



FACULDADE DE TECNOLOGIA DE AMERICANA “MINISTRO RALPH BIASI”

Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil

ELSON GALACCI JUNIOR

AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE ACABAMENTOS FLUORADOS E
FLUOR-FREE EM TECIDOS TÊXTEIS: DESEMPENHO,
SUSTENTABILIDADE E COMPATIBILIDADE TÉRMICA

AMERICANA, SP

2025

ELSON GALACCI JUNIOR

AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE ACABAMENTOS FLUORADOS E
FLUOR-FREE EM TECIDOS TÊXTEIS: DESEMPENHO,
SUSTENTABILIDADE E COMPATIBILIDADE TÉRMICA

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

Área de concentração: Beneficiamento têxtil

Orientador: Prof. Dr. João Batista Giordano

AMERICANA, SP

2025

GALACCI JUNIOR, Elson

Avaliação comparativa entre acabamentos fluorados e fluor-free em tecidos têxteis: desempenho, sustentabilidade e compatibilidade térmica. / Elson GALACCI JUNIOR – Americana, 2025.

32f.

Estudo de caso (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. João Batista Giordano

1. Tecnologia têxtil 2. Tecnologia têxtil – meio ambiente 3. Têxtil – processos industriais. I. GALACCI JUNIOR, Elson II. GIORDANO, João Batista III. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi

CDU: 677

677:504

677.02

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

ELSON GALACCI JUNIOR

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE ACABAMENTOS FLUORADOS E
FLUOR-FREE EM TECIDOS TÊXTEIS: DESEMPENHO,
SUSTENTABILIDADE E COMPATIBILIDADE TÉRMICA**

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

Americana, 02 de dezembro de 2025.

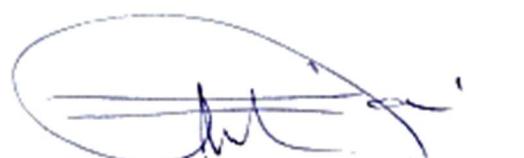
Banca examinadora:



João Batista Giordano
Doutor
FATEC Americana – Ministro Ralph Biasi



Alex Paulo Siqueira Silva
Mestre
FATEC Americana – Ministro Ralph Biasi



Carlos Frederico Faé
Especialista
FATEC Americana – Ministro Ralph Biasi

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, saúde e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada, permitindo-me superar desafios e concluir mais esta etapa.

À minha família, pelo apoio incondicional, pelos conselhos, pela paciência e por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que duvidei das minhas próprias capacidades. Sem o carinho e o incentivo de cada um, esta conquista não seria possível.

À minha esposa, pela compreensão nos dias em que precisei me ausentar, pelo amor constante, pelas palavras de motivação e por compartilhar comigo cada esforço e cada conquista deste percurso. Sua presença foi essencial para que eu mantivesse o foco e a determinação.

Aos meus professores, agradeço pela transmissão de conhecimento, pela dedicação e pelo compromisso com a formação profissional e humana dos alunos. Cada disciplina, orientação e troca de experiência contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho e para minha evolução como profissional.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste TCC. Levo comigo cada aprendizado e cada incentivo recebido ao longo desta jornada.

A ciência é capaz de atravessar o tempo; suas descobertas seguem adiante muito depois de nós. Por isso, cada fórmula, cada processo e cada teoria que aplicamos precisa refletir o legado que desejamos deixar. Que o conhecimento seja ponte, não ruptura."

(Autor desconhecido)

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo comparar o desempenho e os impactos ambientais de dois tipos de acabamentos hidrorrepelentes aplicados a tecidos de 100% algodão, 100% poliéster e 100% polipropileno, utilizando um agente à base de fluorcarbono (MAXXGUARD FC-1) e outro à base de parafina (IDROSSAL 10 LN). A pesquisa envolveu a aplicação dos acabamentos pelo processo pad-dry e avaliação por meio de testes de repelência à água, oleorrepelência, resistência à lavagem e análise do aspecto físico dos tecidos. Os resultados demonstraram que o acabamento fluorado apresentou desempenho superior nos tecidos de algodão e poliéster; entretanto, mostrou-se inviável para o polipropileno, uma vez que a temperatura de cura necessária (180 °C) excedeu o limite térmico da fibra, causando plastificação e perda de suas propriedades. Em contraposição, o acabamento à base de parafina apresentou repelência moderada e menor oleofobicidade, porém com maior compatibilidade térmica, preservação do toque e ausência dos impactos ambientais associados aos compostos fluorados.

A revisão bibliográfica demonstrou que os fluorcarbonos pertencem ao grupo dos PFAS, substâncias reconhecidas por sua extrema persistência, mobilidade e dificuldade de remoção no ambiente, além de potenciais riscos à saúde humana. Nesse contexto, diretrizes internacionais, como a ZDHC MRSL, recomendam a eliminação total dos acabamentos fluorados e incentivam o uso de alternativas fluor-free, como parafinas, silícios, poliuretanos e tecnologias sol-gel. Conclui-se que, embora o acabamento fluorocarbono apresente desempenho técnico superior, suas limitações ambientais, regulatórias e térmicas reforçam a necessidade de transição para soluções mais sustentáveis e compatíveis com diferentes substratos têxteis.

Palavras-chave: acabamentos têxteis; fluorcarbonos; pfas; parafina; hidrorrepelência; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study aims to compare the performance and environmental impacts of two water-repellent textile finishes applied to 100% cotton, 100% polyester, and 100% polypropylene fabrics, using a fluorocarbon-based agent (MAXXGUARD FC-1) and a paraffin-based agent (IDROSSAL 10 LN). The finishes were applied using the pad-dry method, followed by evaluations of water repellency, oil repellency, wash fastness, and changes in physical appearance. The results showed that the fluorocarbon finish presented superior performance on cotton and polyester; however, it proved unsuitable for polypropylene, since its required curing temperature (180 °C) exceeded the thermal tolerance of the fiber, causing plasticization and degradation. In contrast, the paraffin-based finish demonstrated moderate water repellency, lower oleophobicity, but better thermal compatibility, preserved hand feel, and absence of the environmental issues associated with fluorinated compounds.

The literature review indicated that fluorocarbons belong to the PFAS group, substances known for their extreme persistence, environmental mobility, and resistance to conventional treatment processes, in addition to potential risks to human health. In light of these concerns, international guidelines such as the ZDHC MRSL recommend the complete phase-out of fluorinated finishes and encourage the adoption of fluor-free alternatives such as paraffins, silicones, hydrophobic polyurethanes, and sol-gel technologies. Therefore, although fluorocarbon finishes provide superior technical performance, their environmental, regulatory, and thermal limitations highlight the need for more sustainable and fiber-compatible solutions in the textile finishing industry.

Keywords: textile finishing; fluorcarbons; pfas; paraffin; water repellency; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Estrutura molecular do PFOA (esquerda) e do PFOS (direita).....	13
Figura 02: Tecido A composto por 100% Algodão (CO).....	21
Figura 03: Tecido B composto por 100% Poliéster (PES)	21
Figura 04: Tecido C composto por 100% Polipropileno (PP)	21
Figura 05: Foulard de laboratório.....	22
Figura 06: Tecido no Foulard.....	23
Figura 07: Estufa	24
Figura 08: Estufa (internamente)	24
Figura 09: Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após aplicação de fluorcarbono	26
Figura 10: Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após lavagem.....	26
Figura 11: Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após aplicação de parafina	27
Figura 12: Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após 08 horas	28
Figura 13: Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após lavagem.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Alternativas Livre de flourcarbono 18

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO	12
2REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	13
2.1 INTRODUÇÃO AOS FLUORCARBONO	13
2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS COMPOSTOS FLUORCARBONO.....	13
2.2.1 PERSISTÊNCIA E MOBILIDADE AMBIENTAL	14
2.2.2 BIOACUMULAÇÃO E EFEITOS TOXICOLÓGICOS	15
2.2.3 IMPLICAÇÕES REGULATÓRIAS E PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL.....	15
2.2.4 RELAÇÃO COM O PRESENTE ESTUDO	16
2.3 DIRETRIZES DA ZDHC E A ELIMINAÇÃO DE FLUORCARBONOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL.....	16
2.4 ALTERNATIVAS AOS ACABAMENTOS A BASE DE FLUORCARBONETOS	17
2.5 SUSTENTABILIDADE E IMPACTOS AMBIENTAIS DA PARAFINA COMO AGENTE HIDRORREPELENTE.....	19
3DESENVOLVIMENTO	20
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	20
3.2 MATERIAIS.....	20
3.3 METODOLOGIA.....	22
4RESULTADOS	25
4.1 ACABAMENTO A BASE DE FLUORCARBONO	25
4.2 ACABAMENTO A BASE DE PARAFINA.....	27
5CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia têxtil tem impulsionado o desenvolvimento de materiais com propriedades funcionais que vão além do conforto e da estética. Entre essas funcionalidades, a repelência à água e a óleos destaca-se por sua ampla aplicação em vestuário esportivo, profissional, hospitalar e industrial. Paralelamente, a crescente demanda por produtos de alto desempenho alinhados a práticas sustentáveis tem direcionado a atenção da indústria e da comunidade científica para alternativas aos compostos fluorados reconhecidos por sua eficiência, mas também pelos impactos ambientais e toxicológicos associados à presença de compostos perfluoroalquilados e polifluoroalquilados (PFAS), substâncias persistentes e de grande preocupação global.

Nesse contexto, este trabalho propõe um estudo comparativo entre dois agentes hidrorepelentes aplicados em tecidos de algodão, poliéster e polipropileno: o MAXXGUARD FC-1, baseado em tecnologia fluoroquímica, e o IDROSSAL 10 LN, um agente não fluorado à base de parafina. A investigação busca compreender as diferenças de desempenho entre acabamentos fluorados e *fluor-free*, considerando parâmetros como eficiência de repelência, durabilidade frente à lavagem e compatibilidade térmica dos substratos.

A indústria têxtil enfrenta hoje o desafio de conciliar desempenho técnico e responsabilidade ambiental. Embora os fluorcarbonos sejam amplamente utilizados por conferirem repelência simultânea à água e ao óleo, sua permanência no ambiente e seus potenciais efeitos à saúde têm motivado a busca por alternativas mais seguras. Diante disso, formulações com parafinas, silicones, nanopartículas e polímeros modificados têm ganhado relevância como opções para reduzir ou substituir os “*forever chemicals*”, atendendo às diretrizes de entidades como a *Zero Discharge of Hazardous Chemicals* (ZDHC) e às demandas de sustentabilidade do mercado.

Este estudo, portanto, reúne uma revisão teórica sobre mecanismos de repelência, impactos ambientais dos fluorcarbonetos e alternativas tecnológicas, seguida pela aplicação prática dos agentes selecionados e pela análise de seus resultados em laboratório. A partir dessa abordagem integrada, busca-se contribuir para o avanço de soluções mais sustentáveis e tecnicamente viáveis na funcionalização de substratos têxteis.

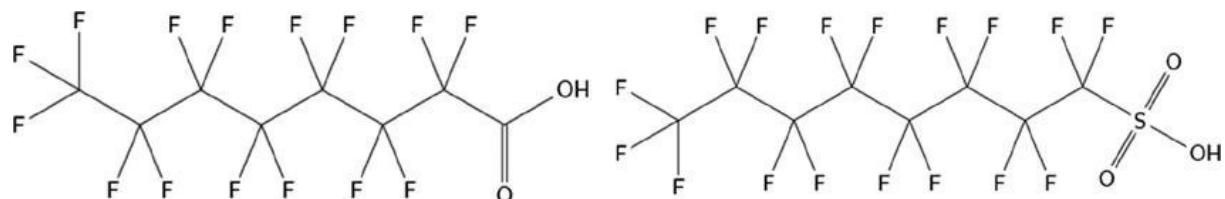
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 INTRODUÇÃO AOS FLUORCARBONO

Os compostos perfluoroalquilados e polifluoroalquilados (PFAS) formam uma ampla família de substâncias químicas caracterizadas por ligações carbono-flúor extremamente estáveis. Essa ligação confere propriedades únicas como alta repelência à água, óleo e sujeira, elevada estabilidade térmica e resistência química. Por essas características, os PFAS foram amplamente utilizados em espumas contra incêndio, embalagens, cosméticos e, especialmente, em acabamentos têxteis hidrorrepelentes e oleorrepelentes.

Historicamente, a indústria utilizou PFAS de cadeia longa (C8), como PFOA e PFOS (Figura 01), que posteriormente foram associados a bioacumulação, toxicidade reprodutiva, carcinogenicidade e persistência extrema. Com as restrições ambientais impostas a esses compostos, houve uma substituição gradual para PFAS de cadeia curta, especialmente os fluorcarbonos C6, considerados alternativas “menos tóxicas”, mas que ainda apresentam riscos significativos.

Figura 01: Estrutura molecular do PFOA (esquerda) e do PFOS (direita)



Fonte: COMPOSTOS PERFLUORADOS: UMA AMEAÇA PARA O OCEANO LIMPO.
Disponível em <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Estrutura-molecular-do-PFOA-esquerda-e-do-PFOS-direita_fig1_370614080>

2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS COMPOSTOS FLUORCARBONO

Os compostos per e polifluoralquilados (PFAS), entre eles os fluorcarbonos utilizados em acabamentos têxteis, constituem um grupo de substâncias sintéticas amplamente empregados devido à sua elevada estabilidade térmica, química e à capacidade de conferir hidrorrepelência e oleorrepelência a diversos substratos. Obras clássicas como Kissa (2001) e Scheirs e Long (1998) descrevem a evolução

do uso de surfactantes e polímeros fluorados em aplicações têxteis, de papel, revestimentos e espumas contra incêndio, ressaltando que essas aplicações se apoiam fundamentalmente na força da ligação C–F e na baixa energia superficial dessas moléculas.

2.2.1 PERSISTÊNCIA E MOBILIDADE AMBIENTAL

A elevada energia da ligação carbono–flúor confere aos fluorcarbonos caráter extremamente persistente, motivo pelo qual são frequentemente classificados como “poluentes eternos” (*forever chemicals*). Revisões de Rayne e Forest (2009) e de Ahrens e Bundschuh (2014) indicam que muitos PFAS apresentam meia-vida ambiental de anos a décadas, com baixa suscetibilidade à degradação biótica ou abiótica em condições ambientais usuais.

Em razão da natureza anfifílica e, em muitos casos, da alta solubilidade em água, os PFAS são prontamente transportados em corpos d’água superficiais, águas subterrâneas e mesmo em longas distâncias por correntes atmosféricas. Estudos de monitoramento em efluentes de estações de tratamento de esgoto e em rios de regiões industrializadas mostram concentrações significativas de ácidos perfluoroalquil carboxílicos (PFCAs) e sulfonatos (PFSAs), inclusive em áreas distantes das fontes pontuais de emissão (PREVEDOUROS et al., 2006; AHRENS et al., 2009).

A substituição progressiva de compostos de cadeia longa, como o ácido perfluorooctanóico (PFOA) e o perfluorooctanossulfonato (PFOS), por análogos de cadeia mais curta (por exemplo, PFHxA e PFHxS) não eliminou o problema ambiental, apenas modificou seu perfil. Li et al. (2020) demonstram que PFAS de cadeia curta apresentam menor sorção a sedimentos e maior mobilidade em sistemas aquáticos, tendendo a ser encontrados com maior frequência em águas superficiais e subterrâneas, justamente pela maior solubilidade e menor interação hidrofóbica com partículas sólidas.

2.2.2 BIOACUMULAÇÃO E EFEITOS TOXICOLÓGICOS

Do ponto de vista ecotoxicológico e de saúde humana, a literatura aponta um conjunto relevante de impactos. Sunderland et al. (2018) sintetizam evidências de associação entre a exposição a PFAS e desfechos adversos, como alterações na função tireoidiana, imunotoxicidade, efeitos sobre desenvolvimento e reprodução, alterações metabólicas e possíveis efeitos carcinogênicos, com robustez maior de dados para PFOS e PFOA. Em organismos aquáticos, revisões como a de Ahrens e Bundschuh (2014) relatam alterações no crescimento, reprodução, desenvolvimento embrionário e biomarcadores de estresse oxidativo em peixes e invertebrados expostos a diferentes PFAS.

Embora os compostos de cadeia longa apresentem maior potencial de bioacumulação e biomagnificação em cadeias tróficas, os PFAS de cadeia curta não podem ser considerados ambientalmente “seguros”. Brendel et al. (2018) discutem que PFAS C4–C6 exibem elevada persistência, ampla distribuição espacial e difícil remoção em sistemas de tratamento de água, o que resulta em exposição crônica de organismos, mesmo em concentrações relativamente baixas. Adicionalmente, a toxicologia de muitos análogos de cadeia curta ainda não é completamente compreendida, principalmente no que se refere a efeitos subcrônicos e crônicos.

2.2.3 IMPLICAÇÕES REGULATÓRIAS E PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL

O acúmulo de evidências científicas sobre persistência, mobilidade, bioacumulação e toxicidade levou à adoção de restrições regulatórias significativas em diferentes jurisdições. Na União Europeia, iniciativas sob o regulamento *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals* (REACH) vêm buscando o enquadramento de PFAS, incluindo compostos de cadeia curta, como substâncias de elevada preocupação (BRENDEL et al., 2018). Em paralelo, diretrizes internacionais e iniciativas voluntárias da cadeia têxtil, como a ZDHC passaram a restringir e, em muitos casos, proibir o uso de acabamentos repelentes à base de fluorcarbonos, independentemente do comprimento da cadeia, recomendando a migração para alternativas “fluor-free”.

No contexto específico de acabamentos têxteis, Schindler e Hauser (2004) destacam que sistemas fluorados proporcionam excelente óleo e hidrorrepelência,

com alto ângulo de contato e boa durabilidade à lavagem. No entanto, à medida que os impactos ambientais dos PFAS foram se consolidando na literatura, esses produtos passaram a ser alvo de substituição por tecnologias baseadas em parafinas, silicones e polímeros modificados, ainda que, em geral, com desempenho inferior em oleorrepelência.

2.2.4 RELAÇÃO COM O PRESENTE ESTUDO

À luz dessa revisão, torna-se evidente que o uso de acabamentos fluorados em substratos têxteis deve ser avaliado não apenas sob o ponto de vista da performance técnico-funcional, mas também dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto. No presente trabalho, a comparação entre um acabamento à base de fluorcarbono (MAXXGUARD FC-1) e um acabamento à base de parafina (IDROSSAL 10 LN), aplicados em tecidos de algodão, poliéster e polipropileno, permite discutir experimentalmente essa troca. Enquanto a literatura sugere que acabamentos fluorados tendem a apresentar maior repelência à água e ao óleo e maior resistência à lavagem, ela também evidencia que tais produtos contribuem para a emissão de PFAS persistentes e móveis no ambiente, com risco potencial à biota e à saúde humana. Já os sistemas parafínicos, embora ofereçam desempenho repelente inferior e menor oleorrepelência, não pertencem à classe dos PFAS e, portanto, não compartilham das mesmas preocupações de persistência extrema e mobilidade global. Dessa forma, os resultados experimentais obtidos neste estudo serão analisados à luz desse contexto, buscando conciliar desempenho técnico com requisitos crescentes de sustentabilidade e conformidade regulatória.

2.3 DIRETRIZES DA ZDHC E A ELIMINAÇÃO DE FLUORCARBONOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL

A ZDHC é uma iniciativa global formada por grandes marcas do setor têxtil, cuja missão é eliminar substâncias perigosas da cadeia produtiva. Através da *Manufacturing Restricted Substances List* (MRSList), a ZDHC estabelece limites e proibições para compostos considerados de risco elevado. Desde a versão 2.0 da MRSList, os compostos fluorados

utilizados em acabamentos hidrorrepelentes e oleorrepelentes (PFAS) são totalmente proibidos em qualquer processo de fabricação alinhado ao programa (ZDHC, 2022).

A justificativa para essa restrição ampla está fundamentada em evidências científicas que apontam que os PFAS apresentam persistência extrema, mobilidade elevada e potencial de bioacumulação, além de estarem relacionados a efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente (AHRENS; BUND SCHUH, 2014; SUNDERLAND et al., 2019). Estudos toxicológicos indicam impactos como alterações hormonais, imunotoxicidade, efeitos no desenvolvimento, bioacumulação em organismos aquáticos e possível carcinogenicidade, especialmente para substâncias como PFOA e PFOS (SUNDERLAND et al., 2019).

Outro conceito central nas diretrizes da ZDHC é o de uso essencial, que estabelece que substâncias perigosas somente devem ser utilizadas quando não existirem alternativas mais seguras e quando a função exercida pelo produto for indispensável. Para a ZDHC, os acabamentos fluorados em produtos têxteis de uso comum não se enquadram como essenciais, uma vez que existem tecnologias alternativas de menor impacto ambiental (ZDHC, 2021). Como consequência das evidências científicas e pressões regulatórias, diversas marcas globais como Adidas, Inditex, H&M, Patagonia e The North Face anunciaram a eliminação progressiva dos fluorcarbonos de suas cadeias produtivas. Assim, a tendência da indústria é substituir os acabamentos fluorados por tecnologias *fluor-free*, buscando equilibrar desempenho funcional e sustentabilidade química.

2.4 ALTERNATIVAS AOS ACABAMENTOS A BASE DE FLUORCARBONETOS

Com a ampla restrição regulatória e voluntária dos acabamentos fluorcarbonetos, especialmente após a inclusão dos PFAS na ZDHC MRSI, a indústria têxtil passou a desenvolver soluções *fluor-free* para substituir repelentes baseados em fluorocarbono. Entre as alternativas mais estudadas e aplicadas estão parafinas, silicones, poliuretanos hidrofóbicos, tecnologias sol-gel e ceras ou biopolímeros naturais. Os acabamentos à base de parafina figuram entre os substitutos mais consolidados. Tan et al. (2024) demonstram que emulsões de parafina oxidada podem gerar elevada hidrorrepelência, boa estabilidade térmica e toque próximo ao natural do tecido, sendo uma tecnologia livre de flúor e de menor impacto ambiental. Os

silicones são amplamente utilizados para suavização e repelência moderada à água. Schindler e Hauser (2004) destacam que polissiloxanos podem formar camadas hidrofóbicas duráveis e conferir excelente toque, embora também não apresentem oleofobicidade relevante. Por sua vez, os poliuretanos hidrofóbicos (PU) apresentam resistência à lavagem superior às parafinas e são frequentemente empregados em têxteis esportivos. Embora ainda incapazes de substituir a oleofobicidade dos PFAS, os PU representam uma alternativa intermediária com boa performance técnico-funcional.

As tecnologias sol-gel e nanoestruturadas, como as estudadas por Gharbi et al. (2019), têm permitido atingir valores elevados de ângulo de contato com água ($>140^\circ$), com boa durabilidade, a partir de estruturas inorgânicas (SiO_2 , TiO_2) completamente livres de flúor. São soluções tecnicamente promissoras, embora mais caras e complexas para aplicação industrial.

Para facilitar a compreensão das principais tecnologias aplicadas em acabamentos hidrorrepelentes e oleorrepelentes, apresenta-se a seguir um quadro comparativo entre diferentes agentes funcionalizantes utilizados na indústria têxtil. A Tabela 01 sintetiza as características mais relevantes de cada tecnologia, como desempenho de repelência à água e ao óleo, durabilidade à lavagem, toque conferido ao tecido e impacto ambiental associado. Essa comparação permite visualizar, de forma objetiva, as vantagens, limitações e áreas de melhor aplicação de cada alternativa, servindo como base para a seleção do agente mais adequado conforme a fibra utilizada, o processo produtivo e os requisitos de performance do artigo têxtil.

Tabela 01 – Alternativas Livre de flourcarbono

Tecnologia	Repelência à Água	Repelência a Óleo	Durabilidade à Lavagem	Toque	Impacto Ambiental
Parafina	Média a alta	Baixa	Média	Levemente encorpado	Baixo
Silicones	Alta	Baixa	Alta	Muito macio	Baixo
PU hidrofóbico	Alta	Baixa a média	Alta	Macio	Baixo/Médio
Sol-gel / Nanoestruturado	Alta / Superhidrofóbica	Baixa	Alta	Pode variar	Baixo
Ceras naturais / Biopolímeros	Média	Baixa	Média	Natural	Muito baixo
Fluorcarbonos (C6/C8) – Referência	Muito alta	Muito alta	Muito alta	Natural	Muito alto (PFAS)

Fonte: Elaboração pelo autor (2025).

2.5 SUSTENTABILIDADE E IMPACTOS AMBIENTAIS DA PARAFINA COMO AGENTE HIDRORREPELENTE

Os acabamentos hidrorrepelentes à base de parafina representam uma alternativa amplamente utilizada e ambientalmente mais segura em comparação aos acabamentos fluorados tradicionais. As parafinas são compostas por hidrocarbonetos saturados de cadeia longa (geralmente entre C20 e C40), sem a presença de flúor em sua estrutura molecular, o que as diferencia fundamentalmente dos PFAS (per e polifluoroalquilados), amplamente reconhecidos por sua persistência ambiental e toxicidade. Segundo Graham e Readman (2016), as parafinas apresentam elevada biodegradabilidade, sendo degradadas por diferentes microrganismos em condições aeróbias e anaeróbias, sem formação de subprodutos tóxicos ou bioacumulativos.

Relatórios ambientais da OECD (2011) classificam as ceras e parafinas como substâncias de baixo risco ecotoxicológico, não apresentando toxicidade relevante para organismos aquáticos, baixa mobilidade em solos e reduzido potencial de bioacumulação. Em comparação aos fluorcarbonos que são resistentes à degradação, altamente móveis e frequentemente encontrados em águas superficiais, e subterrâneas os produtos à base de parafina demonstram comportamento ambiental significativamente mais favorável. Além disso, Mahltig e Textor (2013) destacam que emulsões parafínicas utilizadas em acabamentos têxteis são facilmente tratáveis em estações de tratamento de efluentes, ao contrário dos PFAS, que frequentemente passam inalterados pelos métodos convencionais.

Outro aspecto relevante diz respeito à compatibilidade térmica. Enquanto os acabamentos fluorados geralmente exigem temperaturas de cura elevadas (entre 170 °C e 190 °C) para atingir desempenho ideal, as parafinas apresentam boa fixação mesmo em temperaturas mais baixas, como 120 °C a 140 °C. Isso não apenas reduz o consumo energético do processo industrial, mas também amplia a aplicação da tecnologia em fibras termossensíveis como o polipropileno que, no presente estudo, foi plastificado quando submetido à temperatura necessária para o acabamento fluorado.

Estudos recentes também destacam avanços na modificação estrutural das ceras. Tan et al. (2024) demonstram que emulsões de parafina oxidata apresentam comportamento hidrofóbico aprimorado, maior estabilidade térmica e melhor ancoragem à fibra.

Dessa forma, levando-se em conta desempenho funcional moderado, alta compatibilidade térmica, biodegradabilidade e baixa toxicidade ambiental, os acabamentos à base de parafina configuram-se como soluções viáveis dentro do movimento global de eliminação dos fluorcarbonos. Além disso, alinhama-se às recomendações de programas internacionais como a ZDHC, que priorizam agentes hidrorrepelentes livres de flúor devido ao menor risco ambiental associado.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Foram utilizados para a execução deste estudo, um foulard de laboratório calibrado para aplicar 2,0 kgf de pressão, empregado na etapa de impregnação para garantir controle adequado do pick-up, uma estufa de circulação de ar forçada, equipada com controle de temperatura e ventilação, utilizada para a secagem das amostras e para simular as condições térmicas de uma fábrica industrial, uma lavadora residencial, responsável pelo processo de lavagem das amostras com água em temperatura ambiente e sabão em pó, de modo a reproduzir condições reais de uso doméstico e uma balança de precisão.

3.2 MATERIAIS

Para a aplicação e avaliação desses acabamentos, foram selecionados três tipos de tecidos com composições distintas: o Tecido A – Figura 02, composto por 100% Algodão (CO); o Tecido B – Figura 03, composto por 100% Poliéster (PES); e o Tecido C – Figura 04, composto por 100% Polipropileno (PP). A escolha desses substratos se deu pelas características intrínsecas e pelo amplo uso de cada fibra na indústria têxtil. O algodão foi selecionado por ser a fibra natural mais utilizada na fabricação de vestuário, apresentando elevada hidrofilidade. O poliéster, por sua vez, foi incluído por ser uma das fibras sintéticas mais presentes no mercado, com comportamento físico distinto das fibras naturais. Já o polipropileno foi escolhido devido à sua estrutura sintética, baixa absorção de umidade e sensibilidade a

temperaturas elevadas, o que permite avaliar a influência da temperatura de cura na estabilidade do acabamento aplicado.

Figura 02 – Tecido A composto por 100% Algodão (CO)



Fonte: Autor (2025)

Figura 03 – Tecido B composto por 100% Poliéster (PES)



Fonte: Autor (2025)

Figura 04 – Tecido C composto por 100% Polipropileno (PP)



Fonte: Autor (2025)

3.3 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar o desempenho de dois agentes hidrorrepelentes de composições distintas — um fluocarbonado (Maxxguard FC-1) e outro à base de parafina (Idrossal 10 LN) — aplicados sobre três tipos de tecidos: Algodão (100% CO), Poliéster (100% PES) e Polipropileno (100% PP). Todo o procedimento experimental foi padronizado, utilizando a mesma sequência operacional, tempo de exposição, método de aplicação e etapas de caracterização para todos os substratos avaliados.

Para o acabamento com Maxxguard FC-1, utilizou-se a concentração de 30 g/L, ajustando-se o pH do banho para meio ácido por meio da adição de 1 g/L de ácido acético, condição necessária para o desempenho adequado do produto. O foulard (Figura 05) foi mantido com pressão de 2,0 kgf e a estufa foi regulada para 180 °C, tempo de residência de 90 segundos para cada amostra.

Figura 05 – Foulard de laboratório



Fonte: Autor (2025)

Para o acabamento com Idrossal 10 LN, aplicou-se a concentração de 80 g/L, não havendo necessidade de ajuste de pH. O foulard operou com a mesma pressão de 2,0 kgf (Figura 06), e a etapa de secagem foi conduzida a 130 °C, também por 120 segundos.

Figura 06 – Tecido no Foulard



Fonte: Autor (2025)

Após a impregnação, as amostras foram direcionadas ao processo de secagem em uma estufa de circulação de ar forçada (Figura 07 e Figura 08). Para o acabamento com Maxxguard FC-1 a estufa foi regulada para 180 °C, tempo de residência de 90 segundos para cada amostra e, para o acabamento com Idrossal 10 LN a etapa de secagem foi conduzida a 130 °C por 120 segundos. Essas condições foram utilizadas com o objetivo de simular as condições térmicas de uma rama industrial e garantir a estabilização do acabamento aplicado em cada amostra.

Figura 07 – Estufa



Fonte: Autor (2025)

Figura 08 – Estufa (internamente)



Fonte: Autor (2025)

Após a secagem, todas as amostras passaram por uma etapa de lavagem destinada a simular o uso doméstico. Para isso, empregou-se uma lavadora residencial convencional, utilizando água em temperatura ambiente, sabão em pó e ciclo simples de lavagem com duração de 30 minutos, seguido de secagem natural à luz solar. Essa etapa teve como finalidade avaliar a resistência do acabamento hidrorrepelente frente às condições de uso e manutenção mais comuns.

Embora o método padronizado internacionalmente para avaliação da resistência à penetração de água seja o ensaio hidrostático previsto na ISO 811, que determina a pressão hidrostática necessária para que a água atravesse o tecido, não foi possível utilizar o equipamento específico requerido pela norma. Dessa forma, adotou-se um método alternativo para avaliação comparativa. Após cada etapa do processo (aplicação, secagem e pós-lavagem) foram depositadas gotas de água e de óleo sobre cada amostra, realizando-se registro fotográfico imediato e, posteriormente, após oito horas, com o objetivo de observar o comportamento das superfícies tratadas, a persistência da repelência e possíveis processos de absorção ou espalhamento dos líquidos. Além da análise funcional, procedeu-se à avaliação visual e tátil dos aspectos físicos das amostras, verificando eventuais alterações provocadas pelo tipo de produto utilizado, pela exposição térmica durante a secagem e pelo processo de lavagem.

Com esse conjunto de procedimentos, foi possível comparar o desempenho dos dois acabamentos hidrorrepelentes nos diferentes substratos têxteis, tanto em condições iniciais quanto após a lavagem, permitindo uma análise abrangente da eficiência e da durabilidade das formulações testadas.

4 RESULTADOS

4.1 ACABAMENTO A BASE DE FLUORCARBONO

Após a aplicação dos produtos foi verificado que o fluorcarbono teve um excelente resultado nas 3 amostras quando se trata da hidrorrepelencia e óleorrepelencia (Figura 09), porém como as amostras foram expostas a uma temperatura de 180°C, a amostra C que é composta de 100% Polipropileno não suportou a temperatura e teve os fios plastificado, perdendo assim todo sua característica e desqualificando a amostra.

Figura 09 – Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após aplicação de fluorcarbono



Fonte: Autor (2025)

Após uma espera de 8 horas, as amostras A e B se mantiveram com a água e óleo sobre o tecido, confirmando a eficácia do fluorcarbono mesmo com um longo período de exposição. As amostras A e B, foram lavadas por um período de 30 minutos utilizando água e sabão em pó, e secas naturalmente e os tecidos continuaram apresentando uma ótima repelência a água (Figura 10).

Figura 10 – Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após lavagem

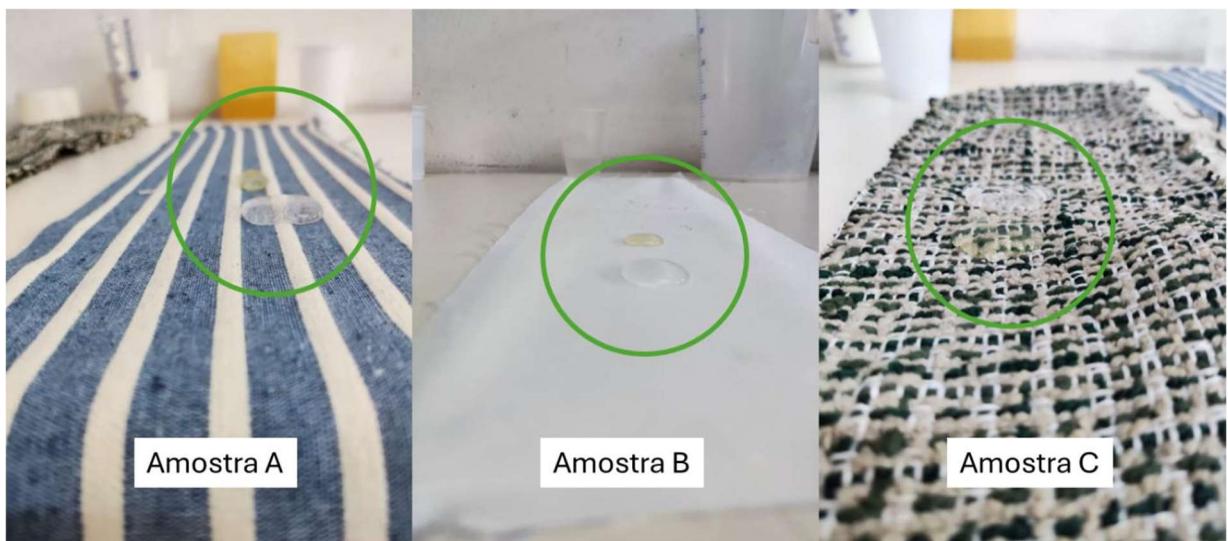


Fonte: Autor (2025)

4.2 ACABAMENTO A BASE DE PARAFINA

Foi constatado que repelência usando parafina também consegue atingir uma excelente repelência, nas três amostras o resultado foi muito bom (Figura 11) e por usar temperatura de 130°C, a amostra C que tem a composição 100% polipropileno manteve o toque macio, assim mantendo suas características físicas e sendo uma opção viável para produção.

Figura 11 – Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após aplicação de parafina



Fonte: Autor (2025)

Após oito horas com água e óleo sobre o tecido (Figura 12), foi verificado que o produto ainda possuía repelência, porém foi observado que a altura da bolha de água e também a de óleo estavam mais baixas e o tecido mostrava sinais que estava absorvendo vagarosamente os produtos, o que nos mostra as limitações quanto ao uso da parafina, não sendo indicado por exemplo para construção de barracas que ficam expostas a chuva.

Figura 12 – Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após 08 horas



Fonte: Autor (2025)

Após a lavagem de 30 minutos com água e sabão, a repelência perdeu um pouco de sua eficácia (Figura 13), logo de início o tecido repeliu a água e óleo e formou uma gota sobre o tecido, mas cinco minutos após o início do teste, foi verificado que o tecido começou a absorver os líquidos, sendo assim não é indicado que se lave o tecido pois pode perder sua eficácia.

Figura 13 – Hidrorrepelencia e óleorrepelencia após lavagem



Fonte: Autor (2025)

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu avaliar, sob a perspectiva técnica, ambiental e regulatória, o desempenho de dois tipos de acabamentos hidro e oleorrepelentes um à base de fluorcarbono (MAXXGUARD FC-1) e outro à base de parafina (IDROSSAL 10 LN) aplicados a tecidos de 100% algodão, 100% poliéster e 100% polipropileno. A análise experimental, associada à revisão bibliográfica sobre impactos ambientais dos PFAS e à discussão das diretrizes internacionais como a ZDHC, permitiu construir uma visão integrada sobre as oportunidades e limitações de cada tecnologia.

Os resultados demonstraram que o acabamento fluorado apresentou desempenho superior em repelência à água e ao óleo, além de maior resistência à lavagem nos tecidos de algodão e poliéster. Esses achados são compatíveis com estudos que apontam a capacidade dos fluorcarbonos em reduzir significativamente a energia superficial do substrato, proporcionando elevados ângulos de contato e elevada durabilidade funcional. Entretanto, em tecido de polipropileno, o acabamento fluorocarbono mostrou-se inviável, uma vez que a temperatura de cura necessária (180 °C) ultrapassou o limite térmico da fibra, levando à plastificação e perda total das propriedades do material. Esse resultado evidencia um ponto crítico na aplicação de fluorcarbonos em substratos termossensíveis, restringindo seu uso e reforçando a importância da compatibilidade térmica no processo de acabamento têxtil.

Por outro lado, o acabamento à base de parafina apresentou repelência mais moderada, com menor oleofobicidade e resistência à lavagem, resultados esperados conforme a literatura. Ainda assim, manteve boa estabilidade dimensional, toque semelhante ao padrão e desempenho adequado para aplicações onde a repelência extrema não é um requisito essencial. Além disso, a parafina se mostrou termoestável nos três tecidos, incluindo o polipropileno, evidenciando sua viabilidade operacional em processos de acabamento que requerem menor temperatura de cura.

Ao integrar esses resultados ao contexto ambiental e regulatório, observa-se que os fluorcarbonos apresentam severas limitações quanto à sustentabilidade. A extensa literatura consultada aponta que compostos PFAS, incluindo os fluorcarbonos C6 utilizados como substitutos dos antigos C8, são extremamente persistentes, móveis no ambiente, de difícil remoção em sistemas de tratamento e associados a efeitos toxicológicos relevantes. Nesse cenário, diretrizes internacionais como a ZDHC MRSI

determinam a eliminação completa dos fluorcarbonos da cadeia têxtil, independentemente do comprimento da cadeia, orientando marcas e fabricantes a migrarem para tecnologias *fluor-free*.

Assim, a partir dos resultados obtidos, conclui-se que, embora o acabamento fluorocarbono apresente melhor performance técnica em termos de repelência e durabilidade, sua aplicação está associada a limitações ambientais significativas, restrições regulatórias crescentes e, no caso do polipropileno, inviabilidade térmica. Em contrapartida, o acabamento à base de parafina representa uma alternativa tecnicamente viável, ambientalmente mais responsável e compatível com substratos sensíveis ao calor, ainda que com desempenho funcional reduzido.

Dessa forma, o conjunto das análises reforça a necessidade de considerar não apenas o desempenho técnico, mas também os impactos ambientais, as exigências regulatórias e as características térmicas das fibras ao selecionar acabamentos têxteis. Para futuras aplicações industriais, sugere-se aprofundar estudos sobre tecnologias *fluor-free* emergentes, como sistemas nanoestruturados e poliuretanos hidrofóbicos, que poderão oferecer desempenho mais equilibrado entre funcionalidade, segurança química e sustentabilidade, atendendo às demandas atuais da indústria e às exigências internacionais de redução de substâncias perigosas.

REFERÊNCIAS

- AHRENS, L.; BUNDSCUH, M. Fate and effects of poly- and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: a review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 33, n. 9, p. 1921–1929, 2014.
- AHRENS, L. et al. Polyfluorinated compounds in waste water treatment plant effluents and surface waters along the River Elbe, Germany. *Marine Pollution Bulletin*, v. 58, n. 9, p. 1326–1333, 2009.
- BRENDEL, S. et al. Short-chain perfluoroalkyl acids: environmental concerns and a regulatory strategy under REACH. *Environmental Sciences Europe*, v. 30, n. 1, p. 1–14, 2018.
- DALTIN, D. Tensoativos: Química, propriedades e aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011.
- GHARBI, R. et al. Fluorine-free water repellent finishing for textiles using sol–gel and nanotechnology. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, v. 89, p. 1–15, 2019.
- GRAHAM, J. A.; READMAN, J. W. Biodegradation of long-chain hydrocarbons under aerobic and anaerobic conditions. *Marine Pollution Bulletin*, 2016.
- KISSA, E. *Fluorinated surfactants and repellents*. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2001.
- LI, F. et al. Short-chain per- and polyfluoroalkyl substances in aquatic systems: occurrence, impacts and treatment. *Chemical Engineering Journal*, v. 380, p. 122506, 2020.
- LIU, N.; LI, M. Distinctive adsorption and transport behaviors of short-chain versus long-chain perfluoroalkyl acids in a river sediment. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 31, p. 66854–66865, 2024.
- MAHLTIG, B.; TEXTOR, T. Nanosols and Textiles. Springer, 2013.

OECD. SIDS Initial Assessment Report for Paraffin Waxes. Paris: OECD, 2011.

PREVEDOUROS, K. et al. Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates. *Environmental Science & Technology*, v. 40, n. 1, p. 32–44, 2006.

RAYNE, S.; FOREST, K. Perfluoroalkyl sulfonic and carboxylic acids: a critical review of physicochemical properties, levels and patterns in waters and wastewaters, and treatment methods. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 44, n. 12, p. 1145–1199, 2009.

ROWE, R. Waxes and sustainable coatings for textiles. *Textile Research Journal*, 2022.

SCHEIRS, J.; LONG, T. E. (ed.). *Modern fluoropolymers: high performance polymers for diverse applications*. Chichester: Wiley, 1998.

SCHINDLER, W. D.; HAUSER, P. J. *Chemical finishing of textiles*. Boca Raton: CRC Press, 2004. (Capítulo: Water and oil repellent finishes).

SUNDERLAND, E. M. et al. A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, v. 29, p. 131–147, 2019.

TAN, Q. et al. Oxidation modification of paraffin wax and preparation of water-repellent emulsion. *Fibers and Polymers*, v. 25, 2024.

ZDHC. MRSL 3.0 – Manufacturing Restricted Substances List. 2022. Disponível em: <https://www.roadmaptozero.com>. Acesso em: 15/10/2025.

ZDHC. ZDHC DWR Guidance – Alternatives to PFAS in Textile Finishing. Amsterdã: ZDHC Foundation, 2021.