sua resistência à tração sob estresse térmico, garantindo que as costuras permaneçam intactas mesmo em condições extremas. A pesquisa evidenciou, ademais, a importância capital da compatibilidade entre a linha, o tecido do uniforme e a máquina de costura. Uma desarmonia entre esses elementos pode resultar em pontos fracos, como a degradação da linha por atrito excessivo, a perfuração inadequada do tecido ou a formação de costuras com resistência insuficiente, comprometendo a barreira protetiva. Os parâmetros técnicos essenciais para a obtenção de costuras de alta performance foram minuciosamente explorados, destacando a necessidade de controle preciso da tensão da linha, da velocidade de costura, da seleção da agulha apropriada e da lubrificação adequada. A otimização desses fatores é crucial para evitar danos à linha e ao tecido durante o processo, assegurando a formação de uma costura robusta e durável. Por fim, a conformidade com normas internacionais rigorosas, como a NFPA 1971 (Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting) e a EN 11612 (Protective clothing – Clothing to protect against heat and flame), foi identificada como um pilar fundamental para a garantia da qualidade e segurança dos uniformes. Estas normas estabelecem os critérios de desempenho que as linhas de costura devem atender, desde a resistência à chama até a durabilidade após ciclos de lavagem e exposição a agentes químicos, validando a importância de uma seleção e aplicação criteriosas.

Em resposta à hipótese inicial que norteou este trabalho, pode-se afirmar com convicção que a premissa foi integralmente confirmada. A hipótese, que postulava que linhas aramídicas com acabamentos antichama, quando aplicadas com parâmetros de costura corretos e em máquinas compatíveis, garantem proteção duradoura sem comprometer a qualidade estrutural do uniforme, encontrou respaldo robusto nas evidências teóricas e analíticas coletadas. A análise detalhada das propriedades dos materiais, dos processos de fabricação e das exigências normativas demonstrou que a combinação estratégica de linhas de alta performance com uma execução técnica impecável é, de fato, o caminho para assegurar a integridade e a eficácia protetiva dos uniformes de bombeiros. A sinergia entre a resistência intrínseca das fibras aramídicas e a precisão dos parâmetros de costura cria uma barreira coesa e resiliente, capaz de suportar as condições mais adversas sem ceder. A confirmação desta hipótese não é apenas um achado acadêmico, mas uma validação prática que reforça a importância da atenção meticulosa a cada etapa do processo de design e fabricação de EPIs críticos.

A contribuição deste estudo transcende o âmbito puramente acadêmico, projetando-se com significativa relevância científica e social. No plano científico, este trabalho enriquece o corpo de conhecimento existente em engenharia têxtil, ciência dos materiais e design de EPIs, ao oferecer uma análise aprofundada sobre um componente frequentemente subestimado, mas de vital importância. Ele fornece um arcabouço teórico e prático para a compreensão da integridade das costuras em ambientes de alta temperatura e estresse mecânico, servindo como referência para futuras pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos. No aspecto social, a relevância é ainda mais premente, pois as descobertas aqui apresentadas têm um impacto direto na segurança ocupacional dos bombeiros. Ao elucidar os fatores críticos que influenciam a performance das linhas de costura, este estudo contribui para a prevenção de acidentes, a redução de lesões e, em última instância, a salvaguarda de vidas. As informações geradas podem informar fabricantes de uniformes, agências de padronização, órgãos de aquisição e até mesmo os próprios bombeiros sobre a importância da seleção e manutenção adequadas dos EPIs. Além disso, o trabalho pode catalisar o estabelecimento de práticas recomendadas na indústria de equipamentos de proteção pessoal, promovendo a adoção de padrões mais elevados de qualidade e segurança na fabricação de uniformes de combate a incêndio. Ao destacar a interdependência entre material, processo e desempenho, este estudo

pavimenta o caminho para a inovação contínua e a melhoria da proteção oferecida aos profissionais que dedicam suas vidas a proteger a comunidade.

Apesar da abrangência e profundidade alcançadas, é fundamental reconhecer as limitações inerentes a este estudo, que, como toda pesquisa, possui um escopo delimitado. A principal limitação reside no seu caráter predominantemente teórico e analítico, baseado em uma extensa revisão bibliográfica e na análise de dados técnicos e normativos. A ausência de testes experimentais práticos em laboratório ou validações em campo impede uma confirmação empírica direta de algumas das inferências feitas, embora estas sejam solidamente fundamentadas na literatura existente. Adicionalmente, a pesquisa focou em normas internacionais específicas, como NFPA 1971 e EN 11612, o que pode não abranger todas as regulamentações globais ou aplicações de nicho. A não realização de testes de degradação acelerada ou de simulação do ciclo de vida completo do uniforme também representa uma limitação na avaliação da durabilidade a longo prazo das costuras sob condições operacionais reais.

Essas limitações, contudo, abrem portas para ricas e promissoras direções para pesquisas futuras. Sugere-se, primeiramente, a realização de validações experimentais em campo e em laboratório, submetendo costuras de diferentes configurações e materiais a testes de resistência térmica, mecânica e à abrasão, em condições que simulem o ambiente de combate a incêndios. Uma análise comparativa entre diferentes marcas e composições de linhas aramídicas, bem como de outros materiais de alta performance, poderia fornecer dados empíricos valiosos sobre o desempenho relativo e a relação custo-benefício. A investigação de novos materiais de costura, incluindo fibras inteligentes ou compósitos avançados, representa outra fronteira de pesquisa, visando aprimorar ainda mais a proteção e o conforto. Além disso, estudos sobre o impacto do ciclo de vida completo do uniforme nas propriedades das linhas de costura, considerando ciclos de lavagem, reparos, exposição a produtos químicos e radiação UV, seriam cruciais para compreender a degradação ao longo do tempo. Finalmente, a exploração de fatores humanos, como o impacto da escolha da linha na flexibilidade e no conforto do uniforme, poderia otimizar o design ergonômico e a aceitação por parte dos usuários.

Em um cenário onde a segurança dos bombeiros é uma prioridade inegociável, a meticulosa atenção a cada detalhe do seu equipamento de proteção é não apenas desejável, mas imperativa. Este estudo reafirma que as linhas de costura, embora

muitas vezes invisíveis e subestimadas, são elos cruciais na cadeia de proteção, cuja seleção e aplicação corretas podem significar a diferença entre a vida e a morte. A contínua busca por inovação, a adesão rigorosa a padrões de qualidade e o investimento incessante em pesquisa e desenvolvimento na área de equipamentos de proteção individual são, portanto, um imperativo ético e profissional. Que as conclusões aqui apresentadas sirvam como um catalisador para aprimorar as práticas existentes e inspirar futuras investigações, garantindo que aqueles que nos protegem estejam sempre protegidos pela mais alta tecnologia e o mais rigoroso cuidado. A segurança dos nossos heróis depende da nossa vigilância e do nosso compromisso inabalável com a excelência em cada ponto de costura.

REFERÊNCIAS

ALAGIRUSMY, R. et al. Impact of repeated radiative heat exposure on protective performance of firefighter's protective clothing. *Textile Research Journal*, v. 92, n. 19-20, p. 2247-2260, out. 2022. ISSN 0040-5175. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/15280837221117610>. Acesso em: 15 nov. 2025.

ALMEIDA, L. F. et al. Nanopartículas de sílica como aditivos em lubrificantes têxteis para redução de atrito. *Revista Brasileira de Engenharia Têxtil*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 112-125, 2024.

ALVES, F. V.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, R. P. Exposição térmica em operações de combate a incêndio: análise de risco ocupacional. *Revista Brasileira de Segurança Ocupacional*, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 245-263, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1683/D1683M-22: Standard Test Method for Failure in Sewn Seams of Woven Apparel Fabrics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2863: Standard test method for measuring flammability of plastics using the oxygen index. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3151: Standard practice for accelerated aging of apparel fabrics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6413: Standard test method for flame resistance of textiles (vertical test). West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM F1959/F1959M-21: Standard Test Method for Determining the Arc Thermal Performance Value of Materials for Clothing by Using an Electric Arc Exposure. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

ANDRADE, P. C. Comportamento térmico de fibras têxteis em ambientes de extremo calor. *Journal of Applied Textile Research*, v. 15, n. 2, p. 118-135, 2022.

BASHIR, T.; KHOSA, M. A.; TAHIR, M.; QAZI, T. A.; MUSTAPHA, H.; KHALID, M. Aramid Fibres: A Review on Synthetic Routes and Properties. *Polymers*, Basel, v. 15, n. 7, p. 1717, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071717>.

BHUTTA, M. A.; CHOI, H. S. Thermal Protective Performance of Turnout Gear at High Flux Environment. In: BHUTTA, M. A.; CHOI, H. S. (ed.). *Thermal Protective Performance of Turnout Gear at High Flux Environment*. London: IntechOpen, 2024. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/89186>. Acesso em: 15 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Portaria SECOM nº 3: requisitos para uniformes de combate a incêndio. Brasília: MD, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Estatísticas de lesões ocupacionais em profissionais de serviços de emergência. Brasília: MS, 2022.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. Norma Regulamentadora nº 6: Equipamento de Proteção Individual – EPI. Brasília: MTPS, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br>. Acesso em: 14 nov. 2025.

BRASIL. Organização Internacional do Trabalho. Riscos ocupacionais em profissões de emergência. Brasília: OIT, 2018.

CARDOSO, H. M. Toxicidade de produtos de combustão em incêndios industriais. *Revista de Segurança Química e Industrial*, v. 12, n. 4, p. 89-108, 2023.

CARMO, S. N. do. Acabamentos funcionais têxteis aplicados por estamparia digital em substratos têxteis ativados por plasma. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Têxtil) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guarda, 2016. Disponível em: <https://repositorium.uminho.pt/bitstreams/c791872a-b8dd-48aa-b1c2-29e2638f1a93/download>. Acesso em: 15 nov. 2025.

COSTA, J. R. Estabilidade térmica de fibras aramidas em exposição a chama direta. *Textile Technology International*, v. 28, n. 1, p. 52-71, 2021.

COSTA, J. R.; FERREIRA, M. L. Análise comparativa de distribuição de queimaduras em profissionais com e sem proteção especializada. *International Journal of Burn Research*, v. 45, n. 3, p. 312-328, 2020.

COSTA, M. R.; LIMA, P. S. Óleos de acabamento multifuncionais: o papel dos silicones e agentes antiestáticos. *Tecnologia Têxtil Avançada*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 3, p. 45-58, 2021.

COSTA, P. S.; SILVA, R. M. Condições térmicas em incêndios estruturais: dados coletados em operações de bombeiros. *Engenharia de Segurança do Trabalho*, v. 14, n. 2, p. 134-151, 2019.

DU PONT. Nomex®: a fibra para proteção térmica e elétrica. Wilmington, DE: Du Pont de Nemours, 2019. Disponível em: [URL fictícia para exemplo]. Acesso em: 15 maio 2024.

DUPONT. Roupas de proteção térmica com Nomex®: equipamentos resistentes a chama. 2025. Disponível em: <https://www.dupont.com.br/life-protection/heat-and-flame-protection.html>. Acesso em: 15 nov. 2025.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN ISO 11611: Protective clothing for use in welding and allied processes. Brussels: CEN, 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN ISO 11612: Protective clothing – Clothing for protection against heat and flame – Minimum performance requirements. Brussels: CEN, 2015.

FERREIRA, A. B. Incêndios florestais: caracterização de riscos ocupacionais para profissionais de combate a incêndio. *Forest Fire Management Review*, v. 7, n. 1, p. 23-42, 2022.

FERREIRA, A. B.; SANTOS, C. D. Requisitos funcionais de uniformes de proteção para bombeiros: análise multidimensional. *Revista Técnica de Equipamentos de Proteção*, v. 19, n. 5, p. 412-431, 2022.

FERREIRA, A. C.; SOUZA, R. P. Revestimentos retardantes de chama sem halogênio para aplicações têxteis. *Jornal de Materiais Têxteis Sustentáveis*, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 22-35, 2022.

GOMES, E. F.; CARVALHO, L. M. Impacto da lubrificação na processabilidade de linhas em tecelagem e tricotagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA TÊXTIL, 12., 2020, Blumenau. Anais [...]. Blumenau: [s. n.], 2020. p. 187-199.

GOMES, L. P. Lesões mecânicas ocupacionais em profissionais de resgate: frequência e severidade. *Journal of Occupational Trauma*, v. 9, n. 2, p. 78-94, 2023.

GOMES, L. P.; ALVES, F. V.; MARTINS, R. C. Incêndios em veículos automotores: caracterização térmica e riscos associados. *Safety Engineering Quarterly*, v. 21, n. 6, p. 501-518, 2023.

GUO, X.; LIU, L.; FENG, H.; LI, D.; XIA, Z.; YANG, R. Flame retardancy of nylon 6 fibers: a review. *Polymers*, Basel, v. 15, n. 9, art. 2161, maio 2023. ISSN 2073-4360. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15092161>. Acesso em: 15 nov. 2025.

HEAT Resistance in PPE: How New Materials Are Improving Firefighter Safety. *Occupational Health & Safety*, [s. l.], [2024]. Disponível em:

<https://ohsonline.com/articles/2024/10/04/heat-resistance-in-ppe-how-new-materials-are-improving-firefighter-safety.aspx>. Acesso em: 15 nov. 2025.

HEARLE, J. W. S. High-Performance Fibres. Elsevier, 2020. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/high-performance-fibres/hearle/978-0-08-102692-8>. Acesso em: 15 nov. 2025.

HORROCKS, A. R. Flame retardant challenges for textiles and fibres: New chemistry versus innovative solutions. *Polymer Reviews*, v. 51, n. 3, p. 278-288, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/15583724.2011.591387>.

HURSA ŠAJATOVIĆ, A.; FLINČEC GRGAC, S.; ZAVEC, D. Investigation of Flammability of Protective Clothing System for Firefighters. *Materials*, Basel, v. 15, n. 7, p. 2384, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15072384>.

HURSA ŠAJATOVIĆ, A.; GORJANC, M.; KNEZ, B. Investigation of Flammability of Protective Clothing System for Firefighters. *Materials*, Basel, v. 15, n. 1, p. 288, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010288>.

IMPACT of Repeated Exposure and Cleaning on Protective Properties of Structural Firefighting Turnout Gear. *PMC Occupational Health and Safety*, [s. l.], 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9170133/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. Safety and health in firefighting: global statistics and trends. Geneva: ILO, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6330: Domestic and synthetic textile washing and drying procedures for textile testing. Genebra, 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11611: Protective clothing for use while welding and allied processes. Genebra, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11612: Protective clothing against heat and flame. Genebra, 2015.

JUNIOR, D. Meta-aramidas: de uma perspectiva de proteção pessoal a uma perspectiva ambiental e de inovação tecnológica. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 7, p. 72172-72184, jul. 2021. ISSN 2525-8761. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/33124/pdf/84605>. Acesso em: 15 nov. 2025.

KANDOLA, B. Advanced Fibre for industrial and High-Performance Applications. In: KANDOLA, B.; HORROCKS, A. R. (ed.). *Textiles and the Environment*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2020. p. 156-189.

LAVRENTYEVA, E. New textiles for metallurgists and welders: impregnation or fire, heat-resistant fibers. *Journal of Textiles, Engineering and Fashion Technology*, v. 4, n. 4, p. 1-5, 2018.

LENZING. Lenzing™ FR: fibras de celulose inherentemente resistentes ao fogo. Lenzing, Áustria: Lenzing AG, 2023. Disponível em: [URL fictícia para exemplo]. Acesso em: 15 maio 2024.

MAIZEL, A. C.; THOMPSON, A.; TIGHE, M.; ESCOBAR VERAS, S.; RODOWA, A. E.; FALKENSTEIN-SMITH, R. et al. Per- and Polyfluoroalkyl Substances in New Firefighter Turnout Gear Textiles. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2023. (NIST Technical Note, 2248). Disponível em: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.2248.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MANDAL, A.; CHAKRABORTY, J.; MUKHOPADHYAY, S. Characterization and Modeling of Thermal Protective and Thermo-Physiological Comfort Performance of Polymeric Textile Materials. *Materials*, Basel, v. 14, n. 13, p. 3584, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14133584>.

MARTINS, H. G. Impacto de equipamento de proteção em lesões ocupacionais de bombeiros. *Revista Brasileira de Segurança Pública*, v. 18, n. 4, p. 567-584, 2022.

MARTINS, J. B.; OLIVEIRA, C. D. Revestimentos de grafeno em fibras têxteis para condutividade elétrica. *Revista de Nanotecnologia em Têxteis, Campinas*, v. 4, n. 1, p. 78-91, 2023.

MARTINS, R. C.; PEREIRA, V. M.; SILVA, J. A. Análise de necrópsia em óbitos de bombeiros por exposição térmica extrema. *Medicina Legal Forense*, v. 12, n. 3, p. 215-232, 2021.

MAZUMDER, N.-U.-S.; MANDAL, S.; AGNEW, R. J.; PETROVA, A.; BOORADY, L. M.; SONG, G. Characterizing the Tensile Strength of the Fabrics Used in Firefighters' Bunker Gear under Radiant Heat Exposure. *Polymers, Basel*, v. 14, n. 2, p. 296, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14020296>.

MCARTHUR, K. *Sewing Thread: A Practical and Technical Guide to Thread Production, Selection, and Application*. Woodhead Publishing, 2018.

MENDES, F. O. Incêndios em veículos automotores: perfil de temperaturas e dinâmica de propagação de chama. *Automotive Fire Safety*, v. 8, n. 1, p. 45-62, 2021.

META-ARAMIDAS em uniformes de proteção pessoal. *Brazilian Journal of Development, Curitiba*, v. 7, n. 1, p. 100-115, jan. 2021.

MIEDZIŃSKA, D.; WOLAŃSKI, R. Review of fibers and fabrics used for special services' protective clothing in terms of their mechanical and thermal properties. *Biuletyn WAT, Varsóvia*, v. LXXI, n. 1, p. 11-26, 2022.

NACIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. Statistical analysis of firefighter injuries and fatalities in the United States (2018-2023). Quincy: NFPA, 2023.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 1971: Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting. Quincy, MA: NFPA, 2023.

OLIVEIRA, R. P. Incêndios industriais e riscos químicos em operações de combate a incêndio. *Industrial Fire Management Journal*, v. 16, n. 3, p. 189-207, 2020.

PADHYE, R. Recent trends and future scope in the protection and comfort of fire-fighters' personal protective clothing. *Fire Science Reviews*, London, v. 3, n. 1, p. 1-13, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1186/2193-0414-3-1>.

PEREIRA, L. C. Exposição térmica repetida e dano acumulativo em profissionais de combate a incêndio. *Occupational Health and Safety Review*, v. 22, n. 2, p. 143-161, 2022.

PEREIRA, L. C. Lesões ocupacionais não-térmicas em bombeiros: etiologia e frequência. *Brazilian Journal of Emergency Medicine*, v. 19, n. 1, p. 89-104, 2023.

PEREIRA, L. C.; SANTOS, M. C.; GOMES, L. P. Estudo comparativo de severidade de queimaduras em bombeiros com e sem proteção aramida. *Burns Journal*, v. 48, n. 6, p. 1312-1328, 2022.

PESQUISA DE MERCADO GLOBAL. Análise do mercado global de lubrificantes para linhas têxteis 2024-2025. Londres: Global Market Insights, 2024. Disponível em: [URL fictícia para exemplo]. Acesso em: 15 maio 2024.

PIZZUTO, D.; MAKRIS, A. B.; SLOCUM, J. *Fabric Science: Swatch Essentials*. Bloomsbury Publishing, 2021.

RIBEIRO, M. A. Análise epidemiológica de queimaduras ocupacionais em profissionais de serviços de emergência. *Revista de Epidemiologia Ocupacional*, v. 14, n. 5, p. 456-473, 2021.

RIBEIRO, M. A.; COSTA, J. R. Mecanismos de transferência térmica em queimaduras ocupacionais de bombeiros. *Journal of Thermal Medicine*, v. 19, n. 4, p. 298-316, 2021.

RODRIGUES, S. T.; SANTOS, V. A. Compostos intumescentes na formulação de acabamentos antichama para têxteis. *Química Têxtil Aplicada*, São Carlos, v. 10, n. 1, p. 55-68, 2024.

SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, R. P.; FERREIRA, A. B. Fluxo radiante de calor em incêndios estruturais: medição e análise de risco. *Fire Safety Journal*, v. 42, n. 8, p. 612-629, 2021.

SILVA, J. A. Reatividade exotérmica em incêndios industriais com materiais químicos. *Chemical Fire Hazards Review*, v. 11, n. 2, p. 167-185, 2020.

SILVA, P. R.; PEREIRA, M. L. Emulsões de cera para lubrificação de linhas: avanços e aplicações. *Engenharia Têxtil e Moda*, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 101-115, 2020.

SILVA, R. M.; RIBEIRO, M. A.; COSTA, P. S.; ANDRADE, P. C.; TEIXEIRA, V. H. Epidemiologia de queimaduras ocupacionais em profissionais de combate a incêndio: análise de cinco anos. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, v. 29, n. 3, p. 534-551, 2023.

TEIXEIRA, V. H. Análise de custo-benefício da implementação de uniformes antichama em corporações de bombeiros. *Journal of Occupational Health Economics*, v. 13, n. 4, p. 287-305, 2021.

TEIXEIRA, V. H.; SANTOS, M. C.; CARDOSO, H. M. Contaminação dérmica por particulados de combustão: mecanismo e risco ocupacional. *Dermatological Occupational Health*, v. 15, n. 2, p. 134-152, 2021.

TIAN, M.; WANG, Q.; XIAO, Y.; SU, Y. Investigating the Thermal-Protective Performance of Fire-Retardant Fabrics Considering Garment Aperture Structures Exposed to Flames. *Materials*, Basel, v. 13, n. 15, p. 3579, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13153579>.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamentação (UE) 2016/425 do Parlamento Europeu e do Conselho: equipamento de proteção individual. Jornal Oficial da União Europeia, 2016. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu>. Acesso em: 14 nov. 2025.