



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIAS E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

SUY FERREIRA HWANG

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE TECIDO NÃO TECIDO (TNT) POR
MICROSCOPIA ÓTICA E ENSAIO DE SPRAY APÓS A DESCONTAMINAÇÃO
POR LAVAGEM, RADIAÇÃO GAMA E RADIAÇÃO UVC**

Recife
2025

SUY FERREIRA HWANG

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE TECIDO NÃO TECIDO (TNT) POR
MICROSCOPIA ÓTICA E ENSAIO DE SPRAY APÓS A DESCONTAMINAÇÃO
POR LAVAGEM, RADIAÇÃO GAMA E RADIAÇÃO UVC**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Elvis Joacir De França

Coorientadora: Profa. Dra. Fabiana Farias de Lima Guimarães

Recife

2025

Hwang, Suy Ferreira.

Avaliação da integridade de tecido não tecido (TNT) por microscopia ótica e ensaio de spray após a descontaminação por lavagem, radiação gama e radiação UVC / Suy Ferreira Hwang. - Recife, 2025.

149f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2025.

Orientação: Elvis Joacir de França.

Coorientação: Fabiana Farias de Lima Guimarães.

Inclui referências e apêndices.

1. EPI; 2. TNT; 3. Pandemia; 4. Biossegurança; 5. Radiação gama; 6. Radiação UVC. I. França, Elvis Joacir de. II. Guimarães, Fabiana Farias de Lima. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

Dedico a todos os profissionais de saúde que, corajosamente, enfrentaram um inimigo tão devastador como o vírus da Covid, com a nobre e linda missão de salvar vidas.

AGRADECIMENTOS

A todos e todas que direta ou indiretamente contribuíram para esse trabalho.

À Secretaria e Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN/UFPE.

Agradeço ao Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste – CRCN-NE que apoiou de todas as formas para que esse trabalho fosse a frente.

Agradeço a Deus, inexoravelmente, pela existência da minha família que sempre encontrava formas de me estimular, ajudar e suprir minhas necessidades quanto mãe, filha, tia, sobrinha, e demais, sendo meu porto seguro nas horas mais difíceis. Agradeço, em especial, a minha mãe Isa Hwang, minha irmã Suzy Hwang e meus filhos Kin e Mei por todo amor dispensado a minha pessoa, pelas súplicas em meu favor, mesmo eu estando desacreditada, nervosa ou brava. Agradeço as minhas tias Ita e Ida pelo apoio psicológico e pelas preciosas orações.

Sou imensamente grata ao meu Orientador Dr. Elvis Joacir De França pela sua perspicácia e inteligência, além da sua paciência em me suportar quando a limitação e o esgotamento já estavam me fazendo desistir.

Gratidão a Deus pelo comitê de acompanhamento nas pessoas do Dr. Fernando de Andrade Lima, Dra. Giselda Neves e a Dra. Mariana Luiza Ramos.

Agradecida sou a Deus pelos pares que ele me deu nesta caminhada da vida, principalmente no meu ambiente de trabalho, na pessoa da amiga e coorientadora Fabiana Lima, da maravilhosa Priscila Aranha, que teve um papel imprescindível para finalização deste trabalho; pela amiga Renata Sales que sempre com seu bom humor, conversas e amizade, tornava o ambiente descontraído e saboroso, pelos colegas Elvis Maranhão e Adriano Aguiar pelo apoio em diversas fases desta pesquisa, pela querida amiga Elda, aos demais colegas, alunos e apoio administrativo, meus sinceros e calorosos agradecimentos.

Agradeço aos amigos particulares que de uma forma ou de outra me empurraram para frente, dando sinais de carinho, de estímulo e compaixão, nas pessoas dos amigos: Dra. Maria Elizabeth Ferreira, Dra. Mônica Ribeiro, Dr. Fabio Júnior (“brigaduuuu”) e demais amigos de todo e qualquer ciclo social que convivo.

RESUMO

A viabilidade da reutilização de Equipamento de Proteção Individual (EPIs) de tecido-não-tecidos (TNT) foi bastante discutida durante a pandemia de COVID-19 devido à alta demanda e escassez de materiais. Contudo, a utilização de processos físicos ou químicos de descontaminação microbiológica tornou-se fundamental para garantir a segurança do trabalhador e evitar a disseminação do vírus. Neste trabalho, diversos métodos de descontaminação foram aplicados em malhas de TNT com gramaturas de 40 g m^{-2} e 60 g m^{-2} com o objetivo de avaliar a integridade física da trama após a aplicação de radiação ultravioleta do tipo C – UVC, radiação gama e lavagem/secagem, incluindo a combinação de lavagem/secagem com radiação gama. Duas novas metodologias para a avaliação da integridade das tramas foram propostas por meio de microscopia óptica para estimar os espaços vazios (passagem de luz - PL) e pelo ensaio de spray (mancha) para avaliar a contenção de fômites. Após a captação de imagens, um programa computacional converteu as imagens em dados numéricos, os quais foram tratados estatisticamente. De acordo com os resultados de PL, o TNT de 40 g m^{-2} resistiu aos efeitos dos métodos de descontaminação, com até 3 ciclos de lavagem/secagem combinado com a dose de 25 kGy de radiação gama; diferentemente do TNT de 60 g m^{-2} que suportou até 2 ciclos de radiação UVC e de lavagem/secagem sem irradiação gama. Considerando os dados de spray, apenas o TNT de 40 g m^{-2} pôde garantir a contenção de fômites mesmo após 10 ciclos de radiação UVC, assim como nos 3 ciclos de lavagem/secagem, que demonstraram ser opções promissoras para a descontaminação desse material. A implementação de controle de qualidade de TNTs a partir de protocolos como os desenvolvidos nesse estudo pode ser uma alternativa para garantir maior qualidade dos TNTs e, conseqüentemente, maior resistência a processos de descontaminação, favorecendo, assim a redução de riscos significativos à segurança dos usuários de EPIs.

Palavras-chaves: EPI, TNT; pandemia; profissionais de saúde; biossegurança; radiação gama; radiação UV-C.

ABSTRACT

The feasibility of reusing Nonwoven Fabric (NWF) Personal Protective Equipment (PPE) was widely discussed during the COVID-19 pandemic due to high demand and material scarcity. However, the use of physical or chemical microbiological decontamination processes became essential to ensure worker safety and prevent the spread of the virus. In this study, various decontamination methods were applied to NWF meshes with grammages of 40 g m⁻² and 60 g m⁻² to evaluate the physical integrity of the fabric after the application of ultraviolet C radiation (UVC), gamma radiation, and washing/drying, including the combination of washing/drying with gamma radiation. Two new methodologies for evaluating the integrity of the fabrics were proposed using optical microscopy to estimate the empty spaces (light passage - LP) and the spray test (stain) to assess fomite containment. After image capture, a computer program converted the images into numerical data, which were statistically treated. According to the LP results, the 40 g m⁻² NWF resisted the effects of the decontamination methods, with up to 3 washing/drying cycles combined with a 25 kGy dose of gamma radiation, unlike the 60 g m⁻² NWF, which withstood up to 2 cycles of UVC radiation and washing/drying without gamma irradiation. Considering the spray data, only the 40 g m⁻² NWF could ensure fomite containment even after 10 cycles of UVC radiation, as well as the 3 washing/drying cycles, which proved to be promising options for the decontamination of this material. The implementation of NWF quality control from protocols such as those developed in this study can be an alternative to ensure higher NWF quality and, consequently, greater resistance to decontamination processes, thus favoring the reduction of significant risks to PPE user safety.

Keywords: PPE; NWF; pandemic; health professionals; biosafety; gamma radiation; UV-C radiation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sumário das análises estatísticas empregadas para o estudo de integridade física de TNT	61
Tabela 2 – Sumários dos resultados obtidos (nível de 95% de confiança) para os efeitos dos tratamentos de descontaminação sobre os TNTs avaliados.....	116

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de EPIs confeccionados em TNT	25
Figura 2 – Exemplo simplificado das estruturas de tecido e tecido-não-tecido	28
Figura 3 – Equipamento de esterilização/descontaminação com vapor de peróxido de hidrogênio.....	35
Figura 4 – Equipamento UV-Clean para desinfecção de protetores respiratórios.....	38
Figura 5 – Imageamento de amostras de TNT de 40 e 60 g m ⁻² em aumento de 100 vezes (100x) em microscópio ótico	40
Figura 6 – Trajetória dos fluídos expelidos durante a tosse ou o espirro	41
Figura 7 – Fluxograma das etapas da pesquisa científica	44
Figura 8 – Amostras preparadas para a irradiação gama (à esquerda), Becker contendo as amostras (centro) e irradiador Gammacell 220 Excel (à direita).....	45
Figura 9 – Balança semi-analítica utilizada nos ensaios	47
Figura 10 – Máquina de lavar (à esquerda) e secadora (à direita) utilizados nos ensaios	48
Figura 11 – Protetor para a lavagem dos recortes de TNT	49
Figura 12 – Câmara interna do sistema UV Clean.....	51
Figura 13 – Preparação das subamostras em lâminas para a microscopia ótica.....	52
Figura 14 – Microscópio ótico Leica DM1000 com sistema de captura de imagens .	53
Figura 15 – Imagem em cores (à esquerda) obtida por microscopia ótica da subamostra de TNT de 40 g m ⁻² e a correspondente imagem convertida em preto branco (à direita)	54
Figura 16 – Dimensões da câmara do ensaio do spray	56
Figura 17 – Gráfico de dispersão e desvio padrão do jato do spray	57
Figura 18 – Arranjo experimental para o ensaio por spray.....	58
Figura 19 – Imagem e transformação de dados do ensaio de Spray	59
Figura 20 – Processamento das imagens para a obtenção de dados numéricos.	60
Figura 21 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras analisadas por UVC (TNT de 40 g m ⁻²).....	64
Figura 22 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC	65

Figura 23 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre as amostras e os ciclos de radiação UVC para o TNT de 40 g m ⁻² de acordo com os valores médios de passagem de luz	66
Figura 24 – Histograma dos resíduos da análise de variância para a passagem de luz do TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC	67
Figura 25 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras analisadas por UVC (TNT de 60 g m ⁻²)	69
Figura 26 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC	70
Figura 27 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre as amostras e os ciclos de radiação UVC para o TNT de 60 g m ⁻² de acordo com os valores médios de passagem de luz	71
Figura 28 – Histograma dos resíduos da análise de variância para a passagem de luz do TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC	72
Figura 29 – Gráfico <i>boxplot</i> para as médias dos valores de passagem de luz – PL das amostras analisadas do TNT de 40 g m ⁻² no ensaio de lavagem/secagem	74
Figura 30 – Gráfico <i>boxplot</i> para as médias dos valores de passagem de luz – PL das amostras 2 e 4 do TNT de 40 g m ⁻² no ensaio de lavagem/secagem	75
Figura 31 – Gráfico <i>boxplot</i> para as médias dos valores de passagem de luz – PL para os ciclos de secagem/lavagem de todas as amostras analisadas do TNT de 40 g m ⁻²	76
Figura 32 – Gráfico <i>boxplot</i> para as médias dos valores de passagem de luz – PL para os ciclos de secagem/lavagem considerando apenas as amostras 2 e 4 analisadas do TNT de 40 g m ⁻²	77
Figura 33 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras submetidas aos ciclos de lavagem/secagem do TNT de 60 g m ⁻²	79
Figura 34 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem	80
Figura 35 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre as amostras e os ciclos de lavagem/secagem para o TNT de 60 g m ⁻² de acordo com os valores médios de passagem de luz	81

Figura 36 – Histograma dos resíduos da análise de variância para a passagem de luz do TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem	82
Figura 37 – Histograma dos resíduos para a passagem de luz do TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem e à radiação gama.....	84
Figura 38 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras submetidas a ciclos de lavagem/secagem e à radiação gama do TNT de 40 g m ⁻²	84
Figura 39 – Comparações múltiplas para os efeitos das interações entre médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras e dos ciclos (à esquerda) e do tratamento Irradiação (à direita) analisadas do TNT de 40 g m ⁻²	85
Figura 40 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem	86
Figura 41 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 40 g m ⁻² submetidos à irradiação gama.....	87
Figura 42 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 40 g m ⁻²	88
Figura 43 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre Ciclo, Irradiação e Amostra para o TNT de 40 g m ⁻²	89
Figura 44 – Histograma dos resíduos para a passagem de luz do TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem e à radiação gama.....	91
Figura 45 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras analisadas do TNT de 60 g m ⁻²	91
Figura 46 – Comparações múltiplas para os efeitos das interações entre médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras e dos ciclos (à esquerda) e do tratamento Irradiação (à direita) analisadas do TNT de 60 g m ⁻²	92
Figura 47 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem	93
Figura 48 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 60 g m ⁻² submetidos à irradiação gama.....	94

Figura 49 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 60 g m ⁻²	95
Figura 50 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre Ciclo, Irradiação e Amostra para o TNT de 60 g m ⁻²	96
Figura 51 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de irradiação com UVC	98
Figura 52 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de irradiação UVC.....	98
Figura 53 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem	99
Figura 54 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de irradiação UVC.....	101
Figura 55 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores de manchas – t(PL) para o TNT de 40 g m ⁻² submetidos à irradiação gama.....	102
Figura 56 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem	103
Figura 57 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 40 g m ⁻² submetidos a radiação gama	104
Figura 58 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 40 g m ⁻²	105
Figura 59 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem e irradiação gama	106
Figura 60 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC	107
Figura 61 – Imagem por microscopia ótica Leica DM6 B (aumento de 100x) com detalhes de rompimento da fibra sintética (acima) e abertura de espaços no ponto de solda (abaixo) do TNT de 60 g m ⁻²	108

Figura 62 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 40 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem e irradiação gama	109
Figura 63 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem	110
Figura 64 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem	111
Figura 65 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores de manchas – t(PL) para o TNT de 60 g m ⁻² submetidos à irradiação gama.....	112
Figura 66 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem	113
Figura 67 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 60 g m ⁻² submetidos a radiação gama	114
Figura 68 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 60 g m ⁻²	115
Figura 69 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 60 g m ⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem e de radiação gama.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS

ABINT	Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos
ANIVA	Análise de Variância
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AVC	Acidente vascular cerebral
BFE	Eficiência de filtração bacteriológica
CFE:	Conselho Federal de Enfermagem (Brasil)
CRCN-NE	Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste
CV%	Coeficiente de variação em porcentagem
DEN	Departamento de Energia Nuclear
DNA	Ácido desoxirribonucleico
Dpi	<i>Dots Per Inch</i> (Pontos por Polegada)
EPI	Equipamento de proteção individual
EPIs	Equipamentos de proteção individual
ETO	Óxido de etileno
EPR	Modelo de protetor respiratório do tipo respirador autônomo
ESPII	Emergência de Saúde Pública de Importância Internacional
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , ou seja, Organização Internacional de Padronização
JPEG	<i>Joint Photographic Expert Groups</i> , ou seja, Grupo de Peritos Fotográficos Unidos
kGy	quilogray (unidade de medida da quantidade de radiação absorvida)
LECC	Laboratório Emergencial de Combate à COVID-19 do CRCN-NE
LMRI	Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes

MDIE	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MO	Microscopia ótica
N95	Protetor respiratório com capacidade de filtragem de 95% do ar
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
OMS	Organização Mundial da Saúde
PFF2	Peça facial filtrante tipo 2
PL	Valores decimais da porcentagem de passagem de luz
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila (plástico termoplástico)
RDC	Resolução de Diretoria Colegiada da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Brasil)
ROI	<i>Region of interest</i> (região de interesse)
SARS	Síndromes respiratórias agudas
SDRA	Síndrome do desconforto respiratório agudo
SMS	<i>Spunbond-meltblown-spunbond</i> (tri-tecido laminado)
TNT	Tecido não tecido
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UVC	Raios ultravioleta do tipo C

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1. Pandemia.....	23
2.2. Alta demanda de EPIs	24
2.3. Equipamento de proteção individual	26
2.4. Importância do TNT na confecção de EPI	28
2.5. Reuso de EPIs após processos de descontaminação	30
2.6. Técnicas para descontaminação de agentes patogênicos.....	32
2.6.1. Esterilização.....	33
2.6.2. Desinfecção	34
2.6.3. Irradiação gama	35
2.6.4. Irradiação com ultravioleta tipo C - UVC.....	36
2.7. Técnicas de verificação de integridade do TNT	38
2.7.1. Microscopia ótica	39
2.7.2. Ensaio por spray	40
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	43
3.1. Irradiação gama	44
3.2. Lavagem e secagem.....	46
3.3. Radiação UVC	50
3.4. Preparação das amostras para análise.....	51
3.5. Microscopia ótica	52
3.6. Ensaio por spray	55
3.7. Obtenção dos dados e análise estatística.....	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1. Ensaios por microscopia ótica	63

4.1.1.	Efeitos da radiação UVC sobre TNT de 40 g m ⁻²	63
4.1.2.	Efeitos da radiação UVC sobre TNT de 60 g m ⁻²	68
4.1.3.	Efeitos da lavagem/secagem sobre TNT de 40 g m ⁻²	73
4.1.4.	Efeitos da lavagem/secagem sobre TNT de 60 g m ⁻²	78
4.1.5.	Efeitos sinérgicos entre lavagem/secagem e irradiação gama sobre TNT de 40 g m ⁻²	83
4.1.6.	Efeitos sinérgicos entre lavagem/secagem e irradiação gama sobre TNT de 60 g m ⁻²	90
4.2.	Ensaio por spray	96
4.2.1.	Efeitos da radiação UVC sobre TNT de 40 g m ⁻²	97
4.2.2.	Efeitos da lavagem/secagem sobre TNT de 40 g m ⁻²	99
4.2.3.	Efeitos da radiação gama sobre TNT de 40 g m ⁻²	101
4.2.4.	Efeitos de lavagem/secagem e radiação gama sobre TNT de 40 g m ⁻² 102	
4.2.5.	Efeitos da radiação UVC sobre TNT de 60 g m ⁻²	106
4.2.6.	Efeitos da lavagem/secagem sobre TNT de 60 g m ⁻²	109
4.2.7.	Efeitos da radiação gama sobre TNT de 60 g m ⁻²	111
4.2.8.	Efeitos de lavagem/secagem e radiação gama sobre TNT de 60 g m ⁻² 112	
4.2.9.	Compilação dos resultados.....	116
5.	CONCLUSÕES	118
6.	PERSPECTIVAS.....	121
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
	APÊNDICE 1 – Resultados de passagem de luz para o tratamento UVC no TNT de 40 g m ⁻²	133
	APÊNDICE 2 – Resultados de passagem de luz para o tratamento UVC no TNT de 60 g m ⁻²	134
	APÊNDICE 3 – Resultados de passagem de luz para o tratamento lavagem/secagem no TNT de 40 g m ⁻²	135

APÊNDICE 4 – Resultados de passagem de luz para o tratamento lavagem/secagem no TNT de 60 g m ⁻²	137
APÊNDICE 5 – Resultados de passagem de luz para os tratamentos lavagem/secagem e irradiação no TNT de 40 g m ⁻²	139
APÊNDICE 6 – Resultados de passagem de luz para os tratamentos lavagem/secagem e irradiação no TNT de 60 g m ⁻²	140
APÊNDICE 7 – Resultados de quantidade de manchas para o tratamento UVC no TNT de 40 g m ⁻²	141
APÊNDICE 8 – Resultados de quantidade de manchas para o tratamento lavagem/secagem no TNT de 40 g m ⁻²	142
APÊNDICE 9 – Resultados de quantidade de manchas para os tratamentos lavagem/secagem e irradiação no TNT de 40 g m ⁻²	143
APÊNDICE 10 – Resultados de quantidade de manchas para o tratamento UVC no TNT de 60 g m ⁻²	144
APÊNDICE 11 – Resultados de quantidade de manchas para o tratamento lavagem/secagem no TNT de 60 g m ⁻²	145
APÊNDICE 12 – Minuta de protocolo de verificação de qualidade do tecido não tecido (tnt) para epis	146

1. INTRODUÇÃO

Em 2020, a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou a COVID-19, doença causada pelo vírus SARS-CoV-2, como Emergência de Saúde Pública de Importância Internacional, o mais alto nível de alerta da Organização, conforme previsto no Regulamento Sanitário Internacional. Essa declaração foi motivada pela notificação, no final de 2019, de vários casos de pneumonia na província de Hubei, na China, e pela rápida propagação global do vírus, que levou a OMS a caracterizar a COVID-19 como uma pandemia. A decisão da OMS visava aprimorar a coordenação, a cooperação e a solidariedade global para conter a disseminação do vírus, que ameaçava colapsar os sistemas de saúde em todo o mundo (WHO, 2020; He et al., 2020).

Diante da rápida disseminação do SARS-CoV-2, a OMS e a comunidade médica recomendaram, inicialmente, o confinamento populacional para implementar o distanciamento físico. Essa medida visava reduzir a transmissão do vírus, protegendo, principalmente, indivíduos com maior risco de desenvolver formas graves da COVID-19, como idosos e portadores de comorbidades que incluem os portadores de doenças pulmonares crônicas, doenças renais crônicas, diabetes mellitus, doenças hepáticas crônicas e obesidade. Adicionalmente, a OMS preconizou o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), como máscaras, luvas e aventais, especialmente para profissionais de saúde, com o objetivo de mitigar a contaminação e a transmissão do vírus (WHO, 2020).

O uso massivo de EPIs principalmente pelos profissionais da área de saúde, levou a escassez destes materiais, aumentando a insegurança quanto ao fornecimento, a consequente variação de preços dos materiais, a divergência de informações quanto a eficiência, bem como a dificuldade de planejar e executar as medidas de proteção. Diante do cenário caótico da pandemia, os órgãos e instituições internacionais passaram a incentivar a prática do reuso, especialmente dos respiradores tipo N95 e PFF2, ou equivalente a fim de minimizar a falta de recursos e de EPIs, que foi imediatamente acatada pelas instituições locais de cada país, no caso do Brasil, a ANVISA (WHO, 2021; ANVISA, 2020a; CDC, 2020a).

Estudos demonstraram a presença de microrganismos e o potencial aumento da carga microbiana em EPIs reutilizados, como as máscaras caseiras (Neves et al., 2023). Outros trabalhos investigaram a eficácia da filtragem após o uso prolongado, a partir dos testes de filtragem de fômites nas camadas dos respiradores tipo N95 e PFF2. (Bezerra, 2022; Medeiros et al., 2022; Medeiros et al., 2023; Arruda, 2023; Paiva et al., 2023; Silva et al., 2024a; Silva et al., 2024b). Nos ensaios conduzidos no Laboratório Emergencial de Combate à COVID-19 do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (LECC/CRCN-NE) (Bezerra, 2022; Medeiros et al., 2022, Medeiros et al., 2023; Arruda, 2023; Paiva et al., 2023; Silva et al., 2024a; Silva et al., 2024b), as peças filtrantes semifaciais do respirador tipo PFF2 confeccionadas com TNT foram o principal objeto de estudo, devido à sua ampla utilização em ambientes hospitalares.

Segundo a NBR 13370 normatizado através da ABNT (2017), o TNT é um material composto por uma rede de fibras poliméricas, predominantemente polipropileno (PP), dispostas aleatoriamente e unidas por processos térmicos ou de pressão. Devido à sua versatilidade e custo relativamente baixo, o TNT é amplamente utilizado na confecção de EPIs, tais como máscaras, toucas, protetores de calçados e aventais. Esses EPIs são essenciais em ambientes hospitalares, instituições de pesquisa e ensino, e em serviços essenciais à população. Além disso, o TNT apresenta facilidade de manuseio e disponibilidade no mercado.

A literatura científica apresenta lacunas quanto aos procedimentos otimizados para a descontaminação de EPIs confeccionados em TNT. O LECC/CRCN-NE conduziu estudos avaliando a eficácia da descontaminação por peróxido de hidrogênio (Ferreira et al., 2021), vapor úmido (Neves et al., 2022) e radiação ultravioleta tipo C (UVC) (Medeiros et al., 2022, Medeiros et al., 2023). Tais estudos demonstraram alterações nas propriedades de filtração dos protetores respiratórios de TNT. Diante da escassez de informações sobre a descontaminação (remoção física de contaminantes) e o reuso de EPIs de TNT, tanto de gramaturas moderadas (40 g m^{-2}) quanto mais elevadas (60 g m^{-2}), torna-se imperativo o desenvolvimento de ensaios para avaliar a integridade estrutural do TNT, especialmente após processos de descontaminação/esterilização, a fim de garantir a manutenção da função protetora do material, ademais de que eventuais surtos podem levar novamente a escassez do

produto. Adicionalmente, constata-se a ausência de metodologias padronizadas para essa avaliação.

A presente investigação propõe um estudo integrado, combinando técnicas microscópicas e a aplicação de jatos de micro gotículas, para avaliar a viabilidade e segurança da reutilização de EPIs de TNT em cenários de escassez, como os observados durante a pandemia de COVID-19. A reutilização de EPIs, embora apresente benefícios potenciais para o setor de saúde, demanda uma avaliação criteriosa dos riscos associados à contaminação microbiana e à degradação do material, que podem comprometer a segurança do profissional de saúde. Além disso, é crucial considerar os impactos ambientais da geração de resíduos de EPIs descartáveis, que contribuem para a contaminação por microplásticos (Olivatto, 2018). Nesse contexto, a validação de métodos de descontaminação eficazes e seguros para o TNT, por meio da análise microscópica e do ensaio de spray, pode promover a conservação de recursos naturais e a redução da poluição, ao mesmo tempo em que garante a proteção dos profissionais de saúde em futuras emergências sanitárias.

Por isso, este trabalho visa desenvolver e aplicar ensaios não destrutivos por Radiação Gama, Radiação UVC, Lavagem/Secagem, Microscopia Ótica (MO) e Ensaio de Spray (ES), para avaliação da integridade de TNT utilizados em EPIs após processos de descontaminação/esterilização. Como objetivos específicos, têm-se:

- Desenvolver e aplicar métodos por microscopia ótica e ensaios com spray para estudar os efeitos dos tratamentos de esterilização/descontaminação sobre malhas de TNT com gramaturas de 40 g m^{-2} e 60 g m^{-2} ;
- Estimar o nível de proteção dos EPIs após Lavagem/Secagem com agentes sanitizantes sobre a integridade das malhas, através dos métodos de MO e ES;
- Atestar a integridade das malhas de TNT após a descontaminação/esterilização com Radiações Gama e Ultravioleta tipo C – UVC;
- Testar as interações entre processos de descontaminação empregados como Lavagem/Secagem combinado com irradiação com fonte gama.

A hipótese científica desta pesquisa investiga se os tratamentos de descontaminação/esterilização propostos neste trabalho podem induzir danos físicos em tecidos não tecidos (TNT) de 40 g m^{-2} e 60 g m^{-2} , comprometendo sua integridade

estrutural e funcional. Busca-se, ainda, implementar e validar metodologias de avaliação da integridade física do TNT após esses tratamentos viabilizando o reuso.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Na revisão da literatura, este trabalho se atentou em buscar artigos científicos que reportassem metodologias de desinfecção e verificação da integridade dos EPIs confeccionados em TNT, dada à escassez dos materiais durante o período da pandemia do COVID-19, uma vez que os dispositivos não eram utilizados de forma tão intensa e quase não se ouvia falar em reuso dos EPIs descartáveis.

2.1. Pandemia

Em 31 de dezembro de 2019, a OMS recebeu notificação de múltiplos casos de pneumonia de etiologia desconhecida na cidade de Wuhan, província de Hubei, República Popular da China. Análises subsequentes revelaram que a causa era uma nova cepa de coronavírus, até então não identificada em humanos (WHO, 2020). Em 30 de janeiro de 2020, a OMS declarou o surto da doença causada pelo novo coronavírus (COVID-19) como uma Emergência de Saúde Pública de Importância Internacional (ESPII), o mais alto nível de alerta da organização, conforme regulamentado pelo Regulamento Sanitário Internacional. Em 11 de março de 2020, a OMS classificou a COVID-19 como uma pandemia, em resposta à sua rápida disseminação global e à transmissão entre humanos (WHO, 2021).

A declaração de pandemia pela OMS teve como objetivo fortalecer a coordenação, a cooperação e a solidariedade global para conter a disseminação do vírus, que ameaçava sobrecarregar os sistemas de saúde em todo o mundo. Clinicamente, os pacientes apresentavam sintomas semelhantes aos da influenza e sintomas gastrointestinais inespecíficos, em menor grau. Contudo, alguns casos evoluíam para pneumonia moderada a grave e síndrome do desconforto respiratório agudo (SDRA), demandando hospitalização e, em indivíduos com comorbidades preexistentes, ventilação mecânica (He et al., 2020).

A COVID-19, causada pelo SARS-CoV-2, manifesta-se como uma doença aguda, geralmente autolimitada, embora aproximadamente 20% dos casos evoluam para quadros graves (WHO, 2021). A letalidade inicial, estimada em mais de 3%

(Chen, 2020), apresentou variações regionais, com o Brasil registrando 2,4% no primeiro semestre de 2021 (ANVISA, 2021).

A complexidade da COVID-19 ultrapassa o comprometimento respiratório e cardíaco, evidenciada pelo aumento de manifestações neurológicas (Li et al., 2020). Entre as complicações, destacam-se o acidente vascular cerebral (AVC), delirium, e disfunções sensoriais persistentes, como anosmia e ageusia (Lechein et al., 2020).

Profissionais de saúde representam um grupo de alto risco para a COVID-19, com estudos demonstrando uma incidência três vezes maior em comparação à população geral (Nguyen et al., 2020). No Brasil, a letalidade entre profissionais de enfermagem alcançou quase 2% (CFE, 2021).

A natureza do trabalho em ambientes de saúde, caracterizada pela exposição contínua a patógenos, estabeleceu a exposição prolongada como um fator de risco significativo para a infecção por COVID-19. A utilização de EPIs se tornou, portanto, um protocolo indispensável para a salvaguarda dos profissionais da saúde. Tais controles, supervisionados por profissionais de saúde e agências reguladoras, objetivaram assegurar a qualidade e a correta utilização dos equipamentos. Além disso, entidades de classe de trabalhadores desempenharam um papel crucial na fiscalização e no acompanhamento das condições de segurança, visando proteger a integridade dos profissionais de saúde, frequentemente submetidos a condições de trabalho desafiadoras e à escassez de recursos (Pozzer, 2020).

A exposição a riscos biológicos em ambientes de saúde, intensificada pela COVID-19, impôs protocolos rigorosos de EPIs. Nesse cenário, a utilização de EPIs foi imprescindível para proteção da saúde dos profissionais. A crescente demanda por EPIs exigiu não apenas o aumento da produção e distribuição, mas também a implementação de controles rigorosos e treinamento. O manuseio inadequado, desde a colocação até o descarte, aumenta o risco de contaminação (Verbeek et al., 2020).

2.2. Alta demanda de EPIs

Diante da necessidade de garantir a segurança dos profissionais de saúde e da sobrecarga do sistema hospitalar, o isolamento social foi implementado, visando

proteger principalmente indivíduos de alto risco, como idosos e pacientes com comorbidades (doenças renais, hepáticas, pulmonares) (He et al., 2020). Contudo, o isolamento profilático demonstrou-se insuficiente para conter a disseminação do SARS-CoV-2, tornando imperativo o uso de EPIs, incluindo máscaras, luvas, toucas, aventais, propés e capuzes (Figura 1). A adoção dessas medidas, especialmente em ambientes de assistência à saúde, teve como objetivo mitigar a transmissão do vírus.

Figura 1 – Tipos de EPIs confeccionados em TNT



Fonte: <https://ecodanusa.pt/produtos/equipamento-de-protecao-individual/> (2020)

A rápida disseminação da COVID-19 gerou um aumento exponencial na demanda por EPIs, visando proteger tanto pacientes quanto profissionais de saúde na linha de frente. Diante da escassez global e da sobrecarga na produção de EPIs, órgãos reguladores, como a OMS e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), autorizaram e recomendaram a reutilização de EPI modelo respiradores

semifaciais N95, PFF2 ou equivalente, adaptando as diretrizes para enfrentar a crise (ANVISA, 2020a; CDC, 2020a; PHAN; WHO, 2021).

Neste sentido, a ANVISA já havia estabelecido diretrizes para a reutilização de respiradores semifaciais PFF2, condicionada à manutenção da vedação, integridade dos tirantes e ausência de sujidade visível (ANVISA, 2006). Essa recomendação estabeleceu um precedente para a reutilização de EPIs em condições mínimas, embora não abordasse especificamente os procedimentos de descontaminação. No trabalho desenvolvido no LECC com relação ao reuso dos respiradores tipo PFF2, foi possível confirmar a possibilidade do uso das máscaras em até 36 horas, sem que houvesse dano significativo as tramas, e sem diminuir a função de proteção do EPI (Bezerra, 2022).

2.3. Equipamento de proteção individual

A segurança e a saúde dos profissionais que atuam em instalações de saúde, como hospitais, clínicas e laboratórios, são de suma importância para a prevenção da disseminação de patógenos no ambiente laboral (Hwang, 2020; OPAS/OMS, 2020; OPAS/OMS, 2021). O uso de EPIs é mandatório em atividades com risco potencial de exposição a fluidos corporais, visando proteger a integridade física dos trabalhadores e minimizar a transmissão de agentes infecciosos (BRASIL, 2015).

A pandemia de COVID-19 impôs uma pressão sem precedentes sobre os sistemas de saúde globais, resultando em um aumento exponencial na demanda por respiradores semifaciais N95/PFF2. A escassez aguda desses equipamentos críticos, combinada com a rápida evolução das diretrizes e a disseminação de informações divergentes, gerou um cenário de incerteza e insegurança. Profissionais de saúde enfrentaram o desafio de garantir a proteção adequada em meio a um ambiente de recursos limitados e informações conflitantes sobre a eficácia dos EPIs disponíveis (Cook, 2020; Shanafelt; Trockel, 2020)

A escassez de respiradores de alta proteção levou à recomendação do uso de máscaras de tecido não profissionais pela população em geral, visando priorizar o acesso dos profissionais de saúde aos EPIs mais eficazes (Bezerra, 2022; Arruda, 2023). Com o surgimento de variantes mais transmissíveis do SARS-CoV-2, a OMS

ampliou a recomendação para o uso de respiradores de alta proteção também pela população em geral, especialmente em ambientes de alto risco, ocasionando maior demanda por EPIs (Lima, 2020).

Os respiradores semifaciais, como os modelos N95 (EUA) e PFF2 (Brasil), são projetados para oferecer proteção respiratória de alta eficiência, filtrando pelo menos 95% de partículas de até 0,3 μm , incluindo aerossóis e gotículas potencialmente infecciosas. A eficácia desses respiradores, no entanto, transcende a simples capacidade de filtração, dependendo crucialmente do ajuste facial adequado, da vedação eficaz, da integridade contínua do material filtrante durante o uso e da qualidade intrínseca do próprio material. A garantia da proteção ideal exige uma abordagem multifacetada, que englobe não apenas a seleção de equipamentos certificados, mas também a capacitação dos profissionais de saúde para o uso correto e a manutenção rigorosa dos respiradores, visando a segurança dos usuários e a prevenção da transmissão de patógenos respiratórios (CDC, 2020b; ANVISA, 2021)

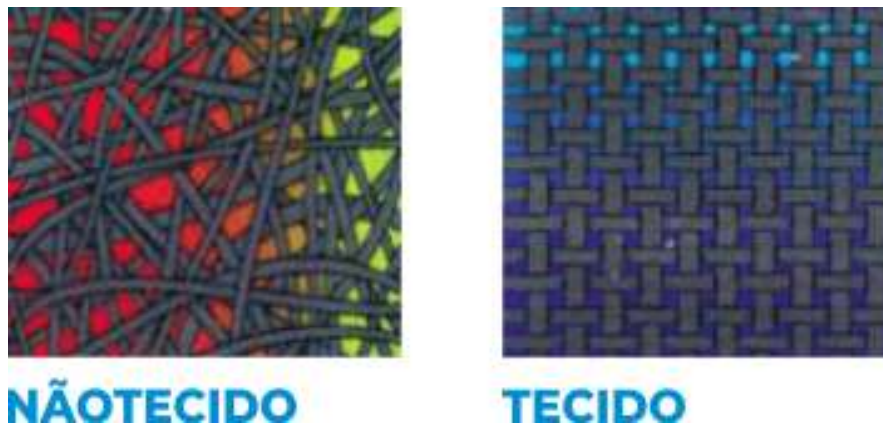
A vestimenta de proteção corporal para profissionais de saúde, compreendendo aventais e roupas privativas para procedimentos não cirúrgicos, deve assegurar a estabilidade do EPI durante o uso. O design deve incluir mecanismos de ajuste, como faixas ou tiras na cintura, para otimizar a adequação ao usuário. Para proteção eficaz, a altura mínima do avental deve ser de 1,0 m, medida da parte posterior do decote à barra inferior, prevenindo a exposição de membros superiores. O EPI deve equilibrar conforto e proteção, considerando condições ambientais, atividades do usuário e duração do uso. A impermeabilidade é crucial, com aventais/jalecos construídos com gramatura mínima de 30 g m^{-2} , para evitar a contaminação da vestimenta do profissional (ANVISA, 2020c).

A demanda por EPIs diversificou-se durante a pandemia, abrangendo uma ampla gama de dispositivos de proteção, como toucas, aventais, óculos e protetores faciais. Esses equipamentos são essenciais para proteger a pele e as roupas dos profissionais contra a contaminação por fluidos corporais e aerossóis (Souza, 2017). A confecção desses EPIs utiliza materiais que oferecem conforto e flexibilidade, como o TNT, garantindo a segurança e o bem-estar dos usuários.

2.4. Importância do TNT na confecção de EPI

O termo TNT corresponde por sua composição de fibras poliméricas predominantemente polipropileno (PP), dispostas aleatoriamente e unidas por processos térmicos, químicos ou mecânicos, interligadas por processos diversos, conferindo-lhe características singulares, como elevada porosidade e notável capacidade de filtração como mostrado na Figura 2. Essas propriedades tornam o TNT um material extremamente versátil, com aplicações que abrangem desde a confecção de EPIs até a utilização em filtros e embalagens médicas. Sua estrutura de não-tecido, distinta dos tecidos convencionais, proporciona ao TNT propriedades como leveza e resistência, atributos essenciais para a proteção eficaz em ambientes de saúde, onde a demanda por materiais descartáveis e de alta performance é constante (ABNT, 2017).

Figura 2 – Exemplo simplificado das estruturas de tecido e tecido-não-tecido



Fonte: <https://www.abint.org.br/naotecidos/o-que-sao>

O TNT apresenta uma classificação dual, abrangendo materiais duráveis e não duráveis, com composições que variam de fibras sintéticas a naturais, como o algodão (ABNT, 2017; TAVARES, 2015). Para aplicações que demandam alta performance, os materiais não tecidos fabricados por processos de fusão, termoligação ou composição, como *spunbond* e *meltblown*, são os mais indicados (Fung, 2002).

Historicamente, os setores de embalagens e transportes têm sido os principais consumidores de TNT. Contudo, a pandemia de COVID-19 provocou uma reorientação da produção industrial, direcionando-a prioritariamente para o setor de saúde. A versatilidade do TNT revelou-se crucial na confecção de EPIs descartáveis, como máscaras, toucas, aventais e propés, em resposta à crescente demanda por medidas de proteção. As vantagens intrínsecas do TNT, como a resistência a microrganismos, a compatibilidade com o corpo humano e o baixo custo, tornaram-no um material indispensável na luta contra a pandemia. A resistência a microrganismos, um atributo crucial para a proteção contra agentes infecciosos, é uma das principais vantagens do TNT. A biocompatibilidade do material com o corpo humano garante a segurança dos usuários, minimizando o risco de reações adversas ou irritações cutâneas. Além disso, o baixo custo do TNT permite a produção em larga escala de EPIs, tornando-os acessíveis a um maior número de profissionais de saúde e à população em geral (Bezerra, 2022).

A percepção de segurança associada a materiais descartáveis pode ser enganosa, pois a embalagem individual e a aparência de limpeza não garantem a ausência de contaminação. A esterilização, por meio de processos validados, é o único meio de assegurar a eliminação de patógenos em materiais descartáveis, conferindo-lhes a segurança necessária para uso em ambientes de saúde (Bezerra, 2022). A ausência de esterilização adequada pode comprometer a eficácia dos materiais descartáveis, expondo pacientes e profissionais de saúde a riscos de infecção.

Inicialmente, a Associação Brasileira das Indústrias de Não-Tecidos (ABINT) direcionava suas recomendações de uso do TNT principalmente para aplicações industriais, devido às características e propriedades específicas do material. No entanto, com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento de novas tecnologias, a ABINT reconheceu o potencial do TNT para aplicações médico-hospitalares. Diante disso, as diretrizes foram atualizadas para incluir o uso do TNT em ambientes de saúde, visando contribuir com a segurança e a proteção de profissionais e pacientes (ABINT, 1999; ABNT, 2011).

A transição de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) reutilizáveis para descartáveis, motivada pela necessidade de assegurar a biossegurança e a praticidade em ambientes de saúde, resultou em um incremento exponencial na

geração de resíduos poliméricos. O aumento da demanda por EPIs descartáveis, exacerbado pela pandemia de COVID-19, intensificou a problemática da gestão de resíduos, acarretando impactos ambientais adversos significativos (Couto; Oliveira, 2019). A maioria das embalagens poliméricas, incluindo aquelas empregadas em EPIs descartáveis, é concebida para uso único, culminando na perda de 95% do seu valor econômico, estimado entre US\$ 80 bilhões e US\$ 120 bilhões anuais, após a primeira utilização. A produção e o descarte inadequado de resíduos poliméricos contribuem para a poluição ambiental, além de representar riscos para a fauna e a flora. A persistência de microplásticos no meio ambiente, originados da degradação de resíduos poliméricos, configura uma ameaça crescente para os ecossistemas. Nesse contexto, a pesquisa e o desenvolvimento de alternativas sustentáveis, como tecnologias de reuso, tornam-se imperativos para mitigar os impactos ambientais negativos associados à produção e ao descarte de EPIs descartáveis, e para promover a economia circular (ATLAS DO PLÁSTICO, 2020).

O tecido SMS (*spunbond-meltblown-spunbond*), pode atingir resultados de eficiência de filtração bacteriológica (EFB) superiores a 90% (ANVISA, 2020b), e é adequado para a produção de máscaras cirúrgicas descartáveis, EPIs fundamentais para a segurança e saúde de trabalhadores em diversas áreas, incluindo saúde e segurança alimentar (ANVISA, 2006). A escassez global de EPIs e matérias-primas, agravada pela pandemia de COVID-19, motivou o presente estudo, que visa explorar alternativas para o uso prolongado e seguro desses materiais, contribuindo para a proteção da biodiversidade e dos recursos naturais.

2.5. Reuso de EPIs após processos de descontaminação

O incremento no consumo de protetores respiratórios e máscaras faciais durante a pandemia de COVID-19 deflagrou um colapso na cadeia de suprimentos desses EPIs, agravado pela recorrência de endemias sazonais, como a influenza. Essa escassez impôs a necessidade de uso prolongado de EPIs descartáveis, suscitando preocupações concernentes à contaminação, haja vista que patógenos aerotransportados podem se aderir às fibras dos respiradores (Phan, 2020). A situação foi exacerbada pela depleção dos estoques de respiradores no mercado

internacional (OPAS, 2020), estimulando a investigação e o desenvolvimento de metodologias de descontaminação para assegurar a biossegurança no reuso desses dispositivos.

Dentre os EPIs utilizados em um hospital, touca descartável, protetor facial ou óculos de proteção, máscara tipo N95/PFF2 ou equivalente, jaleco/avental e luvas de procedimento são recomendadas (ANVISA, 2020a). Os respiradores, em particular, assumem um papel crítico na prevenção da transmissão de patógenos respiratórios, como o SARS-CoV-2, haja vista que a principal via de contágio é aérea. Ademais, concorrendo com a via de contaminação, é o fato de ter havido uma escassez mundial dos dispositivos de segurança, levando as autoridades a autorizarem o uso prolongado dos respiradores. Em função da extensão do tempo de uso, pode haver um aumento significativo da presença de microrganismos presentes nas máscaras (Neves et al., 2023).

A diminuição da razão entre a disponibilidade de EPIs e a demanda mundial, resultante do aumento exponencial do consumo de protetores respiratórios e máscaras faciais durante a pandemia, impulsionou a necessidade de uso prolongado desses dispositivos descartáveis. Diante desse cenário, diversos grupos de pesquisa iniciaram a investigação de metodologias de higienização e descontaminação que assegurassem a biossegurança no uso prolongado, empregando técnicas como irradiação gama, radiação UVC e uso de spray com agentes sanitizantes, como peróxido de hidrogênio (Reis et al., 2020; Bezerra, 2022; Medeiros et al., 2022; Medeiros et al., 2023; Arruda, 2023; Paiva et al., 2023; Silva et al., 2024a; Silva et al., 2024b).

Apesar dos riscos inerentes, a otimização do uso EPIs é crucial para mitigar a escassez decorrente do consumo excessivo. Nesse contexto, a presente pesquisa visa avaliar a viabilidade do reuso de peças TNT, considerando a manutenção da integridade do material após múltiplos ciclos de paramentação/desparamentação, com o objetivo de assegurar a biossegurança dos profissionais de saúde e promover a sustentabilidade econômica e ambiental em ambientes hospitalares. A validação do reuso de TNT, comprovada pela manutenção de sua integridade estrutural e funcional, contribuiria para a redução da geração de resíduos sólidos e a conservação de recursos. Adicionalmente, a crescente prevalência de microrganismos

multirresistentes a antibióticos representa um desafio significativo para a saúde pública, com potencial para agravar o prognóstico de infecções e aumentar a morbimortalidade (WHO, 2020).

Neste sentido, diversas técnicas de descontaminação foram desenvolvidas para garantir o mínimo de proteção e segurança dos trabalhadores, principalmente dos profissionais que laboram na área da saúde. Dentre as mais variadas técnicas de descontaminação, tem-se o vapor de peróxido de hidrogênio, radiação ultravioleta e calor úmido como os métodos de descontaminação mais promissores (Bezerra, 2022; Medeiros et al., 2022; Medeiros et al., 2023; Arruda, 2023; Paiva et al., 2023; Silva et al., 2024a; Silva et al., 2024b).

Em laboratórios de pesquisa, a necessidade de EPIs é análoga à de hospitais, devido à exposição a riscos biológicos, além dos demais riscos (físicos e químicos). A otimização do uso de EPIs, incluindo o reuso seguro, é fundamental para garantir a continuidade das pesquisas, especialmente em instituições com recursos limitados. A ANVISA (2020) autorizou o reuso de EPIs em situações de escassez, desde que obedeçam aos protocolos de segurança.

O TNT é uma excelente matéria prima na confecção dos EPIs e está presente em todos os elementos de um protetor respiratório, uma vez que apresenta uma aplicabilidade diversa, além de ser de baixo custo. Por estes motivos, durante muito tempo foi empregado como de uso único e, logo, descartado como resíduo. Porém, em função da crise sanitária mundial, foi necessário buscar alternativas para esta demanda (Cook, 2020).

2.6. Técnicas para descontaminação de agentes patogênicos

Em ambientes laboratoriais, a gestão de riscos biológicos exige o manejo criterioso de superfícies e materiais potencialmente contaminados, seguindo protocolos de descontaminação padronizados (OPAS/OMS, 2021). A cultura de biossegurança, que abrange desde a descontaminação de superfícies e o descarte de resíduos até o uso adequado de EPIs, demanda uma análise aprofundada da

matéria-prima utilizada na confecção desses equipamentos, visando garantir a proteção física dos trabalhadores (Kimman et al., 2008).

Por esse motivo, com a escassez na literatura sobre a desinfecção e o reuso dos EPIs confeccionados de TNT, seja de moderada gramatura (40 g m^{-2}) ou de uma gramatura maior (60 g m^{-2}), tornam-se necessários ensaios para verificar a manutenção da integridade de TNT quanto à estrutura de tramas da malha, principalmente após processos de descontaminação/esterilização, evitando a perda da sua função de proteção do usuário.

Processos de descontaminação, sejam de natureza física ou química, podem induzir alterações estruturais na matriz do tecido não tecido (TNT), comprometendo sua integridade funcional (Witzel et al., 2020). Entre os métodos de descontaminação, a esterilização por calor úmido, óxido de etileno ou irradiação gama demonstram superioridade em relação à desinfecção química, sendo preferíveis quando a viabilidade técnica (Fonseca-Silva et al., 2019).

2.6.1. Esterilização

A esterilização é um processo crítico que visa a inativação completa de microrganismos, incluindo esporos, resultando na ausência de crescimento microbiano detectável por métodos microbiológicos padronizados. Métodos de esterilização incluem calor úmido, agentes químicos germicidas, óxido de etileno e radiação ionizante (Vidigal-Júnior et al., 2020).

O vapor saturado sob pressão, empregado em autoclaves, é considerado o método de esterilização mais eficaz para artigos hospitalares contaminados, devido à sua capacidade de inativar um amplo espectro de microrganismos. A elevação da temperatura do vapor acima de 100°C , obtida através do aumento da pressão, é fundamental para garantir a inativação de microrganismos termorresistentes. O controle rigoroso de parâmetros como pressão, temperatura e tempo de exposição é essencial para assegurar a eficácia do processo de esterilização (RIVM, 2020; OPAS/OMS, 2021).

Artigos médico-hospitalares fabricados com materiais sensíveis ao calor ou à umidade exigem métodos de esterilização de baixa temperatura. Esses métodos incluem óxido de etileno (ETO), plasma de peróxido de hidrogênio, ozônio, radiação gama e ultravioleta (Salles, 2015). A escolha do método de esterilização depende da compatibilidade do material, da natureza da contaminação e da finalidade do artigo.

2.6.2. Desinfecção

A desinfecção, um processo fundamental em ambientes de saúde, visa a inativação de microrganismos em superfícies e Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), com exceção de esporos bacterianos. Este procedimento pode ser realizado por métodos físicos ou químicos, sendo a desinfecção química uma técnica de descontaminação que emprega agentes químicos para reduzir a carga microbiana a níveis seguros (ANVISA, 2012; Vidigal-Júnior et al., 2020). A aplicação de desinfetantes químicos é rotineira na assepsia de equipamentos e mobiliário utilizados na assistência à saúde, abrangendo desde acessórios para assistência respiratória e endoscópios até espelhos e lâminas de laringoscópios (Crow, 1993; ANVISA, 2010).

Os métodos de desinfecção podem ser físicos, por ação térmica, ou químicos, pelo uso de desinfetantes ou combinados como mostra a Figura 3. Os meios físicos são os equipamentos de pasteurização como desinfetadoras e lavadoras de descarga. Os desinfetantes mais utilizados são à base de aldeídos, ácido peracético, soluções cloradas e álcool, assim como podem, também, ser utilizados produtos à base de amônia quaternária e peróxido de hidrogênio (Salles, 2015).

Os métodos mencionados anteriormente envolvem processos úmidos, como o uso de vapor d'água combinado com agentes sanitizantes, como o peróxido de hidrogênio. No entanto, existem métodos de esterilização/desinfecção a seco, como a radiação ionizante, a radiação UVC, que oferecem alternativas para materiais sensíveis à umidade.

Figura 3 – Equipamento de esterilização/descontaminação com vapor de peróxido de hidrogênio



Fonte: A autora (2022).

2.6.3. Irradiação gama

A esterilização por radiação gama, globalmente utilizada, tem se consolidado como um método seguro e eficaz de descontaminação. A irradiação gama, uma forma de radiação ionizante, é particularmente eficiente na esterilização de materiais poliméricos e na redução da carga microbiana em alimentos e embalagens (Aquino et al., 2014).

A aplicação da radiação gama abrange diversos setores, incluindo materiais médico-hospitalares, produtos laboratoriais, farmacêuticos, veterinários e cosméticos. Na área médica, a esterilização por radiação gama é utilizada em produtos para transplantes e implantes, bem como em materiais descartáveis como luvas, seringas, agulhas, gazes e máscaras cirúrgicas (Aquino et al., 2014).

Na indústria farmacêutica, dentre as técnicas de esterilização mais utilizadas em biomateriais, a exposição aos raios gama é a técnica mais comumente usada para esterilizar seus produtos e dispositivos médicos devido à sua alta capacidade de penetração, uniformidade e taxa de absorção, dependente do tempo e das doses necessárias. Uma das principais vantagens é ausência de qualquer resíduo tóxico (Turker et al, 2014).

De acordo com a ISO 11137-1 de 2006 e a Farmacopéia Brasileira de 2010, a dose de referência para esterilizar materiais é 25 kGy, dose aplicada rotineiramente para muitos dispositivos médicos; embora haja recomendações complementares, em que, a dose de esterilização ideal passe a ser definida segundo o tipo de material. Para este processo, é utilizado o parâmetro de *bioburden* (carga microbiana), o qual se estima a quantidade de microrganismo no material a ser esterilizado, considerando os diferentes níveis de susceptibilidade microbiana (BRASIL, 2010).

Os métodos de esterilização/desinfecção a seco, como a radiação ionizante, representam alternativas viáveis, à esterilização úmida. A radiação ionizante, incluindo raios gama e feixes de elétrons, oferece a vantagem de penetrar em materiais densos e embalagens seladas, garantindo a inativação de microrganismos em toda a superfície e no interior dos artigos. A dose escolhida deve oferecer um nível de letalidade microbiana adequado e reprodutível, quando o processo é operado rotineiramente dentro das tolerâncias estabelecidas, podendo, em algumas situações, a dose ser fixada em maior ou menor do que a estabelecida (ISO, 2006).

2.6.4. Irradiação com ultravioleta tipo C - UVC

A radiação UV-C, tipo mais energético e biocida de radiação UV, é amplamente utilizada para a desinfecção de água e superfícies em ambientes hospitalares, farmacêuticos e de pesquisa. O mecanismo de ação da UV-C envolve a absorção da radiação pelas moléculas de DNA dos agentes infecciosos, resultando na formação de dímeros de timina e na inibição da replicação viral e bacteriana (Medeiros et al., 2023).

A desinfecção por UV-C tem sido objeto de estudos extensivos, com aplicações consolidadas em países como os Estados Unidos, demonstrando eficácia na redução da carga patogênica em superfícies. No entanto, estudos sobre a desinfecção de respiradores com UV-C ainda carecem de avaliações detalhadas sobre o impacto da radiação na integridade das fibras do material, um aspecto crucial para garantir a eficácia e a segurança do reuso desses EPIs (Cadnum, 2020).

A radiação ultravioleta C (UVC), compreendendo o espectro eletromagnético entre 200 nm e 280 nm, é reconhecida como um método eficaz para a inativação de vírus e bactérias em superfícies inanimadas (Kowalski, 2009; Elgujja, 2020). O mecanismo de ação da UVC é capaz de quebrar ligações químicas de ácidos nucleicos em vírus, impedindo, assim, sua replicação por ação germicida do material genético, resultando em efeito germicida (Martinho Júnior, 2008; Benevides et al., 2021; Araújo, 2022). Estudos *in vitro* e *in vivo*, como os conduzidos por Tseng e Li (2007), demonstraram a capacidade da radiação UV-C de inativar uma ampla gama de vírus em superfícies em um curto período, dependendo da dose e da carga viral. Viscusi et al. (2009) corroboram essa eficácia, considerando a radiação UVC um método adequado para a desinfecção rápida de respiradores N95, comumente utilizados em ambientes de saúde.

Durante a pandemia, o UV-Clean (Figura 4) emergiu como um dos dispositivos idealizados para a inativação do vírus SARS-CoV-2 em EPIs. Especificamente, a cabine de desinfecção por radiação UVC foi projetada para irradiar protetores respiratórios semifaciais do tipo PFF2 não dobrável, com o objetivo primordial de descontaminar esses equipamentos (Benevides et al., 2021).

Figura 4 – Equipamento UV-Clean para desinfecção de protetores respiratórios



Fonte: A autora (2022).

Visando a inativação de agentes biológicos e a preparação dos EPIs para reuso, estabeleceu-se a dose mínima de 300 J/m^2 para irradiação das tiras elásticas dos EPIs. Essa dose, três vezes superior à necessária para a inativação do coronavírus (100 J/m^2), garante uma margem de segurança na descontaminação (Benevides et al., 2021).

A ausência de metodologias padronizadas para a avaliação da integridade de EPIs de TNT após processos de descontaminação representa uma lacuna crítica no conhecimento científico. Nesse contexto, o presente estudo propõe uma abordagem inovadora, combinando técnicas de microscopia e ensaios por spray, para investigar a integridade estrutural e funcional de tramas de TNT com gramaturas de 40 e 60 g m^{-2} submetidas a diferentes métodos de esterilização/descontaminação. A metodologia proposta visa estabelecer critérios objetivos e reprodutíveis para a avaliação da integridade do TNT, contribuindo para o desenvolvimento de protocolos de reuso seguros e eficientes.

2.7. Técnicas de verificação de integridade do TNT

A escassez de artigos científicos que retratassem metodologias padronizadas para a avaliação da integridade física das tramas de TNT durante a pandemia de COVID-19 representou um desafio significativo para a pesquisa científica. No contexto do LECC/CRCN-NE, a ausência de protocolos estabelecidos para essa finalidade impulsionou o desenvolvimento de técnicas inovadoras. As técnicas desenvolvidas no contexto da presente pesquisa (Microscopia Ótica e Ensaio de Spray), foram projetadas para suprir essa lacuna, permitindo a avaliação criteriosa da integridade do TNT após diferentes processos de descontaminação/esterilização.

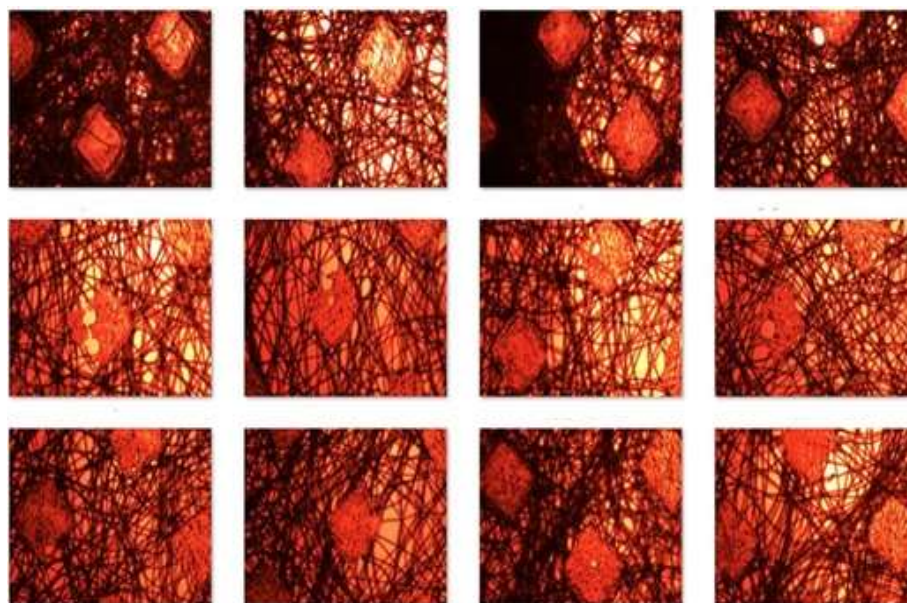
2.7.1. Microscopia ótica

A microscopia ótica (MO) é uma técnica de análise de materiais que utiliza luz visível para gerar imagens ampliadas de estruturas microscópicas, permitindo a visualização de detalhes inacessíveis ao olho nu. A formação de imagens de alta resolução em MO depende da interação da luz com a amostra, bem como de parâmetros ópticos como a abertura numérica das lentes e o comprimento de onda da luz utilizada (Mannheimer, 2002). A MO é uma ferramenta versátil e de baixo custo, amplamente empregada em diversas áreas da ciência e tecnologia, incluindo a análise da morfologia e integridade de materiais fibrosos, como o TNT utilizado em EPIs.

Para a avaliação da integridade física de materiais como o TNT, técnicas de microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) são ferramentas essenciais que podem ser empregadas. Essas técnicas permitem a visualização e análise detalhada de microestruturas e defeitos nas tramas do TNT, que seriam imperceptíveis a “olho nu” (Lima-Leachi et al., 2021).

O MO, que utiliza luz visível e um sistema de lentes de vidro para amplificar a imagem da amostra, pode ser equipado com um sistema de aquisição de imagens digitais. Essa configuração permite a captura e o registro de imagens de alta resolução das tramas do TNT, facilitando a análise e a documentação dos resultados (Neupane et al., 2019) (Figura 5).

Figura 5 – Imageamento de amostras de TNT de 40 e 60 g m⁻² em aumento de 100 vezes (100x) em microscópio ótico



Fonte: A autora (2022).

2.7.2. Ensaio por spray

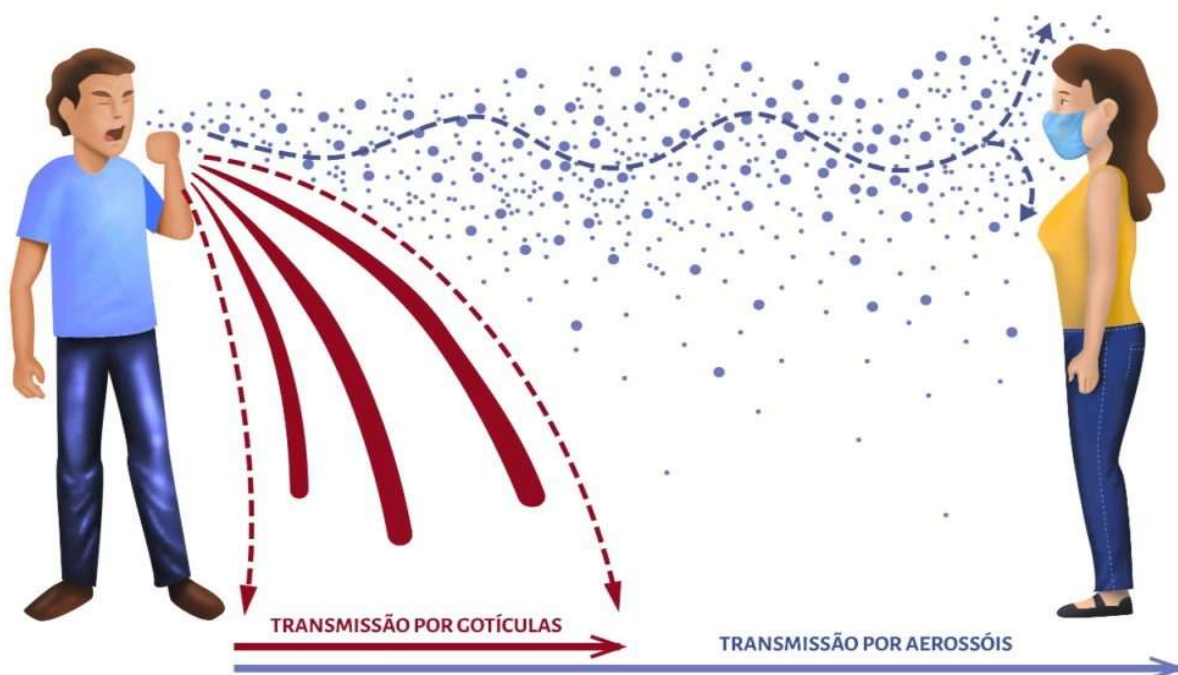
A proteção respiratória, mediada por respiradores semifaciais, é crucial para a prevenção da inalação de patógenos aerotransportados, incluindo vírus respiratórios e agentes causadores de Síndromes Respiratórias Agudas (SARS). A geração de aerossóis, compostos por gotículas contendo partículas infecciosas, representa um vetor de transmissão significativo em ambientes de saúde e comunitários. A complexidade da dinâmica de aerossóis, influenciada por fatores como tamanho das partículas e condições ambientais, exige a adoção de medidas de proteção respiratória eficazes para mitigar o risco de infecção (Lai et al., 2011; Nicas et al., 2005; Chao et al., 2009).

Embora estudos anteriores tenham se concentrado predominantemente na avaliação da eficiência de filtração de partículas em respiradores (Balazy et al., 2006; Beest, et al., 2010), a análise da integridade estrutural e funcional do TNT utilizado na confecção desses EPIs emerge como um aspecto crítico, especialmente em ambientes de assistência à saúde. A manutenção da integridade do TNT, em termos

de resistência mecânica e capacidade de barreira, é fundamental para assegurar a proteção eficaz dos profissionais de saúde contra patógenos aerotransportados. A avaliação da integridade física do TNT, portanto, transcende a mera análise da filtração de partículas, abrangendo a investigação de propriedades como resistência à tração, permeabilidade e durabilidade do material após exposição a diferentes condições de uso e descontaminação (Souza et al., 2021).

A proposição dessa técnica é baseada na simulação da trajetória dos aerossóis proporcionados pelo espirro, tosse, fala ou canto (Figura 6). A tosse ou espirro são reflexos fisiológicos desencadeados pela irritação do nervo trigêmeo quando o nervo identifica uma irritação e envia um sinal ao cérebro. Com isso, os músculos das costas e abdômen se contraem, resultando numa violenta saída de ar, acompanhada de um ruído e das gotículas (McCool, 2006). Essas gotículas, que podem conter patógenos, são capazes de se dispersar em um raio de aproximadamente 1 metro, enquanto os aerossóis, partículas menores, podem permanecer suspensos no ar por períodos prolongados e se propagar a distâncias maiores (Kutter et al., 2018).

Figura 6 – Trajetória dos fluídos expelidos durante a tosse ou o espirro



Fonte: Modificado por Marco Ribeiro (Coordcom/UFRJ).

Em seguida, combinado a métodos estatísticos de processamento de imagem, o ensaio de spray pode auxiliar na avaliação de integridade física de TNT submetidos a técnicas de descontaminação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

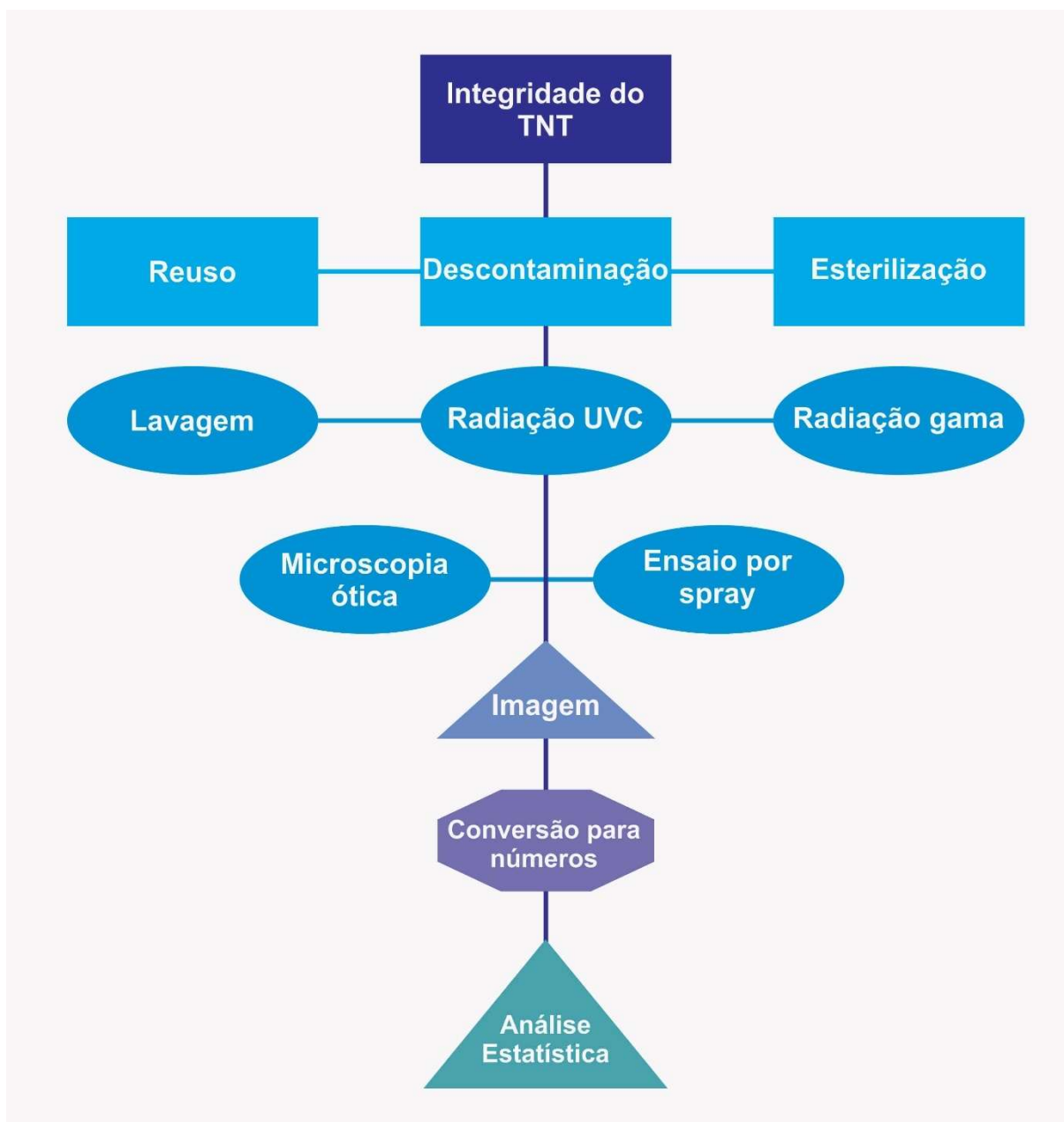
O presente estudo foi conduzido LECC/CRCN-NE, estabelecido em 2020 durante o auge da pandemia. Inicialmente, a pesquisa visava analisar a integridade de EPIs completos, como respiradores semifaciais, toucas e aventais/jalecos de TNT, após processos de descontaminação por radiação gama, UVC e lavagem/secagem. No entanto, a escassez global de EPIs direcionou o foco para a avaliação de amostras de TNT utilizadas na fabricação de jalecos, em colaboração com a Secretaria de Justiça do Estado de Pernambuco (SJEP) e o LECC/CRCN-NE.

A proposição do estudo foi baseada no fato de TNT atuar como um filtro para a passagem de bactérias e fungos na vestimenta dos profissionais de saúde, proporcionando ventilação adequada. A composição de 100% polietileno do TNT confere propriedades atóxicas e hipoalergênicas, garantindo a segurança e o conforto dos usuários durante o seu trabalho.

Nesta pesquisa, os ensaios foram realizados com as amostras de TNT de 40 e 60 g m⁻², cujas gramaturas representam a faixa de materiais mais comumente empregados na produção de EPIs, assegurando a relevância dos resultados para aplicações práticas. (ANVISA, 2020c). O TNT possui baixa liberação de partículas, que minimiza o risco de contaminação ambiental e do usuário, enquanto a elevada resistência mecânica e maleabilidade garantem a durabilidade e o conforto durante o uso. Adicionalmente, a conformidade com as diretrizes da ABINT (ABINT, 1999) reforça a segurança e a adequação do material para o uso em ambientes de saúde.

Amostras devidamente codificadas foram submetidas a protocolos de esterilização/descontaminação, visando simular condições para o reuso, conforme o fluxograma apresentado na Figura 7. Os métodos de lavagem/secagem, irradiação UVC e irradiação gama foram implementados para avaliar a resistência dos TNTs aos processos de descontaminação. A análise dos resultados primários foi realizada por meio de microscopia óptica e digitalização das impressões do ensaio de spray, conforme detalhado na Seção 3.4. Os dados obtidos, expressos em valores numéricos de passagem de luz (PL) para microscopia óptica e área de mancha para o ensaio de spray, foram submetidos a análise estatística. A significância das diferenças entre os grupos foi avaliada com um nível de confiança de 95%.

Figura 7 – Fluxograma das etapas da pesquisa científica



Fonte: A autora (2025).

3.1. Irradiação gama

Para a irradiação com fonte de radiação gama, amostras de TNT com dimensões de 30 cm x 30 cm, nas gramaturas de 40 g m⁻² e 60 g m⁻², foram preparadas para exposição. Os recortes foram justapostos e intercalados, de forma a garantir uma distribuição homogênea da radiação ao longo do volume total de um recipiente de

vidro, tipo Becker de 2L. Especificamente, foram preparadas 12 amostras de TNT com densidade de 40 g m^{-2} e 11 amostras de TNT com densidade de 60 g m^{-2} . A quantidade de amostras por gramatura foi ajustada para preencher um volume total, assegurando a otimização do processo de irradiação. Todas as amostras, com exceção dos recortes de controle (não submetidos à radiação gama), 8 amostras, foram acondicionadas no recipiente, e vedadas com filme plástico de cloreto de polivinila (PVC), visando minimizar a contaminação e a perda de umidade durante o processo de irradiação (Figura 8).

Figura 8 – Amostras preparadas para a irradiação gama (à esquerda), Becker contendo as amostras (centro) e irradiador Gammacell 220 Excel (à direita)



Fonte: A autora (2022).

O processo de irradiação gama foi realizado no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (LMRI-DEN/UFPE), utilizando um irradiador tipo Gammacell equipado com uma fonte de Cobalto-60 (^{60}Co). A dose de irradiação aplicada foi de 25 kGy, um

valor de referência para a esterilização de dispositivos médicos, conforme estabelecido na literatura. A taxa de dose da fonte de ^{60}Co em 08/11/2020 era de 1,453 kGy/hora, permitindo o cálculo preciso do tempo de exposição necessário para atingir a dose desejada.

Amostras de TNT (de 40 g m^{-2} e 60 g m^{-2}), previamente submetidas ao protocolo de lavagem/secagem (descrito na Seção 3.2), foram selecionadas para a condução de um segundo protocolo de descontaminação. Este protocolo subsequente consistiu na aplicação de irradiação gama, com o objetivo de investigar de forma abrangente as alterações estruturais e funcionais nas tramas dos TNTs decorrentes da combinação sequencial de métodos de descontaminação.

Após a irradiação, fragmentos representativos das amostras de TNT foram submetidos a processos de subamostragem, visando a obtenção de espécimes adequados para análise por MO, seguindo os protocolos detalhados nas Seções 3.4 e 3.5.

3.2. Lavagem e secagem

Para a realização do tratamento de lavagem e secagem, foram selecionadas, de forma aleatória, três unidades de TNT com gramatura de 40 g m^{-2} e três unidades de TNT com gramatura de 60 g m^{-2} para cada ciclo de lavagem, com tamanho de $90 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ cada. O estudo contemplou a avaliação de dez ciclos de lavagem/secagem, visando simular o uso repetido dos EPIs em condições reais, sem considerar possível desgastes do EPI pelo profissional. As amostras foram inicialmente pesadas em uma balança semi-analítica da marca BEL, modelo Mark 4100 – Classe II (Figura 9), com o objetivo de determinar o peso inicial de cada amostra, correspondente ao peso de um EPI do tipo jaleco comercial. A pesagem inicial das amostras de TNT de 40 g m^{-2} ($n=3$) e 60 g m^{-2} ($n=3$) foi realizada para garantir a uniformidade das amostras em termos de massa, minimizando a variabilidade nos resultados dos ensaios subsequentes ($\cong 70 \text{ g}$ para o TNT de 40 g m^{-2} e 120 g para o TNT de 60 g m^{-2} , desconsiderando o elástico). A balança semi-analítica, com sua precisão, permitiu a obtenção de dados confiáveis sobre a massa

inicial das amostras, um parâmetro importante para a avaliação das possíveis alterações decorrentes dos ciclos de lavagem e secagem.

Figura 9 – Balança semi-analítica utilizada nos ensaios



Fonte: A Autora (2025).

As amostras de TNT foram codificadas com numeração sequencial, de acordo com a gramatura, e identificadas individualmente com etiquetas costuradas. Essa medida de identificação foi implementada para garantir a rastreabilidade das amostras ao longo dos ciclos de lavagem e secagem, prevenindo trocas ou perdas de informação. Oito amostras de TNT de ambas as gramaturas foram reservadas como controle, não sendo submetidas a nenhum tratamento de descontaminação, servindo como referência para comparação com as amostras tratadas.

Todas as amostras de TNT, tanto de 40 g m⁻² quanto de 60 g m⁻², foram colocadas em uma máquina de lavar doméstica Brastemp® Turbo 9 kg (Figura 10). A máquina foi preenchida até o nível máximo de água, assegurando a imersão completa das amostras durante o ciclo de lavagem. O programa de lavagem selecionado foi o ciclo longo, com duração total de 1 hora e 48 minutos, visando simular um ciclo de lavagem intensivo. Para esse tratamento foi utilizado cerca de 200 g de detergente em pó tipo doméstico a cada ciclo (marca comercial: Guarani de 5 Kg). As características da carga da lavadora, incluindo a capacidade nominal e o volume máximo de água, foram especificadas em conformidade com a Portaria nº 185 do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), conforme

regulamentado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2005). Além da capacidade nominal, o volume do material a ser lavado também foi considerado, uma vez que materiais volumosos, mesmo que leves, podem ocupar um volume significativo, comprometendo o desempenho da lavadora. O volume das amostras de TNT utilizadas neste estudo atendeu aos requisitos de carga mínima estabelecidos na referida Portaria, garantindo o funcionamento adequado da lavadora.

Figura 10 – Máquina de lavar (à esquerda) e secadora (à direita) utilizados nos ensaios



Fonte: A autora (2025).

Após cada ciclo de lavagem, correspondente aos dez ciclos realizados, as amostras de TNT foram submetidas ao processo de secagem em uma secadora doméstica Brastemp® Ative 10 kg (Figura 10). A capacidade máxima da secadora, de 10 kg de roupa úmida, permitiu a secagem eficiente das amostras. Um ensaio preliminar foi conduzido para determinar o tempo de secagem ideal, resultando em 40 minutos, tempo suficiente para a remoção completa da umidade sem causar danos às amostras. O tempo de secagem foi ajustado utilizando o painel de controle da secadora, e o equipamento foi acionado através do botão liga/desliga. Para monitorar o progresso da secagem, as amostras foram pesadas a cada 10 minutos em uma

balança semi-analítica (Figura 9). O processo de secagem foi considerado completo quando a diferença entre duas pesagens sucessivas foi inferior a 1 grama, garantindo a remoção total da umidade, independentemente da gramatura do TNT.

A máquina de lavar utilizada no LECC é um modelo doméstico, exigindo precauções adicionais para proteger as amostras durante o ciclo de lavagem. As palhetas internas da máquina poderiam causar danos às amostras, comprometendo a integridade dos ensaios. Para mitigar esse risco, foram adquiridos protetores de roupa para máquina de lavar (30 x 40 cm), que envolveram as amostras de TNT, minimizando o atrito e prevenindo avarias durante o processo de lavagem. A capacidade da máquina de lavar permitiu a lavagem simultânea do equivalente a 30 jalecos de 40 g m⁻² e 30 jalecos de 60 g m⁻². As amostras de TNT foram distribuídas em quatro sacos protetores (cada gramatura), com cerca de oito amostras por saco (Figura 11), garantindo a lavagem homogênea e a proteção adequada das amostras.

Figura 11 – Protetor para a lavagem dos recortes de TNT



Fonte: A autora (2025).

À medida que o ciclo se completava, as amostras de TNT foram retiradas aleatoriamente e submetidas ao processo de secagem por 40 minutos, seguido de pesagem para monitoramento da umidade. Após a retirada das amostras, novas amostras devidamente identificadas foram submetidas aos ciclos de lavagem, tendo

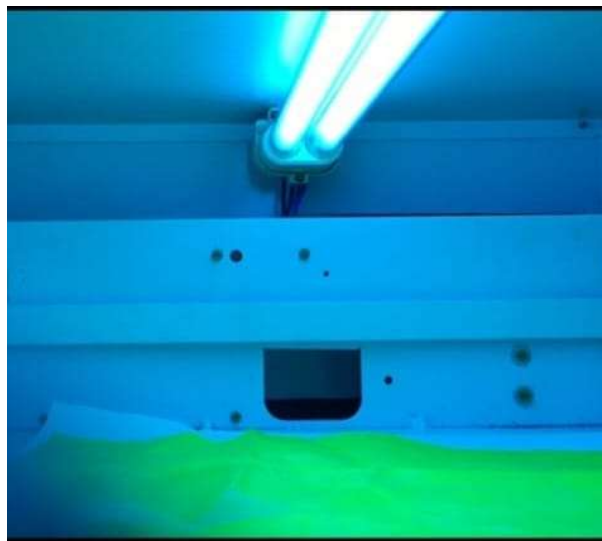
sido selecionadas amostras de acordo com os ciclos de lavagem (10 ciclos) e o número de amostras por lavagem (10 unidades). Para cada ciclo, uma amostra era retirada de maneira aleatória, para que, ao final, restassem duas unidades submetidas para cada ciclo (A-J) no limite de 10 ciclos de lavagem. Assim, foi procedido sucessivamente até que ao final do ensaio, pelo menos, duas amostras de TNT tenha sido submetido a 10 ciclos de lavagens/secagem. A amostragem aleatória foi implementada para minimizar o viés de seleção e garantir a representatividade das amostras analisadas. Após a lavagem, as amostras foram preparadas para as análises na microscopia ótica (MO) e ensaio por spray conforme a Seção 3.4.

Um conjunto de amostras submetidas ao tratamento de lavagem/secagem de cada gramatura (40 g m^{-2} e 60 g m^{-2}) foram separadas para serem submetidas a um tratamento combinado de radiação gama.

3.3. Radiação UVC

Para realizar o ensaio no equipamento UV Clean (Figura 12), foram obtidos 20 recortes de $30 \times 30 \text{ cm}$ de cada gramatura de TNT (40 e 60 g m^{-2}). Cada exemplar foi submetido à radiação ultravioleta tipo C (UVC), obedecendo a sequência até completar 10 ciclos, com exposições em todos os lados. Neste ensaio, oito amostras de TNT de ambas as gramaturas (40 e 60 g m^{-2}) foram reservadas como controle, não sendo submetidas a nenhum tratamento de descontaminação, representando a referência para comparação com as amostras tratadas. Na cabine de desinfecção por radiação UV Clean (Benevides et al., 2021), foi estabelecida uma dose mínima de 300 J m^{-2} para 30 s de irradiação de lâmpada com potência da lâmpada UVC de 27 W. O espectro óptico da emissão da lâmpada apresentou um pico intenso em 254 nm (Benevides et al., 2021) (Figura 12). Após o processo de descontaminação, os recortes de TNT foram cuidadosamente protegidos e acondicionados em sacos plásticos descontaminados, visando a preservação da integridade das amostras e a prevenção de contaminação cruzada. Logo, foram para a confecção de lâminas e posterior análise microscópica (vide próxima Seção).

Figura 12 – Câmara interna do sistema UV Clean

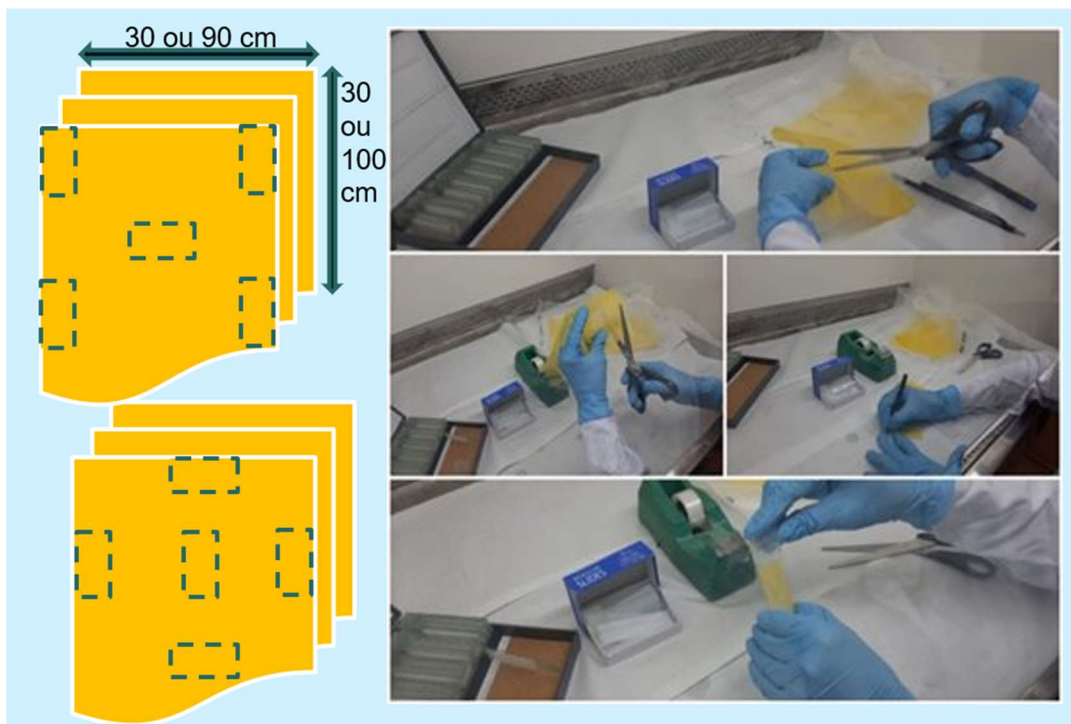


Fonte: A autora (2025).

3.4. Preparação das amostras para análise

Após a aplicação dos métodos de descontaminação por radiação gama, lavagem, radiação UVC e tratamento combinado de lavagem/secagem com radiação gama, fragmentos de aproximadamente 8 cm^2 foram delicadamente recortados, de maneira aleatória, com auxílio de tesoura esterilizada em, ao menos, 5 áreas de cada amostra dos lotes TNT (40 g m^{-2} e 60 g m^{-2}), nas extremidades e no centro de cada exemplar, fixadas em lâminas de vidro para microscopia com dimensões de $25,4 \times 76,2 \text{ mm}$ e espessura padrão (Figura 13). As amostras foram fixadas com fita adesiva transparente, nas lâminas de vidro, de forma a garantir a máxima aderência do TNT, facilitando a obtenção de imagens de alta qualidade durante a análise microscópica.

Figura 13 – Preparação das subamostras em lâminas para a microscopia ótica.



Fonte: A autora (2025).

Os fragmentos foram fixados individualmente (Figura 13) e permaneceram armazenados em caixa porta lâminas a fim de não sofrerem danos físicos adicionais.

3.5. Microscopia ótica

A aquisição das imagens microscópicas foi realizada utilizando o microscópio óptico DM1000, equipado com uma câmera digital Leica DMC 2900 e o *software* de análise de imagens Leica Application Suite versão 2000 (Figura 14). A ampliação de 100x foi selecionada para permitir a visualização detalhada da estrutura das tramas do TNT, incluindo a estrutura das fibras, os espaços inter-fibras e os pontos de solda entre as fibras. A captura das imagens foi focada nas camadas superficiais das amostras, partindo do princípio de que essas camadas, por estarem em contato direto com o ambiente externo, seriam as primeiras a apresentar sinais de danos físicos decorrentes dos processos de descontaminação. A padronização da ampliação e o foco nas camadas superficiais visaram garantir a comparabilidade dos resultados

entre as diferentes amostras e tratamentos, permitindo a análise quantitativa da integridade do TNT.

Figura 14 – Microscópio ótico Leica DM1000 com sistema de captura de imagens



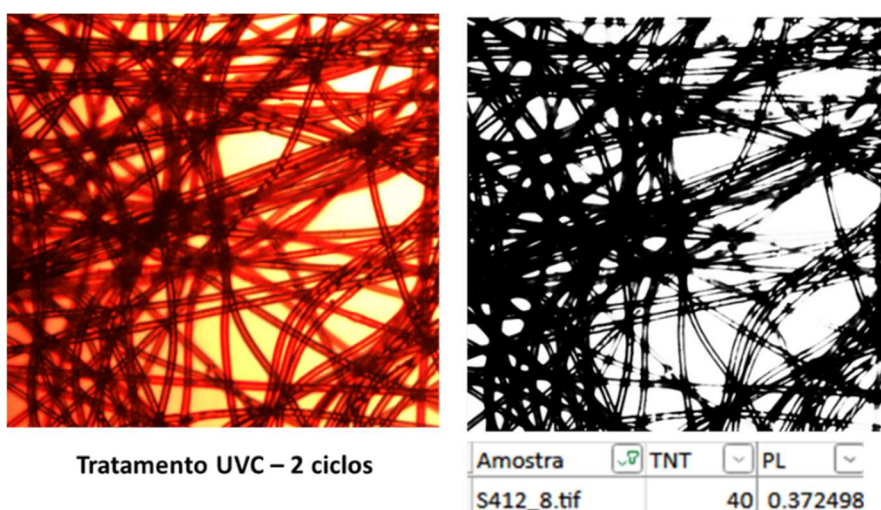
Fonte: A autora (2025).

Foram capturadas imagens ao longo da extensão de cada subamostra (fragmento), pois esta magnificação permitiu observar a estrutura dos recortes de TNT quanto à condição física das tramas e à conservação dos pontos de solda, que prendem e proporcionam a firmeza e a justaposição das fibras sintéticas. Outra vantagem desta metodologia foi a possibilidade de visualização dos espaços vazios, parâmetro considerado essencial para as análises desse trabalho, pois o aumento ou a diminuição do espaço entre fibras, indicado pela passagem de luz (PL), estão relacionados com os danos físicos ocorridos pós-tratamento.

Para a aquisição das imagens, foi realizada a padronização dos parâmetros do *software* do sistema de captura do equipamento, visando otimizar a nitidez das estruturas do TNT sem induzir alterações nas amostras. Os parâmetros ajustados incluíram a região de interesse (ROI) automática com dimensões de 1191 x 1536 pixels, intensidade de luz de 5.0, filtro de luz de 0.1, distribuição gama de 0.99, tempo de exposição de 10.5 ms, captura de imagens coloridas e resolução de 300 pontos por polegada (dpi).

As imagens obtidas foram utilizadas tanto para análise qualitativa, por meio da inspeção visual das imagens coloridas, quanto para análise quantitativa, pela estimativa da passagem de luz (PL) (Figura 15). A padronização dos parâmetros de aquisição de imagens e a utilização de ambas as abordagens de análise (qualitativa e quantitativa) visaram garantir a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados obtidos.

Figura 15 – Imagem em cores (à esquerda) obtida por microscopia ótica da subamostra de TNT de 40 g m⁻² e a correspondente imagem convertida em preto branco (à direita)



Fonte: A autora (2025).

As imagens obtidas por MO foram processadas e convertidas em dados numéricos utilizando um programa de computador de análise de imagens, conforme Seção 3.7, com o objetivo de quantificar a passagem de luz (PL) por meio dos espaços inter-fibras do TNT.

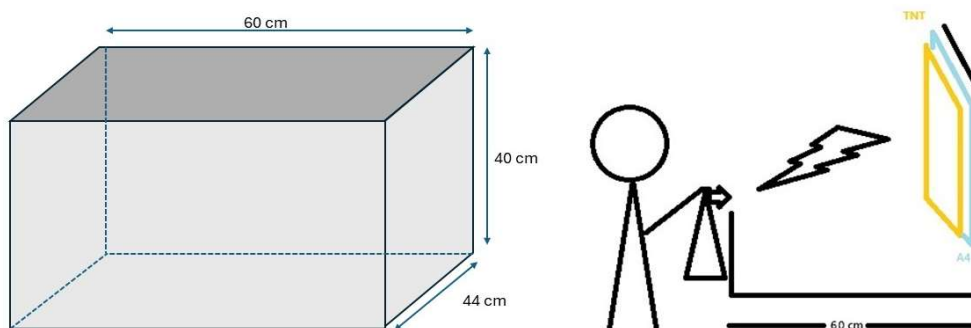
A região de interesse (ROI) para esta análise foi definida como uma área do TNT, excluindo os pontos de solda, que possuem densidade e estrutura distintas. A delimitação precisa da ROI foi crucial para garantir que o *software* identificasse corretamente a área das tramas do TNT, permitindo a análise quantitativa da passagem de luz através dos espaços inter-fibras. A exclusão dos pontos de solda da ROI foi necessária para evitar a introdução de viés nos resultados, uma vez que esses

pontos possuem características ópticas diferentes das tramas do TNT. A análise da passagem de luz através dos espaços inter-fibras forneceu informações valiosas sobre a porosidade e a integridade estrutural do TNT, permitindo a avaliação dos efeitos dos diferentes tratamentos de descontaminação.

3.6. Ensaio por spray

O ensaio de spray foi idealizado para simular o comportamento de fluidos ou secreções expelidas durante a tosse ou espirros, que, em sua trajetória, ultrapassariam a proteção física simulada pelo recorte do TNT, atingindo o usuário. Obviamente, ao aplicar um tratamento de descontaminação como radiação UVC, radiação gama e lavagem/secagem, a trama do TNT pode ser danificada, diminuindo sua capacidade de proteger o usuário. Além disso, métodos aditivos de descontaminação podem ser necessários dependendo do grau de segurança necessário.

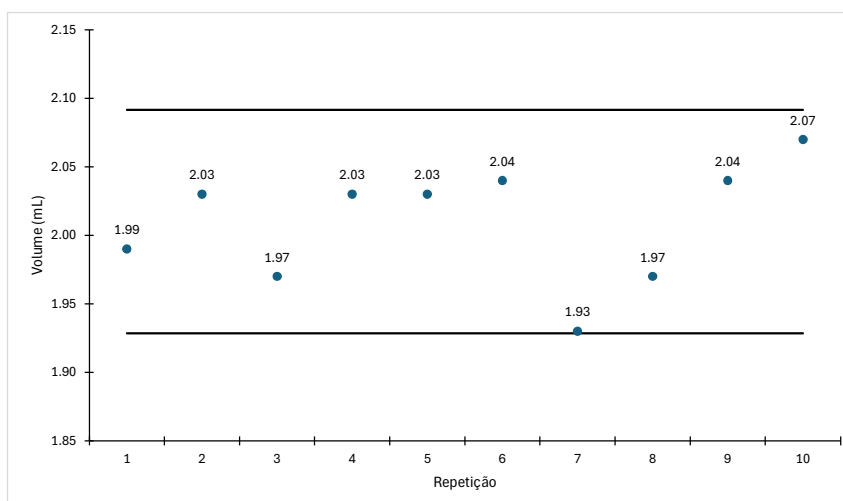
Para a realização do ensaio de spray, foi utilizada uma câmara com dimensões internas de 60 cm x 40 cm x 44 cm (Figura 16). A configuração experimental consistiu em posicionar uma folha de papel A4 branca (anteparo) numa das extremidades da câmara fixada com fita adesiva transparente, seguida da amostra de TNT, que atuou como barreira física. Na extremidade oposta ao anteparo, foi posicionado um borrifador contendo uma solução de tinta de impressora, cuja consistência e densidade (aproximadamente 0,81 g/mL) possuem características semelhantes as secreções respiratórias humanas, considerando a densidade da saliva de 1 g/mL, conforme relatado por Castilho et al. (2011). Para este ensaio, foram aplicados três jatos de spray, simulando o volume de fômites expelidos durante um espirro. A padronização do volume e da densidade do spray, bem como a configuração da câmara, visaram garantir a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados obtidos.

Figura 16 – Dimensões da câmara do ensaio do spray

Fonte: A autora (2025).

Para assegurar a reprodutibilidade e a padronização do volume de solução expelida durante o ensaio de spray, foi realizado um teste preliminar. Este teste consistiu em disparar três jatos da solução de tinta, utilizando o borrifador, diretamente em um tubo Falcon de 50 mL, seguido da pesagem do conteúdo para determinar o volume expelido. Cada disparo do spray teve duração aproximada de 1 segundo e resultou na liberação de um volume médio de 0,827 mL da solução, com uma velocidade máxima do jato estimada em torno de 10 m s^{-1} . O teste foi repetido dez vezes, gerando um conjunto de dados que permitiu a avaliação da variabilidade do volume expelido. A análise dos dados revelou um coeficiente de variação (CV) de 2% (Figura 17), um valor considerado baixo e indicativo de alta precisão e reprodutibilidade do volume expelido por disparo. Este resultado demonstrou a conformidade na repetição dos jatos de spray, confirmando que o volume da solução permaneceu estatisticamente semelhante entre os disparos, um fator crucial para a validade e a comparabilidade dos resultados desse ensaio.

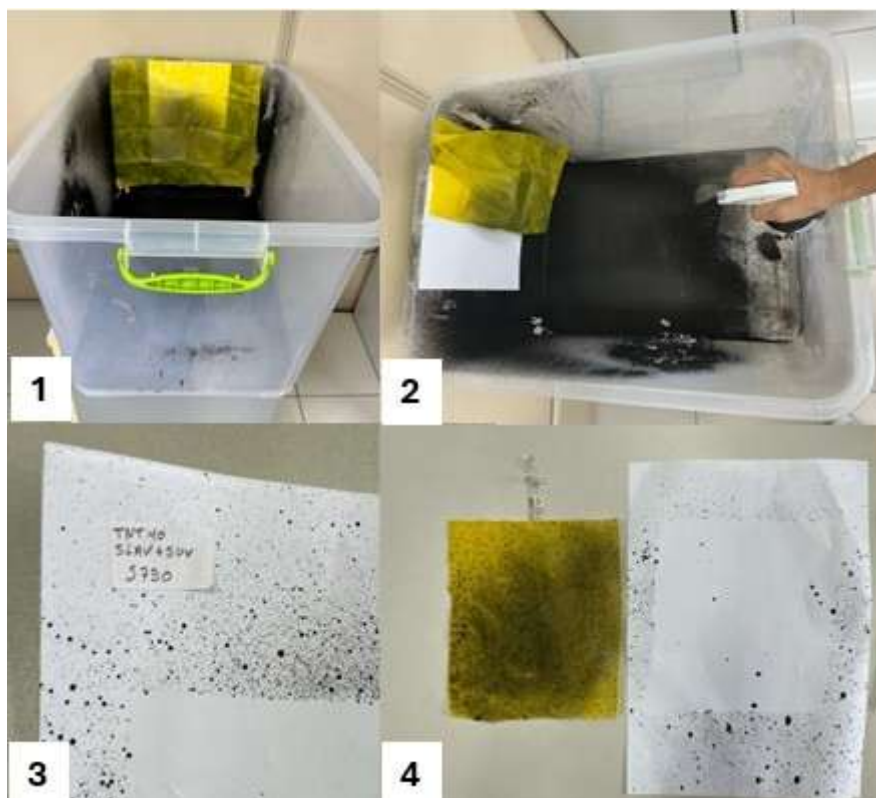
Figura 17 – Gráfico de dispersão e desvio padrão do jato do spray



Fonte: A autora (2025).

As amostras do TNT, com dimensões de 30 cm x 30 cm, foram posicionadas a uma distância de aproximadamente 60 cm da fonte do spray, simulando a distância de propagação de aerossóis durante um espirro ou tosse. Três jatos de spray foram aplicados em cada amostra (pelo menos um exemplar para cada tratamento de acordo com cada ciclo), representando a liberação de fômites em direção aos recortes de TNT de 40 g m⁻² e 60 g m⁻². Uma folha de papel A4 foi posicionada atrás das amostras, atuando como anteparo para capturar os aerossóis que ultrapassaram a barreira física do TNT (Figura 18). As marcações resultantes na folha de papel A4, correspondentes aos aerossóis que penetraram no TNT, ficaram registradas e os anteparos foram devidamente identificados e numerados, correlacionando-os com os respectivos tratamentos de descontaminação aplicados: lavagem/secagem, radiação gama, radiação UV-C e a combinação de lavagem/secagem e radiação gama. A padronização das dimensões das amostras, da distância de aplicação do spray e do número de jatos visou garantir a reprodutibilidade do ensaio e a comparabilidade dos resultados entre os diferentes tratamentos. Devido às dimensões padronizadas dos recortes de TNT, não foi possível avaliar a interação entre os métodos de descontaminação radiação UV-C e lavagem/secagem, limitando a análise das interações a lavagem/secagem e radiação gama.

Figura 18 – Arranjo experimental para o ensaio por spray.

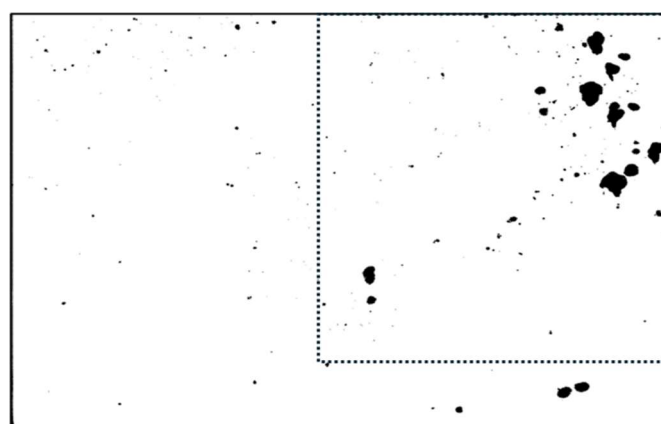


1 = posicionamento do recorte de TNT. 2 = spray direcionado ao anteparo. 3 = identificação da imagem do ensaio. 4 = TNT e anteparo pós ensaio

Fonte: A autora (2025).

As folhas contendo as marcações foram digitalizadas utilizando o equipamento impressora HP® Officejet Pro 8500A com resolução de 300 dpi em tons de cinza com o tamanho real da imagem em 21x29,7 cm. A digitalização padronizada permitiu quantificar a intensidade das marcações, correlacionando-as com a penetração de aerossóis no TNT. Todas as imagens foram digitalizadas e submetidas à análise de processamento de imagem, conforme detalhado na Seção 3.7. A análise digital das imagens permitiu a extração de dados quantitativos sobre a área e a intensidade das marcações, fornecendo informações sobre a capacidade de barreira do TNT frente à penetração de aerossóis (Figura 19).

Figura 19 – Imagem e transformação de dados do ensaio de Spray



Nome_Arquivo	Gramatura	Manchas
S667.jpg	40	0,01546

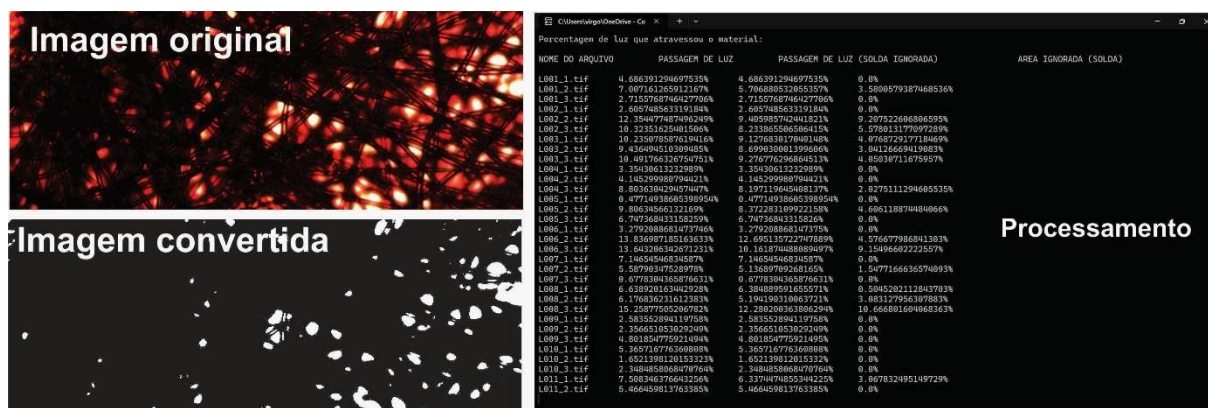
Tratamento UVC – 4 ciclos

Fonte: A autora (2025).

3.7. Obtenção dos dados e análise estatística

A análise das imagens foi realizada por meio um programa de computador em linguagem Python, desenvolvido no LECC/CRCN-NE, para transformar a imagem colorida em escala de cinza com cada pixel de valor variável de 0 (preto) a 255 (branco) como mostra a Figura 20. Depois, o programa converteu a imagem de escala de cinzas para monocolor (preto e branco), convertendo pixel de 0-127 em preto e 128 a 255 em branco. Caso a imagem já se encontrasse em escala de cinzas, como é o caso do spray, a primeira etapa foi eliminada. Assim, o programa contabilizou os pixels brancos existentes dentro da totalidade de pixels da imagem e calculou a razão de vazios ou passagem de luz – PL conforme a Equação 1 e a razão de manchas conforme a Equação 2.

Figura 20 – Processamento das imagens para a obtenção de dados numéricos.



Fonte: A autora (2025).

$$\text{Passagem de luz} = \frac{\text{Número de elementos de imagem brancos}}{\text{Número total de elementos de imagem}} \quad (1)$$

$$\text{Mancha} = \frac{\text{Número de elementos de imagem pretos}}{\text{Número total de elementos de imagem}} \quad (2)$$

Este código em Python analisa imagens no formato JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) para calcular a porcentagem da passagem de luz que atravessa materiais. Foi desenvolvido utilizando diversas bibliotecas do Python (NumPy; Pathlib; OS; datetime; cv2), em que cada uma desempenhou um papel fundamental para alcançar a funcionalidade desejada. Este código foi especialmente útil em experimentos que envolvem a medição da passagem de luz, como testes com materiais translúcidos ou sprays. De forma resumida, ele automatiza a análise de um conjunto de imagens, calculando e registrando a porcentagem de luz transmitida por cada material representado, contribuindo para experimentos científicos de maneira eficiente e organizada.

Após a estimativa da porcentagem da passagem de luz – PL e da porcentagem de manchas no caso do ensaio por spray nas imagens, os dados foram compilados em planilha Excel, transformados de acordo com a função mais apropriada para estabilização de variâncias e analisados no programa de computador *Statistica* por

meio de análise de variâncias – ANOVA ou de maneira não paramétrica pela estatística de Kruskal-Wallis (TIBCO, 2018). Os requisitos da ANOVA foram avaliados a partir da distribuição normal dos resíduos em nível de 95% de confiança. A Tabela 1 sumariza os tratamentos, as variáveis e os testes estatísticos empregados neste estudo para TNT com gramaturas de 40 g m⁻² e de 60 g m⁻².

Tabela 1 – Sumário das análises estatísticas empregadas para o estudo de integridade física de TNT

Ensaio	Método de descontaminação	Estatística	Fator	Requisitos da análise estatística
Microscopia ótica	UVC	ANOVA fatorial com interação	Ciclos (10)/Amostra (4)	Normalidade dos resíduos
	Lavagem/secagem	ANOVA não paramétrica*	Ciclos (10)/Amostra (4)	-
	Radiação gama	ANOVA**	-	Normalidade dos resíduos
	Lavagem/secagem & Radiação Gama	Teste t	-	Homocedasticidade de variâncias
		ANOVA fatorial com interação	Ciclos (10)/Irradiação (sim)/Amostra (5)	Normalidade dos resíduos
	UVC	ANOVA – 1 fator	Ciclos (10)	Normalidade dos resíduos
Spray	Lavagem/secagem	ANOVA – 1 fator	Ciclos (10)	Normalidade dos resíduos
Spray	Radiação gama	Teste t	-	Homocedasticidade de variâncias
	Lavagem/secagem & Radiação Gama	ANOVA fatorial com interação	Ciclos (10)/Irradiação (sim)	Normalidade dos resíduos

*gramatura de 40 g m⁻²

**gramatura de 60 g m⁻²

Fonte: A autora (2025).

A avaliação da normalidade dos resíduos, realizada por meio de testes estatísticos apropriados, revelou que os dados obtidos no ensaio de lavagem do TNT de 40 g m⁻² não apresentavam distribuição normal. Consequentemente, a estatística não paramétrica foi empregada para a análise dos dados. A decisão de utilizar métodos não paramétricos foi motivada pela heterogeneidade das variâncias entre os

grupos de amostras, observada mesmo após a aplicação de funções de estabilização de variâncias

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados e a respectiva discussão para os ensaios realizados. Recortes de tecido-não-tecido - TNT de 40 g m^{-2} e de 60 g m^{-2} foram submetidos a radiação UVC, lavagem/secagem e radiação gama para a avaliação sob o ponto de vista da integridade das malhas do tecido-não-tecido utilizando a microscopia ótica e o ensaio de spray proposto neste estudo.

4.1. Ensaio por microscopia ótica

Os estudos sobre os tratamentos de limpeza/desinfecção foram aprofundados, considerando a sequência dos ensaios e a interação entre os tratamentos como lavagem/secagem e irradiação.

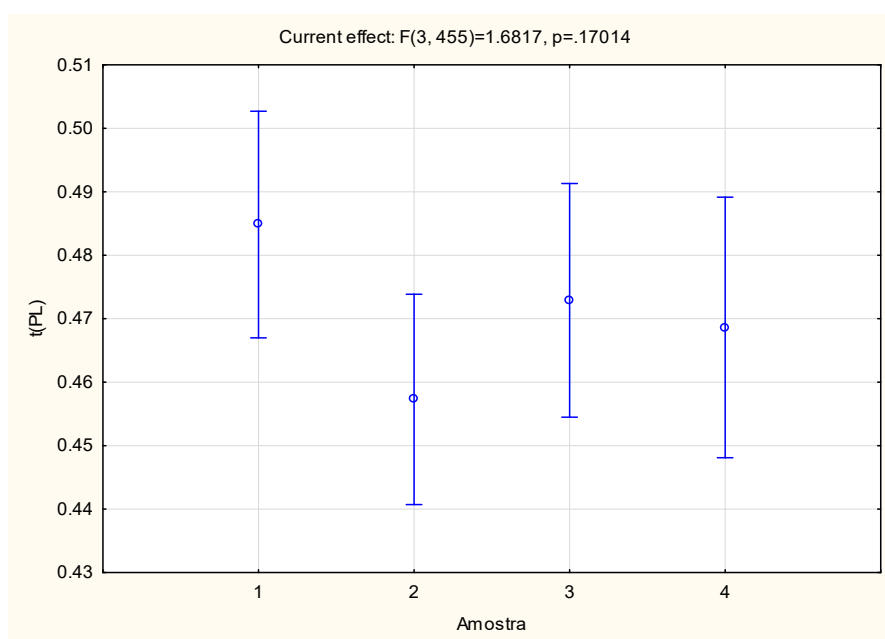
4.1.1. Efeitos da radiação UVC sobre TNT de 40 g m^{-2}

Os resultados da análise estatística descritiva da PL para as amostras de tecido TNT de 40 g m^{-2} submetidas à irradiação UVC são apresentados no Apêndice 1. A média populacional da PL foi de 0,2412. Observou-se que as amostras 4 do ciclo 2 (PL = 0,455) e 1 do ciclo 1 (PL = 0,425) apresentaram os maiores valores de PL. A variabilidade dos dados, expressa pelo coeficiente de variação (CV%), variou de 17% a 96% (Apêndice 1). A análise dos valores médios de PL revelou que: 3 das 4 amostras do ciclo 8 apresentaram PL superior a 0,291; todas as amostras do ciclo 1 apresentaram PL superior a 0,273; todas as amostras do ciclo 7 e 3 das 4 amostras do ciclo 10 apresentaram PL superior a 0,269. No total, 14 das 40 amostras (35%) apresentaram PL superior a 0,269. A amplitude do CV%, variando de 17% a 96%, indica uma alta dispersão dos dados, sugerindo heterogeneidade nas respostas das amostras ao tratamento com UVC. Essa variabilidade pode ser atribuída a fatores como a não uniformidade do material, variações na intensidade da irradiação ou diferenças na degradação do TNT ao longo dos ciclos de exposição ao UVC (Miller,

1991). A análise do CV% revelou que 33 das 40 amostras apresentaram CV% superior a 30%, com exceção da amostra 4 do ciclo 7 (CV% = 17,4%). As amostras não submetidas à irradiação UVC apresentaram CV% superior a 53,4% (Apêndice 1).

A homogeneidade das amostras de tecido não tecido (TNT) de 40 g/m² foi avaliada por meio de comparações múltiplas da passagem de luz (PL), cujos resultados são apresentados na Figura 21. A análise estatística, realizada com um nível de confiança de 95%, demonstrou que não houve diferenças estatisticamente significativas entre as médias de PL das diferentes amostras.

Figura 21 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras analisadas por UVC (TNT de 40 g m⁻²)

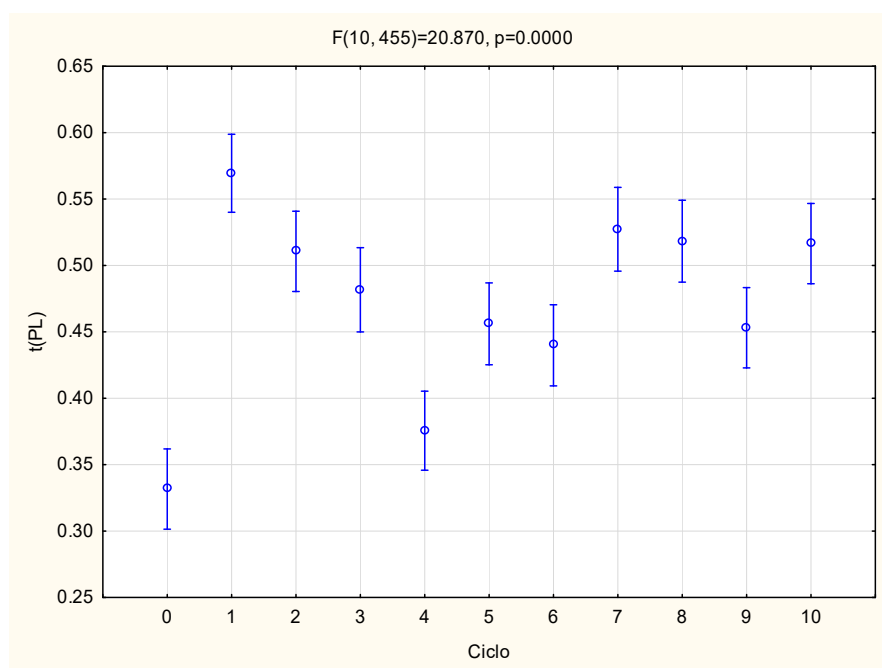


Fonte: A autora (2025).

No teste de comparações múltiplas para as médias dos ciclos, foram identificadas diferenças estatísticas significativas em nível de 95% de confiança ($p < 0,0001$), corroborando o efeito da radiação UVC sobre o TNT com gramatura de 40 g m⁻² (Figura 19). A análise dos valores médios de PL revelou que, com exceção da amostra submetida a 4 ciclos de irradiação, as demais amostras apresentaram um comportamento similar, indicando uma alteração consistente na estrutura do TNT de

40 g m⁻² induzida pela radiação UVC. A amostra submetida a 4 ciclos de irradiação apresentou um comportamento distinto, sugerindo uma resposta diferenciada do material a esse nível de exposição. Esses resultados indicam que a radiação UVC, mesmo em curtos períodos de exposição, pode induzir modificações detectáveis na trama do TNT de 40 g m⁻², comprometendo potencialmente suas propriedades estruturais.

Figura 22 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 40 g m⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC



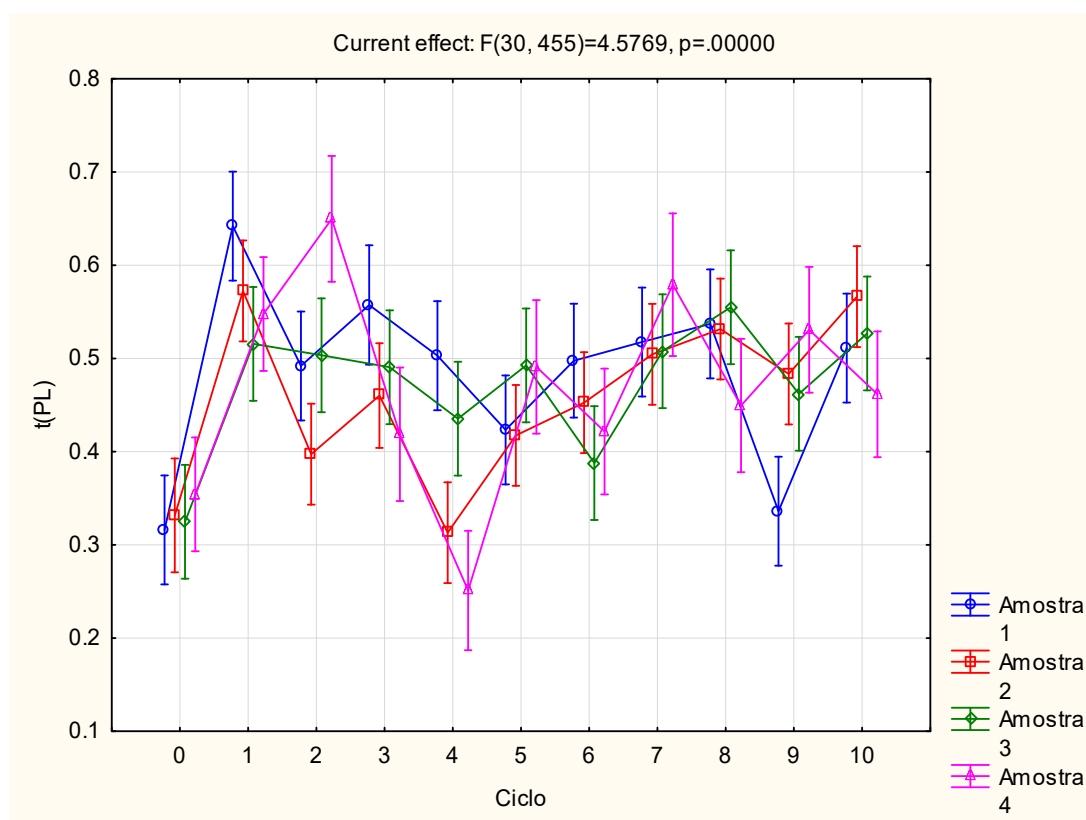
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

De maneira geral, os valores médios estiveram, em sua maioria, bem próximos; todavia, em alguns casos, a média de um ou outro ciclo comportou-se diferentemente com relação às médias dos ciclos próximos como é o caso dos valores médios dos ciclos 1, 2 e 3 comparados com a média do ciclo 4 (Figura 22).

Aproveitando-se de a possibilidade detalhar o comportamento das amostras de TNT com gramatura de 40 g m^{-2} , foi avaliada a interação do fator Amostra com o fator Ciclo, resultando no teste de comparações múltiplas para efeito sinérgico entre esses fatores da Figura 23. Observou-se o comportamento semelhante o efeito sinérgico entre os brancos analíticos e as amostras quanto à passagem luz, indicando uma homogeneidade já esperada do TNT de 40 g m^{-2} sem a aplicação de qualquer ciclo de radiação UVC. Todavia, houve fortes indícios estatísticos ($p = 0,0000$) de que a interação entre a amostra e o ciclo de radiação UVC ocorreu para esse ensaio.

Figura 23 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre as amostras e os ciclos de radiação UVC para o TNT de 40 g m^{-2} de acordo com os valores médios de passagem de luz



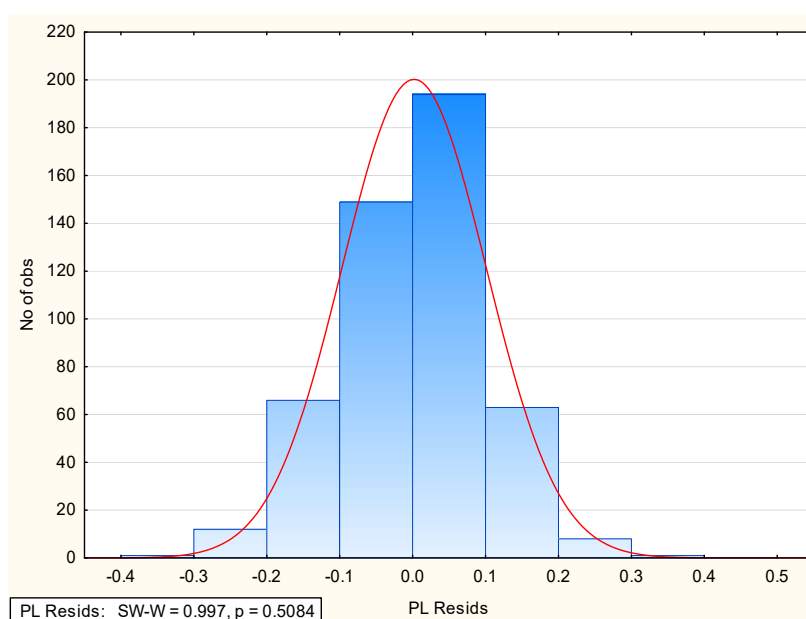
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Aparentemente, os ciclos, em separado, indicam ter pouca influência no TNT de 40 g m^{-2} quando se incrementa a quantidade de ciclos. Porém, com o resultado significativo da interação, percebeu-se que a alteração ocorreu para uma amostra submetida a um ciclo, em particular, como foi o caso da amostra 1 no ciclo 1 (linha azul), da amostra 4 do ciclo 2 (linha fúcsia) e da amostra 4 do ciclo 7 (linha fúcsia), além da amostra 1 do ciclo 9 (linha azul). No caso do ciclo 4, as amostras 2 e 4 tiveram um comportamento equivalente ao branco analítico quando se referiu à interação entre os fatores Amostra e Ciclo (Figura 23).

A validação dos pressupostos da análise de variância (ANOVA) com dois fatores, incluindo a interação, foi realizada por meio da avaliação da distribuição dos resíduos, conforme apresentado na Figura 24. A análise do gráfico de resíduos e a aplicação do teste de normalidade (Shapiro-Wilk) demonstraram que a distribuição dos resíduos não apresentou desvios significativos da normalidade em nível de confiança de 95% ($p = 0,5084$). Esse resultado indica que os pressupostos da ANOVA foram atendidos, corroborando a robustez e a confiabilidade da análise estatística realizada no ensaio.

Figura 24 – Histograma dos resíduos da análise de variância para a passagem de luz do TNT de 40 g m^{-2} submetidos a ciclos de radiação UVC



Fonte: A autora (2025).

A análise da influência dos ciclos de irradiação UVC na integridade do TNT de 40 g m⁻² revelou uma interação significativa entre os ciclos e a amostra ($p < 0,05$). A avaliação da resistência e homogeneidade da trama, atributos cruciais para a função de proteção do TNT, demonstrou que a exposição repetida à radiação UVC induziu alterações detectáveis na estrutura do material. Embora o efeito isolado da amostra não tenha sido estatisticamente significativo, a interação entre a amostra e os ciclos de irradiação UVC sugere que a resposta do TNT à radiação UVC é dependente das características específicas da amostra e do número de ciclos de exposição. Além disso, a manipulação das amostras durante os ciclos de irradiação, mesmo que mínima, pode ter contribuído para a fragilização da trama, exacerbando os efeitos da radiação UVC. Esses resultados indicam que a avaliação da integridade do TNT após exposição à radiação UVC requer a consideração tanto das propriedades intrínsecas do material quanto dos efeitos cumulativos da irradiação e da manipulação.

Os resultados obtidos no presente estudo corroboram as observações de Medeiros et al. (2022), que, por meio de métodos quimiométricos baseados em espectroscopia de raios X, constataram alterações na integridade estrutural de respiradores PFF2 submetidos a mais de cinco ciclos de descontaminação com radiação UVC. Em ambos os estudos, a camada de TNT com gramatura de aproximadamente 40 g m⁻² demonstrou maior susceptibilidade a modificações estruturais após a exposição à radiação UVC. A convergência desses achados ressalta a necessidade de investigações adicionais para compreender melhor o processo e mitigar a perda da capacidade de proteção dos EPIs, conforme enfatizado por Medeiros et al. (2022). A avaliação da integridade do TNT em diversas condições de descontaminação, conforme evidenciado no presente estudo, é crucial para o desenvolvimento de protocolos de reuso seguros e eficazes.

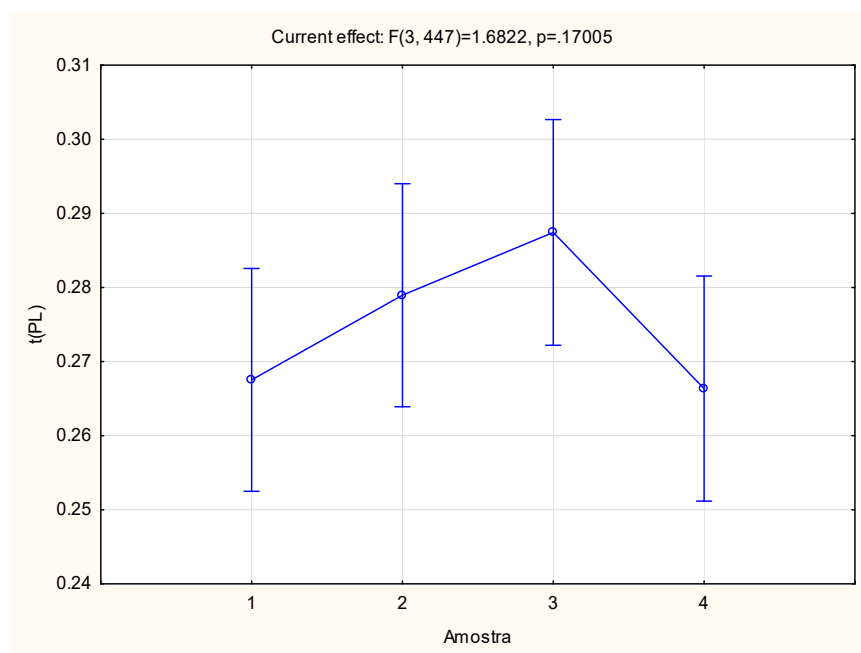
4.1.2. Efeitos da radiação UVC sobre TNT de 60 g m⁻²

A análise estatística descritiva dos resultados de passagem de luz – PL das amostras de TNT com 60 g m⁻² submetidas aos ciclos de radiação UVC encontram-se no Apêndice 2. O valor da média populacional foi 0,0884. As médias indicam

valores superiores para as amostras 3 e 2 do ciclo 0 (0,159 e 0,150, respectivamente) e amostras 2 e 3 do ciclo 6 (0,155 e 0,147 respectivamente), enquanto os coeficientes de variação variaram de 11 a 84% (Apêndice 2). Com relação aos valores médios, observou-se que 3 das 4 amostras submetidas a apenas 1 ciclo de radiação UVC ficaram com resultados acima de 0,103; porém, duas das amostras não submetidas a ciclo nenhum (branco) ficaram acima de 0,150. Considerando os valores de CV%, 31 das 40 amostras apresentaram resultados maiores que 50% e apenas 3 amostras - ciclos 3, 4 e 6 apresentaram CV% menor que 30%. Todas as amostras não submetidas ao tratamento UVC (ciclo 0) apresentaram resultados acima de 62,63%.

Após a aplicação de função estabilizadora de variâncias, os resultados da ANOVA fatorial com dois fatores (Amostra e Ciclo) com relação ao teste de comparações múltiplas podem ser visualizados na Figura 25. Como o valor de p foi estimado em 0,1755, não houve fortes indícios estatísticos de diferenças significativas entre os grupos de amostras avaliados quanto à PL do TNT de 60 g m⁻², comportamento já esperado, quando comparado com desempenho das amostras da Seção anterior (TNT 40 g m⁻²).

Figura 25 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – $t(PL)$ das amostras analisadas por UVC (TNT de 60 g m⁻²)

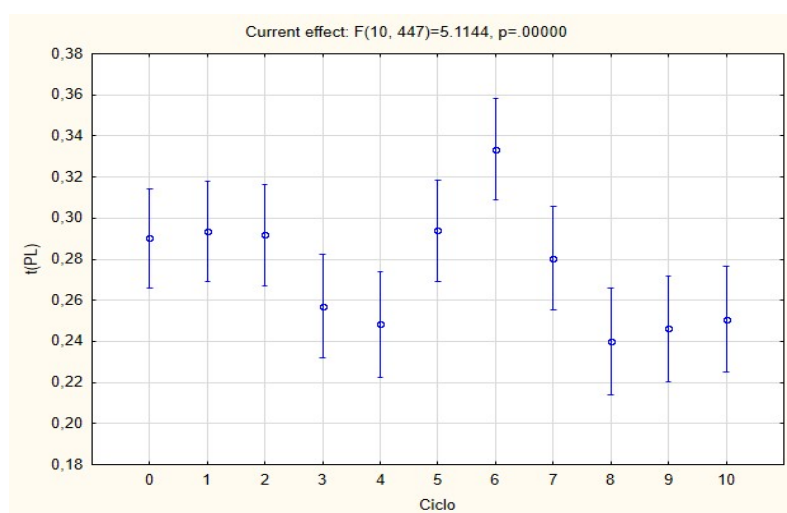


Fonte: A autora (2025).

A análise do teste de comparações múltiplas para os ciclos de radiação UVC no TNT de 60 g m⁻² (Figura 26) revelou diferenças sutis nos espaços inter-fibras das amostras, indicando alterações na estrutura do material. Embora as diferenças individuais entre os ciclos possam ser consideradas sutis, a análise estatística revelou a presença de diferenças significativas entre os grupos de amostras submetidas a diferentes números de ciclos de radiação UVC.

A análise comparativa dos valores médios de passagem de luz (PL), apresentados na Figura 26, revelou uma alteração significativa a partir do oitavo ciclo de irradiação UVC, com subsequente redução nos valores médios nos ciclos subsequentes. Este padrão indica que o TNT de 60 g m⁻² demonstrou maior resistência à radiação UVC até o oitavo ciclo de exposição. A homogeneidade dos valores médios de PL observada nos quatro primeiros ciclos de irradiação UVC, similar ao controle (Ciclo 0), sugere a ausência de alterações significativas na microestrutura do TNT de 60 g m⁻² durante este período. A partir do oitavo ciclo, no entanto, a redução nos valores médios de PL indica uma deterioração da estrutura do material, possivelmente devido à degradação induzida pela radiação UVC.

Figura 26 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC

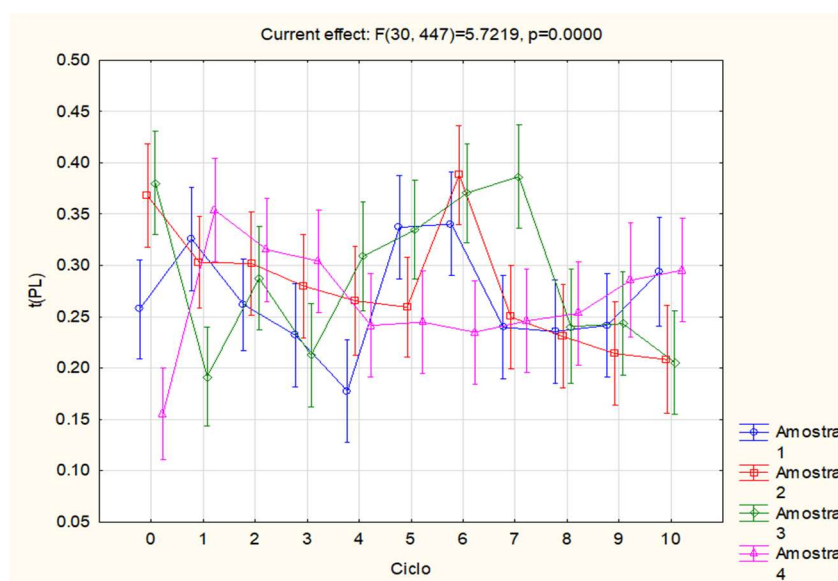


Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Apesar da aparente resistência inicial do TNT de 60 g m^{-2} aos ciclos de irradiação UVC, a análise estatística revelou diferenças significativas ($p < 0,0001$) na interação entre amostras e ciclos, indicando um efeito sinérgico preocupante (Figura 27). A análise dos valores médios de PL demonstrou que, embora as alterações nos ciclos iniciais (até o 4º ciclo) possam ser consideradas próximas, a tendência de diminuição cumulativa dos valores de PL a partir do 8º ciclo sugere uma modificação progressiva na estrutura do TNT (Figura 26). A diminuição da PL, embora possa indicar um aumento imediato da capacidade de barreira, não garante a manutenção dessa propriedade em longo prazo. A natureza cumulativa dos efeitos da radiação UVC, aliada à importância crítica da integridade do EPI para a segurança do usuário, exige uma abordagem extremamente conservadora. A presença de qualquer alteração detectável, mesmo que aparentemente sutil, pode comprometer a função de proteção do TNT ao longo do tempo. Portanto, com base nos resultados deste estudo, recomenda-se que apenas o TNT de 60 g m^{-2} submetido a até dois ciclos de UVC seja considerado seguro para reuso, visando a máxima proteção do profissional de saúde.

Figura 27 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre as amostras e os ciclos de radiação UVC para o TNT de 60 g m^{-2} de acordo com os valores médios de passagem de luz

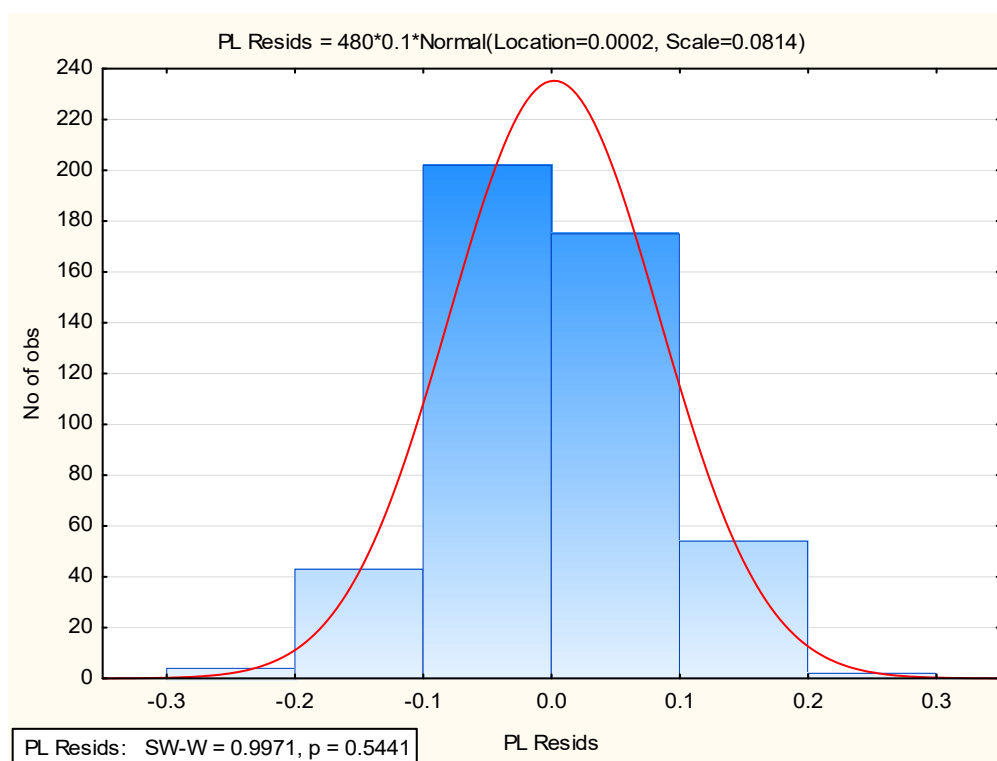


Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Como avaliado anteriormente, no histograma da Figura 28, a distribuição dos resíduos da ANOVA foi aproximada a uma distribuição normal conforme valor de p igual a 0,5441, conferindo a robustez da análise estatística aplicada para a avaliação dos efeitos de ciclos de UVC aplicados sequencialmente no TNT de 60 g m⁻².

Figura 28 – Histograma dos resíduos da análise de variância para a passagem de luz do TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC



Fonte: A autora (2025).

Considerando que as camadas internas e externa dos respiradores semifaciais são tipicamente confeccionadas com TNT de 40 g/m², o estudo de Medeiros et al. (2022) também analisou os filtros internos dos respiradores, que possuem gramaturas mais elevadas. Os resultados deste estudo demonstraram que os filtros de respiradores submetidos a até cinco ciclos de radiação ultravioleta C (UV-C) não apresentaram diferenças significativas em relação aos filtros de respiradores PFF2 não irradiados (Medeiros et al., 2022). Essa observação sugere que o TNT de maior gramatura apresenta maior resistência aos efeitos da

descontaminação/esterilização por radiação UV-C, corroborando os resultados obtidos no presente estudo.

4.1.3. Efeitos da lavagem/secagem sobre TNT de 40 g m⁻²

Os resultados da análise estatística descritiva de passagem de luz para o tratamento de lavagem e secagem aplicados às amostras de TNT de 40 g m⁻² encontram-se no Apêndice 3. O valor da média populacional foi 0,1313. Neste ensaio, as médias foram superiores para a amostra 2 do ciclo 4 (0,3185) e para a amostra 2 do ciclo 9 (0,3056), enquanto os coeficientes de variação (CV%) mínimos e máximos apresentaram resultados de 25,39% a 93,98%, respectivamente (Apêndice 3).

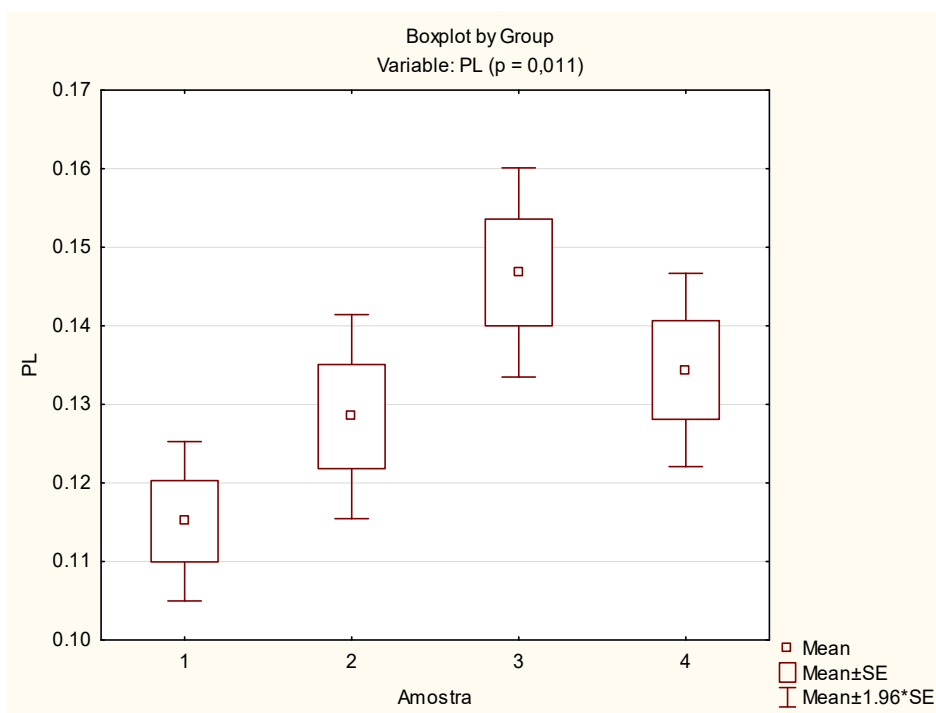
Do ponto de vista geral, 3 das 4 amostras com 4 ciclos de lavagem/secagem ficaram com resultados acima de 0,203, assim como duas amostras do ciclo 9 também se encontram no mesmo patamar. Contudo, 27 das 78 amostras estão com as médias abaixo de 0,100, correspondendo a 34,61% das amostras. Embora 3 das 4 amostras não submetidas ao tratamento (branco – Ciclo 0) tenham ficado com CV acima de 59%, 32 das 78 amostras apresentaram resultados inferiores a 50% de coeficiente de variação. Dessas 32, 12 apresentaram CV inferiores a 30%.

Na primeira tentativa de análise estatística, não foi possível a aplicação de análise de variâncias paramétrica devido ao fato de os resíduos não apresentarem distribuição aproximada à normalidade mesmo com a transformação dos dados. No entanto, ao utilizar a estatística não paramétrica, foi identificada uma certa incongruência entre os resultados do fator Amostra para esse ensaio de lavagem/secagem do TNT de 40 g m⁻² conforme mostra a Figura 29.

De acordo com os resultados da estatística de Kruskal-Wallis (Figura 29), houve indícios estatísticos em nível de 95% de confiança de diferenças significativas entre os valores médios das amostras ($p = 0,011$); porém, quando da aplicação do Teste de Medianas não-paramétrico, os resultados não foram significativos com valor de probabilidade igual a 0,0976 ($p = 0,0976$).

A incoerência residiu na divergência entre os testes aplicados: um teste rejeitou a hipótese nula, indicando diferenças significativas entre as médias das amostras, enquanto o outro aceitou a hipótese nula, sugerindo a ausência de diferenças significativas, ambos com nível de confiança de 95%. A análise detalhada dos dados revelou que as amostras 1 e 3 apresentaram desvios significativos em relação aos valores médios de passagem de luz das demais amostras. Essa heterogeneidade sugere que os recortes de TNT de 40 g m⁻² não apresentaram uma estrutura homogênea ao longo da peça, indicando variações na densidade e na distribuição das fibras.

Figura 29 – Gráfico *boxplot* para as médias dos valores de passagem de luz – PL das amostras analisadas do TNT de 40 g m⁻² no ensaio de lavagem/secagem



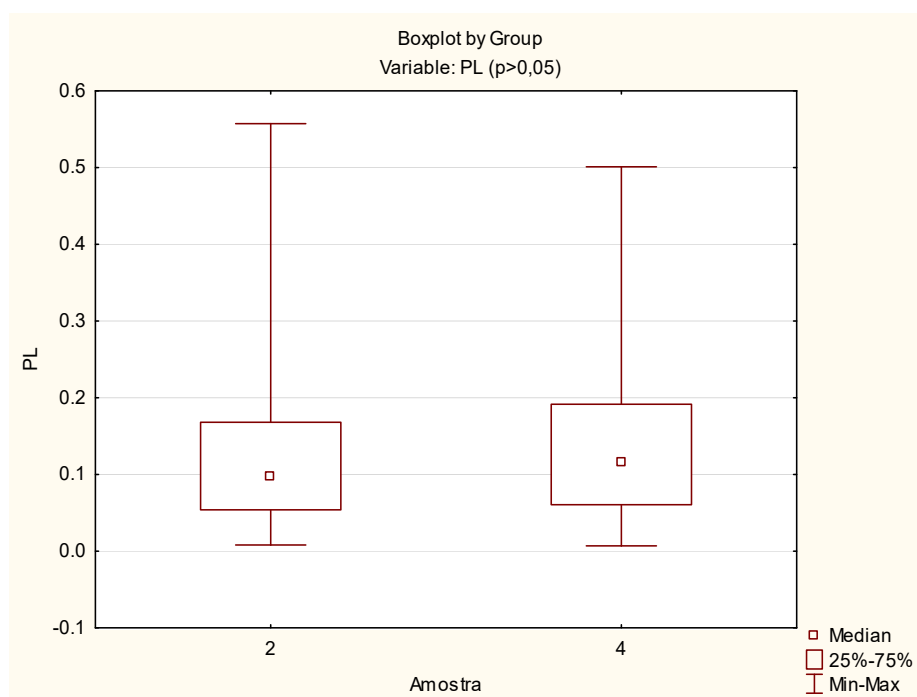
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

No intuito de esgotar a possível influência de amostras não homogêneas no ensaio de lavagem/secagem dos recortes de TNT de 40 g m⁻², foi realizada novamente

a análise de variâncias não-paramétrica excluindo-se as amostras 1 e 3, haja vista que seus valores médios se comportaram de maneira mais diversa que os demais. Conforme os resultados da Figura 30, o valor de p , após a eliminação dos grupos de amostras, foi superior a 0,05, indicando de que houve fortes indícios estatísticos de que as amostras 2 e 4 não foram estatisticamente diferentes. Com isso, preferiu-se manter apenas esses grupos de amostras para não haver interferência na avaliação dos ciclos de lavagem quanto à passagem de luz. Vale ressaltar que essa divergência entre os grupos de amostra pode explicar a impossibilidade de normalidade dos resíduos para a realização da análise de variância paramétrica.

Figura 30 – Gráfico *boxplot* para as médias dos valores de passagem de luz – PL das amostras 2 e 4 do TNT de 40 g m⁻² no ensaio de lavagem/secagem



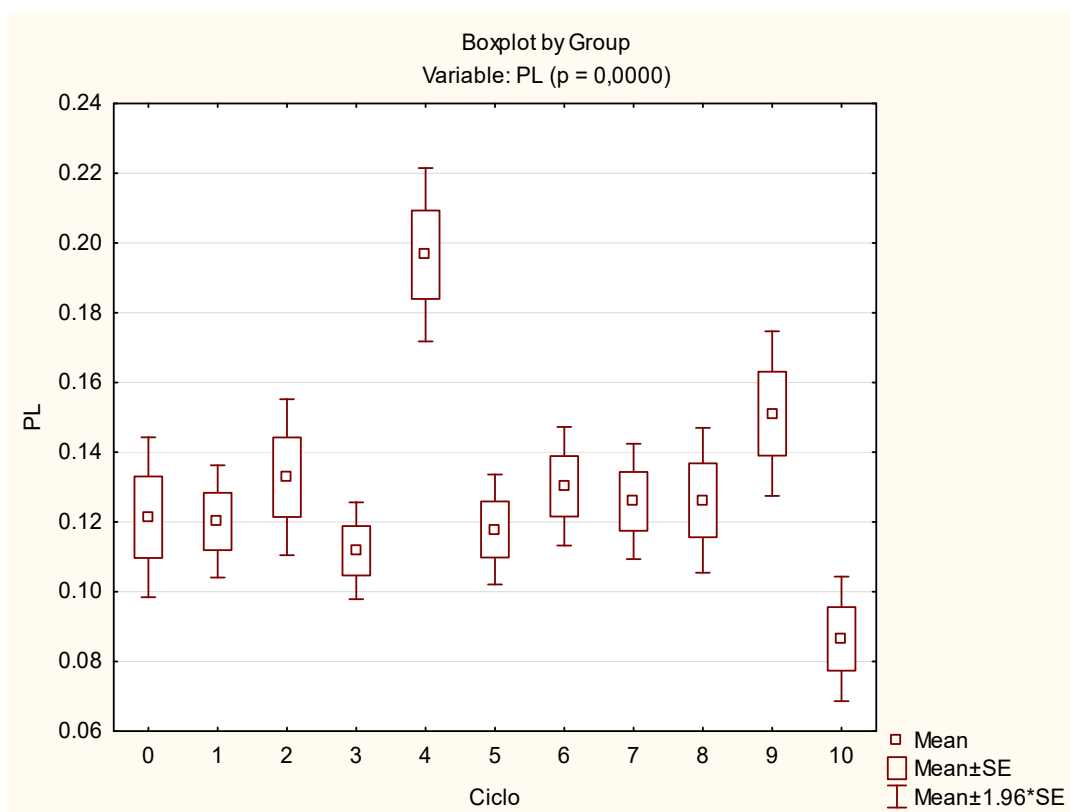
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Os resultados da estatística não paramétrica para os ciclos de lavagem/secagem do TNT de 40 g m⁻² foram significativos em nível de 95% de confiança ($p = 0,0000$) de acordo com o gráfico da Figura 31, sugerindo fortemente

que ao menos um dos valores médios dos ciclos de lavagem/secagem foi diferente dos demais. De maneira geral, as amostras referentes aos Ciclos 1 a 3 se mantiveram semelhantes, assim como as dos Ciclos 5 a 8. As amostras dos Ciclos 4 e 10 foram as que mais se afastaram com relação às médias dos outros ciclos e, mesmo sob a influência dos grupos amostrais 1 e 3, não se pôde atribuir esse comportamento tão diferente somente pela heterogeneidade do TNT de 40 g m⁻².

Figura 31 – Gráfico *boxplot* para as médias dos valores de passagem de luz – PL para os ciclos de secagem/lavagem de todas as amostras analisadas do TNT de 40 g m⁻²



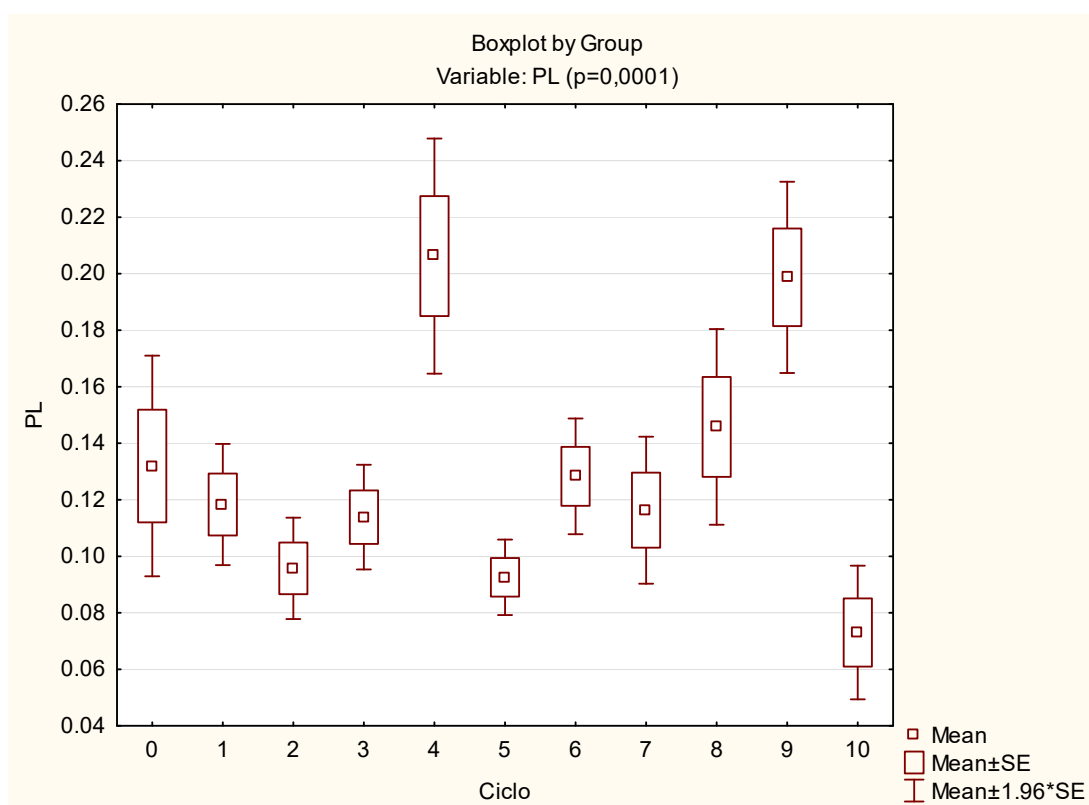
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Para dirimir qualquer dúvida com relação à suposta influência dos grupos amostrais 1 e 3, a análise estatística não-paramétrica foi realizada novamente sem esses grupos amostrais. Os resultados do teste de Kruskal-Wallis, apresentados na

Figura 32, demonstraram que, mesmo sem os grupos amostrais 1 e 3, houve diferenças estatisticamente significativas entre os ciclos de lavagem/secagem para o TNT de 40 g m⁻² ($p = 0,0001$, nível de confiança de 95%).

Figura 32 – Gráfico *boxplot* para as médias dos valores de passagem de luz – PL para os ciclos de secagem/lavagem considerando apenas as amostras 2 e 4 analisadas do TNT de 40 g m⁻²



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Essa análise confirmou os resultados obtidos anteriormente, indicando que os ciclos de lavagem/secagem induziram alterações na microestrutura do TNT de 40 g m⁻². A análise detalhada dos resultados revelou que os ciclos 4, 9 e 10 apresentaram valores médios de PL distintos, com uma redução notável no ciclo 10, sugerindo uma diminuição da trama do TNT de 40 g m⁻². Essa observação corroborou os achados de Arruda (2023), que também relatou a redução da trama em máscaras

caseiras após ciclos de lavagem, reforçando a necessidade de avaliar o impacto da lavagem na integridade de materiais de proteção respiratória.

É promissor sugerir que, até o ciclo 3, as tramas do TNT suportaram o tratamento de lavagem e secagem, mantendo a estrutura de proteção do TNT de 40 g m^{-2} . Nesse sentido, pode ser considerado o reuso do produto como uma forma viável de ser aproveitar de maneira mais sustentável a matéria prima utilizada na confecção dos EPIs.

O tratamento de lavagem/secagem será mais bem abordado no capítulo 4.1.5, uma vez que a proposta daquele capítulo traz o tratamento de radiação gama conjugado ao tratamento de lavagem/secagem.

4.1.4. Efeitos da lavagem/secagem sobre TNT de 60 g m^{-2}

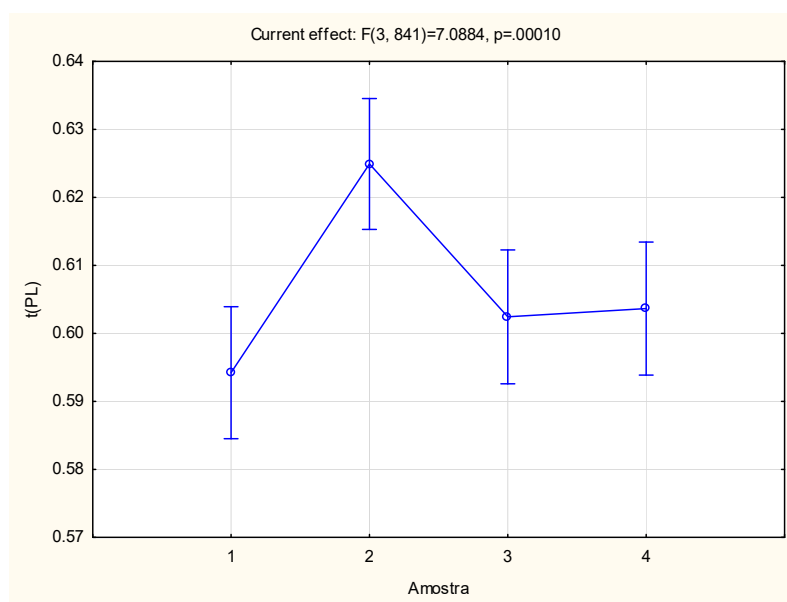
Os resultados da análise estatística descritiva de passagem de luz para o tratamento de lavagem/secagem do TNT de 60 g m^{-2} encontram-se no Apêndice 4. O valor populacional médio foi 0,0412. As médias indicaram valores superiores para as amostras 2 do Ciclo 0 (0,1665) e a amostra 4 do Ciclo 1 (0,1251), enquanto os coeficientes de variação (CV) foram estimados entre 38,34% e 144,26% (Apêndice 4). Com relação aos valores de média, observou-se que apenas 3 amostras superaram a média de 0,1200 (amostras 2 e 3 do Ciclo 0 e amostra 4 do Ciclo 1), o que equivaleu a apenas 3,70% dos dados. Considerando os coeficientes de variação, 8 das 81 amostras apresentaram resultados inferiores a 50%, embora 73 amostras tenham superado este percentual, chegando até a ultrapassar o percentual de 100% para CV% como foi o caso das amostras 5 e 4 do Ciclo 5, a 2 do Ciclo 3 e a amostra 1 do Ciclo 7 (Apêndice 4).

Considerando a trama mais firme do TNT de 60 g m^{-2} , era esperado a aceitação da hipótese de que as médias das amostras (tratamento Amostra) não diferem entre si, contudo, os resultados da análise estatística paramétrica indicaram, em nível de 95% de confiança, diferenças significativas ao menos para a Amostra 2 como mostra os resultados da Figura 33, com $p = 0,00010$.

Ao contrário do que foi observado na análise não paramétrica do TNT de 40 g m⁻², a análise estatística do TNT de 60g m⁻² permitiu a avaliação individual dos fatores Amostra e Ciclo, bem como da interação entre eles (Amostra*Ciclo). No entanto, é importante ressaltar que o processo de fabricação do TNT, independentemente da gramatura, pode introduzir variações na homogeneidade da distribuição das fibras, resultando em alterações estruturais ao longo do material.

Quando se analisam os dados extraídos dos ciclos empregados nesta avaliação do TNT de 60 g m⁻² separadamente como pode ser visto na Figura 34, houve fortes indícios estatísticos, em nível de 95% de confiança, de que ao menos uma média dos valores de passagem de luz – t(PL) foi diferente das demais (p=0,00000), com destaque para as médias referentes aos Ciclos 5 e 7. Desse modo, de acordo com os dados levantados nesse trabalho, o TNT de 60 g m⁻² não permitiu a utilização de um procedimento de lavagem seguido de secagem em máquinas convencionais.

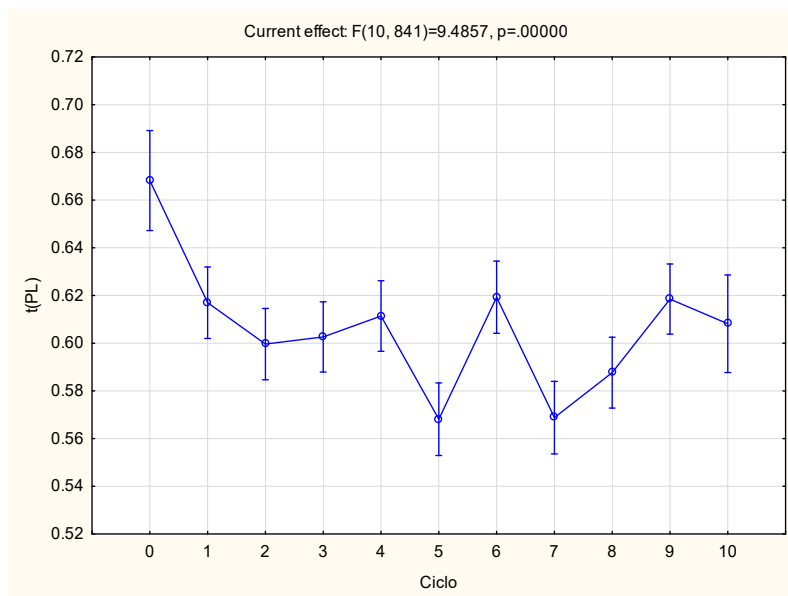
Figura 33 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras submetidas aos ciclos de lavagem/secagem do TNT de 60 g m⁻²



Barras verticais denotam intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$)

Fonte: A autora (2025).

Figura 34 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem

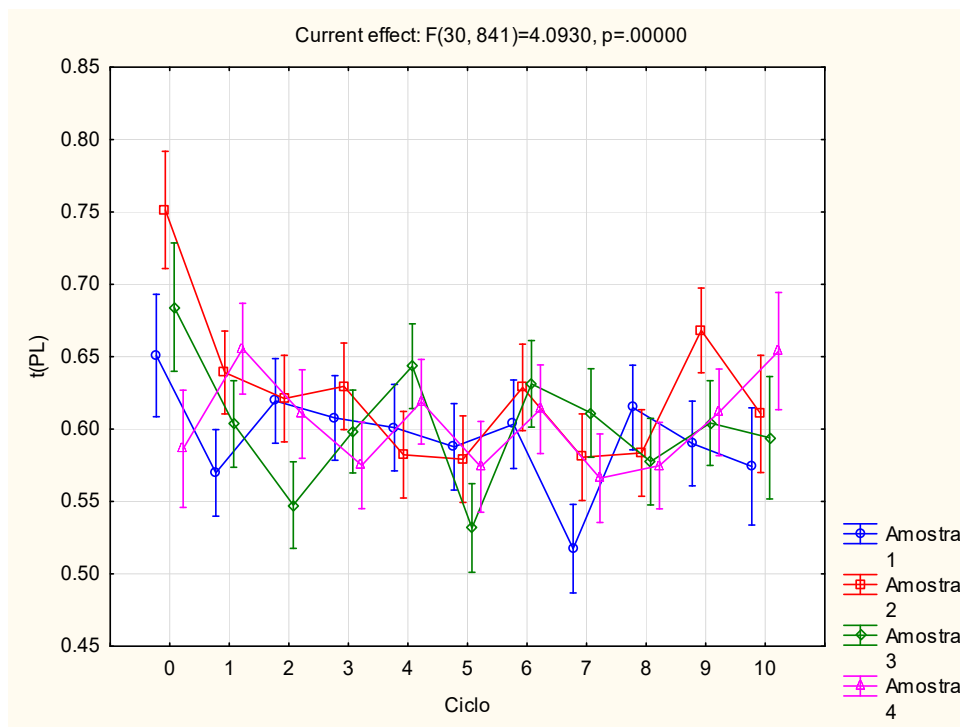


Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Para os efeitos da interação de Ciclo e Amostra, os dados da Figura 35 permitiram concluir que houve efeitos consideráveis em nível de 95% de confiança, comprovando que a heterogeneidade do TNT de 60 g m⁻² proporcionou alterações na trama desse material. Vale destacar os efeitos significativos ($\alpha = 0,05$) para os valores médios das Amostras 2 e 4 no Ciclo 0 (controle), corroborando os resultados iniciais da ANOVA, em que a média da Amostra 2 foi significativamente mais elevada (Figura 33).

Figura 35 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre as amostras e os ciclos de lavagem/secagem para o TNT de 60 g m⁻² de acordo com os valores médios de passagem de luz



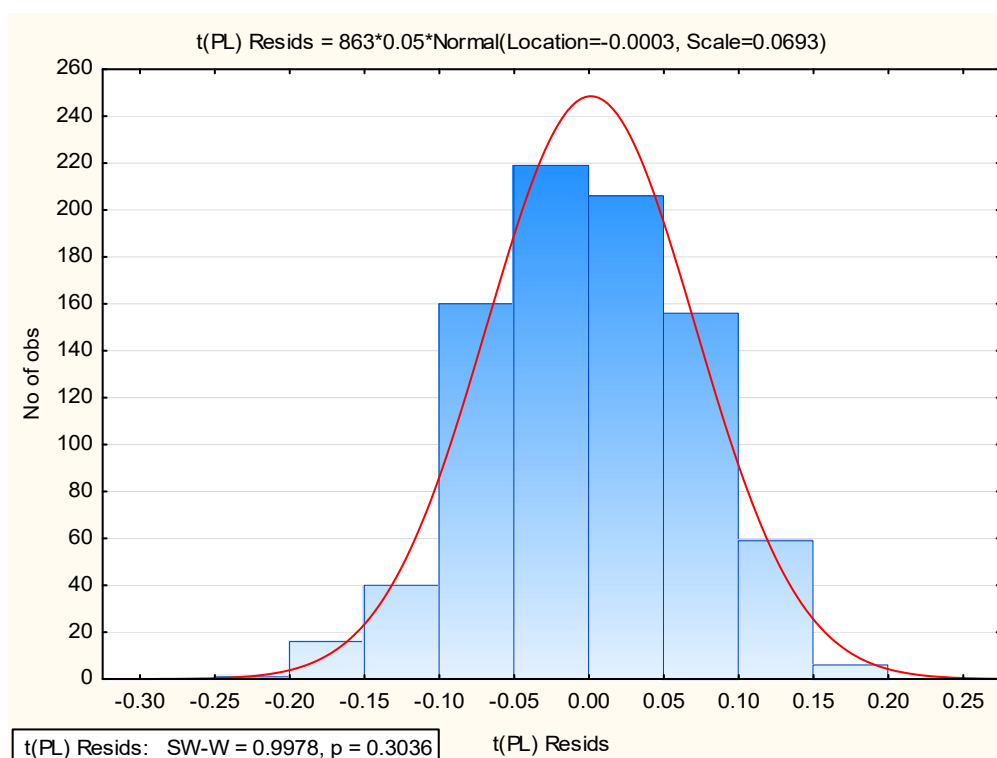
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Ao que se refere aos valores médios da Amostra 2 dentro dos ciclos de lavagem, foi notado o comportamento mais diferenciado, quando comparado aos valores do Ciclo 0, para o efeito da interação dessa amostra no Ciclo 9, além de uma sutil diferença da Amostra 2 do Ciclo 3. Não se pode negar que há uma heterogeneidade dos TNT estudados, embora que, no caso do 60 g m⁻², tenha, teoricamente, a urdidura mais fechada, mas ela não foi tão evidente no que tange o TNT de 40 g m⁻². De fato, a análise não paramétrica apontou para diferenças significativas para 50% dos níveis do tratamento Amostra, enquanto, para o TNT com gramatura superior, apenas uma amostra pôde ser considerada significativamente diferente em nível de 95% de confiança.

Para garantir que a análise estatística foi adequada, a distribuição aproximada à normalidade dos resíduos foi avaliada, comprovando-a em nível de 95% de confiança de acordo com o gráfico da Figura 36 ($p=0,3036$).

Figura 36 – Histograma dos resíduos da análise de variância para a passagem de luz do TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem



Fonte: A autora (2025).

Ênfase foi dada na confiabilidade da análise estatística de variâncias devido aos possíveis impactos dos resultados desse trabalho na busca de materiais com qualidade comprovada para a confecção de EPIs, incluindo modificações no processo industrial e melhoria na garantia da qualidade por meio de controle estatístico.

O capítulo 4.1.6 dedica-se à investigação do tratamento combinado de irradiação gama e lavagem/secagem, portanto, a discussão aprofundada deste último será realizada neste contexto.

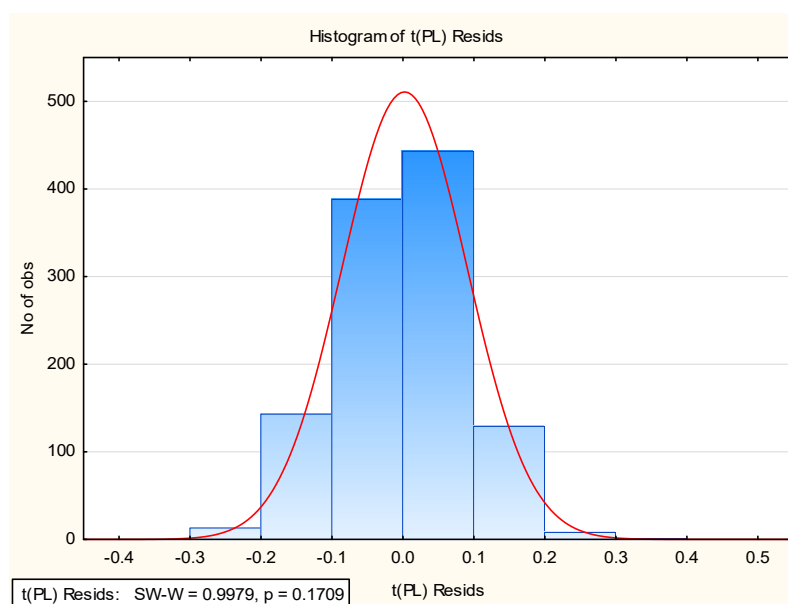
4.1.5. Efeitos sinérgicos entre lavagem/secagem e irradiação gama sobre TNT de 40 g m⁻²

Os resultados da passagem de luz (PL) para os tratamentos de lavagem/secagem com irradiação gama no TNT 40 g m⁻² encontram-se no Apêndice 5. A média populacional foi 0,1171. As médias indicaram valores superiores para os fragmentos das subamostras 22 e 28 com valores de 0,3774 e 0,3528, respectivamente. No que diz respeito aos coeficientes de variação, os resultados apresentaram percentuais que variaram de 31 a 85% (Apêndice 5). Observou-se que as subamostras 29 e 31 tiveram 4 de seus resultados acima de 0,200, a média geral da passagem de luz, assim como as subamostras 21 e 22 tiveram 3 de seus resultados dentro da mesma faixa. Das 61 médias, 26 ficaram abaixo de 0,1952, incluindo as médias das amostras não irradiadas (Ciclo 0), que correspondem a um percentual de 42,62%. Considerando as estimativas de Coeficiente de Variação em porcentagem – CV%, 19 dos 61 fragmentos apresentaram resultados superiores a 50%, incluindo as subamostras referentes ao Ciclo 0.

O ensaio fatorial com três fatores (Amostra, Lavagem/Secagem e Irradiação) com as interações (Amostra*Lavagem/Secagem, Amostra*Irradiação, Lavagem*Irradiação e Amostra*Lavagem/Secagem*Irradiação) foi bastante complexo. Por isso, optou-se, primeiramente, mostrar os resultados do teste de Shapiro-Wilk para avaliar a distribuição normal dos resíduos. Após a exclusão de alguns pontos fora de controle (*outliers*), com probabilidade igual 0,1709 (Figura 37), houve indícios estatísticos de que os resíduos da análise estatística possuírem distribuição aproximada à normalidade, corroborando os resultados conseguintes.

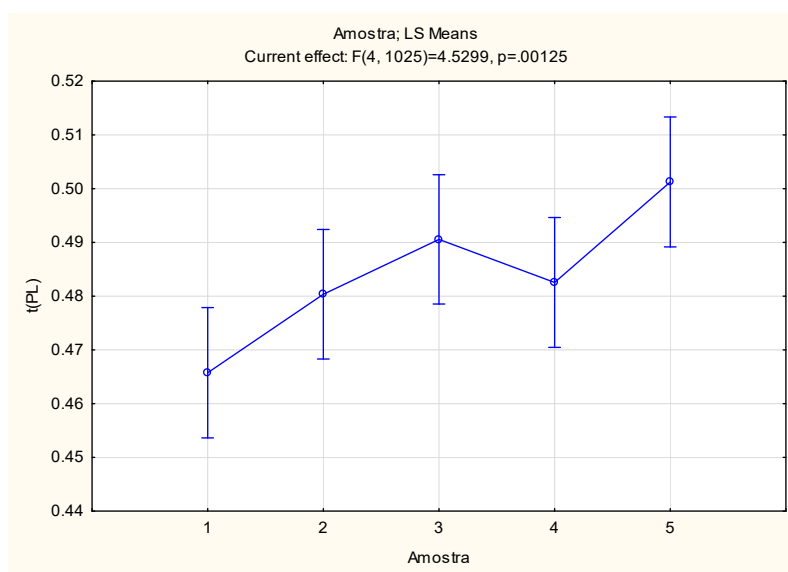
Diferentemente da análise estatística aplicada anteriormente para o ensaio de lavagem/secagem, foi possível aplicar a estatística paramétrica para o TNT de 40 g m⁻², mesmo tendo sido submetido a dois tratamentos em sequência. Para o tratamento Amostra conforme mostra os dados da Figura 38, houve indícios estatísticos de que ao menos uma das médias das Amostras foi diferente em nível de 95% de confiança ($p = 0,00125$) das demais.

Figura 37 – Histograma dos resíduos para a passagem de luz do TNT de 40 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem e à radiação gama



Fonte: A autora (2025).

Figura 38 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras submetidas a ciclos de lavagem/secagem e à radiação gama do TNT de 40 g m⁻²



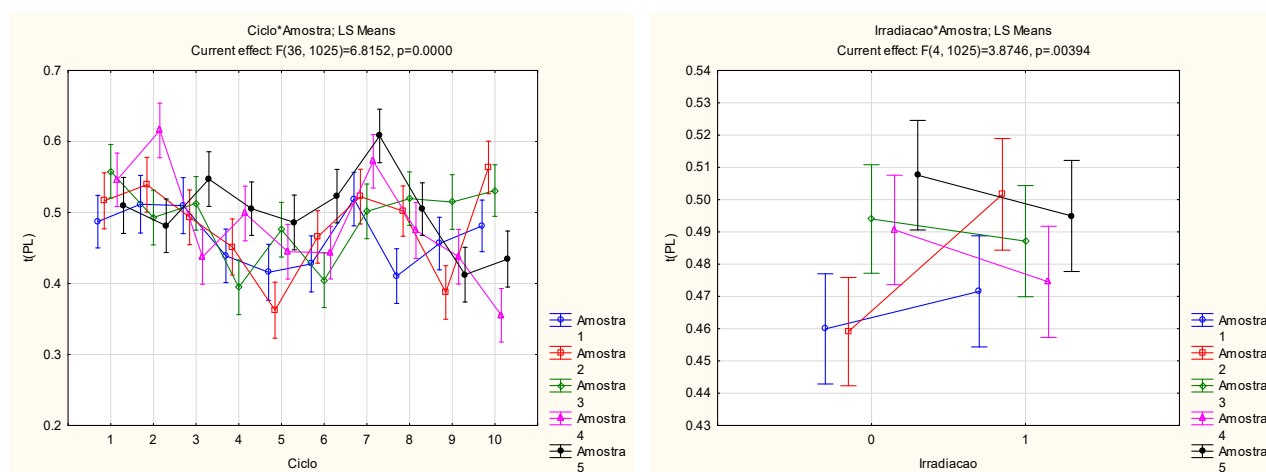
Barras verticais denotam intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$)

Fonte: A autora (2025).

As amostras 3 e 5 foram consideradas significativamente diferentes da amostra 1 (Figura 38) em nível de 95% de confiança, novamente permitindo esclarecer a dificuldade de garantia de homogeneidade do TNT, principalmente o de gramatura 40.

A análise estatística das interações entre Amostra e Ciclo, e Amostra e Irradiação, apresentada na Figura 39, revelou efeitos significativos ($p = 0,00000$ e $p = 0,00394$, respectivamente). No ensaio de lavagem/secagem, as amostras 4 (Ciclo 2), 5 (Ciclo 3) e 1 (Ciclo 8) apresentaram valores médios de passagem de luz (PL) distintos, indicando interação significativa entre Amostra e Ciclo. No ensaio de radiação gama, apenas a amostra 2 apresentou diferença significativa ($\alpha = 0,05$) em relação à interação com a irradiação (Figura 39). Esses resultados corroboram a heterogeneidade da trama do TNT de 40 g m^{-2} , observada em análises anteriores, e evidenciam a importância de considerar os efeitos sinérgicos e cumulativos dos tratamentos na avaliação da integridade do material.

Figura 39 – Comparações múltiplas para os efeitos das interações entre médias dos valores transformados de passagem de luz – $t(PL)$ das amostras e dos ciclos (à esquerda) e do tratamento Irradiação (à direita) analisadas do TNT de 40 g m^{-2}

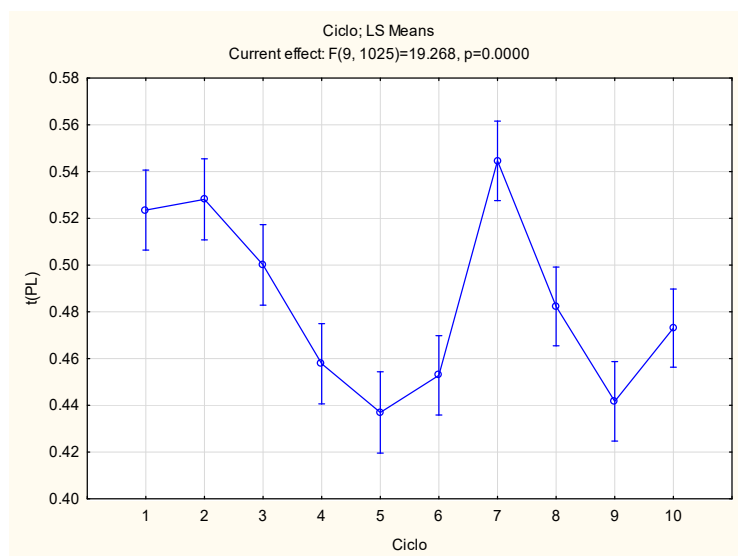


Barras verticais denotam intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$)

Fonte: A autora (2025).

Para os ciclos de lavagem/secagem, de acordo com os resultados da ANOVA da Figura 40, houve evidências estatísticas de que ao menos uma média dos ciclos tenha sido diferente das demais em nível de 95% de confiança ($p = 0,0000$). Mudanças na trama foram consistentemente notadas a partir do Ciclo 3, embora o Ciclo 7 não possa ser considerado diferente do Ciclo 0. É provável que as amostras do Ciclo 7 possam ter sofrido efeito sistemático da lavagem/secagem até o sexto ciclo, ocasionando alterações na trama que imitassem as condições iniciais do TNT. Por isso, nesse trabalho, focaram-se nas primeiras alterações, mesmo que outros ciclos providenciassem resultados não estatisticamente diferentes do Ciclo 0.

Figura 40 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – $t(PL)$ para o TNT de 40 g m^{-2} submetidos a ciclos de lavagem/secagem



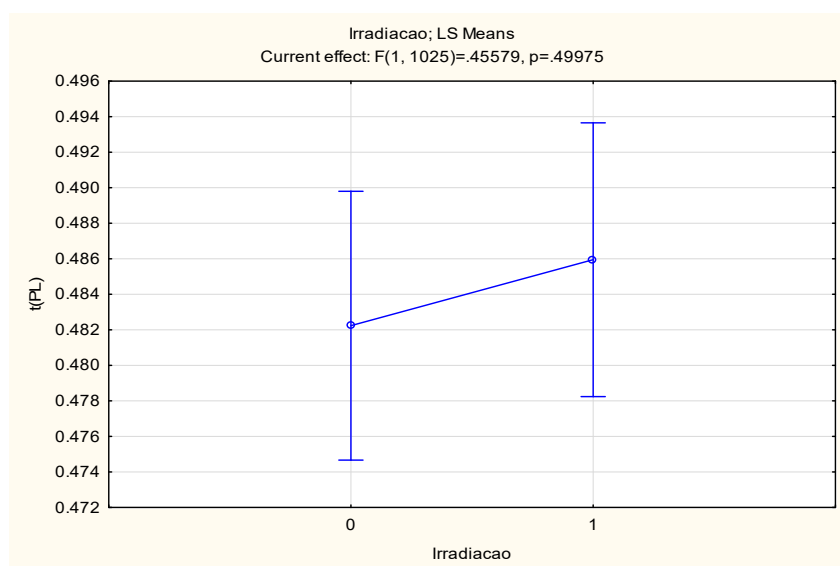
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Ao aplicar método de descontaminação baseado em lavagem sem secagem em máquina, Arruda (2023) obteve resultados parecidos independentemente do tipo de tecido do EPI doméstico testado (protetor respiratório semifacial caseiro), ou seja, a partir de 5 ciclos de lavagens e secagens ao ar livre, os protetores caseiros apresentavam alterações significativas em nível de 95% de confiança.

Com relação ao tratamento Irradiação, os resultados da ANOVA fatorial da Figura 41 permitiram comprovar que não houve diferença significativa entre os recortes de TNT de 40 g m^{-2} submetidos ou não à irradiação gama em nível de 95% de confiança ($p = 0,49975$). Apenas notou-se uma tendência de valor médio mais elevado para as amostras submetidas à irradiação gama independentemente dos ciclos de lavagem/secagem.

Figura 41 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – $t(\text{PL})$ para o TNT de 40 g m^{-2} submetidos à irradiação gama



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

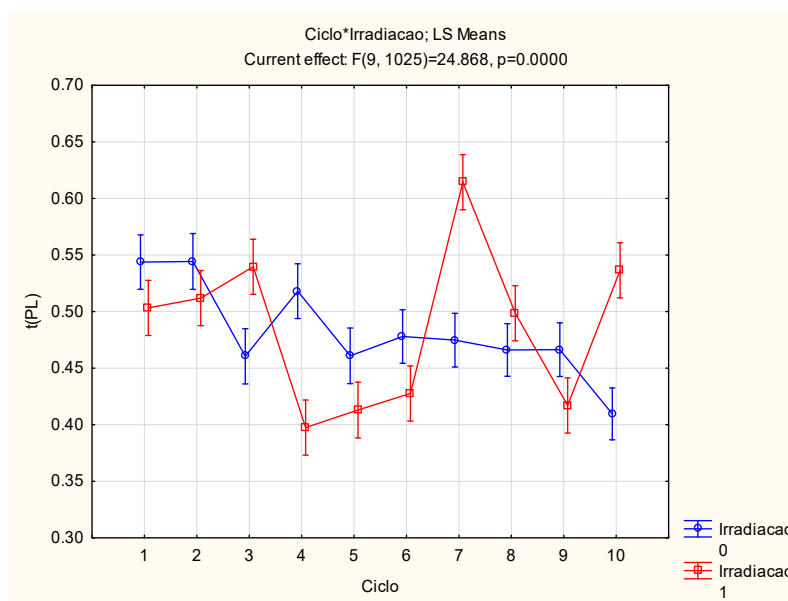
Fonte: A autora (2025).

Para esse ensaio com o tratamento Irradiação, os resultados apresentaram diferença estatística significativa ($\alpha = 0,05$), embora, no teste realizado por Hwang et al. (2023), a comparação estabelecida tenha sido somente com o TNT não irradiado com o irradiado. Neste ensaio, a comparação se deu com um TNT não irradiado que já sofreu efeitos de lavagem/secagem somados àqueles da irradiação gama. É de se esperar que o efeito de lavagem seja mais agressivo que o efeito de irradiação pelo comportamento apresentado nas análises anteriores, resultando em maior variabilidade dos resultados para o fator Irradiação.

Mesmo que a aplicação da radiação gama não tenha sido significativa para o TNT de 40 g m⁻², foram encontraram resultados desfavoráveis para a aplicação de irradiação gama a longo prazo em TNT, verificados a partir da degradação do material após a dose de 25 kGy (IAEA, 2021).

Com relação aos efeitos da interação entre ciclo e irradiação, na Figura 42, foi constatada diferença estatística significativa em nível de 95% de confiança ($p = 0,0000$) para o TNT de 40 g m⁻². As interações mais pronunciadas ocorreram a partir do terceiro ciclo de lavagem com as amostras irradiadas por radiação gama.

Figura 42 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) para o TNT de 40 g m⁻²

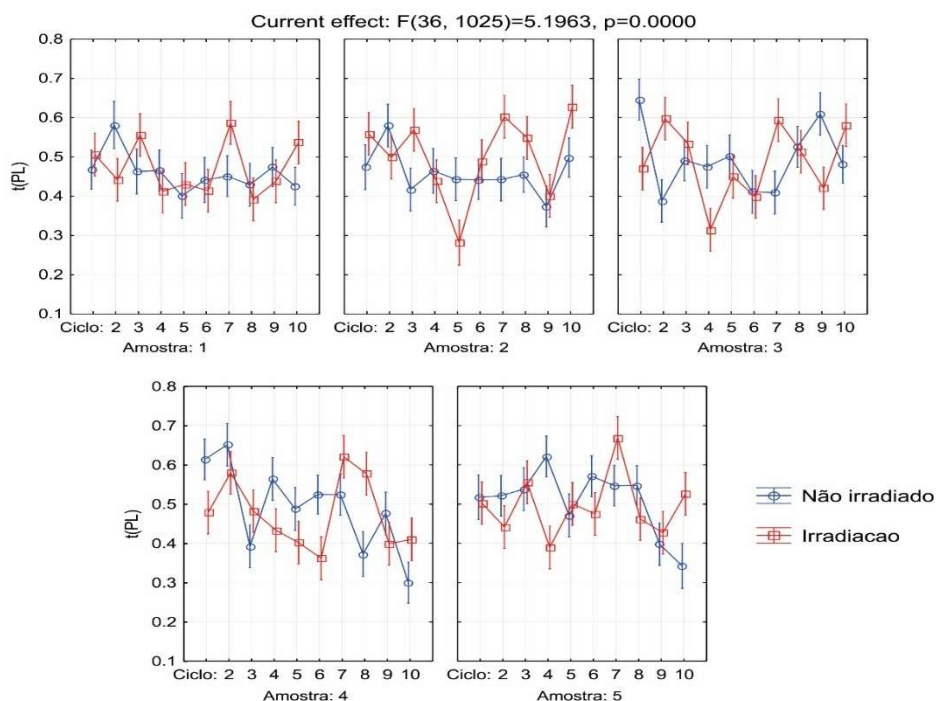


Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Avaliando a interação dos três tratamentos Ciclo, Irradiação e Amostras, por meio do teste estatístico ANOVA, observou-se que, com o valor de $p = 0,0000$, houve diferenças significativas em nível de 95% de confiança, corroborando efeito sinérgico conforme mostra a Figura 43.

Figura 43 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre Ciclo, Irradiação e Amostra para o TNT de 40 g m⁻²



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

No ciclo 1, houve diferença significativa em nível de 95% de confiança para o efeito sinérgico da irradiação gama nas amostras 3 e 4, enquanto, no ciclo 4, houve forte interação entre as amostras 3 e 5. No ciclo 5, também foi considerado efeito da interação significativo para as amostras 2 e 3, assim como nos ciclos 7 e 10, cuja interação entre radiação gama e amostra foi significativa para praticamente em todas as amostras. O efeito de interação foi supostamente menos expressivo nas amostras 1, 2 e 5, que aparentam terem a integridade um pouco mais preservada.

Como os tratamentos foram praticamente todos significativos em nível de 95% de confiança e havendo interação entre ciclo e irradiação, os métodos utilizados causaram efeitos na trama do TNT de 40 g m⁻². Ademais, os efeitos significativos observados com o tratamento Amostra apontaram para a heterogeneidade do material.

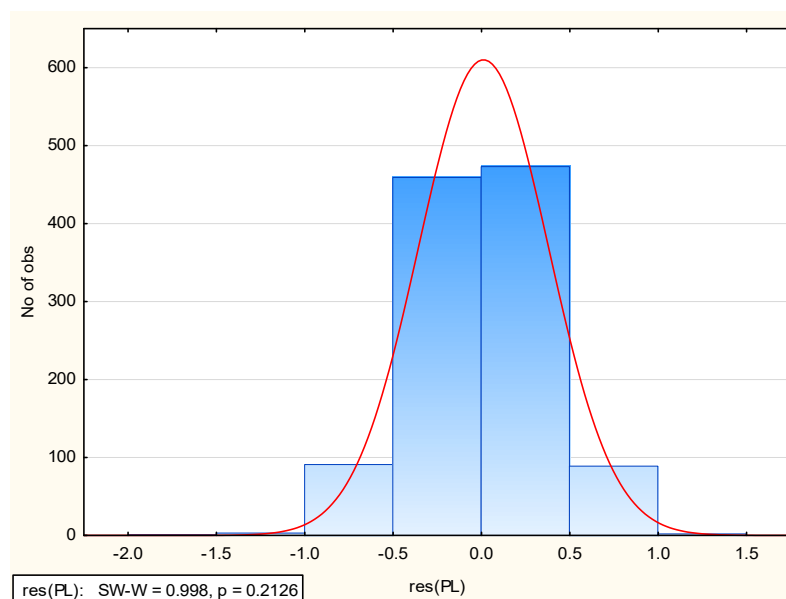
4.1.6. Efeitos sinérgicos entre lavagem/secagem e irradiação gama sobre TNT de 60 g m⁻²

Os resultados da passagem de luz (PL) para os tratamentos com lavagem/secagem e irradiação gama no TNT 60g m⁻² encontram-se no Apêndice 6. A média populacional foi estimada em 0,0806, por isso foi destacado o valor médio superior de 0,2041 para a amostra 1.1 do ciclo 5. No que diz respeito aos coeficientes de variação – CV%, os resultados encontraram-se na faixa de 39,83 a 139,95% (Apêndice 6), com apenas 5 das 40 amostras apresentando resultados inferiores a 50%. Duas amostras ultrapassaram os 100%, que são amostra 1.1 do ciclo 9 – 139,95% e amostra 1.1 do ciclo 7 – 108,03%.

Similarmente, esse ensaio experimento fatorial – 3 fatores (Amostra, Lavagem/secagem e Radiação gama) com interações (Amostra*Lavagem/secagem; Amostra*Radiação gama; Lavagem/secagem*Radiação gama; Amostra*Lavagem/secagem*Radiação gama) – constituiu-se numa complexidade para a avaliação da passagem de luz no TNT de 60 g m⁻² submetido à lavagem/secagem e à irradiação gama, cujos requisitos da análise de variância devem ser cumpridos para garantir a confiabilidade dos resultados estatísticos. Nesse sentido, os resíduos apresentaram distribuição aproximada à normalidade como se pode observar o histograma da Figura 44, assim como a probabilidade de 0,2126 indicou que não houve indícios estatísticos da não normalidade dos resíduos da ANOVA. Não foram encontrados problemas relacionados à assimetria, ou seja, os lados do histograma com alturas desproporcionais, e à curtose, quando ocorreria o achatamento da curva ou o oposto.

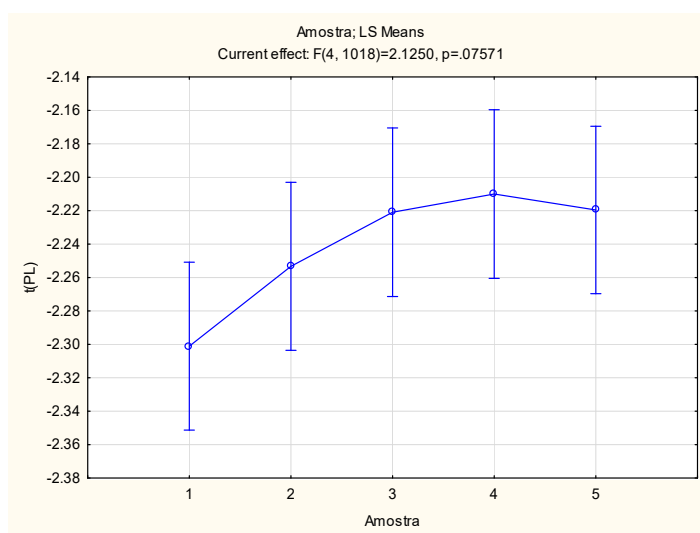
Diferentemente do TNT de 40 g m⁻², cuja heterogeneidade foi confirmada para o tratamento Amostra, os resultados da análise estatística apontaram, em nível de 95% de confiança ($p = 0,07571$), para a igualdade dos valores médios de passagem de luz após transformação ($t(PL)$) conforme os resultados da Figura 45. Considerando que o TNT de 60 g m⁻² apresentou homogeneidade, sob os mesmos tratamentos, esse material deve suportar os efeitos da descontaminação.

Figura 44 – Histograma dos resíduos para a passagem de luz do TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem e à radiação gama



Fonte: A autora (2025).

Figura 45 – Comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – t(PL) das amostras analisadas do TNT de 60 g m⁻²

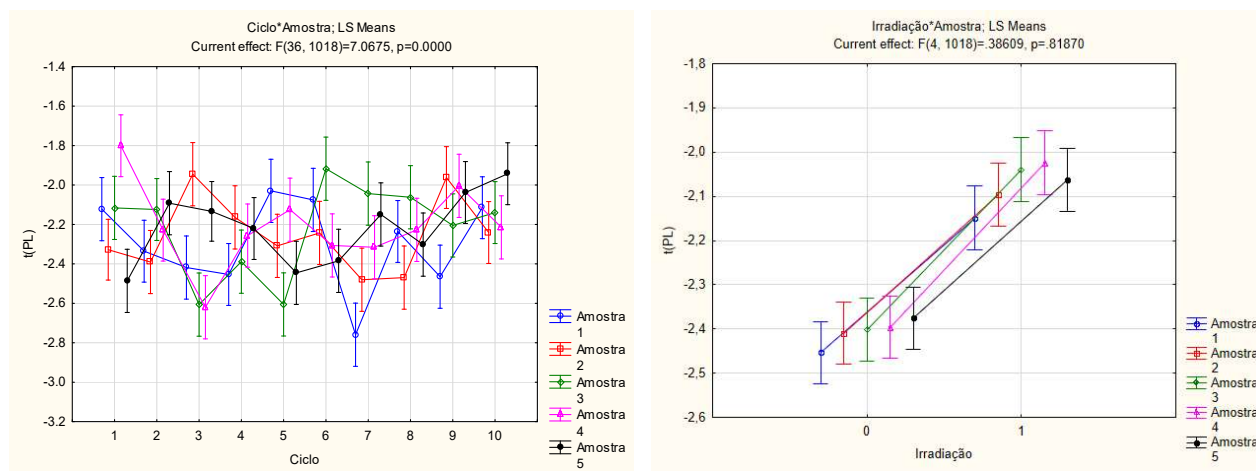


Barras verticais denotam intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$)

Fonte: A autora (2025).

A análise da interação entre os tratamentos Amostra e Ciclo (Ciclo*Amostra) e Amostra e Radiação gama (Irradiação*Amostra) (Figura 46) revelou efeitos estatisticamente significativos ($p = 0,0000$, nível de confiança de 95%) para a interação Ciclo*Amostra, indicando que a resposta do TNT de 60 g m^{-2} aos ciclos de lavagem/secagem variou entre as amostras. Os ciclos 2, 4, 9 e 10 apresentaram padrões de interação semelhantes, embora as amostras 1, 3 e 4 tenham exibido certa variação para interação Ciclo*Amostra. Por outro lado, os efeitos da interação Irradiação e Amostra foram considerados não significativos em nível de 95% de confiança com probabilidade de 0,81870 (Figura 46, à direita).

Figura 46 – Comparações múltiplas para os efeitos das interações entre médias dos valores transformados de passagem de luz – $t(\text{PL})$ das amostras e dos ciclos (à esquerda) e do tratamento Irradiação (à direita) analisadas do TNT de 60 g m^{-2}



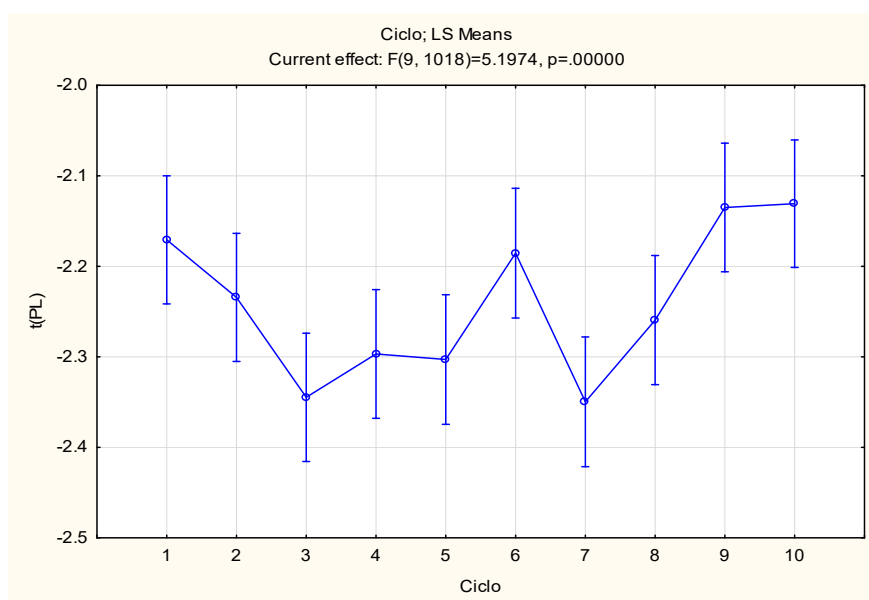
Barras verticais denotam intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$)

Fonte: A autora (2025).

De acordo com a Figura 46, mesmo não sendo significativos os efeitos da interação dos tratamentos Amostra e Irradiação, observou-se que as médias dos efeitos do subgrupo irradiados foram sempre maiores, indicando a importância do conhecimento da heterogeneidade do TNT e seu impacto no aumento da fragilidade do material após métodos de descontaminação.

De acordo com a Figura 47, houve fortes indícios estatísticos, em nível de 95% de confiança, de que ao menos uma média dos ciclos foi diferente das demais dado o valor de p igual a 0,00000. Houve semelhança entre as médias dos ciclos 1, 2, 6, 9 e 10, assim como nos ciclos 3, 4, 5, 7 e 8. Foi notada a diminuição da trama, estimado pela passagem de luz (PL), indicando encolhimento devido a influência do tratamento de lavagem seguida de secagem.

Figura 47 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – $t(PL)$ para o TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem

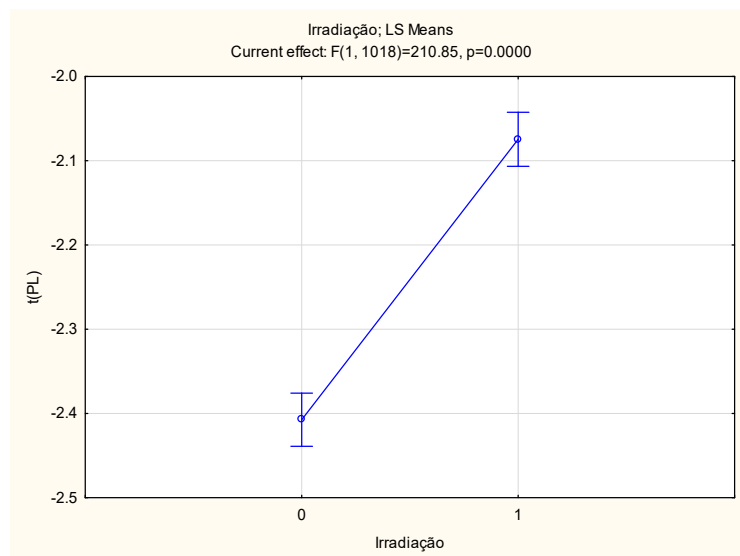


Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Com relação aos recortes de TNT de 60 g m⁻² irradiada e não irradiada, embora tenham sido submetidas aos ciclos de lavagens antes de serem irradiadas, o teste estatístico se apresentou significativo em nível de 95% de confiança, uma vez que o valor de probabilidade foi 0,0000, conforme mostra a Figura 48.

Figura 48 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de passagem de luz – $t(PL)$ para o TNT de 60 g m⁻² submetidos à irradiação gama



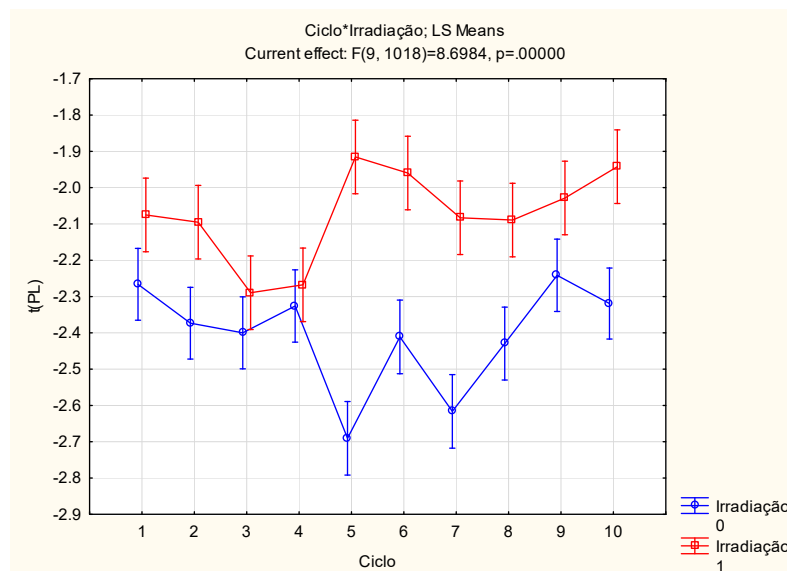
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Mesmo que a análise de variância seja capaz de isolar os efeitos dos tratamentos e das interações, há possibilidade das diferenças para um determinado tratamento serem intensificadas, o que provavelmente aconteceu para os efeitos de radiação gama observados na Figura 48.

Os efeitos da interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação foram pormenorizados na Figura 49, em que houve fortes indícios estatísticos, em nível de 95% de confiança, de diferenças significativas com valor de p igual a 0,0000. Até o quarto ciclo, os efeitos não foram tão significativos em nível de 95% de confiança, enquanto foram intensificados nos ciclos 5, 6 e 7 com aumento das médias dos efeitos da interação com o tratamento Irradiação. A partir do oitavo ciclo, as diferenças foram novamente reduzidas, indicando claramente que houve interação entre os métodos de descontaminação aplicados.

Figura 49 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação para as médias dos valores transformados de passagem de luz – $t(PL)$ para o TNT de 60 g m⁻²



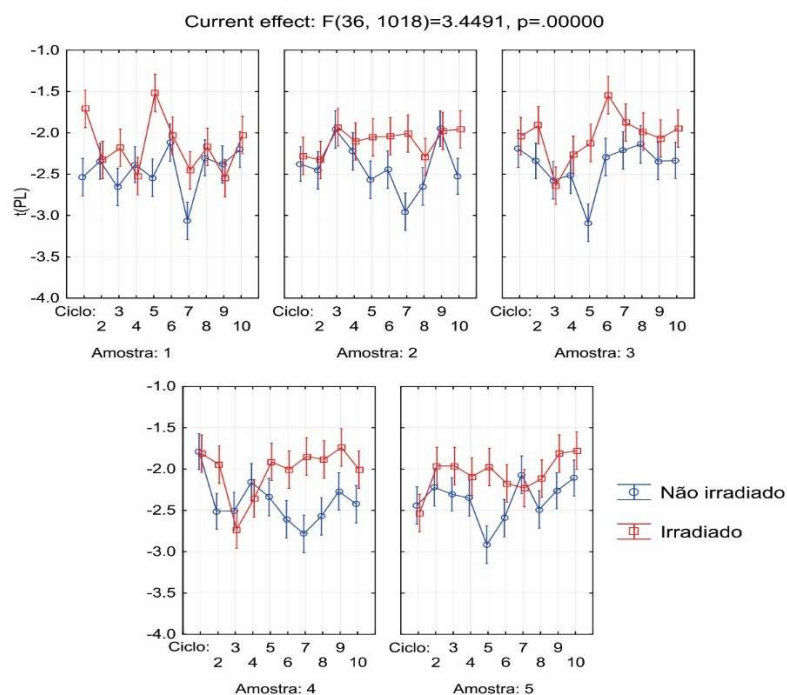
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

De maneira clara, os recortes do TNT de 60 g m⁻² não irradiados (Irradiação 0) apresentaram valores médios inferiores do que aqueles irradiados (Irradiação 1) como mostra a Figura 49. O comportamento aleatorizado provavelmente esteve relacionado com o trecho que foram extraídas as amostras submetidas aos tratamentos, muito embora já se tenha verificado que o efeito deixado pelos ciclos de lavagem/secagem tenha oferecido maior dano que o tratamento Irradiação.

Os efeitos da interação entre os tratamentos Ciclo, Irradiação e Amostra estão mostrados na Figura 50, em que houve fortes indícios estatísticos em nível de 95% de confiança de interação significativa, apontando a heterogeneidade e efeitos sinérgicos de danos ao TNT de 60 g m⁻² devido à aplicação de métodos de esterilização/descontaminação como a radiação gama e a lavagem/secagem, conjuntamente.

Figura 50 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre Ciclo, Irradiação e Amostra para o TNT de 60 g m⁻²



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

A técnica de avaliação de espaços vazios (passagem de luz) por microscopia ótica foi aplicada adequadamente nesta Seção, permitindo pormenorizar os efeitos dos métodos de descontaminação sobre as gramaturas de TNT analisados, além de possibilitar avaliar a heterogeneidade dos materiais devido às diversas interações significativas com as amostras aleatórias tomadas. Contudo, os próximos ensaios permitiram também avaliar os danos dos métodos de descontaminação sobre a proteção física do usuário a partir da simulação do spray.

4.2. Ensaios por spray

A análise da integridade física dos TNT de 40g m⁻² e 60g m⁻² utilizando MO para avaliar a PL, foi complementada pela avaliação da capacidade de proteção física dos materiais submetidos aos tratamentos de limpeza/desinfecção. Para simular a

penetração de fômites, foi realizado um ensaio de spray, e as manchas resultantes foram digitalizadas. As imagens digitalizadas foram então convertidas em dados numéricos, permitindo a aplicação da Análise de Variância (ANOVA) após a transformação dos dados, quando necessário. A utilização da ANOVA permitiu a análise estatística robusta dos dados, identificando diferenças significativas na capacidade de barreira dos materiais submetidos aos diferentes tratamentos de limpeza/desinfecção.

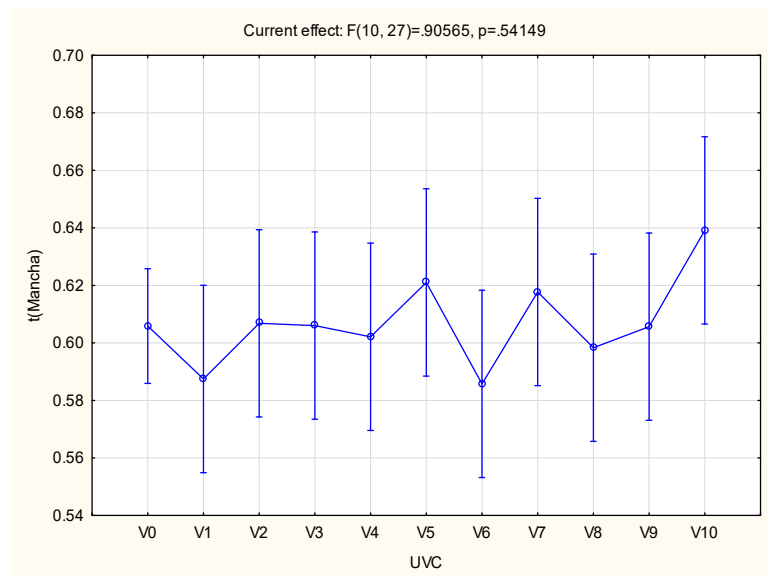
4.2.1. Efeitos da radiação UVC sobre TNT de 40 g m^{-2}

Os resultados da análise estatística descritiva de quantidade de manchas para os tratamentos referentes aos ciclos de irradiação com UVC a recortes de TNT de 40 g m^{-2} encontram-se no Apêndice 7. As médias indicaram valores superiores, quando comparados com a média populacional de 0,012, para as amostras dos ciclos 5 (média = 0,0146), 7 (0,01431) e 10 (0,01785), enquanto a faixa dos coeficientes de variação foi 7,54% - 68,84%, estimados para os ciclos 3 e 2, respectivamente).

Os resultados das comparações múltiplas da ANOVA encontram-se na Figura 51, em que, a partir do valor de p de 0,54149, foi possível concluir a ausência de diferenças estatísticas em nível de 95% de confiança para as médias de manchas dos recortes submetidos à radiação UVC. De maneira geral, os intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$) foram notavelmente superiores para esse ensaio, indicando a maior contribuição de variabilidade para a aceitação da hipótese de igualdade das médias de manchas após a transformação dos dados.

Os resultados da avaliação da distribuição dos resíduos da ANOVA encontram-se na Figura 52, apontando que a transformação dos dados foi aceitável para garantir a distribuição normal aproximada dos resíduos conforme o valor de $p = 0,0576$.

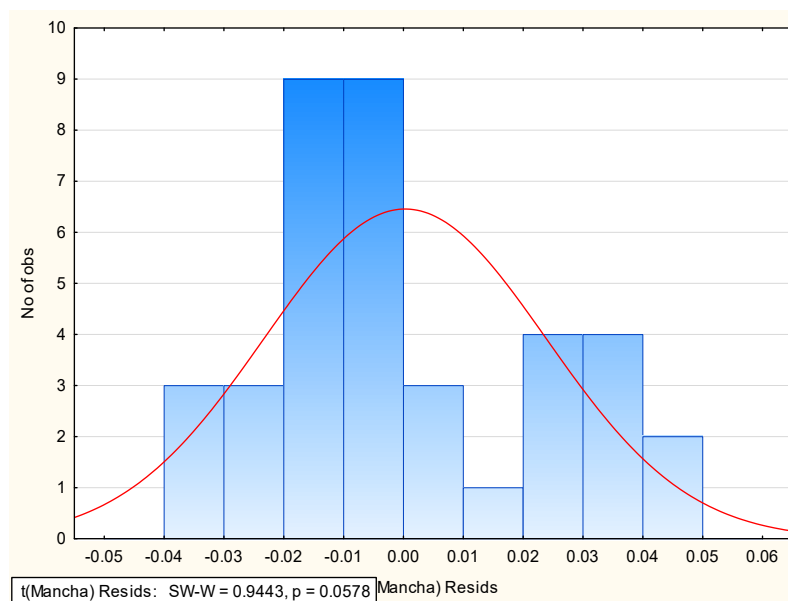
Figura 51 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 40 g m⁻² submetidos a ciclos de irradiação com UVC



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Figura 52 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 40 g m⁻² submetidos a ciclos de irradiação UVC



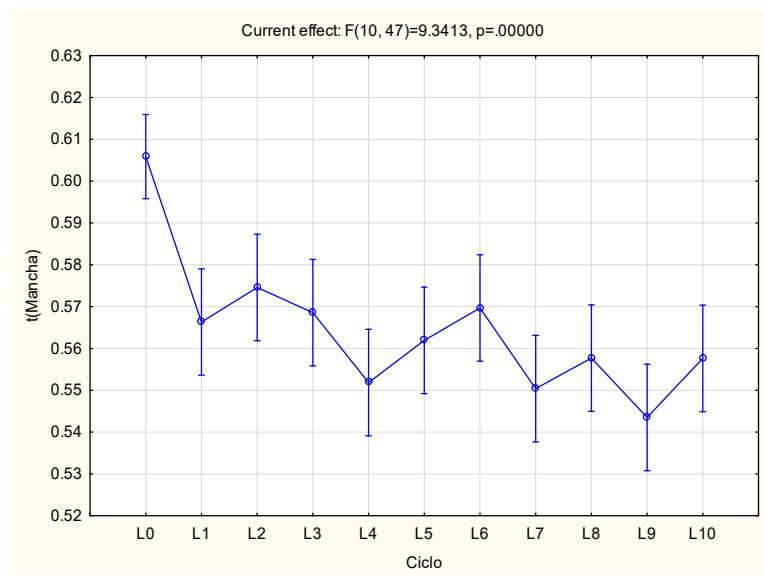
Fonte: A autora (2025).

A radiação UVC, de maneira geral, pode não afetar a trama do TNT de modo a interferir na capacidade de proteção dos recortes de gramatura 40 g m^{-2} , embora tenha se verificada alterações pelo ensaio de microscopia ótica.

4.2.2. Efeitos da lavagem/secagem sobre TNT de 40 g m^{-2}

Os resultados da análise estatística descritiva de manchas para os tratamentos referente aos ciclos lavagem no TNT de 40 g m^{-2} encontram-se no Apêndice 8. As médias indicaram valores superiores à média populacional de 0,00611 para as amostras dos ciclos 1 (média = 0,0060), 2 (0,0070), 3 (0,0063) e 6 (0,0067), enquanto os coeficientes de variação variaram de 9,51%, referente ao nível de tratamento L5, a 41,28% (L6). Submetendo o TNT de 40 g m^{-2} ao ensaio por spray nos diversos ciclos de lavagem/secagem, foram obtidos os resultados do teste de comparações múltiplas conforme mostra a Figura 50.

Figura 53 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 40 g m^{-2} submetidos a ciclos de lavagem/secagem



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

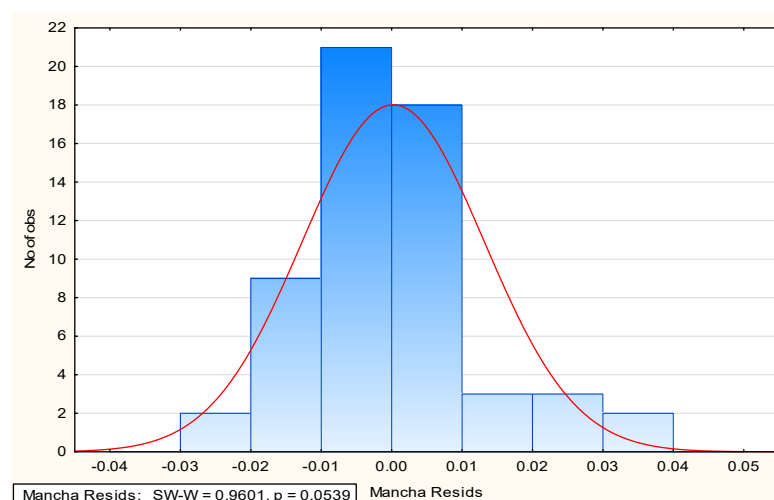
Fonte: A autora (2025).

Como demonstrado pelo gráfico da Figura 53, as manchas produzidas pelo spray ao atravessar recortes do TNT de 40 g m⁻² sem a submissão à lavagem apresentaram valor relativamente diverso com relação aos demais ciclos de lavagem. Sendo assim, o valor de $p = 0,0000$ apresentado indicou diferenças estatísticas em nível de confiança de 95% para as manchas na trama da malha do TNT de 40 g m⁻² em função dos ciclos de lavagem.

Conforme também discutido por Arruda (2023) em seu trabalho sobre protetores respiratórios caseiros, o tamanho das manchas das amostras submetidas aos ciclos de lavagem indicaria uma área menor quando comparada a que não foi submetida ao tratamento de lavagem. Aparentemente, tal resultado poderia sugerir uma vantagem, uma vez que a expectativa seria um afrouxamento da trama. Esse comportamento de diminuição de área pode simular que o TNT melhorou a proteção física; todavia, pôde ter sido causado a uma maior deformidade em sua estrutura a ponto de contrair suas fibras. Durante o reuso, as chances de rompimento da malha poderiam ser maiores nessa circunstância devido à perda de resistência à tração.

Para verificar a distribuição dos resíduos após a aplicação do modelo ANOVA, foi empregado o teste estatístico de Shapiro-Wilk, em que a distribuição normal dos resíduos foi considerada aproximada à normalidade em nível de 95% de confiança conforme a Figura 54 com valor de p igual a 0,0539. Nesse sentido, os resultados da análise estatística são confiáveis, o que permite confirmar os efeitos negativos da lavagem/secagem sobre o TNT de 40 g m⁻².

Figura 54 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 40 g m⁻² submetidos a ciclos de irradiação UVC

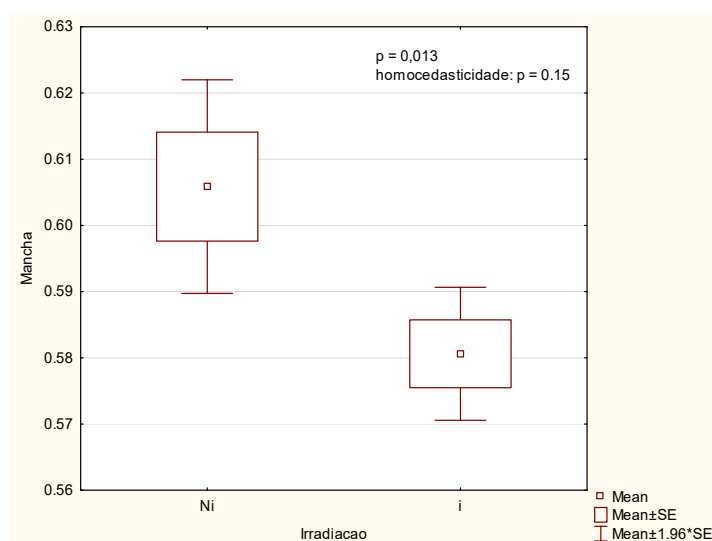


Fonte: A autora (2025).

4.2.3. Efeitos da radiação gama sobre TNT de 40 g m⁻²

Da mesma forma, os recortes de TNT de 40 g m⁻² irradiados na fonte gama de Co-60 foram avaliados por meio do ensaio por spray. A homoscedasticidade de variâncias foi avaliada pelo teste de Levene, assegurando que as variâncias dos tratamentos Não irradiado (Ni) e Irradiado (I) foram semelhantes. Desse modo, houve indícios estatísticos em nível de 95% de confiança de que os valores médios dos tratamentos foram diferentes ($p = 0,0130$), resultando em maior porcentagem de manchas para o tratamento Ni em comparação com o tratamento I (Figura 55).

Figura 55 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores de manchas – t(PL) para o TNT de 40 g m⁻² submetidos à irradiação gama



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

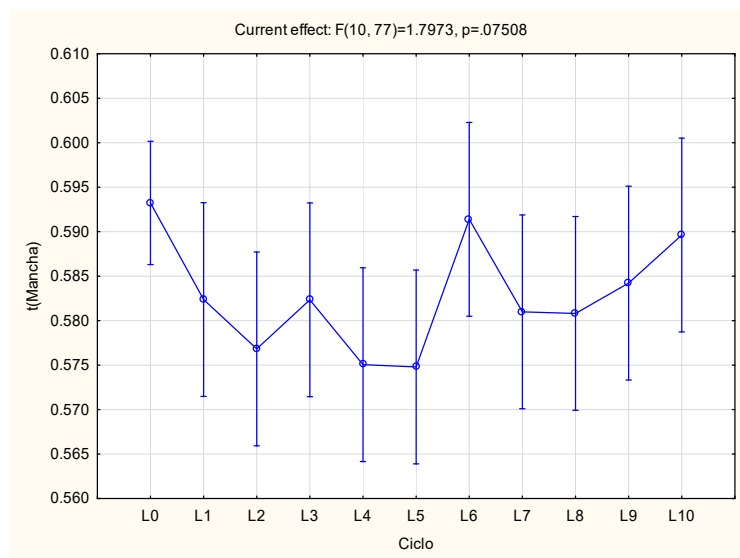
Fonte: A autora (2025).

4.2.4. Efeitos de lavagem/secagem e radiação gama sobre TNT de 40 g m⁻²

Os resultados da análise estatística descritiva de manchas para os tratamentos referentes aos ciclos de lavagem/secagem e irradiação nos recortes de TNT de 40 g m⁻² encontram-se no Apêndice 9. As médias indicaram valores superiores, quando comparadas com a média populacional de 0,01069, para as amostras irradiadas dos ciclos de lavagem 9 com valor de 0,0146; ciclo 10 com valor de 0,0139, ciclo 6 com valor de 0,0125 e ciclo 7 com o valor de 0,0124. Os coeficientes de variação variaram de 7,7% (ciclo L4) a 33,39% (ciclo L7).

Assim como ocorreu para os ensaios com microscopia ótica, foram realizados tratamentos sequenciais de recortes de TNT para a avaliação por ensaio por spray. No primeiro gráfico extraído dessa combinação (Figura 53), percebeu-se que não houve diferenças significativas em nível de 95% de confiança entre os ciclos de lavagem e secagem, uma vez que o valor de p foi 0,07508. Vale destacar que o TNT de 40 g m⁻² submetido a nenhum ciclo de lavagem apresentou menor intervalo de confiança em nível de 95% de confiança (Figura 56).

Figura 56 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 40 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem

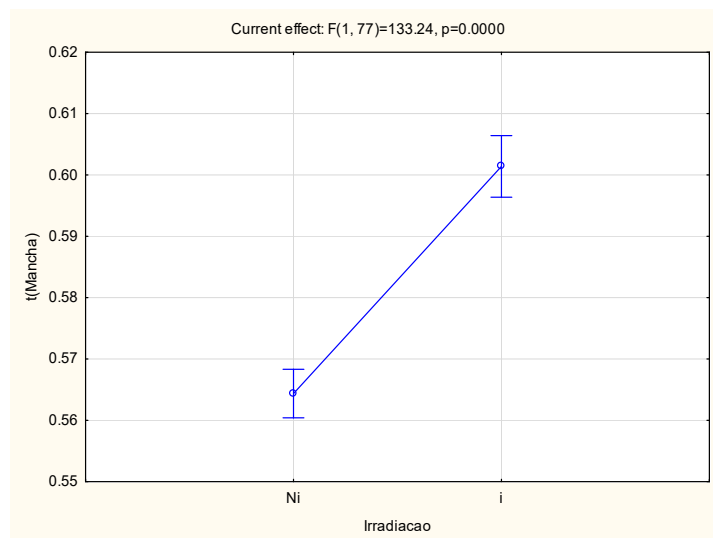


Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Para o tratamento Irradiação gama, ao avaliar os grupos de amostras irradiadas e não irradiadas com relação à quantidade de manchas que atravessaram o TNT de 40 g m⁻², pôde-se verificar claramente que as amostras foram estatisticamente diferentes em nível de 95% de confiança ($p = 0,0000$) conforme mostra a Figura 57. A quantidade de manchas obtidas foi maior para os recortes irradiados, corroborando os dados de passagem de luz.

Figura 57 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 40 g m⁻² submetidos a radiação gama

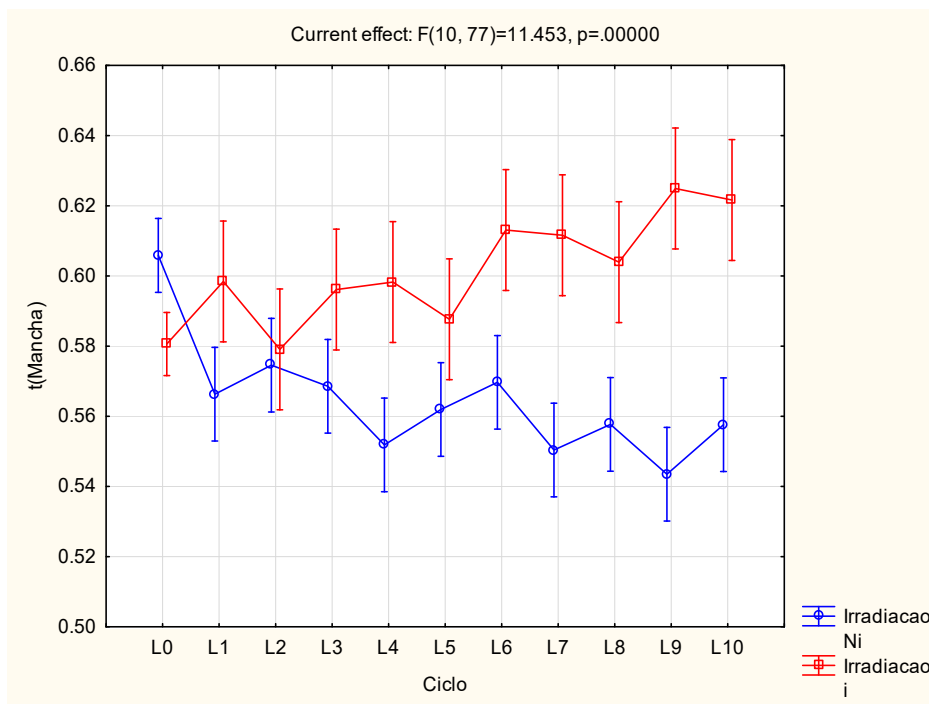


Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Apesar da aparente simplicidade do TNT como material para EPIs, a aplicação simultânea de dois métodos de descontaminação, lavagem/secagem e irradiação gama, revelou uma complexidade inesperada. A análise da interação entre esses tratamentos demonstrou efeitos estatisticamente significativos ($p < 0,05$, nível de confiança de 95%) (Figura 58), indicando que a combinação dos métodos de descontaminação não resulta em efeitos aditivos, mas sim em interações complexas que podem alterar a integridade do material de maneiras não previstas. A análise detalhada dos resultados revelou que a interação entre lavagem/secagem e irradiação gama induziu alterações na microestrutura do TNT que não foram observadas nos tratamentos isolados, destacando a importância de avaliar os efeitos combinados dos métodos de descontaminação na integridade dos EPIs

Figura 58 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 40 g m⁻²



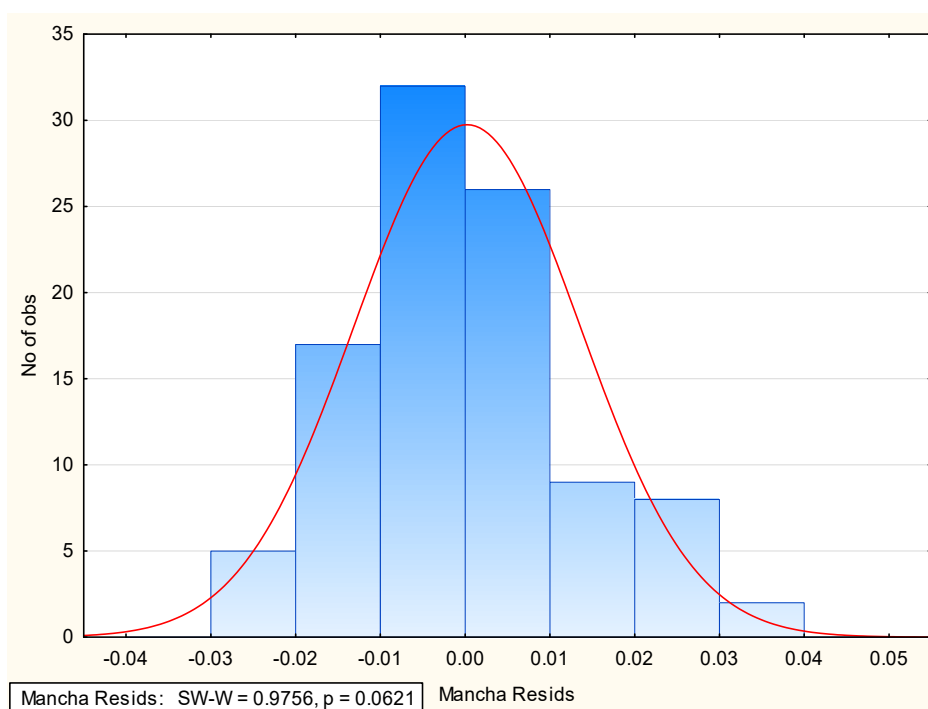
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

No que se pôde inferir da Figura 58, a partir do Ciclo 2 de lavagem/secagem, ocorre a intensificação da interação com a irradiação, em que os valores se tornaram maiores e mais significativos em nível de 95% de confiança quando se considera os intervalos de confiança. Desse modo, todos os resultados apontaram para alterações físicas no TNT de 40 g m⁻², possivelmente prejudicando a sua função primária de proteção ao usuário.

Considerando a avaliação dos resíduos, no histograma da Figura 59, pôde-se verificar que a distribuição dos resíduos foi considerada aceitável para a confirmação dos resultados da ANOVA a partir da distribuição normal dos resíduos em nível de 95% de confiança. Conforme o gráfico abaixo, o resíduo foi considerado normal, tendo em vista que o valor de p foi 0,0621.

Figura 59 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 40 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem e irradiação gama



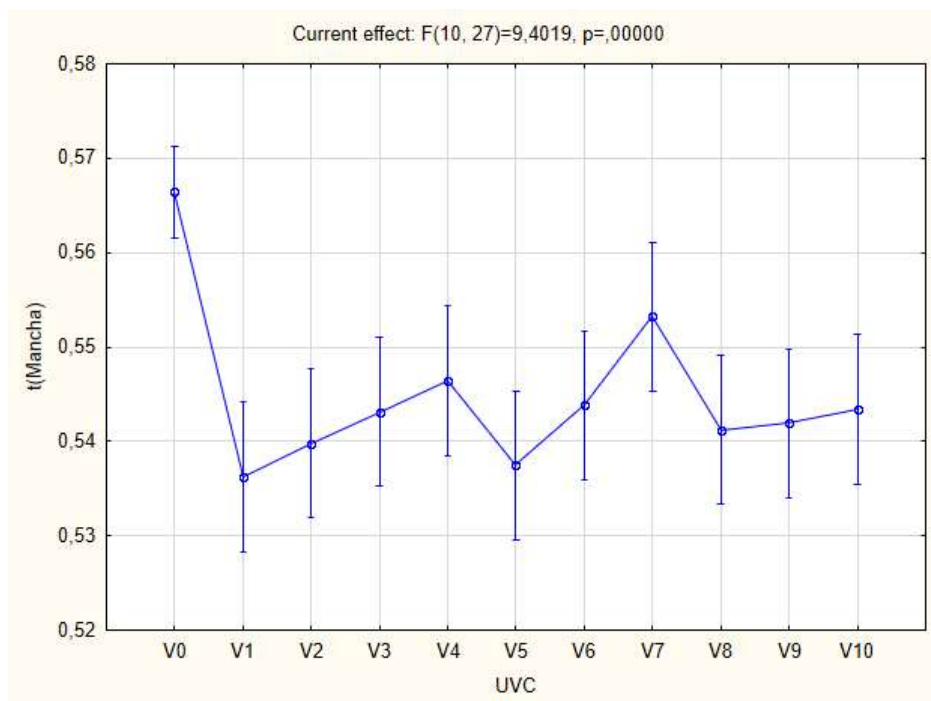
Fonte: A autora (2025).

4.2.5. Efeitos da radiação UVC sobre TNT de 60 g m⁻²

Os resultados da análise estatística descritiva de manchas para os tratamentos referentes aos ciclos de irradiação com UVC dos recortes de TNT com 60 g m⁻² encontram-se no Apêndice 10. As médias foram superiores em comparação com a média populacional de 0,004281 para a amostra do ciclo 7 com valor de 0,00488; todavia, inferiores para aquela do ciclo 1 (média = 0,00367), enquanto os coeficientes de variação variaram de 2,04% a 15,67% (ciclos 1 e 4, respectivamente).

Os resultados do teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – t(Mancha) para o TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC encontram-se na Figura 60. Houve fortes indícios estatísticos de que ao menos uma média dos ciclos de UVC foi diferente das demais em nível de 95% de confiança (p = 0,00000).

Figura 60 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de radiação UVC



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

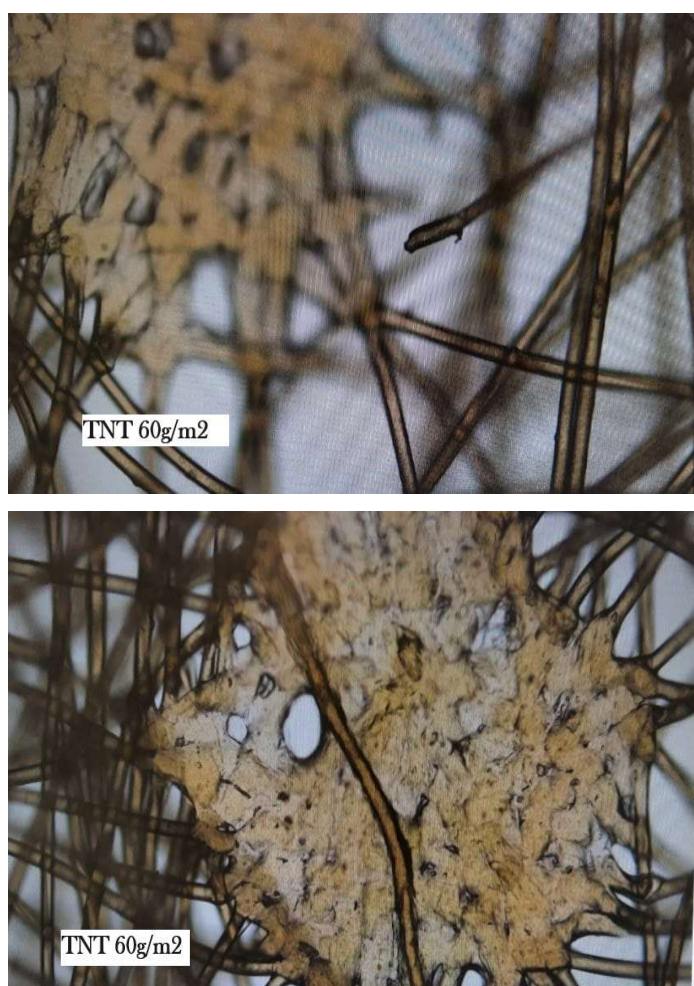
Fonte: A autora (2025).

Assim como observado em estudos que tratam do mesmo tema, os efeitos da radiação ultravioleta UV-C em EPIs (Medeiros et al., 2022; Medeiros et al., 2023; Silva et al., 2024), este estudo também evidenciou os efeitos da radiação UVC no TNT de 60 g m⁻². A partir do primeiro ciclo de irradiação, observou-se uma redução na porcentagem de manchas que atravessaram o TNT, indicando uma aparente melhoria na capacidade de barreira do material. No entanto, essa melhoria pode ser um indicativo de comprometimento da estrutura do TNT, como observado em outros estudos (Bezerra, 2022; Arruda, 2023). A Figura 61 apresenta imagens de MO que demonstram danos estruturais no TNT de 60 g m⁻² após a descontaminação, o que pode explicar a redução na trama do material e, consequentemente, a diminuição da penetração de aerossóis. A análise conjunta dos resultados da MO e do ensaio de spray sugere que a radiação UVC induz alterações na microestrutura do TNT de 60 g

m^{-2} resultando em uma aparente melhoria na capacidade de barreira do material, mas que pode comprometer sua integridade a longo prazo.

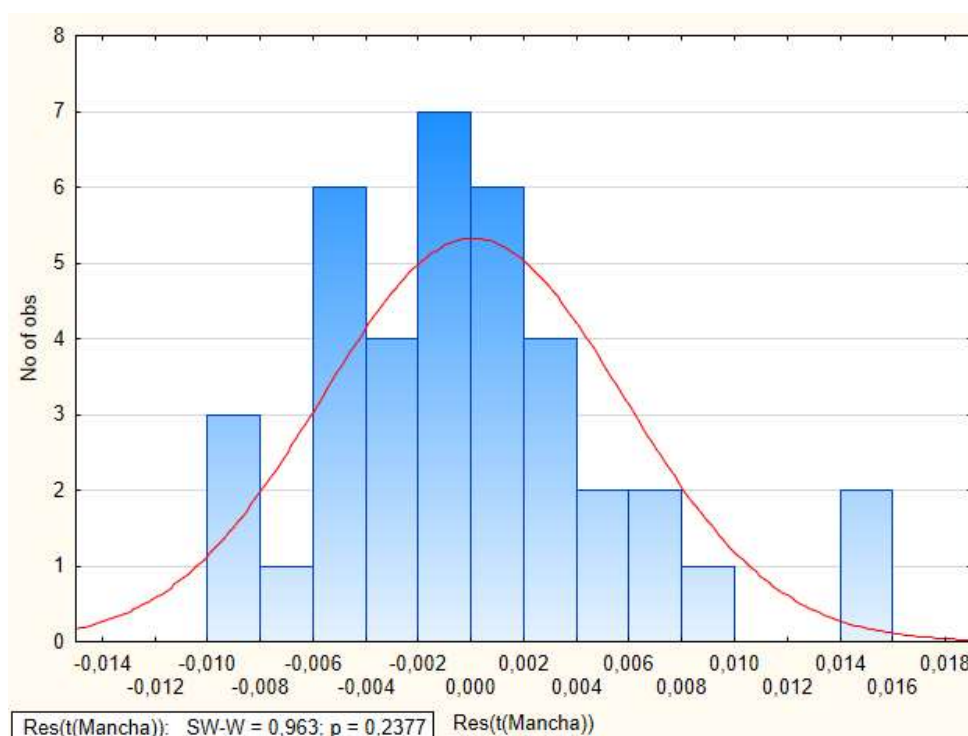
Com relação à distribuição dos resíduos (Figura 62), os resultados da análise estatística foram considerados confiáveis, pois a hipótese de distribuição normal aproximada foi aceita em nível de 95% de confiança ($p = 0,2377$).

Figura 61 – Imagem por microscopia ótica Leica DM6 B (aumento de 100x) com detalhes de rompimento da fibra sintética (acima) e abertura de espaços no ponto de solda (abaixo) do TNT de 60 g m^{-2}



Fonte: A autora (2025).

Figura 62 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 40 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem e irradiação gama



Fonte: A autora (2025).

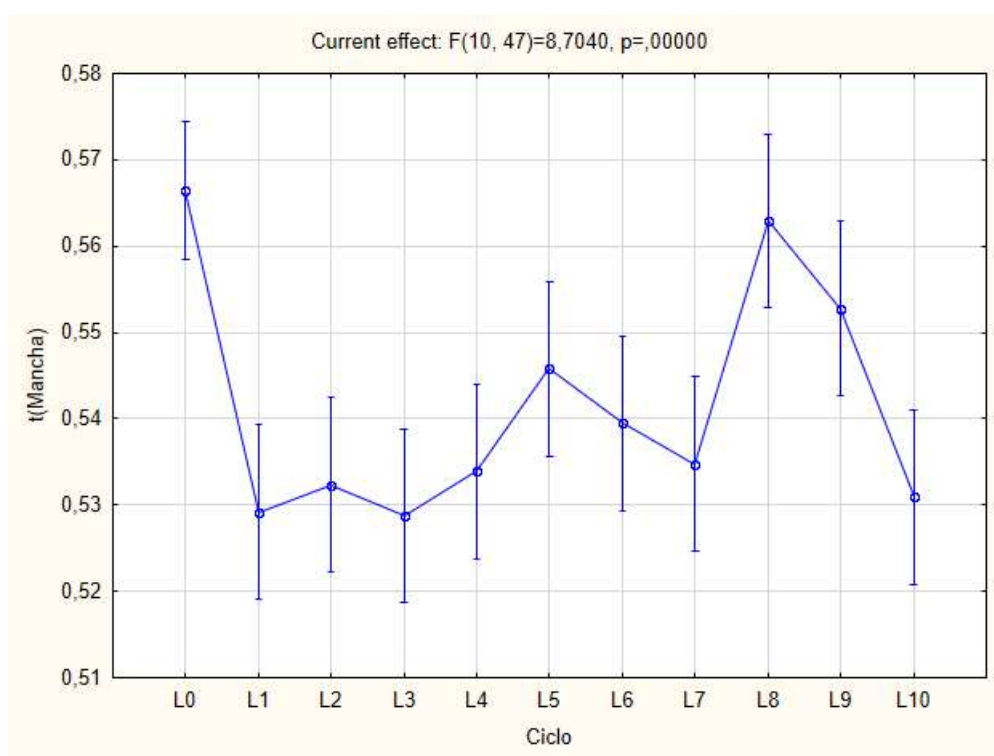
Embora esperada a maior resistência do TNT com gramatura maior, os resultados da exposição à radiação esterilizante UVC indicaram efeitos consideráveis sobre o material.

4.2.6. Efeitos da lavagem/secagem sobre TNT de 60 g m⁻²

Os resultados da análise estatística descritiva de manchas para os tratamentos referente aos ciclos lavagem sobre o TNT de 60 g m⁻² encontram-se no Apêndice 11. As médias indicaram valores superiores, quando comparados com a média populacional de 0,004153, para os recortes submetidos aos ciclos de lavagem 8 com valor médio de 0,0058 e 9 (média = 0,0050), enquanto os coeficientes variaram de 2,66% para as subamostras do ciclo 1 (L1) a 34,80% (Ciclo 9 – L9).

Submetendo os recortes de TNT com 60 g m^{-2} ao ensaio por spray aos diversos ciclos de lavagem, a aplicação do teste de comparações múltiplas permitiu comprovar diferenças significativas em nível de 95% de confiança ($p = 0,00000$) conforme mostra a Figura 63.

Figura 63 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 60 g m^{-2} submetidos a ciclos de lavagem/secagem



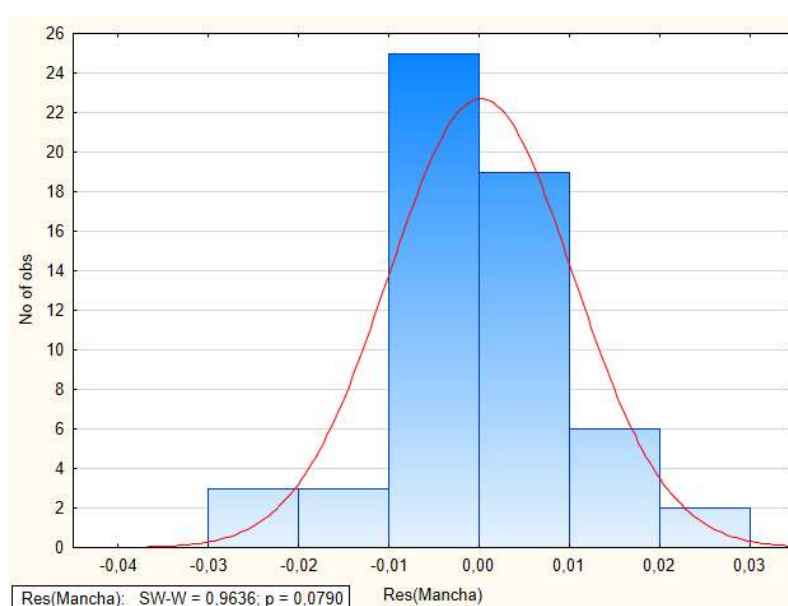
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

As manchas, que atravessaram o TNT de 60 g m^{-2} sem a submissão da lavagem, apresentaram valor médio relativamente diverso com relação às demais médias dos ciclos de lavagem. O tamanho das manchas apresentou uma área ligeiramente menor quando comparada com o TNT de 40 g m^{-2} . Esse resultado indicou que esse material suportaria mais as agressões oriundas do tratamento de lavagem/secagem.

A distribuição dos resíduos, avaliada no histograma da Figura 64, foi considerada aproximada a uma distribuição normal em nível de 95% de confiança com valor de probabilidade igual a 0,0790. Nesse sentido, a análise de variâncias foi capaz de providenciar resultados confiáveis para o teste de comparações múltiplas empregado.

Figura 64 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem

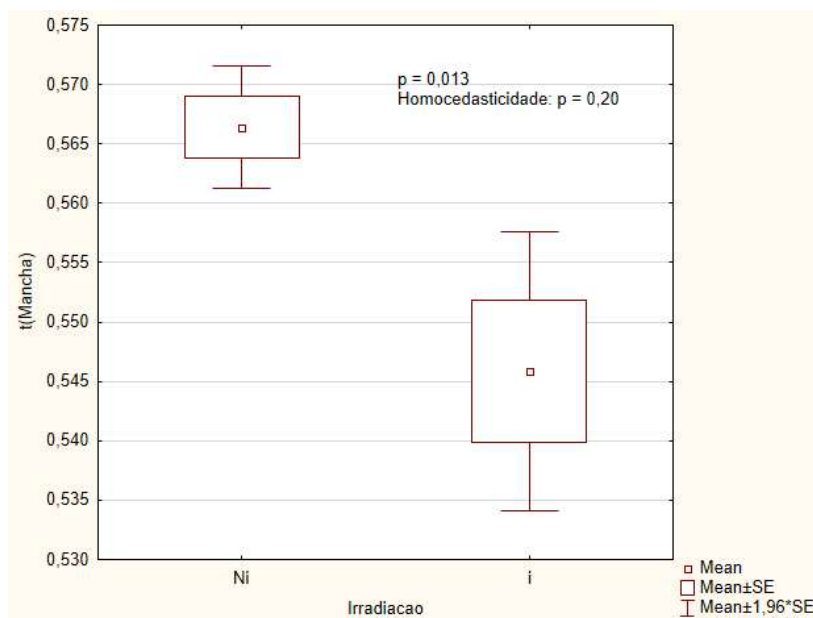


Fonte: A autora (2025).

4.2.7. Efeitos da radiação gama sobre TNT de 60 g m⁻²

Os recortes de TNT de 60 g m⁻² irradiados também foram avaliados por meio do ensaio por spray. A homoscedasticidade de variância foi garantida pelo teste de *Levene*, assegurando similaridade das variâncias dos tratamentos Irradiados (I) e Não irradiados (Ni) em nível de 95% de confiança ($p = 0,20$), conforme mostra os valores encontrados na Figura 65.

Figura 65 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores de manchas – t(PL) para o TNT de 60 g m⁻² submetidos à irradiação gama



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

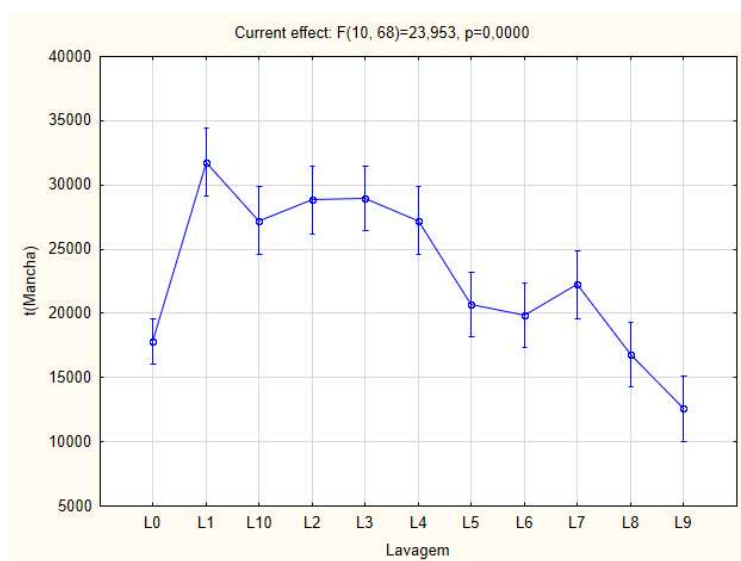
Na Figura 65, os valores médios dos tratamentos foram considerados significativamente diferentes em nível de 95% de confiança com valor de probabilidade de 0,013. Houve diminuição na média da porcentagem de manchas, indicando uma redução do espaçamento das tramas. Esse resultado, como explicitado anteriormente, não indicaria melhoria na capacidade de proteção do material, mas sim uma possibilidade grave mudança estrutural ocasionada pela irradiação gama (IAEA, 2021).

4.2.8. Efeitos de lavagem/secagem e radiação gama sobre TNT de 60 g m⁻²

Os efeitos da ação conjunta dos métodos de descontaminação de lavagem/secagem e radiação gama foram avaliados a partir de um ensaio fatorial com dois tratamentos (Lavagem/secagem – L; Irradiação – I). Na Figura 63, o teste de

comparações múltiplas acusou diferença significativa em nível de 95% de confiança a ao menos uma média dos ciclos de lavagem com o valor de p igual a 0,00000.

Figura 66 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 60 g m⁻² submetidos a ciclos de lavagem/secagem



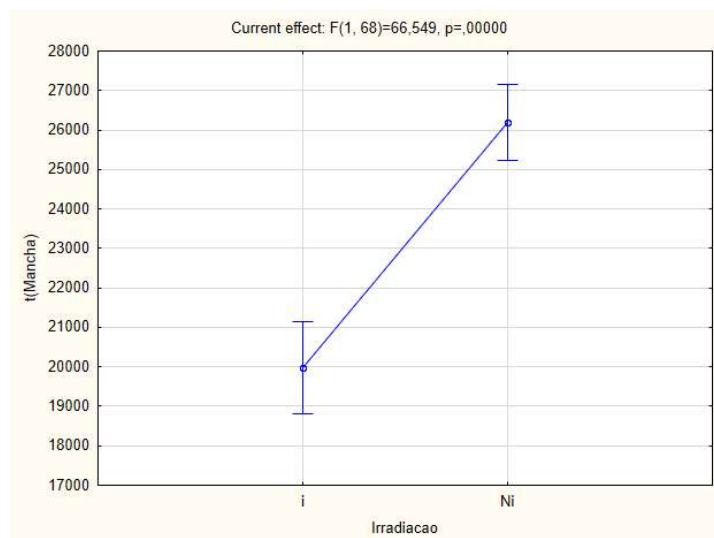
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Neste ensaio, os resultados foram mais proeminentes, pois a partir do Ciclo 4, as alterações na quantidade de manchas foram mais notáveis, em que, mesmo atingindo o nível do Ciclo 0, ficaram evidentes as mudanças físicas quanto à proteção do TNT de 60 g m⁻² (Figura 66).

Após a aplicação do modelo estatístico, os efeitos quanto à irradiação gama também foram avaliados estatisticamente. Na Figura 67, o teste de comparações múltiplas indicou diferenças significativas em nível de 95% de confiança para as médias dos tratamentos não irradiados e irradiados ($p = 0,00000$), com redução do valor médio para os dados transformados do tratamento Irradiação.

Figura 67 – Teste de comparações múltiplas para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 60 g m^{-2} submetidos a radiação gama



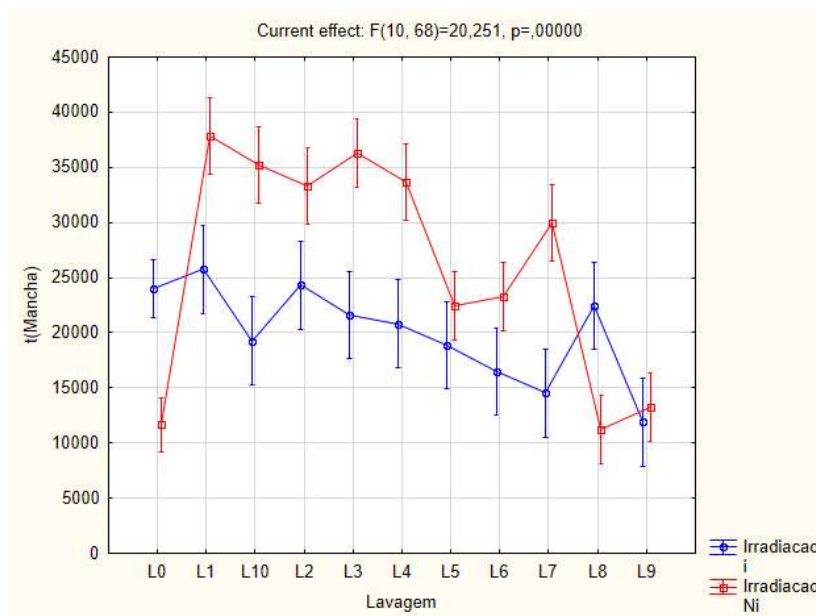
Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Os efeitos da interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação foram também testados nessa análise de variâncias por meio de um desenho experimental fatorial. Os resultados de comparações múltiplas para a interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 60 g m^{-2} podem ser visualizados na Figura 68, em que efeitos significativos foram encontrados em nível de 95% de confiança ($p = 0,00000$). Grande divergência foi encontrada para os efeitos da interação entre lavagem/secagem e radiação gama com comportamentos opostos (Figura 65).

Para a confirmação dos resultados da ANOVA, a distribuição dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk. Em nível de 95% de confiança, foi confirmada a normalidade aproximada dos resíduos devido ao valor de p igual a 0,7906, conforme a Figura 69.

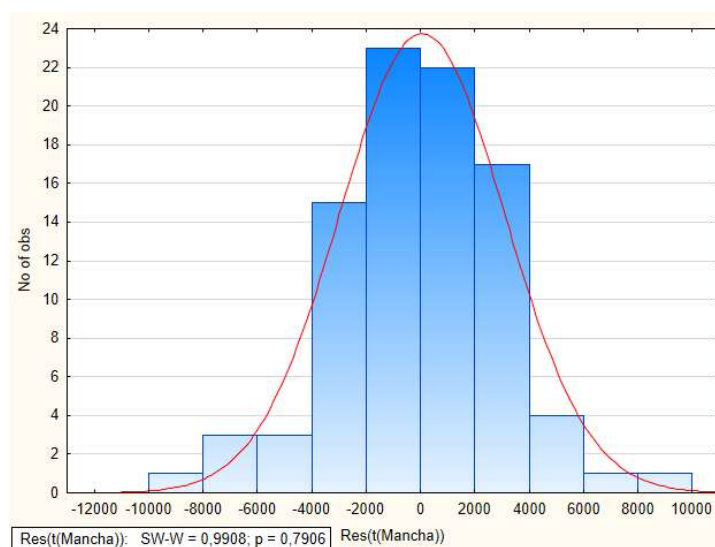
Figura 68 – Teste de comparações múltiplas para a interação entre os tratamentos Ciclo e Irradiação para as médias dos valores transformados de manchas – $t(\text{Mancha})$ para o TNT de 60 g m^{-2}



Barras verticais denotam intervalos de confiança em nível de 95% de confiança

Fonte: A autora (2025).

Figura 69 – Histograma dos resíduos para manchas do ensaio por spray do TNT de 60 g m^{-2} submetidos a ciclos de lavagem/secagem e de radiação gama



Fonte: A autora (2025).

4.2.9. Compilação dos resultados

A partir da análise integrada dos ensaios realizados, a Tabela 2 sintetiza os resultados obtidos, evidenciando o impacto dos tratamentos de descontaminação na integridade estrutural dos TNTs avaliados. Observou-se uma discrepância significativa entre os resultados provenientes da microscopia óptica e da técnica de spray. Tal divergência sugere que os mecanismos de ação dos métodos de descontaminação sobre os TNTs podem ser mais complexos do que inicialmente previsto. Embora a MO seja uma técnica consagrada e com alta confiabilidade, os resultados conflitantes indicam a necessidade de uma investigação mais aprofundada para elucidar os efeitos dos tratamentos na microestrutura dos materiais.

Tabela 2 – Sumários dos resultados obtidos (nível de 95% de confiança) para os efeitos dos tratamentos de descontaminação sobre os TNTs avaliados

Método de descontaminação	Passagem de luz		Mancha	
	40 g m ⁻²	60 g m ⁻²	40 g m ⁻²	60 g m ⁻²
UVC	Significativo	Significativo	Não significativo	Significativo
	NR	Até o ciclo 2	Até o ciclo 10	NR
Lavagem/secagem	Significativo	Significativo	Significativo	Significativo
	Até o ciclo 3	NR	NR	NR
Lavagem/secagem e radiação gama	Significativo*	Significativo**	Significativo	Significativo
	Até o ciclo 3	Até o ciclo 2	Até o ciclo 3	NR
Radiação gama	Não significativo	Significativo	Significativo	Significativo
	Dose de 25 kGy	NR	NR	NR

NR = não recomendada a aplicação de nenhum ciclo de descontaminação de acordo com os resultados deste estudo

*significativo apenas para lavagem

**significativo para ambos os tratamentos (lavagem/secagem e radiação gama)

Fonte: A autora.

O material utilizado para a confecção de EPIs necessita de ferramentas de controle de qualidade e garantia da qualidade, sendo que técnicas de descontaminação podem ser aplicadas com restrição dependendo da gramatura do TNT.

5. CONCLUSÕES

Este estudo empregou microscopia óptica e ensaios de spray para avaliar o impacto dos tratamentos de esterilização/descontaminação nas propriedades estruturais de não tecidos (TNTs) com gramaturas de 40 g m^{-2} e 60 g m^{-2} . Os métodos utilizados mostraram-se eficazes como modelos de referência para a caracterização da integridade da trama dos TNTs, permitindo a análise prévia à sua aplicação na fabricação de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs).

A análise inicial sugeriu que o tratamento de lavagem/secagem poderia induzir maior degradação nas tramas dos TNTs. No entanto, a implementação do protocolo revelou que a metodologia é viável para o TNT de 40 g m^{-2} até o terceiro ciclo de lavagem/secagem, sob a perspectiva dos ensaios de spray. Todavia, o TNT de 60 g m^{-2} não apresentou resultados satisfatórios em nenhum dos ciclos de lavagem/secagem avaliados.

Quando a abordagem se volta ao tratamento por UVC, pela microscopia ótica o TNT de 60 g m^{-2} suportou até o ciclo 2 do tratamento de maneira a manter a integridade da trama do material, enquanto o TNT de 40 g m^{-2} não suportou os ciclos consecutivos de UVC. Pela metodologia de ensaio de spray, o resultado apresentou de forma diversa indicando que o TNT de 40 g m^{-2} suporta a radiação UVC, sem prejudicar a função de barreira, diferentemente do que aconteceu para o TNT de 60 g m^{-2} .

Avaliando o tratamento por meio do ensaio de spray, se pode-se inferir que a dose de radiação aplicada (25 kGy) prejudicou ambas as malhas de 40 g m^{-2} e 60 g m^{-2} . Neste sentido, pode-se sugerir que o experimento pode ser repetido, utilizando-se de doses de radiação mais baixas ou até alterando a qualidade da radiação empregada, sendo indispensável a avaliação da viabilidade do vírus após esse processo.

Com relação às interações dos tratamentos dos processos de esterilização/descontaminação sobre malhas de TNT nas duas gramaturas, a análise dos resultados revelou um efeito sinérgico e cumulativo da combinação dos tratamentos de lavagem/secagem e radiação gama, que promoveu uma degradação

acentuada do TNT de 40 g m^{-2} , comprometendo sua função de barreira. A observação de um melhor desempenho do TNT de 60 g m^{-2} sob a mesma combinação de tratamentos, em contraste com sua falha no tratamento isolado de lavagem/secagem, sugeriu a complexidade das interações entre os processos de tratamento e a estrutura do material. Essa discrepância ressaltou a necessidade de investigações adicionais para elucidar os mecanismos de degradação e os fatores que influenciam a resistência do TNT sob diferentes condições de tratamento.

Do ponto de vista de controle de qualidade, não era esperado que o TNT sofresse tantas modificações após os métodos de descontaminação aplicados, haja visto que o trabalhador necessita estar adequadamente paramentado e o material usado para a confecção de EPIs deve ser confeccionado com alta qualidade.

A princípio um TNT de gramatura maior poderia ser a sugestão mais adequada, porém, considerando o uso cotidiano dos EPIs em locais de trabalho insalubres, e nem sempre com condições adequadas, fica muito difícil estabelecer uma recomendação mais contundente.

O processo de tratamento com um melhor resultado dada a menor alteração na malha foi a radiação UVC com até 10 ciclos para o TNT de 40 g m^{-2} , contudo somente do ponto de vista de impedimento da formação de manchas no ensaio por spray. Da mesma forma, as tramas do TNT de 40 g m^{-2} suportaram o tratamento de lavagem e secagem até o ciclo 3, mantendo a estrutura de proteção do material. Tendo em vista a economia aos recursos ambientais com a diminuição da geração de resíduos, como micro e nanoplásticos, estes tratamentos poderiam reduzir em até 75% do orçamento com este insumo, uma vez que o mesmo EPI seria utilizado 4 vezes. Além disso, o reuso do produto como uma forma viável de ser aproveitar de maneira mais sustentável a matéria prima utilizada na confecção dos EPIs.

A identificação da heterogeneidade estrutural do TNT é um fator crítico para a análise precisa dos resultados. Variações na microestrutura do material, como densidade de fibras, orientação e distribuição, podem influenciar diretamente suas propriedades de barreira e, conseqüentemente, a eficácia na proteção do usuário. A discrepância observada nos resultados dos ensaios de lavagem/secagem entre o TNT de 40 g m^{-2} e o de 60 g m^{-2} evidenciou a sensibilidade do material a processos de tratamento. A reprovação da aplicação de um protocolo de lavagem/secagem para o

TNT de 60 g m^{-2} ressaltou a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a influência da gramatura do material após tais procedimentos, com diferentes processos de lavagem/secagem.

A implementação de tratamentos sucessivos em TNT, sem a devida validação da integridade estrutural do material, representou um risco significativo à segurança dos usuários de EPIs.

A confiabilidade dos resultados estatísticos deve ser crucial para a implementação de melhorias nos processos industriais, incluindo a otimização de parâmetros de produção e aprimoramento dos sistemas de garantia de qualidade por meio do controle estatístico de processos, permitindo a tomada de decisões informadas na seleção de materiais e processos para a fabricação e descontaminação de EPIs. Desta forma, é imperioso que os fabricantes invistam, durante o processo fabril do TNT, em um controle de qualidade mais rigoroso do material destinado à fabricação de EPIs, uma vez que em diversos momentos, a homogeneidade do não tecido ficou prejudicada.

Por fim, este trabalho levou a construção de uma minuta de um protocolo (Apêndice 12) para avaliação da integridade do TNT utilizado na fabricação de EPIs. Este protocolo será aplicável aos fabricantes da matéria prima (TNT) e dos fabricantes de EPIs que utilizem este material como barreira protetora contra microrganismos. Da mesma forma, os órgãos de Fiscalização Sanitárias poderão utilizar deste protocolo como parâmetro de aferição da qualidade e eficácia destes materiais

6. PERSPECTIVAS

Visando otimizar a pesquisa e garantir a segurança e proteção dos usuários de EPIs (Equipamentos de Proteção Individual), torna-se crucial recomendar aos fabricantes a implementação de um sistema de controle de qualidade abrangente durante o processo de fabricação. A variabilidade observada nas tramas dos TNTs (Tecidos Não Tecidos) afetou os resultados deste estudo, conforme demonstrado pela análise estatística realizada. Ademais, a avaliação dos efeitos dos raios-X como um possível agente descontaminante, em conjunto com análises microbiológicas que assegurem as condições de reutilização dos EPIs, apresenta-se como uma abordagem promissora. Recomenda-se, ainda, repetir a análise dos efeitos da radiação gama como agente descontaminante, utilizando diferentes doses de radiação, preferencialmente inferiores às mencionadas na literatura (25kGy).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Cartilha de Proteção Respiratória contra Agentes Biológicos para Trabalhadores de Saúde. Brasília: ANVISA, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Nota Técnica GVIMS/GGTES/ANVISA nº 07/2020: orientações para serviços de saúde: medidas de prevenção e controle que devem ser adotadas durante a assistência aos casos suspeitos ou confirmados de infecção pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2). 7. ed. Brasília, 2020a.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). RDC nº 356, de 23 de março de 2020b. Diário Oficial da União, Edição: 56-C, Seção: 1 – Extra, Página: 5, Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2020b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-356-de-23-de-marco-de-2020-249317437>. Acesso em: [data de acesso].

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Nota Técnica nº 202/2020/GEMAT/GGTPS/DIRE3/ANVISA. Esclarecimentos sobre o enquadramento sanitário de produtos fabricados por têxteis de propriedade antiviral ou antibacteriana, no âmbito de atuação da Gerência-Geral de Tecnologia de Produtos para a Saúde. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2020/nota-esclarece-sobre-produtos-texteis-antivirais-e-antibacterianos/sei_anvisa-1170941-nota-tecnica.pdf. Acesso em: 13 out. 2020c.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Nota técnica nº 12/2020/SEI/GGTES/DIRE1/ANVISA. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/219201/4340788/Nota+Te%C2%B4cnica+2+GGTES.pdf/42dfec78-8651-4714-b5dd-e9840f9b6037>; 2020b. Acesso em: 17 ago. 2021.

AQUINO, K. A. S.; SILVA, R. C.; SILVA, R. M. A Interação da Radiação Gama com a Matéria no Processo de Esterilização. Revista Virtual de Química, v. 6, n. 6, p. 1624-1641, 2014. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/805>. Acesso em: [data de acesso].

ARAUJO, M. M.; BARREIRA, D. A. S.; GOMES, S.; BRITO, P. S. S.; BORRELY, S. I.; SALVADOR, P. A. V. A radiação ionizante como tecnologia para a inativação de vírus. *Ciências Biológicas e da Saúde*, v. 28, n. 1, p. 62-71, 2022.

ARRUDA, C. C. Mudança Física de Máscaras de Tecido: Ensaios não destrutivos por radiação gama, EDXRF e microscopia óptica. 2023. 60 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

ARPA - FVG. Protocolo: 0011982/P/GEN/LAB_AS.GEN/INT 0004427. 2020. Disponível em: <https://www.essericami.it/wp-content/uploads/2020/05/ARPA-FVG-UNIUD-Trasmissione-risultati-prot.-n.-4513-2020-Tessuto-TNT-S.-e-TNT-M.-ESSERICAMI-SRL.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃO TECIDO (ABINT). Classificação, Identificação e Aplicações de Não tecido. São Paulo: ABINT, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13370: não tecido: terminologia. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13698: equipamento de proteção respiratória: peça semifacial filtrante para partículas. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ATLAS DO PLÁSTICO. Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. Fundação Heinrich Böll. ISBN / DOI 978-65-87665-02-3. Novembro de 2020. Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/2020/11/29/atlas-do-plastico/>. Acesso em: 09 fev. 2025.

BAKER-JARVIS, J.; KIM, S. The interaction of radio-frequency fields with dielectric materials at macroscopic to mesoscopic scales. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v. 117, p. 1, 2012.

BALAZY, A.; TOIVOLA, M.; ADHIKARI, A.; SIVASUBRAMANI, S. K.; REPONEN, T.; GRINSHUPUN, S. A. Do N95 respirators provide 95% protection level against airborne viruses, and how adequate are surgical masks. *American Journal Infection Control*, v. 34, p. 51–57, 2006.

BBC NEWS BRASIL. Coronavírus: por que os japoneses já usavam máscaras muito antes da covid-19. 17 jul. 2020. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-53452695>.

BEEST, D. E. T.; VAN BOVEN, M.; BOS, M. E. H.; STEGEMAN, A.; KOOPMANS, M. P. G. Effectiveness of personal protective equipment and oseltamivir prophylaxis during avian influenza A (H7N7) epidemic, the Netherlands, 2003. *Emerging Infection Disease*, v. 16, p. 1562–1568, 2010.

BENEVIDES, C. A.; PEDROSA, T. L.; NEVES, W. W.; MOURA, D. S.; LIMA-NETO, R. G.; ARAUJO, R. E. Desenvolvimento e avaliação de cabine de radiação ultravioleta para desinfecção de máscaras hospitalares descartáveis, durante a pandemia da COVID-19. 2021. Disponível em: <http://uvclean.tec.br/download/artigo.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2021.

BEZERRA, L. C. S. Integridade e funcionalidade de máscaras PFF2 após reutilização em ambiente hospitalar gerador de aerossóis. 2022. 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

BRASIL. Farmacopeia Brasileira, volume 2 / Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília: ANVISA, 2010.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora (NR) 06: Equipamento de Proteção Individual – EPI. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2015.

CAMO. The Unscrambler User Manual. Carmo Software AS, 2006.

CASTILHO, M. C. M.; OLIVEIRA, C. A.; BARBOSA-JÚNIOR, E. S.; GIRONDO, A. L. G. C.; LIMA-ARSATI, Y. B. O. Relação entre estresse percebido e fatores salivares em mulheres, sob condições basais de estresse. *Arquivo de Odontologia*, v. 47, n. 1, p. 25 – 30, 2011.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). Decontamination and Reuse of Filtering Facepiece Respirators. Atlanta, GA, 2020b. Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/ppe-strategy/decontamination-reuse-respirators.html>. Acesso em: 21 set. 2020.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). Interim Infection Prevention and Control Recommendations for Healthcare Personnel During the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pandemic, USA, 2020a. Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/infection-control-recommendations.html>. Acesso em: 11 set. 2021.

CHAO, C. Y. H.; WAN, M. P.; MORAWSKA, L.; JOHNSON, G. R.; RISTOVSKI, Z. D.; HARGREAVES, M.; MENGENSEN, K.; CORBETTE, S.; LI, Y.; XIE, X.; KATOSHEVSKI, D. Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening. *Journal of Aerosol Science*, v. 40, n. 2, p. 122–133, 2009.

CHEN, N.; ZHOU, M.; DONG, X.; QU, J.; GONG, F.; HAN, Y.; ZHANG, L. Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study. *The Lancet*, v. 395, n. 10223, p. 507 – 513, 2020.

CHRISTENSEN, D. M.; IDDINS, C. J.; SUGARMAN, S. L. Ionizing radiation injuries and illnesses. *Emergency Medicine Clinics*, v. 32, n. 1, p. 245-265, 2014a.

CONSELHO FEDERAL DE ENFERMAGEM (COFEN). Observatório da Enfermagem. Brasil, 2020. Disponível em: <http://observatoriodaenfermagem.cofen.gov.br/>. Acesso em: 11 set. 2021.

COOK, T. M. Personal protective equipment during the coronavirus disease (COVID) 2019 pandemic – a narrative review. *Anaesthesia*, v. 75, n. 7, p. 920–927, 2020.

COSTA, P. Desenvolvimento de uma metodologia para caracterização do filtro cunho do 73 reator iea-r1 utilizando o método de Monte Carlo. 2014. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-23032015-081657/publico/2014CostaDesenvolvimento.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2021.

COUTO, C. V. O.; OLIVEIRA, A. J. Análise dos copos descartáveis após 100 anos de uso. In: *Anais do Simpósio Design Sustentável*, São Paulo: Blucher, 2019. p. 478-489.

ELGUJJA, A. A.; ALTALHI, H. H.; EZREQAT S. Review of the efficacy of ultraviolet C for surface decontamination. Journal of Nature and Science of Medicine, v. 3, n. 1, p. 8 – 12, 2020.

FERREIRA, D. H. S.; MEDEIROS, T. P. M.; FRANÇA, E. J. Descontaminação de máscaras N95 utilizadas por profissionais de saúde em contato com pacientes internados com Coovid-19. Anais do PIBIC 2021 do IPEN. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/pibic/2021/LIVRO-RESUMO-2021.pdf>

FONSECA-SILVA et al. Protocolo de Biossegurança, SLM.BIO.M1-02. Faculdade São Leopoldo Mandic, 2019.

FUNG, W. Coated and laminated textiles. Boca Raton: CRC Press; Cambridge, England, 2002.

HE, X. et al. Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19. Nature Medicine, v. 26, n. 5, p. 672 – 675, 2020.

HWANG, S. F.; VITURINO, M. G. S. C.; AGUIAR, A. J. C.; LIRA, E. V.; PAIVA, A. C.; SANTOS, J. L. S.; NEVES, G. B. C. Uso de equipamentos de proteção individual durante a pandemia por covid-19: Biossegurança e uso de equipamento de proteção individual (epi) em tempos de pandemia covid-19. 1. ed. RFB Editora, v. 1, p. 13-20, 2022.

IAEA – International Agency of Energy Atomic. Report: Radiation Effects on Polymer Materials Commonly Used in Medical Devices. Report of the 1st RCM for CRP F23035: Comparison of the gamma radiation and electron beam effect on medical nonwoven polypropylene polymers, p.25-31. Novembro, 2021. Disponível em: https://nucleus.iaea.org/sites/diif/PublishingImages/Pages/IAEAPublications/IAEA%201st%20RCM%20F23035%20Report_Final.pdf.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Regulamento específico para uso da etiqueta nacional de conservação de energia – ENCE. Máquinas de lavar roupa. Edição nº 01 - revisão 01, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE SALUD. Disinfection of personal protective equipment in healthcare from the covid-19 pandemic. Ministerio de Salud, El Salvador, 2020.

ISO 11137-2c. Establishing the sterilisation dose: method 2—dose setting using fraction positive information from incremental dosing to determine an extrapolation factor. In: Technical Committee ISO/TC 198, editors. Sterilisation of health care products—radiation. Geneva: International Standard Organisation, 2006.

KIMMAN, T. G.; SMIT, E.; KLEIN, M. R. Evidence-Based Biosafety: a Review of the Principles and Effectiveness of Microbiological Containment Measures. *Clinical Microbiology Reviews*, v. 21, n. 3, p. 403–425, 2008.

KOWALSKI, W. UVGI Disinfection Theory. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*, Chapter 2, p. 17 – 50, 2009.

KUTTER, J. S.; SPRONKEN, M. I.; FRAAIJ, P. L.; FOUCHIER, R.; HERFST, S. Transmission routes of respiratory viruses among humans. *ScienceDirect. Current Opinion in Virology*, Elsevier v. 28. p. 142-151. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1879625717301773?via%3Dihub#section-cited-by>. Acesso em: 10 nov. 2023.

LAI, A. C. K.; POON, C. K. M.; CHEUNG, A. C. T. Effectiveness of facemasks to reduce exposure hazards for airborne infections among general populations. *Journal of The Royal Society Interface*, v. 9, n. 70, p. 938–948, 2011.

LECHIEN, J. R. et al. Olfactory and gustatory dysfunctions as a clinical presentation of mild-to-moderate forms of the coronavirus disease (COVID-19): a multicenter European study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, v. 277, p. 2251 –2261, 2020.

LI, Y. C.; BAI, W. Z.; HASHIKAWA, T. The neuroinvasive potential of SARS-CoV2 may be at least partially responsible for the respiratory failure of COVID-19 patients. *Journal of Medical Virology*, 2020.

LIMA, M. M. S.; CAVALCANTE, F. M. L.; MACÊDO, T. S.; GALINDO-NETO, N. M.; CAETANO, J. A.; BARROS, L. M. Cloth face masks to prevent Covid-19 and other respiratory infections. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, v. 28, p. 1 – 8, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rlae/a/rwW9ptCZ9sFmFVxDbLzxHpM/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 07 set. 2021.

LIMA-LEACHI, H. F.; APOLINARIO-BIENIEK, A.; SEVERO-PEIXE, T.; PERFEITO-RIBEIRO, R. Estudo microscópico dos materiais utilizados para confecção de máscaras para proteção contra a COVID-19. *Revista Eletrônica de Enfermagem*, v. 23, p. 1-8, 2021.

MANNHEIMER, W. A. et al. *Microscopia dos Materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Microscopia e Microanálise, 2002.

MARTINHO JR. A. C. Estudo dos efeitos físicos, químicos e estruturais ocasionados pela radiação ionizante e preservação em cartilagem costal humana. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MCCOOL, F. Global physiology and pathophysiology of cough: ACCP evidence-based clinical practice guidelines. *Chest Journal*, v. 129, n. 1, p. 48S-53S, 2006.

MEDEIROS, T. P. M.; FERREIRA, D. H. S.; FRANÇA, E. J.; PAIVA, A. C. Integridade física de protetor respiratório PFF2 após ciclos de descontaminação por radiação ultravioleta-C. *PIBIC – IPEN – 2022*, v. 1, p. 122, 2022. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/pibic/2022/LIVRO-RESUMO-2022.pdf>

MEDEIROS, T. P. M.; PAIVA, A. C. Método gama/quimiométrico para avaliar a integridade física de protetor respiratório PFF2 submetidos à descontaminação por radiação ultravioleta-c. *PIBIC – IPEN – 2023*, v. 1, p. 122, 2023. Disponível em: [http://pelicano.ipen.br/pibic/2023/LIVRO-RESUMO-2023\(v2\).pdf](http://pelicano.ipen.br/pibic/2023/LIVRO-RESUMO-2023(v2).pdf)

MILLER, J. C.; MILLER, J. N. *Statistics for analytical chemistry*. Ellis Horwood, 1991.

NEUPANE, B. B.; MAINALI, S.; SHARMA, A.; GIRI, B. Optical microscopic study of surface morphology and filtering efficiency of face masks. *Peer Open Advances Journal Series*, v. 26, n. 7, p. e7142, 2019. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6599448/pdf/peerj-07-7142.pdf>.

Acesso em: 01 jun. 2023.

NEVES, G. B. C.; CASTRO, A. G. S.; SILVA, R. M.; QUEIROZ, T. K.; SANTOS, J. L. S.; MATIAS, M. S.; SILVA, E. W.; LIMA, V. R.; SILVA, M. C. L. B.; PORTUGAL, W. M. Bacterial colonies found on heat-decontaminated reused N95 masks. *Research*,

Society and Development, v. 12, n. 3, p. e25512340698, 2023. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/40698>. Acesso em: 09 fev. 2024.

NEVES, G. B. C.; PAIVA, A. C.; VITURINO, M. G. S. C.; SANTOS, J. L. S.; FERREIRA, D. H. S.; SILVA, A. C. A. V.; LOPES, L. R.; PINA JUNIOR, H. S.; PORTUGAL, W. M.; SILVA, M. C. L. B. Microorganisms from N95 masks were reused for 36h and then decontaminated by heat which we learned from the COVID-19 pandemic. Research, Society and Development, v. 11, n. 8, p. e17311830230, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/30230>. Acesso em: 09 fev. 2023.

NGUYEN, L. H. et al. Risk of COVID-19 among front-line health-care workers and the general community: a prospective cohort study. The Lancet, Public Health, p. 475 - 483. 2020. Disponível em: <https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S2468-2667%2820%2930164-X>. Acesso em: 21 set. 2020.

NICAS, M.; NAZAROFF, W. W.; HUBBARD, A. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, v. 2, p. 143 – 154, 2005.

OLIVEIRA, D. G. Ensaios não destrutivos: Fundamentos e Aplicações. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). Manual de biossegurança laboratorial – quarta edição, 2021.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). Uso racional de equipamentos de proteção individual para doença do coronavírus (COVID-19) e considerações durante desabastecimentos graves, 2020.

PAIVA, J. D. et al. Evaluation of the Microbiota and Integrity of Respirators Reused by Health Professionals in a Hospital Environment. Aerosol and Air Quality Research, v. 23, p. 220057, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4209/aaqr.220057>.

PHAN, T. L.; CONGO, T. C. A. Reusable Mask for Coronavirus Disease 2019 (COVID19). Archives of Medical Research, v. 51, n. 5, p. 455 – 457, 2020.

POZZER, A.; DOMINICI F.; HAINES, A.; WITT, C.; MUNZEL, T.; LELIEVELD J. Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19. *Cardiovascular Research*, v. 116, p. 2247 – 2253, 2020.

REIS, V. P.; MAIA, A. B. P.; BEZERRA, A. R.; CONDE, D. C. Uso dos Equipamentos de Proteção Individual no Atendimento Odontológico Durante Surto da COVID-19 e Alternativas em Períodos de Desabastecimento: Revisão Integrativa. *Revista Brasileira de Odontologia*, v. 77, p. 1826, 2020.

RESEARCHGATE. Inhalation of pulmonary formulations and size-dependent distribution of aerosol particles in the respiratory tract. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Inhalation-of-pulmonary-formulations-and-size-dependent-distribution-of-aerosol-particles_fig1_341719354. Acesso em: 10 fev. 2022.

RIVM - National Institute for Public Health and the Environment. Reuse of FFP2 masks. 2020. Disponível em: <https://www.rivm.nl/en/documenten/reuse-of-ffp2-masks>. Acesso em: 13 jan. 2023.

SALLES, C. L. Limpeza, desinfecção ou esterilização: o que fazer? Disponível em: <http://www.portaldaenfermagem.com.br>. Acesso em: 05 set. 2021.

SHANAFELT, T.; RIPP, J.; TROCKEL, M. Understanding and Addressing Sources of Anxiety Among Health Care Professionals During the COVID-19 Pandemic. *Journal of American Medical Association*, p. E1 – E2, 2020.

SILVA, E. W.; SILVA, R. L. B. A.; ARRUDA, C. C.; RIBEIRO, V. L.; FRANÇA, E. J.; SOUZA, L. M. Elementos químicos nos protetores respiratórios artesanais confeccionados em tecidos. *International Journal of Health Sciences*, v. 4, n. 2, p. 91-92, 2024a.

SILVA, E. W.; MEDEIROS, T. P. M.; PAIVA, A. C.; SCHIRMER, B. G. A.; FRANÇA, E. J. Análise quimiométrica a partir de espectros gama de Protetores respiratórios semifaciais PFF2 submetidos à radiação UV-c. *Anais do Congresso Brasileiro de Química*, 2024b. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/trabalhos/13/A13T26092-1726614681.pdf>

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ENFERMAGEM EM CENTRO CIRÚRGICO (SOBECC). Recomendações relacionadas ao fluxo de atendimento para pacientes com suspeita ou infecção confirmada pelo covid-19 em procedimentos cirúrgicos ou endoscópicos. 2. ed. São Paulo: Sobecc, 2020. Disponível em: http://www.coren-es.org.br/wpcontent/uploads/2020/04/RECOMENDA%C3%87%C3%95ES_SOBECC_COVID_2%C2%BA-EDI%C3%87%C3%83O-1.pdf. Acesso em: 21 set. 2020.

SOUZA, V. C.; PADOVEZE, M. C. O Jaleco é um EPI? Official Journal of the Brazilian Association of Infection Control and Hospital Epidemiology, v. 6, n. 1, 2017.

SOUZA, V. L. B.; SILVA, L. C. D.; SOARES, A. L. B. Covid-19. In: A Construção do Campo da Saúde Coletiva 2, cap. 07. p. 74 – 81, 2021.

SPINKS, J. W. T.; WOODS, R. J. An introduction to radiation chemistry. 3. ed. New York: Wiley, 1990.

TAVARES, M. L.; SAAD, D. S. A conservação preventiva de arquivo têxteis: uma checklist aplicada ao Museu Municipal Parque da Baronesa (MMPB) - Pelotas/RS. Anais do XVI Encontro de Pós-Graduação UFPEL, 2015. Disponível em: https://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2014/MD_01283.pdf. Acesso em: 07 ago. 2021.

TIBCO. TIBCO Statistica™ Quick Reference, 2018.

TSENG, C.-C.; LI, C.-S. Inactivation of Viruses on Surfaces by Ultraviolet Germicidal Irradiation. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, v. 4, n. 6, p. 400 – 405, 2007.

TÜRKER, N. S. et al. The effect of gamma radiation sterilization on dental biomaterials. Tissue Engineering and Regenerative Medicine, v. 11, n. 5, p. 341-349, 2014.

VERBEEK, J. H.; RAJAMAKI, B.; IJAZ, S.; SAUNI, R.; TOOMEY, E.; BLACKWOOD, B.; TIKKA, C.; RUOTSALAINEN, J. H.; BALCI, E. S. Personal protective equipment for preventing highly infectious diseases due to exposure to contaminated body fluids healthcare staff. Cochrane Database of Systematic Reviews, n. 5, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD011621.pub5>.

VIDIGAL-JUNIOR G. M. et al. Manual de biossegurança da Faculdade de Odontologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UERJ/Faculdade de Odontologia, 2020.

VISCUSI D. J.; BERGMAN M. S.; EIMER B. C. et al. Evaluation of Five decontamination methods for filtering facepiece respirators. *Annals of Occupational Hygiene*, v. 53, p. 815 – 827, 2009.

WITZEL, A. L. et al. Orientação de Biossegurança: adequações técnicas em tempos de COVID-19. São Paulo: CROSP, 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Coronavirus disease (COVID-19) pandemic, 2021. Disponível em: https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus2019?gclid=EAlaIQobChMIz6-K7YG78QIVmgytBh21zABUEAAYASAAEgILx_D_BwE. Acesso em: 21 abr. 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Rational use of personal protective equipments for coronavirus disease (COVID-19). Interim guidance, 2020. Disponível em: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/331215/WHO-2019-nCov-IPCPPE_use2020.1-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

APÊNDICE 1 – Resultados de passagem de luz para o tratamento UVC no TNT de 40 g m⁻²

<i>Ciclo</i>	<i>Amostra</i>	<i>Média</i>	<i>CV%</i>	<i>n</i>
0	1	0,110114	63,89416	12
0	2	0,123604	83,71936	12
0	3	0,105419	53,38417	12
0	4	0,147444	58,12284	12
1	1	0,425273	36,03012	12
1	2	0,335613	30,11617	14
1	3	0,272635	34,82481	11
1	4	0,318308	49,78335	11
2	1	0,249118	35,01167	12
2	2	0,160653	25,67535	14
2	3	0,270043	52,13488	11
2	4	0,455836	28,43453	10
3	1	0,35545	34,56814	12
3	2	0,23461	38,22532	14
3	3	0,250611	39,86129	11
3	4	0,178656	28,86165	8
4	1	0,25628	24,66438	12
4	2	0,11962	96,35674	14
4	3	0,198799	45,31979	11
4	4	0,070988	72,57503	10
5	1	0,192972	50,06497	12
5	2	0,191065	53,4366	14
5	3	0,252029	39,39885	11
5	4	0,249274	38,41642	8
6	1	0,26756	31,68076	12
6	2	0,214887	41,69483	14
6	3	0,158551	44,33788	11
6	4	0,180807	25,93192	9
7	1	0,278613	39,35281	12
7	2	0,268915	41,65687	14
7	3	0,280979	54,98503	11
7	4	0,339887	17,44734	8
8	1	0,294135	31,17817	12
8	2	0,291641	33,82782	14
8	3	0,316385	33,45012	11
8	4	0,210907	44,19996	8
9	1	0,12083	52,82863	12
9	2	0,245392	43,20302	14
9	3	0,225816	46,40892	9
9	4	0,291161	36,35506	9
10	1	0,269221	37,19299	12
10	2	0,329321	32,39283	14
10	3	0,285516	31,65722	11
10	4	0,216367	25,91587	9

APÊNDICE 2 – Resultados de passagem de luz para o tratamento UVC no TNT de 60 g m⁻²

<i>Ciclo</i>	<i>Amostra</i>	<i>n</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio-padrão</i>
0	1	12	0.078501	0.066062
0	2	11	0.150562	0.094304
0	3	11	0.159611	0.100421
0	4	14	0.026702	0.017205
1	1	11	0.116331	0.066698
1	2	14	0.103310	0.071570
1	3	12	0.039445	0.020862
1	4	11	0.128896	0.045032
2	1	14	0.074559	0.047276
2	2	11	0.108923	0.076502
2	3	11	0.085636	0.035099
2	4	11	0.109723	0.065886
3	1	11	0.057355	0.032799
3	2	11	0.082216	0.035919
3	3	11	0.053870	0.041347
3	4	11	0.094394	0.025911
4	1	11	0.033875	0.021310
4	2	10	0.076648	0.049019
4	3	10	0.099687	0.042668
4	4	11	0.061023	0.025465
5	1	11	0.123875	0.076646
5	2	12	0.073484	0.043879
5	3	12	0.126905	0.083217
5	4	11	0.063884	0.031324
6	1	11	0.117865	0.033117
6	2	12	0.155154	0.054595
6	3	12	0.147838	0.074755
6	4	11	0.063789	0.047876
7	1	11	0.065542	0.052928
7	2	11	0.069036	0.043632
7	3	11	0.156463	0.062981
7	4	11	0.066160	0.039399
8	1	11	0.061225	0.038381
8	2	11	0.060432	0.043427
8	3	9	0.062923	0.043750
8	4	11	0.069241	0.037118
9	1	11	0.063449	0.035572
9	2	11	0.050037	0.030695
9	3	11	0.066024	0.045836
9	4	9	0.084342	0.031800
10	1	10	0.088335	0.029976
10	2	10	0.045554	0.025307
10	3	11	0.046131	0.025332
10	4	11	0.090785	0.038546

APÊNDICE 3 – Resultados de passagem de luz para o tratamento lavagem/secagem no TNT de 40 g m⁻²

Ciclo	Amostra	subamostra	Média	CV%	n
0	1	0	0,110113811	63,89416223	12
0	2	0	0,126896717	85,00606934	11
0	3	0	0,112440075	47,33723837	11
0	4	0	0,136994878	59,47034973	11
1	1	1	0,098457328	45,81994466	13
1	1	2	0,106051745	59,55201025	10
1	1	4	0,218327638	29,38633648	12
1	1	5	0,132274168	47,43015776	11
1	2	1	0,114186723	57,44802356	10
1	2	3	0,049644056	79,51925802	11
1	2	4	0,185821765	37,27651363	10
2	1	1	0,170581169	44,47434666	12
2	1	2	0,061581671	42,63913403	10
2	1	3	0,266941727	43,10258365	12
2	1	4	0,134315568	41,07028238	12
2	2	1	0,045257717	74,63202844	11
2	2	2	0,085163733	76,90280374	11
2	2	4	0,173893745	92,82377784	13
1	2	2	0,055596806	40,86257104	11
3	1	3	0,129762403	41,9591927	11
3	1	4	0,068055118	65,9283029	10
3	1	5	0,153417161	50,19313298	10
3	2	1	0,126679454	68,49486864	10
3	2	2	0,087044882	76,32996896	13
3	2	3	0,161799255	34,76969484	13
3	2	5	0,092030134	41,535704	12
4	1	1	0,11292771	70,53627189	11
4	1	2	0,089505597	53,94864982	11
4	1	4	0,170335929	31,49039499	11
4	1	5	0,256766303	57,07455399	12
4	2	1	0,197721631	43,85097644	12
4	2	2	0,318611121	26,90906918	13
4	2	3	0,269386742	40,75750283	13
4	2	4	0,086949706	82,6715212	8
5	1	1	0,079095933	52,84908794	12
5	1	3	0,116700492	31,34307087	11
5	1	4	0,105585506	25,39338573	11
5	1	5	0,09763984	38,53058457	11
5	2	1	0,178450188	54,68198535	13
5	2	2	0,073605501	76,9236447	12
5	2	3	0,188936873	59,47982085	14
5	2	5	0,085270653	54,53866549	13
6	1	1	0,153542219	59,98265032	7
6	1	2	0,081696533	48,76784982	13
6	1	3	0,064977898	47,75798658	11
6	1	4	0,142113816	52,65858309	13
6	2	1	0,111875653	42,39277343	13
6	2	3	0,101254346	45,27970624	13
6	2	4	0,204563446	60,92989959	12
6	2	5	0,193075429	43,11030708	12
7	1	2	0,081423978	52,73626862	11
7	1	3	0,070865054	46,41119001	10
7	1	4	0,133932434	35,06446911	12
7	1	5	0,169607978	69,71075698	12
7	2	1	0,185808389	40,41275708	14
7	2	2	0,147488539	54,85377879	11
7	2	4	0,123631379	67,32104192	11
7	2	5	0,068301306	54,32587604	11
8	1	2	0,097462868	69,17026388	16

Ciclo	Amostra	subamostra	Média	CV%	n
8	1	3	0,148546352	67,05160096	12
8	1	4	0,042513073	81,94272039	12
8	1	5	0,16879556	60,51037652	13
8	3	1	0,161005877	60,62341136	11
8	3	3	0,042883198	85,45140886	10
8	3	4	0,139692725	63,29146492	12
8	4	5	0,203848373	78,61349737	12
9	1	2	0,054659314	52,33912108	11
9	1	3	0,216494108	33,73265002	11
9	1	4	0,129693818	93,98117691	11
9	1	5	0,076687286	72,0008838	10
9	2	4	0,144599326	61,9603413	11
9	2	2	0,305651289	39,70817001	14
9	2	4	0,144599326	61,9603413	11
9	2	5	0,159353567	38,3898814	12
10	1	1	0,084533373	80,80241023	14
10	1	2	0,117182886	43,60118546	13
10	1	3	0,112376021	63,95814832	14
10	1	5	0,025187197	67,74396544	12

APÊNDICE 4 – Resultados de passagem de luz para o tratamento lavagem/secagem no TNT de 60 g m⁻²

Ciclo	Amostra	Subamostra	Média	CV%	n
0	1	0	0,078500938	84,15433669	11
0	2	0	0,166504892	63,37493313	12
0	3	0	0,120368696	75,47948558	12
0	4	0	0,028603299	62,34921687	12
1	10	1	0,023114909	58,89878401	11
1	12	2	0,022536823	57,6624604	11
1	10	2	0,036590622	82,13910983	13
1	12	3	0,078283777	58,18786878	11
1	10	3	0,052842567	57,23385833	11
1	12	4	0,025188024	95,48933758	11
1	10	4	0,125105968	62,30653725	12
1	12	5	0,051249236	75,28549922	11
2	8	1	0,03959721	74,26040679	12
2	11	1	0,045776879	51,40094703	11
2	8	2	0,029881223	68,91348433	11
2	11	3	0,069001523	89,51323487	11
2	8	4	0,027366961	64,93530228	12
2	11	4	0,011138308	83,21069081	11
2	8	5	0,044634181	43,95826784	11
2	11	5	0,024407338	69,83257379	11
3	7	1	0,019820486	85,55819733	11
3	13	1	0,064271751	50,44227574	12
3	7	2	0,085025258	63,36755126	11
3	7	2	0,050356708	114,3680288	11
3	13	2	0,025792957	76,32575755	14
3	13	3	0,043574385	55,07260788	13
3	7	4	0,028264328	68,37095357	11
3	7	4	0,025702326	87,46414306	11
4	9	1	0,050585131	69,23896409	11
4	15	1	0,020965433	49,19814949	11
4	9	2	0,023549463	48,37270041	11
4	15	2	0,031751926	95,3621123	11
4	9	3	0,061516199	90,00187705	11
4	15	3	0,059884524	83,04463854	12
4	9	4	0,041659981	73,4799836	12
4	15	4	0,041213768	69,29694882	12
5	6	1	0,022856313	62,35821111	11
5	14	1	0,031680586	38,34554085	11
5	6	2	0,022695718	61,32322251	11
5	14	2	0,032357858	79,12562789	11
5	6	3	0,004758871	71,85436115	11
5	14	4	0,033457202	103,5167468	12
5	6	5	0,012673889	144,2361224	11
5	14	5	0,043991902	56,07274134	11
6	5	2	0,035656345	86,7545837	11
6	18	1	0,032748367	85,02793313	12
6	5	2	0,044841797	75,97113546	11
6	18	2	0,052836129	71,8917616	11
6	5	4	0,023094099	56,21474572	11
6	18	4	0,074381443	63,18562292	12
6	5	5	0,020540609	62,53449638	11
6	18	5	0,058804539	66,60310456	11
7	4	1	0,005529705	102,2974239	11
7	16	1	0,030274983	90,50178579	11
7	4	2	0,008469534	76,8655632	11
7	16	3	0,054938089	54,90972412	12
7	4	3	0,050014052	66,60112659	11
7	16	4	0,026055927	58,1060125	10
7	4	4	0,015171905	95,53416428	11

Ciclo	Amostra	Subamostra	Média	CV%	n
7	16	5	0,023397431	40,66578836	12
8	3	1	0,041509779	60,65364394	12
8	17	2	0,034881534	51,92013858	11
8	3	2	0,018833674	75,28597455	11
8	17	3	0,053048973	81,74068417	12
8	3	4	0,020947747	50,74643636	11
8	17	4	0,029231155	59,1767421	11
8	3	5	0,026678646	55,5828686	11
8	17	5	0,021859393	62,25063913	11
9	2	1	0,033236836	50,74996481	11
9	19	1	0,025897854	68,59558323	12
9	2	2	0,084425212	57,78025544	12
9	19	3	0,053394539	49,68271598	11
9	2	3	0,04000504	68,09676424	11
9	19	4	0,031713351	60,88637743	13
9	2	4	0,04215963	47,16978552	10
9	19	5	0,029197669	43,39390923	11
10	1	2	0,025522209	96,78496814	12
10	1	3	0,044400106	87,60164065	12
10	1	4	0,034055866	89,1823815	11
10	1	5	0,072349734	86,06556507	12

APÊNDICE 5 – Resultados de passagem de luz para os tratamentos lavagem/secagem e irradiação no TNT de 40 g m⁻²

Código	Ciclo Lav/Sec	Irradiação	Amostra	Média	CV%	n
1	1	1	2	0.129982756	65.51622594	11
2	1	1	2	0.159888365	26.06896825	11
3	1	1	2	0.09512319	37.50863059	11
4	1	1	2	0.10378076	48.74409472	11
5	2	1	10	0.084222103	56.668646	11
6	2	1	10	0.119277838	46.14842608	11
7	2	1	10	0.18815615	39.6923279	11
8	2	1	10	0.084341555	62.92522781	11
9	3	1	6	0.166508516	43.50907722	11
10	3	1	6	0.139033888	28.12523745	11
11	3	1	6	0.117010745	67.48229085	11
12	3	1	6	0.177854736	55.64109856	11
13	4	1	8	0.066659437	46.72252271	11
14	4	1	8	0.082738299	70.83459519	11
15	4	1	8	0.030019785	86.85086257	11
16	4	1	8	0.053102498	38.86016189	11
17	5	1	4	0.022512439	73.25606972	11
18	5	1	4	0.090042178	61.19738845	11
19	5	1	4	0.059754716	40.73488716	11
21	6	1	3	0.066852611	49.35690978	11
22	6	1	3	0.113644958	61.88620867	11
23	6	1	3	0.060660742	73.15391753	11
24	6	1	3	0.111527441	63.3830467	11
25	7	1	5	0.194975623	36.92262905	11
26	7	1	5	0.217623451	45.22659082	11
27	7	1	5	0.203181777	41.89331407	11
28	7	1	5	0.228909898	33.02212235	11
29	8	1	7	0.062763392	92.97387447	11
30	8	1	7	0.134129301	59.07784343	11
31	8	1	7	0.187744653	55.4972822	11
32	8	1	7	0.097306026	59.39141717	11
33	9	1	9	0.085021345	62.85907975	11
34	9	1	9	0.067483094	90.88399906	11
35	9	1	9	0.062671629	73.55126156	11
36	9	1	9	0.073668907	54.21150539	11
37	10	1	1	0.159787461	59.15424152	11
38	10	1	1	0.190170171	41.59594033	11
39	10	1	1	0.190170171	41.59594033	11
40	10	1	1	0.070183131	67.42700782	11
41	0	1	1	0.110113811	63.89416218	12
42	0	1	2	0.126896717	85.00606938	11
43	0	1	3	0.112440075	47.33723832	11
4	0	1	4	0.136995063	59.4700718	11

APÊNDICE 6 – Resultados de passagem de luz para os tratamentos lavagem/secagem e irradiação no TNT de 60 g m⁻²

Código	Ciclo Lav/Sec	Irradiação	Amostra	Média	CV%	n
1	1	1	1	0.135994399	75.73512817	11
2	1	1	1	0.047124598	86.13971885	11
3	1	1	1	0.072362775	65.87415972	11
4	1	1	1	0.119706172	77.33261567	11
6	2	1	1	0.036274502	49.5770855	11
7	2	1	1	0.042955219	87.681798	11
8	2	1	1	0.102606176	76.84878116	11
10	2	1	1	0.078883914	52.24361457	11
11	3	1	1	0.053496451	75.09012709	11
12	3	1	1	0.084659985	60.72850404	11
15	3	1	1	0.07743293	54.03842932	11
17	4	1	1	0.06383198	78.21047018	11
18	4	1	1	0.044066594	64.5581306	11
19	4	1	1	0.036683972	59.4981107	11
20	4	1	1	0.054243467	50.52247066	11
21	5	1	1	0.189379371	71.27265616	11
22	5	1	1	0.068929325	61.38043419	11
24	5	1	1	0.095078467	66.03470996	11
25	5	1	1	0.088339854	76.07695462	11
26	6	1	1	0.074316769	70.9308071	11
27	6	1	1	0.07746534	73.77823527	11
28	6	1	1	0.158725489	48.18026514	11
29	6	1	1	0.069430409	39.8323511	11
31	7	1	1	0.039324862	108.0306128	11
33	7	1	1	0.089360381	46.17817714	11
34	7	1	1	0.096058442	45.27130073	11
35	7	1	1	0.050380426	71.88213611	11
36	8	1	1	0.05904367	99.74160192	11
37	8	1	1	0.045977959	86.41077914	11
40	8	1	1	0.066520131	77.47136525	11
41	9	1	1	0.030893779	139.9545084	11
43	9	1	1	0.078842625	89.58993191	11
44	9	1	1	0.134031263	67.01610255	11
45	9	1	1	0.11410016	80.24915267	11
46	10	1	1	0.076793547	76.15852395	11
48	10	1	1	0.080685583	50.92700544	11
49	10	1	1	0.073796867	57.93972114	11
49	10	1	1	0.073796867	57.93972114	11
50	10	1	1	0.111419206	52.33210635	11
51	0	1	1	0.063693449	68.54974355	0
52	0	1	2	0.150561787	62.63479196	0
53	0	1	3	0.129975486	68.21720043	0
54	0	1	4	0.030007692	60.38663496	0

APÊNDICE 7 – Resultados de quantidade de manchas para o tratamento UVC no TNT de 40 g m⁻²

ciclos	Média	CV%	n
V0	0,01153	35,45751483	8
V1	0,009533333	68,83847319	3
V2	0,01133	23,34122202	3
V3	0,011043333	7,535096213	3
V4	0,010813333	37,51220874	3
V5	0,014643333	46,52066042	3
V6	0,008526667	42,60983707	3
V7	0,01431	53,08225963	3
V8	0,01092	61,80145052	3
V9	0,011566667	42,88013035	3
V10	0,017853333	11,09211029	3

APÊNDICE 8 – Resultados de quantidade de manchas para o tratamento lavagem/secagem no TNT de 40 g m⁻²

ciclo	Média	CV%	n
L0	0,01153	35,45751483	0
L1	0,006022	12,01448467	0
L2	0,007006	28,27258957	0
L3	0,006294	19,71366352	0
L4	0,004782	14,85131985	0
L5	0,005604	9,510912869	0
L6	0,006668	41,28854301	0
L7	0,004664	13,25486889	0
L8	0,005238	9,914043576	0
L9	0,004156	11,0913265	0
L10	0,005242	12,76243278	0

APÊNDICE 9 – Resultados de quantidade de manchas para os tratamentos lavagem/secagem e irradiação no TNT de 40 g m⁻²

Ciclo	Média	CV%	n
L1	0,010153333	31,72845219	3
L2	0,007486667	28,41303297	3
L3	0,009553333	13,05145879	3
L4	0,009833333	7,702900359	3
L5	0,008583333	31,17464692	3
L6	0,012556667	27,48529196	3
L7	0,012366667	33,38607627	3
L8	0,010856667	23,40108102	3
L9	0,014563333	7,725515602	3
L10	0,01391	10,81877802	3

APÊNDICE 10 – Resultados de quantidade de manchas para o tratamento UVC no TNT de 60 g m⁻²

ciclo	Média	CV%	n
V0	0,00603375	12,26016632	8
V1	0,003666667	2,045550289	3
V2	0,003896667	3,930154307	3
V3	0,004126667	6,654878096	3
V4	0,0044	15,67395456	3
V5	0,003743333	2,137481348	3
V6	0,004163333	2,392170164	3
V7	0,004883333	12,07512906	3
V8	0,003993333	5,640654059	3
V9	0,004043333	6,981203438	3
V10	0,004143333	7,020438686	3

APÊNDICE 11 – Resultados de quantidade de manchas para o tratamento lavagem/secagem no TNT de 60 g m⁻²

Ciclo	Média	CV%	n
L0	0,00603375	12,26016632	8
L1	0,00325672	2,65802343	5
L2	0,0034392	5,507926684	5
L3	0,003232	4,187852553	5
L4	0,0035444	12,09030148	5
L5	0,004442	30,85034246	5
L6	0,003924	19,94665753	5
L7	0,0035884	10,01383934	5
L8	0,005838	26,30075451	5
L9	0,005032	34,15159129	5
L10	0,0033572	6,578700606	5

APÊNDICE 12 – Minuta de protocolo de verificação de qualidade do tecido não tecido (tnt) para epis

PROTOCOLO 1 – Garantia da qualidade de TNT

Este protocolo visa fornecer um guia técnico e prático para a verificação da qualidade do TNT utilizado na fabricação de EPIs, assegurando a conformidade com padrões de segurança e eficácia.

1. Amostragem Estratégica

- **Definição de Lotes:** Estabelecer o tamanho dos lotes com base na quantidade de rolos recebidos, priorizando a homogeneidade do material.
- **Coleta de Amostras:**
 - Amostragem estratificada: Coletar amostras de diferentes rolos e posições (início, meio, fim) para garantir a representatividade do lote.
 - Quantidade: Retirar no mínimo 5 amostras por rolo selecionado.
 - Dimensões: Amostras com dimensões mínimas de 30 cm x 30 cm.
- **Identificação:** Utilizar etiquetas com códigos de barras ou numeração sequencial para rastreabilidade individual de cada amostra.

2. Análise Macroscópica Detalhada

- **Inspeção Visual:**
 - Verificação de defeitos: Inspecionar a uniformidade da cor, presença de furos, rasgos, dobras, manchas, sujidades ou outras imperfeições.
 - Registro fotográfico: Documentar visualmente os defeitos encontrados.
- **Medição da Gramatura:**
 - Utilizar balança de precisão para verificar a gramatura do TNT, comparando com as especificações do fabricante.

- Área de medição: Padronizar a área das amostras para cálculo da gramatura (ex: 100 cm²).
- Cálculo: Gramatura (g/m²) = Peso (g) / Área (m²).

- **Medição da Espessura:**

- Micrômetro digital: Utilizar micrômetro com resolução de 0,01 mm.
- Pontos de medição: Realizar medições em 5 pontos diferentes de cada amostra.
- Cálculo: Espessura média = Soma das medições / Número de medições.

3. Análise Microscópica Padronizada

- Confeccionar no mínimo 3 lâminas com as amostras, retirando fragmentos de aproximadamente 8 cm².
- Determinar os parâmetros do MO para captura das imagens. Utilizar microscópio óptico com aumento de 100x para avaliar a integridade das tramas, a presença de fibras rompidas ou deformadas, e a homogeneidade da distribuição das fibras.
- Avaliação da trama: Observar a integridade das fibras, presença de rompimentos, deformações e homogeneidade da distribuição.
- Registro fotográfico: Capturar imagens representativas das tramas, com no mínimo, 5 imagens de cada amostra.
- Utilizar software de análise de imagem para quantificar a passagem de luz através do TNT, indicando a porosidade do material.

4. Ensaio de Spray Controlado

- **Simulação de Aerossóis:**

- Utilizar um borrifador para simular a penetração de aerossóis através do TNT, utilizando uma solução de tinta com densidade similar à saliva humana (~1,0 g/mL).
- Borrifador padronizado: Utilizar borrifador com vazão e pressão controladas.

- Distância e ângulo: Padronizar a distância e o ângulo de aplicação do em 60cm.
- **Quantificação de Manchas:**
 - Digitalização: Digitalizar o papel A4 com resolução de 300 dpi.
 - Software de análise: Utilizar software para quantificar a área e intensidade das manchas.
 - Cálculo: Expressar a área das manchas em cm^2 e a intensidade em unidades de densidade óptica.

5. Análise Estatística Robusta

- **ANOVA:** Utilizar ANOVA para comparar os resultados entre lotes e amostras, verificando a homogeneidade do material.
- **Testes Não Paramétricos:** Utilizar testes como Kruskal-Wallis ou Mann-Whitney quando os pressupostos da ANOVA não forem atendidos.
- **Interpretação:** Analisar os resultados estatísticos para identificar variações significativas na qualidade do TNT.

6. Critérios de Aprovação Detalhados

- **Especificações Técnicas:** Comparar os resultados com as especificações do fabricante e normas técnicas aplicáveis (ex: ABNT NBR 14900).
- **Limites de Tolerância:** Definir limites de tolerância para cada parâmetro, considerando a aplicação do EPI.
- **Matriz de Decisão:** Criar uma matriz de decisão com os critérios de aprovação e os resultados das análises, facilitando a tomada de decisão.

7. Documentação Completa

- **Relatórios Técnicos:** Elaborar relatórios com dados brutos, imagens, resultados estatísticos e conclusões.
- **Rastreabilidade:** Manter registros de todas as etapas do protocolo, incluindo calibração de equipamentos, datas e responsáveis pelas análises.

- **Arquivamento:** Armazenar os registros em formato digital e físico, seguindo as normas de Boas Práticas de Fabricação (BPF).

Este protocolo, com suas melhorias técnicas e foco na praticidade, visa assegurar a qualidade do TNT para a produção de EPIs seguros e eficazes.