



FACULDADE DE TECNOLOGIA DE AMERICANA "MINISTRO RALPH BIASI"
Curso Superior De Tecnologia em Produção Têxtil

RENATO MARQUES BUENO

FLUXOGRAMA DE FIAÇÃO OPEN-END

AMERICANA, SP
2026

RENATO MARQUES BUENO

FLUXOGRAMA DE FIAÇÃO OPEN-END

Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido em cumprimento à exigência curricular do Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil no CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – FATEC/ Americana – Ministro Ralph Biasi.

Área de concentração: Fiação

Orientador: Prof. Dr. Daives Arakem Bergamasco

AMERICANA, SP
2026

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec Americana Ministro Ralph Biasi- CEETEPS Dados Internacionais de Catalogação-na-fonte

BUENO, Renato Marques

Fluxograma de fiação open end. / Renato Marques Bueno –
Americana, 2026.

91f.

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

Orientador: Prof. Dr. Daives Arakem Bergamasco

1. Fiação 2. Qualidade 3. Tecnologia têxtil. I. BUENO, Renato
Marques II. BERGAMASCO, Daives Arakem III. Centro Estadual de
Educação Tecnológica Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de
Americana Ministro Ralph Biasi

CDU: 677022

658.56

677

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

Renato Marques Bueno

FLUXOGRAMA DE FIAÇÃO OPEN-END

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

Americana, 11 de junho de 2026

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Daives Arakem Bergamasco
Doutor
Faculdade de Tecnologia de Americana, SP



Prof. Me. Edison Valério Monteiro
Mestre
Faculdade de Tecnologia de Americana, SP



Prof. Esp. Miguel Ronaldo Galhani
Especialista
Faculdade de Tecnologia de Americana, SP

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o encerramento de uma etapa acadêmica, mas também o resultado de um percurso marcado por desafios, aprendizados e muitas contribuições valiosas. Por isso, gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que fizeram parte dessa jornada.

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela sabedoria, força e perseverança concedidas ao longo deste processo.

Aos meus familiares, que sempre acreditaram em mim e me ofereceram apoio incondicional. Agradeço especialmente à minha esposa e ao meu filho, pela paciência, compreensão e apoio emocional nos momentos mais intensos deste trabalho. Seu incentivo foi fundamental para que eu continuasse firme até o fim.

Agradeço também ao meu orientador, Daives Arakem Bergamasco, pela dedicação, pela disponibilidade constante e pelas contribuições essenciais para o desenvolvimento deste estudo. Suas orientações ampliaram minha visão crítica e foram determinantes em cada etapa da pesquisa.

Aos professores do curso de Produção Têxtil, manifesto meu reconhecimento pelo conhecimento transmitido, pela motivação e por todo o comprometimento demonstrado ao longo da minha formação.

Não poderia deixar de agradecer aos colegas e amigos que fizeram parte desta caminhada. Seja através de conversas, trocas de ideias ou apoio nos momentos difíceis, cada um contribuiu de forma única para que este trabalho se tornasse possível.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a construção deste TCC. Cada gesto, palavra e incentivo foram fundamentais.

A todos, meu muito obrigado.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos diariamente.”
— Robert Collier, (1926)

RESUMO

O presente trabalho aborda o sistema de fiação open-end (rotor) aplicado ao beneficiamento de fibras de algodão, com foco na influência das propriedades das fibras e dos parâmetros do processo na qualidade do fio, especialmente para aplicações em tecidos denim. A pesquisa objetivou compreender como características fundamentais da fibra como tenacidade, alongamento, comprimento, uniformidade, finura, maturidade, higroscopicidade e flexibilidade impactam a estabilidade do processo e as propriedades do fio produzido, visando otimizar a produtividade mantendo os padrões de qualidade exigidos. A metodologia adotou uma abordagem bibliográfica descritiva, incluindo análise comparativa dos principais sistemas de fiação (anel, open-end e air-jet) e revisão das características técnicas do processo produtivo da fiação open-end, abrangendo desde a preparação das fibras até o bobinamento final. Os resultados evidenciam que a fiação open-end oferece elevada produtividade e redução de custos, porém apresenta limitações quanto à resistência do fio em relação ao sistema de anel, demandando rigoroso controle de qualidade das matérias-primas e otimização de todos os estágios do processo. O estudo constatou que a implementação de sistemas de garantia de qualidade incluindo avaliações laboratoriais de contagem, resistência à tração, regularidade de massa, imperfeições e pilosidade, além de controle estatístico do processo e rastreabilidade é essencial para a liberação técnica do fio para processos subsequentes. Conclui-se que o desempenho da fiação open-end é intrinsecamente dependente da qualidade da matéria-prima, da preparação adequada das fibras e do controle operacional rigoroso, sendo fundamental para a indústria têxtil a compreensão integrada desses fatores, especialmente considerando a incorporação de fibras recicladas como estratégia de sustentabilidade.

Palavras-chave: fiação open-end; propriedades das fibras de algodão; controle de qualidade têxtil; beneficiamento de algodão; sustentabilidade têxtil.

ABSTRACT

This study addresses the open-end (rotor) spinning system applied to cotton fiber processing, focusing on the influence of fiber properties and process parameters on yarn quality, particularly for denim fabric applications. The research aimed to understand how fundamental fiber characteristics such as tenacity, elongation, length, uniformity, fineness, maturity, hygroscopicity, and flexibility impact process stability and the properties of produced yarn, with the goal of optimizing productivity while maintaining required quality standards. The methodology adopted a descriptive bibliographic approach, including a comparative analysis of the main spinning systems (ring, open-end, and air-jet) and a review of the technical characteristics of the open-end spinning production process, encompassing fiber preparation through final winding. The results demonstrate that open-end spinning offers high productivity and cost reduction; however, it presents limitations regarding yarn strength compared to ring spinning, demanding rigorous raw material quality control and optimization of all process stages. The study found that the implementation of quality assurance systems including laboratory evaluations of yarn count, tensile strength, mass regularity, imperfections and hairiness, as well as statistical process control and traceability is essential for technical release of yarn to subsequent processes. It is concluded that open-end spinning performance is intrinsically dependent on raw material quality, adequate fiber preparation, and rigorous operational control, making it fundamental for the textile industry to achieve an integrated understanding of these factors, particularly considering the incorporation of recycled fibers as a sustainability strategy.

Keywords: open-end spinning; cotton fiber properties; textile quality control; cotton processing; textile sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do insumo e produto na fiação têxtil	14
Figura 2 - (a) emaranhamento de fibras (b) fragmento de casca (c) impureza não identificada	16
Figura 3 - Medição e estimação do índice micronaire	17
Figura 4 - Influência do micronaire na fiação open-end	18
Figura 5 – Fluxo das etapas do processo de fiação	20
Figura 6 - Esquema de fiação de anel.....	21
Figura 7 - Esquema de uma fiação por rotor	22
Figura 8 - Esquema de uma fiação a jato de ar.....	24
Figura 9 - Medição da resistência e do alongamento á rotura da fibra de algodão ..	28
Figura 10 - Comprimento e uniformidade da fibra	33
Figura 11 - Fluxograma do processo de fiação open-end	43
Figura 12 - Linha de abertura	44
Figura 13 - Princípios mecânicos de abertura e limpeza	45
Figura 14 - Abridor alimentador automático	46
Figura 15 - Sala de abertura.....	49
Figura 16 - Cardagem	55
Figura 17 - Formação da fita a partir do véu no processo de cardagem	56
Figura 18 - Passador.....	59
Figura 19 - Passador I e II	60
Figura 20 - Trem de estiragem dos passadores.....	61
Figura 21 - Fitas de alimentação	63
Figura 22 - Uniformidade da fita	65
Figura 23 - Diagrama do processo de fiação por rotor	66
Figura 24 - Filatório por rotor	67
Figura 25 - Formação do fio por rotor	68
Figura 26 - Bobinamento.....	70
Figura 27 - Aspa para titulação de fibras têxteis	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Algodão	14
3 FIAÇÃO TÊXTIL: CONCEITOS, TIPOS, CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES ..	20
3.1 O que é fiação.....	20
3.2 Principais tipo de fiação	21
3.2.1 Fiação a anel (ring spinning).....	21
3.2.2 Fiação open-end (rotor)	22
3.2.3 Fiação por jato de ar (air-jet).....	23
3.3 Características dos fios nos diferentes sistemas de fiação	24
3.3.1 Resistência	24
3.3.2 Uniformidade.....	25
3.3.3 Volume e estrutura.....	25
3.3.4 Produtividade e custo	25
3.4 Aplicações dos diferentes sistemas de fiação.....	25
3.4.1 Fiação a anel	25
3.4.2 Fiação open-end	25
3.4.3 Fiação air jet	26
4 CARACTERÍSTICAS DA FIBRA PARA A FIAÇÃO OPEN-END	27
4.1 Resistência (tenacidade).....	27
4.2 Alongamento (elasticidade).....	28
4.3 Comprimento da fibra.....	30
4.4 Uniformidade.....	32
4.5 Finura da fibra	34
4.6 Maturidade da fibra	36
4.7 Higroscopicidade.....	38
4.8 Flexibilidade	40
5 DESENVOLVIMENTO – FIAÇÃO OPEN-END (POR ROTOR)	42
5.1 Considerações gerais sobre a fiação open-end.....	42
5.2 Fluxo produtivo da fiação open-end	42
5.2.1 Linha de abertura, limpeza e mistura.....	44

5.2.2 Abertura individual das fibras	47
5.2.3 Transportes das fibras	51
5.2.4 Cardagem	54
5.2.5 Passadores I e II	58
5.2.6 Trem de estiragem dos passadores.....	61
5.2.7 Preparação e alimentação da fita da cardagem.....	62
5.2.8 Formação do fio por rotor.....	65
5.2.9 Extração e bobinamento	69
6 ANÁLISE TÉCNICA DO PROCESSO OPEN-END	73
6.1 Avaliação laboratorial dos fios de algodão	73
6.2 Garantia da qualidade e liberação técnica do fio para processos subsequentes	80
7 CONCLUSÃO.....	85
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

A transformação de fibras têxteis em fios é uma das tecnologias mais antigas da humanidade, representando um marco fundamental na evolução das sociedades e na consolidação da indústria manufatureira. Historicamente, a fiação evoluiu de processos manuais rudimentares, baseados no uso do fuso e da roca, para sistemas de alta complexidade tecnológica. Conforme descrevem Araújo e Castro (1984), a transição da fiação manual para a mecânica ocorreu de forma acentuada durante a Revolução Industrial no século XVIII, com a introdução de máquinas como a Spinning Jenny e a Water Frame, que permitiram o aumento exponencial da capacidade produtiva e a padronização das propriedades físicas dos fios. Esse desenvolvimento não apenas impulsionou a economia global, mas também estabeleceu as bases para a engenharia têxtil moderna, exigindo um entendimento profundo das forças mecânicas envolvidas na torção e no estiramento das fibras. No cenário contemporâneo, a indústria têxtil fundamenta-se em diferentes sistemas de fiação, sendo os mais proeminentes o sistema por anel (Ring Spinning), o sistema de extremidade aberta (open-end) e a fiação a jato de ar (Vortex).

O sistema Ring é amplamente reconhecido por sua versatilidade e pela capacidade de produzir fios de alta resistência e finura, embora apresente limitações de produtividade devido à necessidade de rotação simultânea do fuso e da embalagem de fio. Em contrapartida, LORD (2003) argumenta que a fiação open-end, ou fiação a rotor, revolucionou o setor ao dissociar as etapas de torção e enrolamento, permitindo velocidades de produção significativamente superior e a utilização de bobinas de grande formato diretamente na fiação. Paralelamente, o sistema Vortex destaca-se pela alta velocidade e pela produção de fios com baixa pilosidade e excelente resistência à abrasão, sendo uma solução tecnológica intermediária que atende a demandas específicas de conforto e estética em tecidos planos e malharia. A transição conceitual para a fiação open-end justifica-se pela sua maturidade tecnológica e pela eficiência econômica na produção de fios de títulos grossos e médios.

LAWRENCE (2003) enfatiza que a principal vantagem competitiva deste sistema reside na sua capacidade de processar fibras mais curtas e com menor custo de preparação, mantendo uma uniformidade de massa superior à do sistema

convencional. Diante da crescente pressão por sustentabilidade e otimização de recursos na cadeia têxtil, o entendimento técnico das variáveis do rotor e da dinâmica de formação do fio open-end torna-se essencial. Assim, este trabalho delimita seu foco neste sistema, buscando analisar como suas especificidades mecânicas influenciam as propriedades finais do produto e sua aplicabilidade em larga escala na indústria de vestuário contemporânea.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Algodão

O algodão constitui a principal fibra natural utilizada pela indústria têxtil mundial, destacando-se por sua versatilidade, disponibilidade e propriedades físico-químicas adequadas à produção de fios e tecidos (Figura 1).

Figura 1 - Representação do insumo e produto na fiação têxtil



Fonte: Adaptado de VITA CAMPO (2024).

No contexto da fiação *open-end* (processo de fiação por rotor, no qual as fibras são individualizadas e reagrupadas), a qualidade da matéria-prima assume papel ainda mais crítico, uma vez que essa tecnologia apresenta menor tolerância a variações estruturais da fibra quando comparada à fiação convencional de anel (ring spinning, sistema tradicional de fiação baseado na torção contínua das fibras). Do ponto de vista botânico, o algodoeiro pertence ao gênero *Gossypium*, sendo a espécie *Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch a mais cultivada mundialmente, devido à sua elevada produtividade e características favoráveis ao processamento industrial (CARVALHO et al., 2005). Essas características incluem comprimento médio de fibra, resistência adequada e boa uniformidade, fatores essenciais para o desempenho

eficiente em sistemas de fiação open-end. A predominância de fibras de comprimento médio, característica da espécie *G. hirsutum*, alinha-se bem com os requisitos da fiação open-end. Diferentemente do sistema a anel, que depende de fibras mais longas para garantir a coesão através da torção, o processo open-end desagrega as fibras individualmente antes de reagregá-las na superfície interna de um rotor (componente giratório onde ocorre a formação do fio) em alta velocidade.

Fibras excessivamente longas podem causar problemas de enrolamento e embaraçamento durante a fase de abertura e transporte para o rotor. Por outro lado, um baixo índice de uniformidade e uma alta concentração de fibras curtas (Short Fiber Content – SFC, porcentagem de fibras curtas presentes no algodão) são extremamente prejudiciais, pois essas fibras não têm comprimento suficiente para se ligarem adequadamente à estrutura do fio, sendo expelidas como pó ou gerando pontos finos e fracos, o que aumenta o número de quebras durante a fiação e compromete a regularidade do fio final (LAWRENCE, 2010). A resistência individual da fibra (tenacidade) também desempenha um papel crítico, embora de maneira distinta. No processo open-end, as fibras são submetidas a forças aerodinâmicas e mecânicas intensas durante a abertura e deposição no rotor. Fibras com baixa resistência são mais propensas a se romperem durante este processo, aumentando a geração de fibras curtas e pó, o que contamina o rotor e degrada a qualidade do fio. Embora a estrutura do fio open-end, com sua faixa de envoltório (belly-band, camada externa de fibras que envolve o fio), torne a resistência final do fio menos dependente da tenacidade individual da fibra em comparação ao fio de anel, uma matéria-prima com boa resistência é fundamental para garantir a processabilidade (fiabilidade) e a eficiência da produção, minimizando interrupções e refugos (ARTZT, 2008).

A fibra de algodão é composta predominantemente por celulose (cerca de 90%), o que lhe confere elevada capacidade de absorção de umidade, resistência mecânica e flexibilidade (ASSAD; ANDRADE; ANDRADE, 2012). Essas propriedades são fundamentais para o processo open-end, no qual as fibras são individualizadas e reagrupadas diretamente no rotor. Diferentemente da fiação por anel, não há um sistema contínuo de torção ao longo do fio, o que torna a coesão entre fibras altamente dependente de suas características intrínsecas. Outro aspecto relevante refere-se à maturidade da fibra, que está associada ao grau de desenvolvimento da parede celular. Fibras imaturas apresentam menor resistência, maior tendência à deformação

e dificuldades no processamento, impactando negativamente a regularidade do fio. No contexto da fiação open-end, a presença de fibras imaturas pode intensificar problemas como neps (pequenos emaranhados de fibras), irregularidade e redução da qualidade final do produto conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - (a) emaranhamento de fibras (b) fragmento de casca (c) impureza não identificada



Fonte: Adaptado de JACOBSEN (2001).

Dada a importância dessas propriedades, a classificação do algodão torna-se uma etapa essencial para a indústria têxtil. Essa classificação pode ser realizada com base em parâmetros físicos, como comprimento, uniformidade, resistência e Micronaire (índice que relaciona finura e maturidade da fibra), além de características visuais como cor e presença de impurezas (BESEN; LEYVA; FIGUEIREDO, 1995). No entanto, mais do que uma simples padronização comercial, essa classificação permite direcionar a matéria-prima mais adequada para cada tipo de processo de fiação.

Essa divergência na classificação tem um impacto direto na fiação open-end, que é notoriamente sensível à presença de impurezas. O rotor, girando a velocidades que podem ultrapassar 100.000 rotações por minuto, atua como um potente separador centrífugo. Partículas de casca, folhas (trash, impurezas de origem vegetal) e pó mineral são depositadas no canal do rotor. Esse acúmulo de sujeira impede que as fibras se acomodem corretamente, causando falhas periódicas no fio (defeitos de massa, como pontos grossos e finos) e, em casos críticos, levando à quebra do fio. Portanto, um algodão com alto teor de impurezas, mal avaliado por um sistema subjetivo, exigirá paradas mais frequentes para limpeza do rotor, reduzindo drasticamente a eficiência da fiação e a qualidade do produto final. A capacidade de

um sistema como o HVI (High Volume Instrument, sistema automatizado de medição das propriedades do algodão) de quantificar objetivamente o trash é, assim, uma ferramenta indispensável conforme na figura 3, para otimizar a matéria-prima para este processo (RIETER, 2017).

Figura 3 - Medição e estimativa do índice micronaire



Fonte: Adaptado de IMAMT (2018).

Adicionalmente, a finura medida em e a maturidade da fibra são parâmetros interdependentes e vitais. Fibras mais finas permitem um maior número de fibras na seção transversal do fio, o que tende a melhorar a uniformidade e a resistência. Contudo, fibras muito finas e imaturas são um grande problema para a fiação open-end. Por serem mecanicamente fracas e possuírem uma parede celular pouco desenvolvida, elas se rompem facilmente no processo de abertura e são uma das principais causas da formação de neps. Estes neps não só causam defeitos visuais no fio e no tecido final, como também podem se acumular nos elementos da fiandeira, provocando instabilidade no processo (Figura 4).

Figura 4 - Influência do micronaire na fiação open-end

MICRONAIRE BAIXO (<3,5) IMATURO/FINO	MICRONAIRE IDEAL (3,7-4,2) GRAU A / PREMIUM	MICRONAIRE ALTO (>4,9) GROSSO
 Características: - Fibras imaturas com paredes celulares finas - Maior área de superfície por peso - Mais fibras na seção transversal do fio	 Características: - Equilíbrio perfeito entre finura e maturidade - Espessura ideal da fibra - Paredes celulares bem desenvolvidas	 Características: - Fibras grossas e espessas - Menor área de superfície por peso - Menos fibras na seção transversal do fio
Problemas de Fiação: - Propenso a quebrar durante o processamento - Forma nós (nós de fibra) - Absorção irregular de corante - Cores do tecido manchadas - Falta de brilho - Níveis mais altos de desperdício	Benefícios da Fiação: - Excelente resistência do fio - Uniformidade superior - Processamento fácil - Absorção uniforme de corante - Produção de fios de alta qualidade - Desperdício mínimo	Problemas de fiação: - Não é possível produzir títulos de fios finos - Fio mais fraco no geral - Fio menos uniforme - Resistência reduzida do fio - Limitado à produção de fios grossos - Oportunidades de mercado restritas
Impacto no Mercado: - Grandes descontos de preço - Rotulado como "fino" ou "imaturado" - Abaixo da faixa padrão de mercado	Impacto no Mercado: - Preços padrão de mercado - Prêmios ocasionais - Faixa preferencial: 3,5-4,9 aceitável - Taxa básica de empréstimo: US\$ 0,52/lb (3,5-3,6, 4,3-4,9)	Impacto no mercado: - Penalidades de preço - Rotulado como "grosso" - Preços de venda reduzidos - Abaixo da faixa de mercado padrão
Informações principais de medição:  Medido por: Resistência ao fluxo de ar através da amostra de fibra comprimida  Combina: Finura da fibra (espessura) + Maturidade (desenvolvimento da parede celular)  Padrão da indústria: ASTM D6394-21  Precisão: 4-5% (analisando ~20.000 fragmentos de fibra)		

Fonte: Adaptado de COTTON GINS (2026).

Um *Micronaire* dentro da faixa ideal (tipicamente entre 3.8 e 4.5) indica um bom equilíbrio entre finura e maturidade, assegurando fibras robustas o suficiente para suportar as altas velocidades do processo open-end e, ao mesmo tempo, finas o bastante para produzir um fio de qualidade (GULATI; IYER, 1995). Além disso, o processamento do algodão desde a colheita até a fiação influencia diretamente suas propriedades finais. Etapas como descaroçamento, limpeza e abertura devem ser cuidadosamente controladas para preservar a integridade das fibras (ASSAD; ANDRADE; ANDRADE, 2012). Danos mecânicos durante essas fases podem reduzir o comprimento efetivo das fibras e aumentar a quantidade de fibras curtas, prejudicando significativamente o desempenho na fiação open-end. Do ponto de vista agrônomo, fatores como condições edafoclimáticas, manejo da cultura e escolha da cultivar influenciam diretamente a qualidade da fibra produzida (CUNHA; FREIRE, 2011). Regiões com condições climáticas favoráveis tendem a produzir fibras com melhor desenvolvimento, maior uniformidade e menor incidência de defeitos, características altamente desejáveis para a indústria de fiação. Nesse contexto, observa-se que a qualidade da matéria-prima não é apenas um requisito inicial, mas um fator determinante ao longo de todo o processo produtivo. Na fiação open-end, essa dependência é ainda mais evidente, pois o sistema apresenta menor capacidade

de compensar variações na qualidade da fibra. Assim, a seleção adequada do algodão torna-se estratégica para garantir eficiência produtiva, redução de perdas e qualidade final do fio.

Por fim, embora o algodão esteja inserido em uma ampla cadeia produtiva que envolve aspectos econômicos, logísticos e tecnológicos (BATALHA; BUAINAIN, 2007; NEVES, 2008), é no nível da fibra que se estabelece a base para o desempenho industrial. Dessa forma, compreender profundamente as propriedades do algodão e sua interação com o processo de fiação open-end é fundamental para o desenvolvimento de produtos têxteis de qualidade e para a competitividade do setor.

3 FIAÇÃO TÊXTIL: CONCEITOS, TIPOS, CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

3.1 O que é fiação

A fiação é o conjunto de operações industriais destinadas à transformação de fibras têxteis descontínuas em fios contínuos, com propriedades adequadas para posterior processamento em tecelagem ou malharia. A Figura 5 ilustra o processo que envolve as etapas como abertura, limpeza, cardagem, estiragem e torção das fibras.

Figura 5 – Fluxo das etapas do processo de fiação



Fonte: TESTEX TEXTILE (2021).

Segundo SAVILLE (1999, p. 3), a fiação pode ser definida como “o processo de converter um conjunto de fibras descontínuas em um fio contínuo com resistência suficiente para uso têxtil”. Essa definição evidencia a importância da coesão entre fibras e da resistência mecânica do fio. Além disso, a qualidade do fio obtido depende diretamente do controle das variáveis do processo, como paralelização das fibras, nível de torção e uniformidade de massa (KLEIN, 2014). Por exemplo, fios com maior alinhamento apresentam melhor desempenho mecânico e menor irregularidade. Na cadeia produtiva têxtil, a fiação ocupa uma posição intermediária, conectando a

produção de fibras ao processo de formação de tecidos, sendo determinante para o desempenho do produto final.

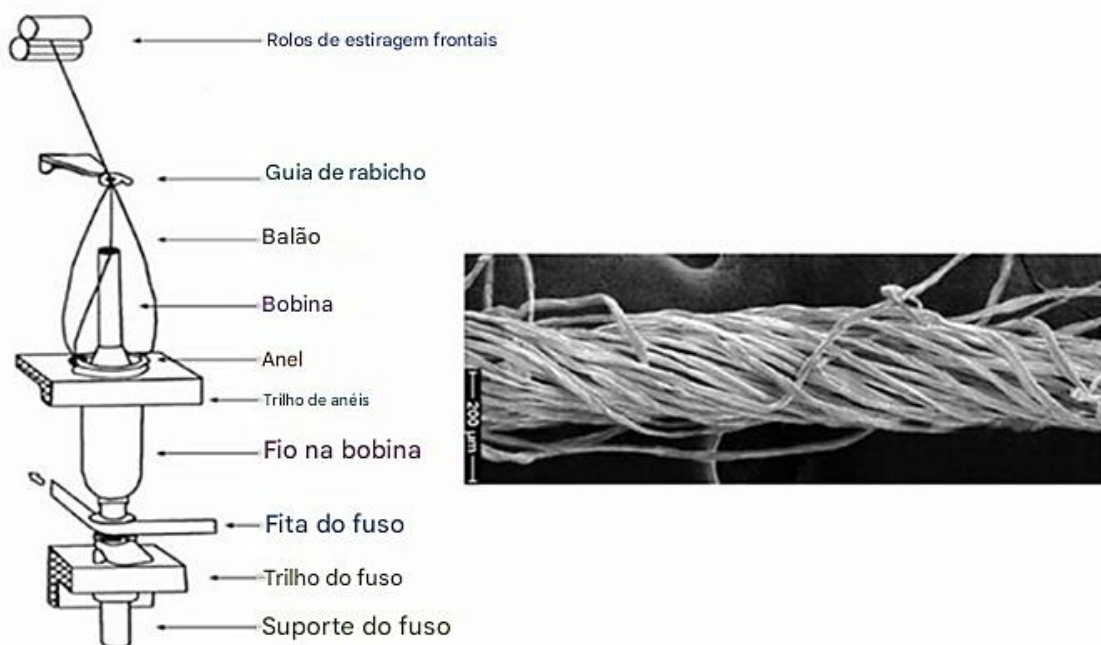
3.2 Principais tipo de fiação

A evolução tecnológica da indústria têxtil resultou no desenvolvimento de diferentes sistemas de fiação, cada um com características específicas de produção e aplicação.

3.2.1 Fiação a anel (ring spinning)

A fiação a anel é o sistema mais tradicional e amplamente utilizado. Nesse método, a torção é inserida no fio por meio da rotação de um fuso associado a um anel e um viajante (Figura 6).

Figura 6 - Esquema de fiação de anel



Fonte: Adaptado de IMAMT (2018).

De acordo com GORDON E COOKLIN (2002), esse sistema proporciona excelente coesão entre as fibras, resultando em fios de alta resistência e qualidade superiores. Exemplo aplicado: Tecidos finos utilizados em camisas sociais ou roupas

de alto padrão utilizam fios produzidos por fiação anel, devido à sua resistência e acabamento mais uniforme.

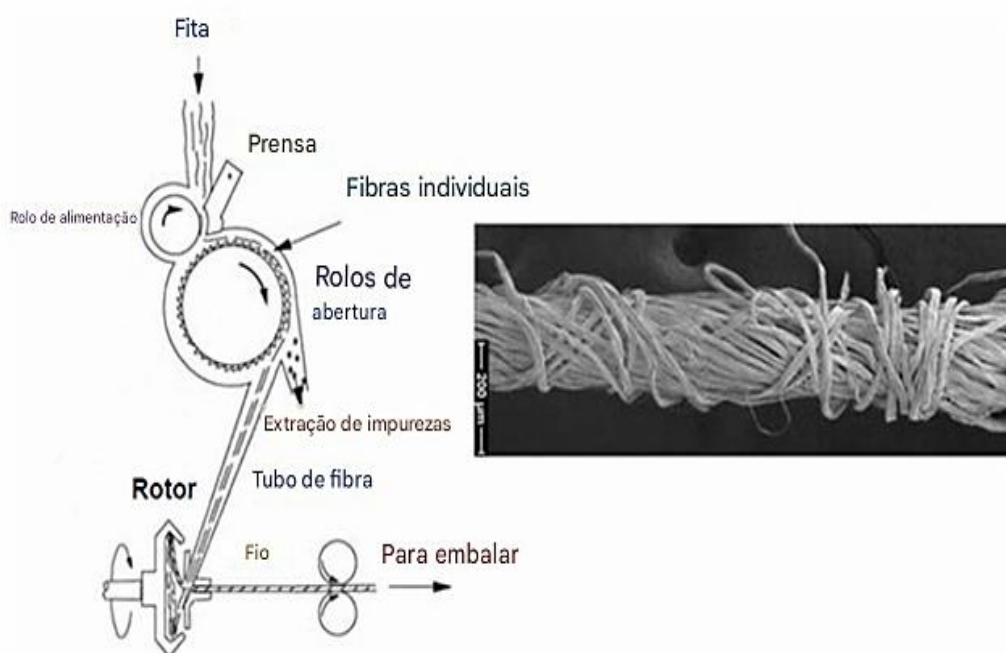
Características principais:

- Alta resistência mecânica
- Boa uniformidade
- Estrutura compacta
- Menor produtividade
- Maior custo operacional

3.2.2 Fiação open-end (rotor)

A fiação open-end, ou por rotor, é um sistema mais moderno que elimina algumas etapas do processo convencional. As fibras são individualizadas e transportadas por fluxo de ar até um rotor em alta rotação, onde ocorre a formação do fio (Figura 7).

Figura 7 - Esquema de uma fiação por rotor



Fonte: Adaptado de IMAMT (2018).

SAVILLE (1999) aponta que esse sistema permite maior automação e produtividade em comparação à fiação anel. Exemplo aplicado: A produção de tecidos denim (jeans) utiliza amplamente fios open-end, devido ao equilíbrio entre custo e desempenho.

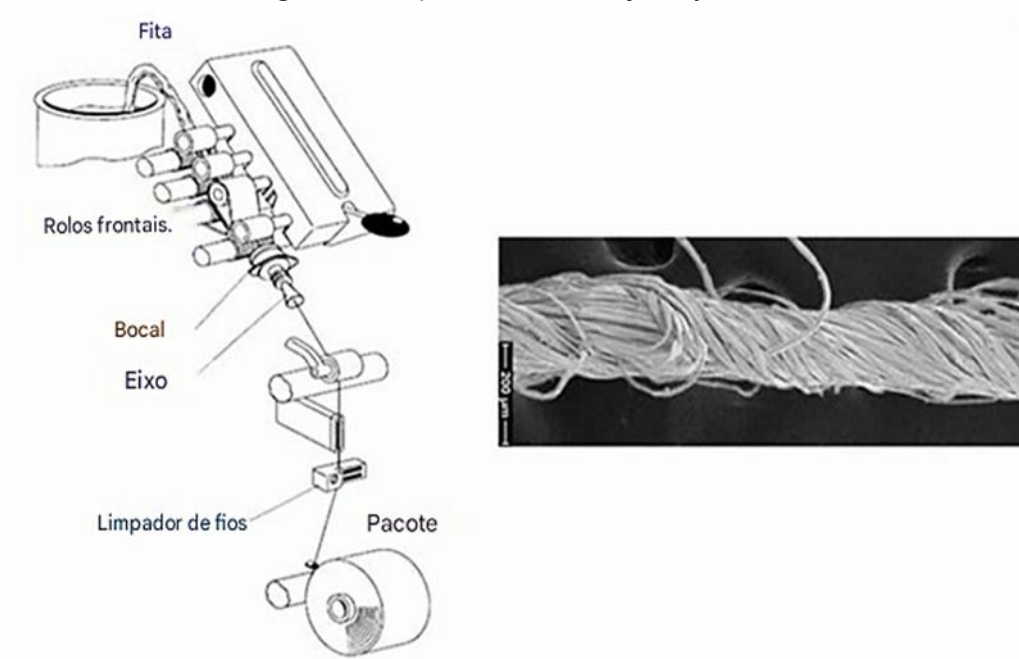
Características principais:

- Alta produtividade
- Redução de etapas do processo
- Menor custo de produção
- Fios mais volumosos
- Menor resistência em relação ao fio anel
- Boa regularidade

3.2.3 Fiação por jato de ar (air-jet)

A fiação por jato de ar utiliza correntes de ar comprimido para entrelaçar as fibras, formando o fio sem necessidade de torção convencional. Segundo KLEIN (2014), esse sistema produz fios com estrutura diferenciada, em que fibras externas envolvem um núcleo central mais alinhado (Figura 8).

Figura 8 - Esquema de uma fiação a jato de ar



Fonte: Adaptado de IMAMT (2018).

Exemplo aplicado: Muito utilizada em tecidos esportivos, onde leveza e uniformidade são mais importantes que alta resistência.

Características principais:

- Elevada velocidade de produção
- Boa uniformidade
- Menor resistência
- Estrutura menos compacta
- Superfície mais lisa

3.3 Características dos fios nos diferentes sistemas de fiação

As propriedades dos fios variam conforme o sistema de fiação empregado, influenciando diretamente sua aplicação final.

3.3.1 Resistência

Fios produzidos por fiação anel apresentam maior resistência devido à maior torção e melhor alinhamento das fibras (GORDON; COOKLIN, 2002).

3.3.2 Uniformidade

Sistemas automatizados, como open-end e air-jet, apresentam melhor controle de regularidade, reduzindo variações de massa ao longo do fio (KLEIN, 2014).

3.3.3 Volume e estrutura

Fios open-end são mais volumosos e menos compactos, o que proporciona maior capacidade de absorção e toque mais macio.

3.3.4 Produtividade e custo

A fiação open-end e air-jet apresentam maior produtividade e menor custo por unidade produzida, sendo mais indicadas para produção em larga escala (SAVILLE, 1999).

3.4 Aplicações dos diferentes sistemas de fiação

A seleção do sistema de fiação está diretamente relacionada ao uso final do fio, considerando propriedades desejadas e viabilidade econômica

3.4.1 Fiação a anel

- Tecidos finos e de alta qualidade
- Malhas premium
- Fios para costura

Exemplo: roupas formais e tecidos de maior valor agregado.

3.4.2 Fiação open-end

- Tecidos denim (jeans)
- Toalhas e tecidos felpudos
- Malhas básicas

Exemplo: calças jeans e toalhas de banho, onde o custo e a produtividade são fatores decisivos.

3.4.3 Fiação air jet

- Tecidos esportivos
- Produtos técnicos
- Tecidos leves

Exemplo: roupas esportivas com foco em conforto e leveza.

4 CARACTERÍSTICAS DA FIBRA PARA A FIAÇÃO OPEN-END

4.1 Resistência (tenacidade)

A resistência, tecnicamente denominada tenacidade, constitui-se como o atributo mecânico primordial para a eficiência do sistema de fiação open-end (por rotor). Diferentemente de outros sistemas, como o de anéis, que priorizam o comprimento da fibra, a fiação por rotor estabelece a tenacidade como sua exigência técnica principal para garantir a fiabilidade e a qualidade do produto final, especialmente no setor de tecidos pesados. De acordo com BELOT (2018, p. 162), na hierarquia de importância dos parâmetros de qualidade para a fiação por rotor, a resistência ocupa o primeiro lugar, seguida pela finura intrínseca e pelo comprimento. Essa priorização ocorre porque a estrutura do fio produzido por rotor é inerentemente mais fraca e menos resistente à tração do que o fio de anéis de mesma titulação. Pesquisas experimentais confirmam essa disparidade: enquanto fios de anéis apresentam tenacidade média de 17,91 cN/tex, fios produzidos pelo sistema open-end registram valores significativamente inferiores, em torno de 13,10 cN/tex (KAYNAK et al., 2017, p. 198).

A relevância da tenacidade é acentuada na produção de tecidos denominados denim. NUNES et al. (1999, p. 1) afirmam que "as propriedades mecânicas das fibras de algodão têm importância fundamental na determinação da mistura que dará a resistência final necessária aos fios para uso na fabricação do tecido denim". No Ceará, polo relevante dessa indústria, a diversidade de procedências da pluma exige um controle rigoroso desses atributos para que o fio suporte as altas tensões do processo de tecelagem sem rupturas excessivas. Além da genética da semente, fatores climáticos e o método de descaroçamento influenciam diretamente essa capacidade de carga da fibra (NUNES et al., 1999). Recentemente, a introdução de fibras recicladas na fiação open-end trouxe novos desafios à manutenção da tenacidade. HABIB et al. (2024, p. 832) observam que, à medida que a porcentagem de algodão reciclado aumenta na mistura, a resistência (RKM) e o alongamento do fio diminuem. Isso ocorre porque as fibras recicladas possuem um teor elevado de fibras curtas (inferiores a 12,7 mm), que não conseguem se ancorar adequadamente na estrutura do fio. Sob tensão, essas fibras curtas tendem a deslizar em vez de resistir

à força aplicada, resultando em um produto final mais frágil (HABIB et al., 2024). Para o sucesso da fiação open-end, a seleção de fibras com alta maturidade e tenacidade é indispensável. Fibras com paredes secundárias espessas suportam melhor as agressões mecânicas do rotor, que opera em velocidades superiores a 100.000 rpm, garantindo um fio que atenda aos requisitos de durabilidade e desempenho exigidos pelo mercado têxtil contemporâneo.

4.2 Alongamento (elasticidade)

O alongamento, também denominado elasticidade da fibra de algodão, corresponde à capacidade da fibra de deformar-se sob ação de uma força de tração antes da ruptura, retornando parcial ou totalmente à sua configuração original após a retirada da carga conforme a Figura 9. No sistema de fiação open-end (por rotor), essa propriedade possui elevada relevância devido às intensas solicitações mecânicas impostas às fibras durante as etapas de abertura, transporte pneumático e deposição centrífuga no rotor. Diferentemente de outros sistemas de fiação, a fiação por rotor submete as fibras a elevadas velocidades de processamento e forças dinâmicas constantes, exigindo comportamento mecânico capaz de absorver tensões sem ocorrência excessiva de rupturas (BELOT, 2018).

Figura 9 - Medição da resistência e do alongamento á rotura da fibra de algodão



Fonte: Adaptado de IMAMT (2018).

A elasticidade da fibra influencia diretamente a resistência, a regularidade e a estabilidade estrutural do fio produzido. Fibras com alongamento adequado apresentam maior capacidade de dissipação de tensões, favorecendo a coesão interfibra e reduzindo a incidência de falhas estruturais durante a formação do fio. Em contrapartida, fibras com baixa capacidade de deformação tendem a romper-se mais facilmente sob tensão, aumentando a presença de fibras curtas e comprometendo a uniformidade e a resistência mecânica do produto final. Segundo KAYNAK et al. (2017), o desempenho mecânico dos fios produzidos no sistema open-end é fortemente dependente das propriedades estruturais da fibra, especialmente em aplicações destinadas à produção de tecidos denim, nos quais elevados níveis de resistência e estabilidade dimensional são indispensáveis.

Do ponto de vista físico, o comportamento elástico da fibra está associado à organização molecular da celulose, especialmente à interação entre regiões cristalinas e amorfas da parede celular. Durante a deformação, as regiões amorfas apresentam maior mobilidade estrutural, permitindo deformação reversível sob tensão, enquanto as regiões cristalinas contribuem para a resistência mecânica da fibra. No sistema open-end, essas propriedades são constantemente solicitadas devido às forças centrífugas e de cisalhamento geradas pelo rotor, que pode operar em velocidades superiores a 100.000 rpm (NUNES et al., 1999). Além disso, fatores como finura, comprimento, maturidade e higroscopicidade influenciam diretamente o comportamento elástico da fibra, uma vez que fibras mais maduras e estruturalmente desenvolvidas apresentam melhor capacidade de suporte mecânico e 8 sob deformação.

As condições ambientais também exercem influência significativa sobre o alongamento da fibra. A umidade relativa atua como agente plastificante da celulose, aumentando temporariamente a flexibilidade e a capacidade de deformação da fibra durante o processamento industrial (SINFIOCE, 2012). Na produção de fios para denim, o equilíbrio entre elasticidade e resistência é essencial para garantir desempenho adequado durante a tecelagem e resistência ao desgaste em uso contínuo. Nesse contexto, PAL (2010) destaca que a estabilidade mecânica do fio é um dos principais fatores para a qualidade final do tecido denim.

Recentemente, a incorporação de fibras recicladas no sistema open-end tem ampliado os desafios relacionados ao alongamento da fibra. HABIB et al. (2024)

observam que o aumento da proporção de algodão reciclado reduz significativamente o alongamento e a resistência do fio, principalmente devido à elevada presença de fibras curtas e estruturalmente degradadas, que possuem menor capacidade de ancoragem e deformação sob tensão. Assim, tanto a insuficiência quanto o excesso de elasticidade podem comprometer o desempenho do fio: baixos níveis favorecem rupturas e defeitos estruturais, enquanto elasticidade excessiva pode reduzir a estabilidade dimensional e a rigidez do produto final. Dessa forma, o controle do alongamento, associado às demais propriedades físico-mecânicas da fibra, é fundamental para assegurar qualidade, estabilidade e eficiência no sistema de fiação open-end.

4.3 Comprimento da fibra

O comprimento da fibra de algodão constitui uma das principais propriedades geométricas responsáveis pela coesão e estabilidade estrutural do fio no sistema de fiação open-end (por rotor). Tecnicamente, essa característica corresponde à extensão longitudinal média das fibras individuais e influencia diretamente sua capacidade de ancoragem, sobreposição e entrelaçamento durante a formação do fio. Embora a fiação por rotor apresente maior tolerância ao uso de fibras médias e curtas quando comparada à fiação a anel, o comprimento permanece como um parâmetro fundamental para garantir resistência mecânica, regularidade e estabilidade operacional do processo (BELOT, 2018).

No sistema open-end, o comprimento da fibra interfere diretamente na dinâmica de consolidação do fio dentro do rotor. Fibras mais longas apresentam maior área de contato interfibra, favorecendo o atrito mecânico e aumentando os pontos de ancoragem na estrutura do fio, o que resulta em melhor distribuição das tensões e maior resistência mecânica. Em contrapartida, fibras curtas possuem menor capacidade de integração ao núcleo fibroso, tornando-se mais suscetíveis ao deslizamento e à extração sob tensão. Segundo KAYNAK et al. (2017) os fios produzidos por rotor apresentam resistência inferior aos fios de anéis justamente em razão das diferenças estruturais de consolidação das fibras, tornando o controle do comprimento ainda mais relevante para compensar essa limitação mecânica.

Os mecanismos físicos envolvidos no comportamento do comprimento da fibra estão relacionados à interação entre forças de atrito, alinhamento e deposição centrífuga no rotor. Durante a fiação, as fibras são individualizadas e transportadas pneumáticamente até a parede do rotor, onde formam o anel fibroso responsável pela consolidação do fio. Fibras mais longas possuem maior capacidade de permanecer ancoradas nessa estrutura devido ao maior número de pontos de contato interfibra, enquanto fibras curtas tendem a se desprender com maior facilidade, gerando irregularidades e reduzindo a coesão do fio (NUNES et al., 1999). Além disso, o comprimento interage diretamente com outras propriedades da fibra, como finura, elasticidade e maturidade, influenciando simultaneamente a resistência, a flexibilidade e a regularidade estrutural do produto final.

Fatores industriais e ambientais também exercem influência significativa sobre o comprimento efetivo das fibras. Processos agressivos de descaroçamento, abertura mecânica e limpeza podem aumentar a ruptura fibrosa e elevar a proporção de fibras curtas na mistura. Esse problema torna-se ainda mais evidente na utilização de algodão reciclado. HABIB et al. (2024) demonstram que o aumento da proporção de fibras recicladas na fiação open-end reduz significativamente a resistência e o alongamento do fio devido à elevada presença de fibras inferiores a 12,7 mm, que não conseguem se fixar adequadamente na estrutura do fio sob tensão.

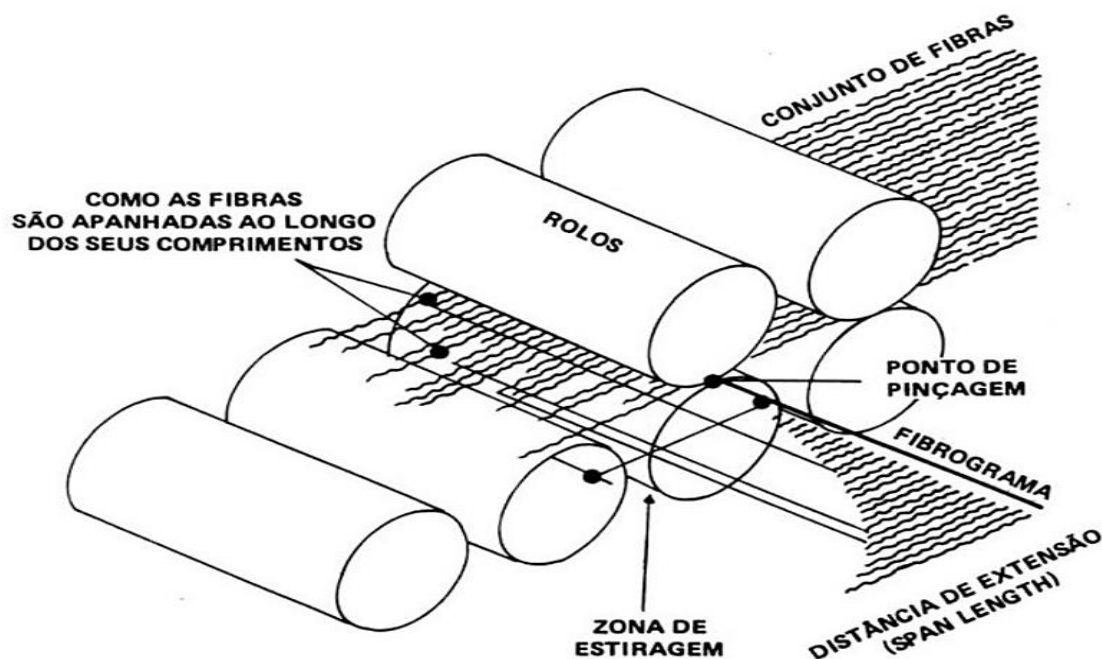
Na produção de tecidos denim, o comprimento da fibra possui importância estratégica, pois o fio precisa suportar elevadas tensões durante os processos de tecelagem, tingimento e acabamento industrial. Segundo PAL (2010), a estabilidade mecânica do fio denim depende diretamente da uniformidade e da capacidade de coesão da estrutura fibrosa. Dessa forma, a utilização de fibras com comprimento adequado contribui para reduzir rupturas, melhorar a regularidade do fio e aumentar a durabilidade do tecido final. Entretanto, distribuições heterogêneas de comprimento ou excesso de fibras curtas comprometem a estabilidade operacional do sistema open-end, elevando a incidência de defeitos estruturais, irregularidades e perdas de desempenho mecânico. Assim, o controle rigoroso do comprimento da fibra, associado às demais propriedades físico-mecânicas do algodão, é indispensável para garantir eficiência produtiva e qualidade no setor têxtil contemporâneo (SINFIOCE, 2012).

4.4 Uniformidade

A uniformidade da fibra de algodão corresponde à regularidade física e dimensional da massa fibrosa, especialmente quanto à distribuição homogênea de propriedades como comprimento, finura, maturidade e resistência mecânica. No sistema de fiação open-end (por rotor), essa característica possui elevada relevância técnica, pois a estabilidade do processo depende diretamente da constância do comportamento das fibras durante as etapas de abertura, transporte pneumático e deposição centrífuga no rotor. Diferentemente de outros sistemas de fiação, o open-end apresenta elevada sensibilidade às variações estruturais da matéria-prima, uma vez que a consolidação do fio ocorre com menor paralelização das fibras e maior dependência da regularidade do fluxo fibroso (BELOT, 2018).

A uniformidade interfere diretamente na eficiência operacional e na qualidade estrutural do fio produzido. Fibras com propriedades homogêneas favorecem a formação de um fluxo fibroso estável e contínuo, permitindo melhor distribuição das fibras no rotor e maior regularidade na consolidação do fio. Como consequência, obtêm-se fios com menor variação de título, maior resistência mecânica, menor incidência de neps e melhor estabilidade dimensional. Em contrapartida, variações excessivas de comprimento, finura ou maturidade comprometem a coesão interfibra e aumentam a ocorrência de descontinuidades estruturais, resultando em defeitos, irregularidades e redução do desempenho mecânico do fio (KAYNAK et al., 2017). Os mecanismos físicos envolvidos na influência da uniformidade estão relacionados à dinâmica de distribuição das fibras dentro do rotor e à estabilidade da torção durante a formação do fio (Figura 10).

Figura 10 - Comprimento e uniformidade da fibra



Fonte: Adaptado de IMAMT (2018).

No sistema open-end, as fibras são individualizadas e transportadas pneumáticamente até a superfície interna do rotor, onde formam o anel fibroso responsável pela estrutura do fio. Quando existe elevada uniformidade, o comportamento das fibras sob ação das forças centrífugas e de atrito tende a ser mais previsível, favorecendo melhor ancoragem interfibra e distribuição equilibrada das tensões mecânicas. Entretanto, massas fibrosas heterogêneas geram instabilidade no fluxo, dificultam a consolidação estrutural e aumentam a propensão ao rompimento durante o processamento (NUNES et al., 1999).

A uniformidade também apresenta forte interação com outras propriedades da fibra, como elasticidade, higroscopicidade, finura e comprimento. Fibras com comportamento físico semelhante respondem de forma mais estável às condições mecânicas e ambientais do processo industrial, contribuindo para maior regularidade do fio. Além disso, fatores como descaroçamento, abertura mecânica, mistura inadequada de lotes e variações de umidade relativa podem comprometer significativamente a uniformidade da matéria-prima. Esse problema torna-se ainda mais evidente na utilização de fibras recicladas, que frequentemente apresentam elevada heterogeneidade estrutural. HABIB et al. (2024) demonstram que o aumento da proporção de algodão reciclado na fiação open-end intensifica irregularidades do

fio e reduz sua resistência devido à maior presença de fibras curtas e propriedades físicas desuniformes.

Na produção de fios destinados a tecidos denim, a uniformidade é indispensável para assegurar estabilidade estrutural e desempenho mecânico adequado durante os processos de tecelagem, tingimento e acabamento industrial. Segundo PAL (2010), a regularidade do fio influencia diretamente a qualidade visual e mecânica do denim, afetando resistência ao desgaste, uniformidade de tingimento e estabilidade dimensional do tecido final. Dessa forma, baixos níveis de uniformidade resultam em maior incidência de rupturas, falhas de tingimento, irregularidades superficiais e perda de desempenho têxtil. Assim, o controle rigoroso da uniformidade da fibra, associado às demais propriedades físico-mecânicas do algodão, constitui fator essencial para a eficiência e a qualidade da fiação open-end contemporânea (SINFIOCE, 2012).

4.5 Finura da fibra

A finura da fibra de algodão corresponde à sua massa linear e ao seu diâmetro transversal, constituindo uma das propriedades físicas mais relevantes para o desempenho da fiação open-end (por rotor). Essa característica influencia diretamente a área de contato interfibra e a quantidade de fibras presentes na seção transversal do fio, determinando o nível de coesão estrutural, regularidade e resistência mecânica do produto final. Segundo BELOT (2018), a finura ocupa posição de destaque entre os parâmetros de qualidade exigidos pela fiação por rotor, pois fibras mais finas favorecem maior integração estrutural do fio, compensando parcialmente a menor compactação característica desse sistema de fiação.

No sistema open-end, a finura interfere diretamente na estabilidade operacional e na eficiência da consolidação fibrosa. Fibras finas apresentam maior superfície específica e maior número de pontos de contato interfibra, aumentando o atrito mecânico e favorecendo a distribuição uniforme das tensões ao longo da estrutura do fio. Como consequência, ocorre melhora na regularidade, na resistência e na estabilidade dimensional do produto final. Em contrapartida, fibras excessivamente grossas reduzem a quantidade de fibras por seção transversal do fio, diminuindo os pontos de ancoragem e favorecendo irregularidades estruturais, falhas de coesão e

maior incidência de defeitos superficiais. KAYNAK et al. (2017) observam que a própria estrutura do fio open-end apresenta resistência inferior à dos fios de anéis, tornando indispensável o uso de fibras com propriedades físicas adequadas para minimizar perdas de desempenho mecânico.

Os mecanismos físicos relacionados à influência da finura envolvem atrito interfibra, flexibilidade estrutural e comportamento aerodinâmico das fibras durante o transporte pneumático até o rotor. Fibras mais finas tendem a acomodar-se de forma mais eficiente na parede do rotor, favorecendo melhor distribuição no anel fibroso e maior estabilidade na formação da torção. Além disso, a finura interage diretamente com outras propriedades da fibra, como comprimento, maturidade, elasticidade e higroscopicidade. Fibras finas e maduras, por exemplo, apresentam melhor equilíbrio entre flexibilidade e resistência, permitindo maior capacidade de deformação sem ruptura durante as elevadas rotações do rotor, que frequentemente ultrapassam 100.000 rpm (NUNES et al., 1999).

A finura também sofre influência significativa dos processos industriais e das condições de processamento. Operações de descaroçamento e abertura mecânica podem alterar a integridade da fibra e aumentar a variabilidade dimensional da matéria-prima. Esse problema é ampliado na utilização de algodão reciclado, cuja composição apresenta elevada heterogeneidade estrutural. HABIB et al. (2024) demonstram que a presença de fibras recicladas aumenta a proporção de fibras curtas e desuniformes, comprometendo a regularidade do fio e reduzindo sua resistência mecânica devido à menor eficiência de ancoragem interfibra.

Na produção de fios destinados a tecidos denim, a finura assume importância estratégica, pois o equilíbrio entre resistência, regularidade e estabilidade estrutural é essencial para suportar as elevadas tensões dos processos de tecelagem e acabamento industrial. Segundo PAL (2010), fios destinados ao denim necessitam apresentar elevada consistência estrutural para garantir desempenho mecânico, uniformidade de tingimento e durabilidade do tecido final. Entretanto, finuras inadequadas podem comprometer significativamente a produtividade industrial: fibras excessivamente finas tornam-se mais suscetíveis à formação de neps e instabilidades no processamento, enquanto fibras grossas reduzem a coesão e aumentam a irregularidade do fio. Dessa forma, o controle rigoroso da finura da fibra, associado às

demais propriedades físico-mecânicas do algodão, constitui fator determinante para a eficiência e a qualidade da fiação open-end contemporânea (SINFIOCE, 2012).

4.6 Maturidade da fibra

A maturidade da fibra de algodão constitui uma propriedade estrutural diretamente relacionada ao grau de desenvolvimento da parede secundária da célula fibrosa, resultante da deposição progressiva de celulose durante o processo de crescimento vegetal. Esse parâmetro define a proporção entre regiões maduras, com paredes celulares espessas e altamente celulósicas, e fibras imaturas, caracterizadas por paredes finas e colapso estrutural parcial.

No contexto da fiação open-end (por rotor), essa propriedade assume papel determinante na resistência mecânica, na estabilidade dimensional e no comportamento dinâmico da fibra durante o processamento em altas rotações, que podem ultrapassar 100.000 rpm, exigindo elevada integridade estrutural do material fibroso (NUNES et al., 1999).

No sistema open-end, a maturidade influencia diretamente a capacidade da fibra de resistir às forças de tração, cisalhamento e impacto geradas durante a abertura, o transporte pneumático e a deposição centrífuga no rotor. Fibras maduras apresentam maior espessura de parede celular e maior proporção de regiões cristalinas de celulose, o que resulta em maior rigidez estrutural e maior resistência à deformação plástica. Isso favorece a estabilidade do fluxo fibroso e a consolidação eficiente do anel de fibras, resultando em fios mais regulares e estruturalmente coesos. Em contraste, fibras imaturas apresentam paredes celulares delgadas e colapsadas, comportando-se de maneira instável sob ação mecânica, o que aumenta a geração de neps, irregularidades e falhas de formação do fio. Segundo BELOT (2018), a qualidade estrutural da fibra é fortemente dependente da integridade da parede secundária, sendo a maturidade um dos principais indicadores desse equilíbrio.

A relação entre maturidade e qualidade do fio produzido é direta e significativa. Fibras maduras contribuem para maior resistência mecânica do fio, melhor coesão interfibra e maior estabilidade dimensional, reduzindo a ocorrência de rupturas durante a fiação e processos subsequentes. Já fibras imaturas comprometem a continuidade

estrutural do fio, favorecendo deslizamento interfibra, pontos fracos e variações de título. KAYNAK et al. (2017) destacam que sistemas de fiação como o open-end são particularmente sensíveis a variações estruturais da fibra, o que amplifica os efeitos negativos da baixa maturidade na performance final do tecido.

Os mecanismos físicos associados à maturidade envolvem a espessura da parede celular, a organização das regiões cristalinas e amorfas da celulose e o comportamento viscoelástico da fibra sob tensão. Fibras maduras, por possuírem maior conteúdo de celulose cristalina, apresentam menor deformação irreversível e melhor capacidade de distribuição de tensões ao longo da estrutura do fio. Essa estabilidade estrutural favorece a interação com outras propriedades como comprimento, finura, elasticidade e higroscopicidade, determinando o desempenho global da fiação open-end. BELOT (2018) reforça que o equilíbrio entre essas propriedades é essencial para garantir desempenho consistente em processos industriais de alta exigência.

A maturidade da fibra também é fortemente influenciada por fatores agrônômicos e ambientais, incluindo condições climáticas, disponibilidade hídrica, nutrição da planta e tempo de colheita. Além disso, processos industriais como descaroçamento e abertura mecânica podem acentuar diferenças entre fibras maduras e imaturas, aumentando a variabilidade da matéria-prima. No caso de fibras recicladas, HABIB et al. (2024) evidenciam que a presença de fibras estruturalmente degradadas ou imaturas intensifica a heterogeneidade do material, reduzindo a resistência do fio e comprometendo sua regularidade devido à menor capacidade de ancoragem interfibra.

Na produção de fios destinados a tecidos denim, a maturidade assume papel crítico, uma vez que esses produtos estão sujeitos a elevadas tensões mecânicas durante tecelagem, tingimento e acabamento industrial. Fibras adequadamente maduras garantem maior resistência à tração, menor incidência de defeitos e maior estabilidade estrutural do tecido final. PAL (2010) destaca que a consistência estrutural da fibra é determinante para o desempenho do denim, especialmente em aplicações industriais que exigem durabilidade e uniformidade. Em contrapartida, níveis inadequados de maturidade resultam em instabilidade no processo de fiação, aumento de rupturas, irregularidades no fio e redução significativa da qualidade do

produto final, comprometendo a eficiência produtiva e o desempenho têxtil global (SINFIOCE, 2012).

4.7 Higroscopicidade

A higroscopicidade da fibra de algodão consiste na capacidade de absorver e liberar umidade em equilíbrio com as condições ambientais, sendo uma propriedade diretamente associada à presença de grupos hidroxila na estrutura da celulose e à natureza porosa da parede celular da fibra. Essa característica confere comportamento dinâmico ao material fibroso, influenciando sua rigidez, flexibilidade e estabilidade dimensional, especialmente sob condições variáveis de temperatura e umidade relativa. No contexto da fiação open-end (por rotor), a higroscopicidade desempenha papel crítico na modulação das propriedades físicas e mecânicas da fibra durante o processamento industrial, impactando diretamente a eficiência do fluxo fibroso e a qualidade do fio produzido (BELOT, 2018).

No sistema open-end, a higroscopicidade interfere de forma significativa no comportamento aerodinâmico e mecânico das fibras durante o transporte pneumático, abertura e deposição no rotor. Em níveis adequados de umidade, ocorre plastificação parcial da parede celular da fibra, o que reduz a rigidez estrutural e aumenta a flexibilidade, favorecendo o alinhamento e a coesão interfibra durante a formação do fio. Além disso, a presença controlada de umidade contribui para a dissipação de cargas eletrostáticas, reduzindo a repulsão entre fibras e melhorando a estabilidade do fluxo fibroso. Em contrapartida, condições de baixa umidade aumentam a rigidez e a geração de eletricidade estática, resultando em instabilidade operacional, maior dispersão de fibras e irregularidade no fio, enquanto excesso de umidade pode provocar aglomeração fibrosa e dificuldade de abertura eficiente (SINFIOCE, 2012). A relação entre higroscopicidade e qualidade do fio é direta, uma vez que níveis adequados de umidade absorvida favorecem maior coesão interfibra, redução da ruptura de fibras e menor formação de neps, contribuindo para maior uniformidade e resistência mecânica do fio open-end. KAYNAK et al. (2017) destacam que a estabilidade estrutural do fio produzido por rotor é altamente dependente do comportamento físico das fibras durante o processo de consolidação, sendo a umidade um fator determinante para o controle da regularidade e desempenho do

produto final. Em condições inadequadas, observam-se variações dimensionais, fragilidade estrutural e aumento da taxa de defeitos, comprometendo a eficiência produtiva.

Os mecanismos físicos associados à higroscopicidade envolvem interações intermoleculares entre moléculas de água e os grupos hidroxila da celulose, resultando em alterações na estrutura amorfa da fibra e redução da rigidez da parede celular. Esse fenômeno de plasticização modifica o comportamento viscoelástico da fibra, influenciando sua capacidade de deformação sob tensão e sua resposta às forças mecânicas aplicadas no rotor. Além disso, a presença de umidade atua na dissipação de cargas eletrostáticas, reduzindo forças de repulsão entre fibras e favorecendo a consolidação do anel fibroso. A higroscopicidade interage diretamente com outras propriedades como maturidade, finura, elasticidade e comprimento, determinando o equilíbrio estrutural necessário para o desempenho adequado do sistema open-end (NUNES et al., 1999).

As condições ambientais e industriais exercem forte influência sobre a higroscopicidade efetiva da fibra, especialmente temperatura, umidade relativa do ar, armazenamento e processos de condicionamento. Durante a abertura mecânica e o transporte pneumático, variações bruscas de umidade podem comprometer a estabilidade do fluxo fibroso e aumentar a variabilidade do fio. No caso de fibras recicladas, HABIB et al. (2024) observam que a degradação parcial da celulose e a heterogeneidade estrutural alteram a capacidade higroscópica do material, ampliando a instabilidade do processo e reduzindo a regularidade do fio produzido.

Na produção de fios destinados a tecidos denim, a higroscopicidade assume importância estratégica, pois o controle de umidade é essencial para garantir estabilidade durante as etapas de tecelagem, tingimento e acabamento industrial. Fios com comportamento higroscópico equilibrado apresentam melhor desempenho mecânico, maior uniformidade e menor incidência de falhas durante processamento subsequente. PAL (2010) destaca que a consistência estrutural do fio é fundamental para o desempenho do denim, especialmente em aplicações industriais sujeitas a elevadas tensões mecânicas. Entretanto, condições inadequadas de umidade resultam em rupturas frequentes, irregularidades no fio, instabilidade operacional e redução significativa da qualidade final do tecido, comprometendo a eficiência global do sistema produtivo (KAYNAK et al., 2017).

4.8 Flexibilidade

A flexibilidade da fibra de algodão é definida como sua capacidade de sofrer deformações geométricas reversíveis, como curvatura e dobramento, sem ruptura estrutural, sendo governada pela morfologia da fibra, pela espessura da parede celular e pelo comportamento mecânico viscoelástico da celulose sob solicitação de forças externas. Essa propriedade está diretamente associada à conformação da fibra durante o processamento têxtil, influenciando sua capacidade de adaptação às trajetórias aerodinâmicas e centrífugas no sistema de fiação open-end (por rotor), onde a dinâmica de movimentação e deposição das fibras exige elevado grau de maleabilidade estrutural (BELOT, 2018).

No sistema open-end, a flexibilidade exerce influência decisiva na eficiência do transporte pneumático, na individualização das fibras e na estabilidade da deposição no rotor. Fibras mais flexíveis apresentam maior capacidade de adaptação ao fluxo turbulento de ar e às forças centrífugas, permitindo melhor orientação e distribuição uniforme no anel fibroso em formação. Esse comportamento favorece a consolidação estrutural do fio, promovendo maior coesão interfibra e regularidade ao longo da massa fibrosa. Em contrapartida, fibras rígidas ou de baixa flexibilidade tendem a apresentar trajetórias irregulares, maior resistência ao dobramento e menor eficiência de deposição, resultando em descontinuidades estruturais e instabilidade no processo de fiação. Segundo KAYNAK et al. (2017), a sensibilidade do sistema open-end às propriedades físicas da fibra torna a flexibilidade um parâmetro crítico para o desempenho do fio produzido.

A relação entre flexibilidade e qualidade do fio é direta, uma vez que fibras com maior capacidade de deformação apresentam melhor acomodação na estrutura do fio, maior número de pontos de contato interfibra e maior eficiência de transferência de tensões mecânicas. Isso resulta em aumento da coesão estrutural, maior resistência à tração e redução da incidência de rupturas durante o processamento. Por outro lado, fibras pouco flexíveis dificultam o empacotamento adequado no rotor, favorecendo a formação de zonas de fragilidade, irregularidades de massa linear e defeitos estruturais no fio final. NUNES et al. (1999) destacam que as propriedades mecânicas das fibras de algodão influenciam diretamente o comportamento do fio em sistemas de fiação open-end, especialmente sob altas exigências de processamento.

Os mecanismos físicos associados à flexibilidade envolvem a deformação da parede celular da fibra, o comportamento viscoelástico da celulose e a interação entre regiões cristalinas e amorfas da estrutura polimérica. Fibras com maior proporção de regiões amorfas tendem a apresentar maior capacidade de deformação reversível, enquanto fibras com elevada cristalinidade apresentam maior rigidez estrutural. Durante o processo de fiação por rotor, essas características determinam a resposta da fibra às forças centrífugas e aerodinâmicas, influenciando diretamente sua trajetória e estabilidade no interior do equipamento. A flexibilidade também interage com propriedades como maturidade, finura, comprimento, elasticidade e higroscopicidade, compondo um sistema de equilíbrio estrutural essencial para o desempenho do processo open-end (PAL, 2010).

As condições industriais e ambientais exercem forte influência sobre a flexibilidade da fibra. Variáveis como umidade relativa, temperatura, processos de abertura mecânica, descaroçamento e condições de armazenamento podem alterar significativamente a rigidez estrutural da celulose. A presença de umidade, por exemplo, atua como plastificante natural, aumentando a mobilidade molecular e, consequentemente, a flexibilidade da fibra. No entanto, variações extremas podem comprometer a estabilidade do processo. No caso de fibras recicladas, HABIB et al. (2024) observam que a degradação parcial da estrutura celulósica reduz a capacidade de deformação da fibra, aumentando a heterogeneidade do material e prejudicando a regularidade e a resistência do fio produzido.

Na produção de fios destinados a tecidos denim, a flexibilidade assume papel estratégico, pois esses materiais são submetidos a elevadas tensões mecânicas durante tecelagem, tingimento e acabamento industrial. Fibras com flexibilidade adequada garantem melhor consolidação estrutural do fio, maior resistência ao processamento e maior uniformidade do tecido final. PAL (2010) destaca que a consistência estrutural do fio é determinante para o desempenho do denim em aplicações industriais exigentes. Em contrapartida, níveis inadequados de flexibilidade resultam em aumento de rupturas, instabilidade operacional no sistema de fiação open-end, formação de defeitos estruturais e redução significativa do desempenho têxtil, comprometendo a eficiência produtiva e a qualidade final do produto (SINFIOCE, 2012).

5 DESENVOLVIMENTO – FIAÇÃO OPEN-END (POR ROTOR)

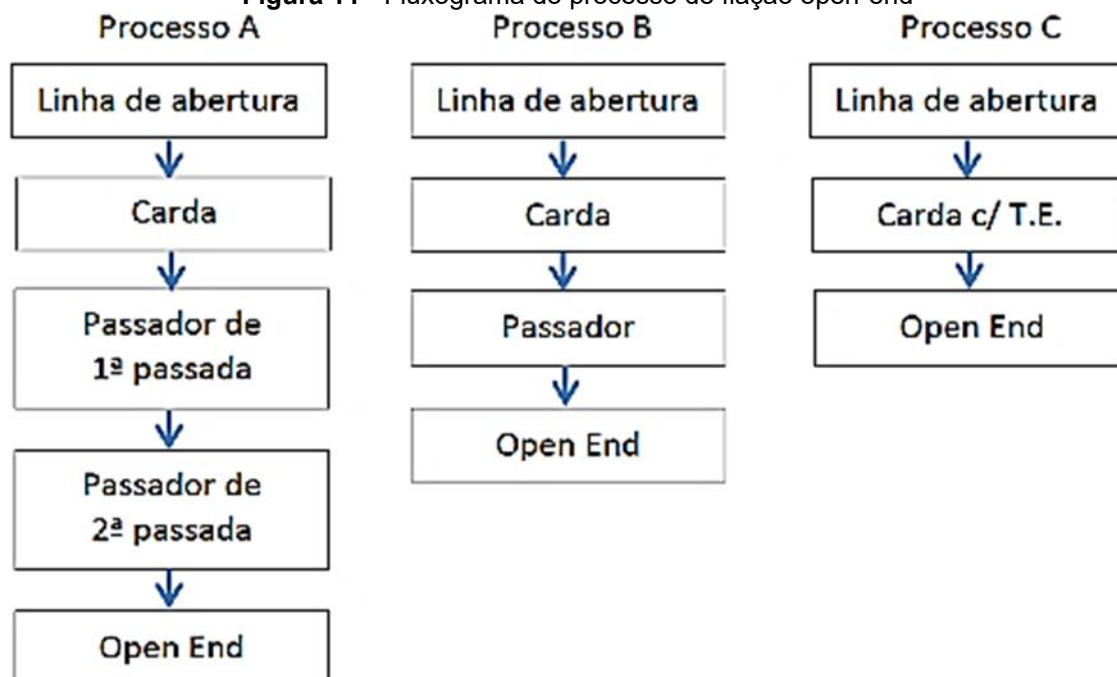
5.1 Considerações gerais sobre a fiação open-end

A fiação open-end, também denominada fiação por rotor, é um dos sistemas mais importantes da indústria têxtil contemporânea, destacando-se pela elevada produtividade e simplificação do processo produtivo. Nesse sistema, o fio é formado a partir da fita de fibras (sliver), passando por etapas de abertura, individualização e reagrupamento das fibras no rotor, o que elimina a necessidade de etapas intermediárias presentes na fiação convencional, como a formação de mecha. De acordo com a COTTON INCORPORATED (2004), o processamento do algodão envolve etapas como abertura, cardagem e formação de fita, podendo ainda incluir a mistura de fibras, fatores que influenciam diretamente as propriedades finais do fio. Nesse contexto, a escolha do sistema de fiação impacta significativamente a eficiência produtiva e as características do produto final. Conforme descrito por PAL (2010), a escolha do sistema de fiação influencia diretamente propriedades do tecido, como resistência, aparência e custo final. Sob uma perspectiva mais recente, observa-se também a inserção de fibras recicladas no processo open-end. Segundo HABIB et al. (2024), a incorporação de algodão reciclado impacta diretamente a qualidade do fio, resultando em aumento da irregularidade e redução da resistência mecânica.

5.2 Fluxo produtivo da fiação open-end

O processo de fiação open-end compreende uma sequência de etapas interdependentes, desde a preparação da matéria-prima até a formação do fio. Dependendo do nível de preparação da fibra e da configuração industrial adotada, diferentes arranjos de processo podem ser utilizados como ilustra a Figura 11, variando principalmente quanto à presença de etapas intermediárias de estiragem e paralelização.

Figura 11 - Fluxograma do processo de fiação open-end



Fonte: Adaptado de LOPO (2017).

Conforme apresentado na Figura 11, o processo de fiação open-end pode ser organizado em diferentes configurações de preparação da fita, variando principalmente quanto ao número de passagens de estiragem antes da alimentação ao rotor. Essas variações influenciam diretamente a uniformidade da fita e a estabilidade da formação do fio (LAWRENCE, 2010; RIETER, 2017).

- No Processo A, a presença de duas passagens no passador após a cardagem proporciona maior paralelização e homogeneização das fibras, resultando em melhor regularidade do fio e menor incidência de imperfeições. Esse nível de preparação favorece a estabilidade do processo, porém implica maior custo operacional (KLEIN, 2014; LORD, 2003).
- O Processo B utiliza uma única passagem de estiragem, representando uma condição intermediária. Nessa configuração, mantém-se um controle adequado da uniformidade da fita, com ganho de produtividade em relação ao Processo A, sendo amplamente adotado na prática industrial (RIETER, 2017).
- No Processo C, a eliminação do passador reduz o nível de preparação da fibra, aumentando a variabilidade de massa e a suscetibilidade a imperfeições no fio.

Apesar disso, essa configuração apresenta maior produtividade e menor custo, sendo mais dependente da qualidade da matéria-prima (LORD, 2003; RIETER, 2017).

Dessa forma, observa-se que o número de etapas de estiragem constitui um fator determinante no desempenho da fiação open-end, estabelecendo um compromisso direto entre qualidade do fio e eficiência produtiva (LAWRENCE, 2010).

5.2.1 Linha de abertura, limpeza e mistura

A Linha de Abertura, Limpeza e Mistura, frequentemente denominada blowroom no jargão industrial, constitui o estágio inicial e um dos mais críticos no processamento de fibras de algodão destinadas à produção de fios para tecidos denim (Figura 12).

Figura 12 - Linha de abertura

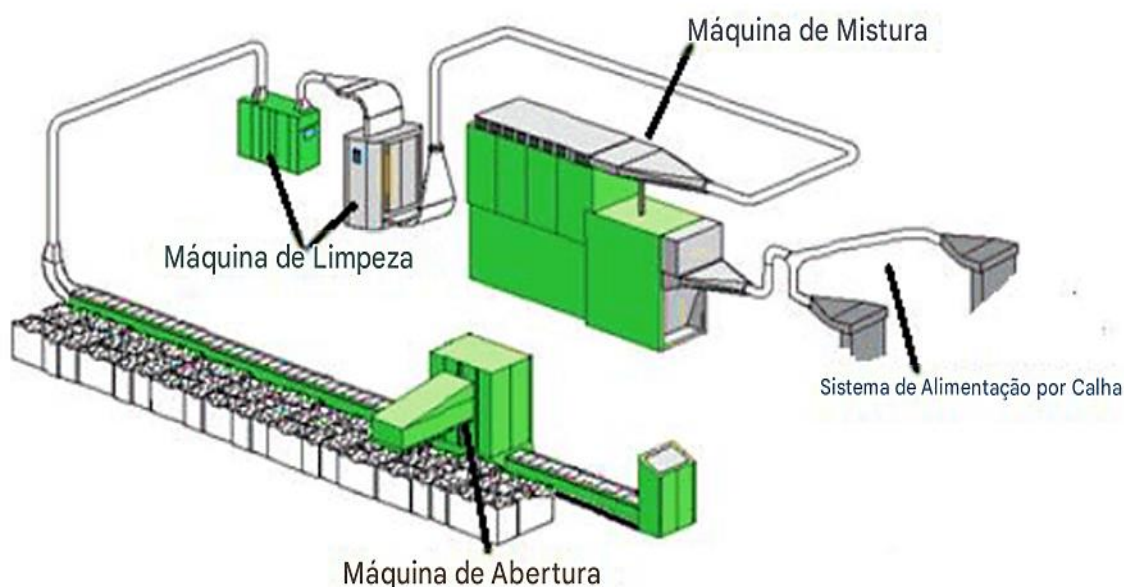


Fonte: RIETER (2025).

A complexidade desta etapa reside na necessidade de transformar fardos de fibras densamente compactados em um fluxo contínuo e homogêneo de tufo pequenos e limpos, prontos para a cardagem. Conforme elucidado por LAWRENCE (2003), a natureza técnica deste processo fundamenta-se na abertura progressiva dos fardos, onde a separação das fibras é acompanhada pela remoção sistemática de

impurezas extrínsecas, como fragmentos de cascas, folhas, poeira e sementes. No contexto específico da produção de denim, que exige fios de alta resistência e uniformidade para suportar as tensões dos teares de alta velocidade, a eficiência desta linha preparatória é o que determina a viabilidade econômica e a qualidade estética do produto final. Os objetivos estratégicos da linha de abertura transcendem a simples limpeza. A busca pela uniformidade e homogeneização é imperativa, especialmente quando se lida com lotes de algodão de diferentes origens ou características físicas. LORD (2003) destaca que a mistura eficaz é a única salvaguarda contra variações de tonalidade no tingimento e irregularidades estruturais no fio. Em tecidos denim, onde o aspecto visual e a consistência da cor índigo são parâmetros de valor, qualquer falha na homogeneização dos lotes na sala de abertura manifestar-se-á como defeitos de "barramento" ou variações de cobertura no tecido acabado. Portanto, a linha de abertura atua como um filtro técnico e um equalizador de propriedades, garantindo que a matéria-prima que alimenta a fiação open-end possua uma base estatística de propriedades físicas constante conforme demonstra a Figura 13. Do ponto de vista dos princípios operacionais, a linha de abertura opera sob a interação complexa de forças mecânicas e pneumáticas.

Figura 13 - Princípios mecânicos de abertura e limpeza



Fonte: Adaptado de KIRON (2012).

A ação mecânica é exercida por batedores (beaters) de diversos tipos, que utilizam pinos, dentes ou lâminas para golpear os tufo de fibra contra grelhas ou facas de limpeza. LAWRENCE (2003) explica que a eficácia da remoção de impurezas depende da força centrífuga gerada durante o batimento, a qual projeta as partículas mais densas (impurezas) para fora do fluxo de fibras, enquanto o fluxo de ar pneumático transporta as fibras mais leves para a próxima etapa. A gestão equilibrada dessas forças é o que permite a limpeza sem causar danos excessivos às fibras, como o rompimento ou a formação de neps, que são pequenos emaranhados de fibras imaturas ou danificadas que prejudicam a aparência do fio. A configuração dos equipamentos em uma linha de abertura moderna é sequencial e especializada. Conforme demonstrado na Figura 14, o processo inicia-se com os abridores de fardos automáticos, que retiram pequenas camadas de fibra de uma linha de fardos dispostos no chão, garantindo uma mistura inicial proporcional.

Figura 14 - Abridor alimentador automático



Fonte: Adaptado de AMPA; IMAMT (2014).

Seguem-se os limpadores (cleaners) horizontais e verticais, cada um projetado para remover tipos específicos de impurezas com base no tamanho e na densidade. Os misturadores (blenders), por sua vez, utilizam câmaras de mistura ou sistemas de pesagem para garantir que a proporção de cada lote seja rigorosamente mantida. Sistemas pneumáticos de transporte interconectam esses equipamentos, utilizando

duto e ventiladores que não apenas movem a fibra, mas também auxiliam na remoção de poeira fina através de filtros de ar integrados, um aspecto vital para a saúde ocupacional e a limpeza do ambiente de fiação. A gestão da linha de abertura é pautada por parâmetros críticos que exigem monitoramento constante. A intensidade de batida, definida pela velocidade de rotação do batedor e pela distância entre o batedor e a faca de limpeza, deve ser ajustada de acordo com o nível de impurezas da matéria-prima. Uma intensidade excessiva pode levar ao encurtamento da fibra por quebra mecânica, enquanto uma intensidade insuficiente resulta em uma eficiência de limpeza baixa, deixando resíduos que causarão quebras na fiação. A proporção de lotes na mistura é outro parâmetro vital; LORD (2003) enfatiza que a precisão na alimentação dos misturadores é o que assegura a estabilidade das propriedades do fio a longo prazo. A eficiência de limpeza é medida pela relação entre a quantidade de impurezas removidas e a quantidade total presente inicialmente, sendo um indicador direto da performance técnica da linha. Finalmente, a relação causa-efeito entre a preparação da fibra e a qualidade do fio open-end é direta e severa. Na fiação por rotor, comum na produção de fios para denim, a presença de impurezas residuais causa o acúmulo de partículas no canal do rotor, gerando instabilidade produtiva e defeitos conhecidos como "moiras" ou irregularidades de massa.

Além disso, fibras danificadas por uma abertura agressiva reduzem a tenacidade do fio, tornando-o propenso a quebras durante o urdimento e a tecelagem. Como observa BORELLI (2024), a instabilidade produtiva gerada por uma limpeza ineficiente não apenas eleva os custos operacionais, mas também compromete a integridade estrutural do tecido denim, que deve ser robusto o suficiente para os processos de lavanderia industrial. Assim, a excelência na linha de abertura, limpeza e mistura é o alicerce sobre o qual se constrói a competitividade e a qualidade na indústria têxtil contemporânea.

5.2.2 Abertura individual das fibras

A abertura individual das fibras representa uma das operações mais decisivas dentro da preparação da matéria-prima para a fiação têxtil destinada à produção de tecidos denim de alta performance. Inserida nas etapas iniciais do processamento do

algodão, esta operação possui a responsabilidade fundamental de transformar grandes aglomerados compactados de fibras em uma massa progressivamente aberta, homogênea e tecnicamente adequada para os processos subsequentes de limpeza, cardagem e estiragem. Dentro da arquitetura produtiva da indústria têxtil, a abertura individual das fibras não pode ser compreendida apenas como uma ação mecânica de separação física, mas sim como um procedimento de refinamento estrutural que determina diretamente a eficiência operacional de toda a linha de fiação. Conforme destaca o AMPA e IMAMT (2014), a qualidade da individualização inicial influencia de maneira profunda a capacidade de remoção de impurezas, a preservação do comprimento efetivo das fibras e a estabilidade do processamento nas etapas posteriores. No contexto específico da fabricação de fios para denim, onde resistência mecânica, regularidade estrutural e comportamento tintorial são características indispensáveis, a eficiência da abertura inicial torna-se um dos pilares fundamentais para a obtenção de um produto final de elevado padrão técnico e estético.

A compreensão da abertura individual das fibras exige uma análise detalhada dos princípios físicos e mecânicos envolvidos na desagregação controlada da massa fibrosa. O algodão chega à indústria em forma de fardos altamente compactados, nos quais milhões de fibras encontram-se comprimidas sob intensa pressão mecânica. A função dos sistemas de abertura consiste justamente em reduzir progressivamente o tamanho desses blocos fibrosos sem provocar danos excessivos à estrutura natural das fibras. Conforme observa o AMPA e IMAMT (2014), o princípio operacional ideal baseia-se na realização de múltiplas etapas graduais de abertura, evitando ações bruscas capazes de romper fibras maduras ou gerar aumento excessivo de neps e partículas fragmentadas. Dessa forma, a individualização das fibras transforma-se em um delicado equilíbrio entre eficiência de separação e preservação estrutural, no qual o excesso de energia mecânica pode comprometer severamente a qualidade da matéria-prima destinada à fiação. Podemos observar na Figura 15 sob a ótica dos equipamentos industriais, o sistema de abertura revela-se uma sequência altamente sincronizada de máquinas projetadas para atuar progressivamente sobre os tufo de algodão.

Figura 15 - Sala de abertura

Fonte: AMPA; IMAMT (2014).

O processo inicia-se nos abridores automáticos, responsáveis pela retirada controlada de pequenas porções de fibra diretamente dos fardos compactados. Em seguida, os tufo passam por sistemas de limpeza preliminar compostos por cilindros batedores, grelhas e correntes de ar que promovem a separação inicial das fibras e a eliminação parcial de impurezas grosseiras, como fragmentos vegetais, poeira e partículas contaminantes. Conforme ressalta o AMPA e IMAMT (2014), a eficiência dessa etapa depende diretamente da regulagem da intensidade de batimento e da velocidade periférica dos elementos mecânicos envolvidos. No segmento denim, onde os fios precisam suportar elevadas cargas de tensão durante os processos de tecelagem e beneficiamento industrial, a preservação do comprimento das fibras assume importância crítica, tornando indispensável o controle rigoroso da agressividade mecânica aplicada na abertura.

A dinâmica da abertura individual das fibras também está intimamente relacionada ao controle do fluxo aerodinâmico dentro da linha de preparação. Os sistemas pneumáticos utilizados no transporte do algodão exercem papel fundamental na dispersão progressiva dos tufo e na alimentação uniforme das máquinas subsequentes. De acordo com o AMPA e IMAMT (2014), a estabilidade do transporte pneumático contribui significativamente para evitar concentrações irregulares de massa fibrosa, reduzindo oscilações de alimentação que poderiam comprometer a

homogeneidade do processamento posterior. Além disso, a circulação controlada do ar auxilia na remoção de poeira fina e partículas leves, promovendo melhorias tanto na qualidade do material quanto nas condições ambientais da produção têxtil. Nesse contexto, a engenharia da abertura individual das fibras ultrapassa a simples ação mecânica de separação, incorporando princípios de dinâmica dos fluidos e controle operacional de alta precisão.

Ao analisar os parâmetros técnicos envolvidos nesta etapa, torna-se evidente que a relação entre produtividade e preservação da fibra constitui um dos maiores desafios da indústria de fiação moderna. A busca por elevadas capacidades produtivas frequentemente pressiona o aumento da velocidade dos cilindros abridores e da intensidade de batimento, porém o excesso de energia mecânica pode resultar em consequências severas para a qualidade final do fio. O AMPA e IMAMT (2014) adverte que a abertura excessivamente agressiva favorece o rompimento de fibras maduras, eleva a geração de fibras curtas e aumenta significativamente a incidência de neps, elementos que comprometem diretamente a regularidade da fiação e a resistência estrutural dos fios denim. Por outro lado, uma abertura insuficiente reduz a eficiência de limpeza e dificulta a individualização adequada das fibras, sobrecarregando os processos posteriores de cardagem e estiragem. Dessa forma, o ajuste operacional dos equipamentos deve ser conduzido com extremo rigor técnico, considerando características como comprimento da fibra, grau de maturidade do algodão, umidade ambiente e capacidade de processamento da linha produtiva.

As consequências de falhas na abertura individual das fibras propagam-se por toda a cadeia de fiação e manifestam-se de maneira direta na qualidade do tecido denim acabado. A presença de tufo parcialmente abertos compromete a eficiência da cardagem, reduzindo a capacidade de paralelização das fibras e aumentando a incidência de irregularidades lineares na fita. Além disso, a permanência de impurezas vegetais e partículas contaminantes favorece o surgimento de defeitos visuais após os processos de tingimento com índigo e lavanderia industrial. Segundo o AMPA e IMAMT (2014), o excesso de neps gerado por uma abertura inadequada constitui um dos principais fatores responsáveis pelo aparecimento de pontos brancos e falhas tintoriais no tecido denim, reduzindo significativamente o valor comercial do produto final. A instabilidade da alimentação também pode provocar oscilações operacionais

nas máquinas de fiação open-end e anel, elevando os índices de ruptura e diminuindo a eficiência produtiva da indústria.

A análise técnica da abertura individual das fibras demonstra que esta etapa representa muito mais do que uma simples preparação preliminar da matéria-prima. Trata-se de um processo de engenharia responsável por estabelecer as bases estruturais da qualidade do fio, influenciando diretamente parâmetros como resistência mecânica, regularidade linear, absorção tintorial e estabilidade operacional de toda a cadeia produtiva. A individualização eficiente das fibras cria as condições necessárias para que os processos subsequentes atuem de maneira otimizada, permitindo que a cardagem, a estiragem e a fiação alcancem elevados níveis de desempenho técnico. Conforme enfatiza o AMPA e IMAMT (2014), o domínio desta operação depende da integração precisa entre conhecimento da matéria-prima, controle operacional e manutenção adequada dos sistemas mecânicos envolvidos.

Em última análise, a abertura individual das fibras pode ser compreendida como o primeiro grande filtro de qualidade da indústria de fiação têxtil voltada ao denim. A eficiência desta etapa determina não apenas a limpeza inicial da matéria-prima, mas também a preservação das propriedades físicas essenciais para a construção de fios resistentes, uniformes e capazes de suportar as exigências mecânicas e químicas impostas pelos processos modernos de produção de jeanswear. A estabilidade da fiação, a uniformidade do tingimento e a durabilidade do tecido encontram suas origens na precisão técnica aplicada à separação inicial das fibras de algodão. Conforme conclui o AMPA e IMAMT (2014), a excelência na abertura da matéria-prima constitui um dos fundamentos indispensáveis para a obtenção de padrões industriais de classe mundial, nos quais cada variável operacional representa um compromisso direto com a qualidade final do produto têxtil.

5.2.3 Transportes das fibras

O transporte das fibras constitui uma etapa intermediária essencial dentro da cadeia de processamento têxtil, desempenhando papel determinante na manutenção da continuidade operacional entre os sistemas de abertura, limpeza, cardagem e preparação da fita. Embora frequentemente percebido como um processo auxiliar de deslocamento físico da matéria-prima, o transporte das fibras possui relevância

técnica significativa, uma vez que influencia diretamente a regularidade da alimentação das máquinas, a preservação da integridade estrutural das fibras e a estabilidade do fluxo produtivo. No contexto da produção de fios destinados ao denim, onde a consistência do material fibroso é fator crítico para a resistência mecânica e uniformidade do tecido final, o transporte adequado torna-se uma condição indispensável para o desempenho global da linha de fiação. Conforme destaca o IMAMT (2018), a continuidade e a estabilidade do fluxo de fibras entre as etapas produtivas são fundamentais para evitar variações de massa e irregularidades que se propagam ao longo de todo o processo de fiação.

A compreensão técnica do transporte das fibras exige a análise dos princípios físicos e operacionais que regem o deslocamento controlado da matéria fibrosa em ambiente industrial. Após a etapa de abertura e limpeza inicial, as fibras encontram-se em estado de baixa densidade e elevada suscetibilidade a aglomerações ou dispersões descontroladas. O sistema de transporte tem como função reorganizar esse fluxo, garantindo que o material seja conduzido de forma homogênea até os equipamentos subsequentes. Em muitos sistemas industriais, esse deslocamento ocorre por meio de mecanismos pneumáticos, nos quais o fluxo de ar é utilizado como meio de condução das fibras ao longo de tubulações fechadas. Conforme observa o AMPA e IMAMT (2014), a eficiência desse processo depende diretamente do equilíbrio entre velocidade do ar, pressão negativa e densidade de material transportado, uma vez que desequilíbrios nesses parâmetros podem resultar em segregação de fibras, acúmulo de resíduos ou variações na alimentação das máquinas subsequentes.

Sob a perspectiva dos sistemas industriais, o transporte das fibras é sustentado por uma infraestrutura composta por dutos, ventiladores, filtros e dispositivos de controle de fluxo que operam de forma integrada. Os ventiladores industriais exercem a função de gerar a diferença de pressão necessária para o deslocamento do material fibroso, enquanto os sistemas de filtragem garantem a separação entre fibras e partículas indesejadas transportadas pelo fluxo de ar. O controle da velocidade de transporte é um dos fatores mais críticos desse processo, pois velocidades excessivas podem provocar danos mecânicos às fibras, enquanto velocidades insuficientes podem causar entupimentos e acúmulo de material nos dutos. Segundo o AMPA e IMAMT (2014), a estabilidade do transporte pneumático é determinante para a

uniformidade da alimentação da carda e das etapas subsequentes, sendo qualquer variação abrupta capaz de comprometer a continuidade do processo produtivo.

No segmento de produção de denim, o transporte das fibras assume importância ainda mais significativa devido às exigências de alta regularidade do fio e resistência às etapas subsequentes de beneficiamento. O jeanswear moderno, submetido a processos intensivos de lavagem, abrasão e tingimento com corantes índigo, exige fios produzidos a partir de fibras cuja integridade estrutural tenha sido preservada ao longo de toda a cadeia produtiva. Nesse contexto, o transporte inadequado pode gerar segregação de fibras curtas, acúmulo de impurezas ou variações de densidade que se refletem diretamente na qualidade final do tecido. Conforme ressalta o AMPA e IMAMT (2014), a instabilidade no fluxo de transporte pode resultar em alimentação irregular das máquinas de cardagem e fiação, comprometendo a homogeneidade do fio e aumentando a incidência de defeitos estruturais no tecido acabado.

A análise dos parâmetros operacionais do transporte das fibras evidencia a necessidade de controle rigoroso das variáveis envolvidas no processo. Entre os fatores mais relevantes destacam-se a velocidade do fluxo de ar, a pressão interna dos dutos, a taxa de alimentação de material e a eficiência dos sistemas de separação de impurezas. O desequilíbrio entre essas variáveis pode gerar efeitos acumulativos ao longo da cadeia produtiva, resultando em irregularidades de massa e instabilidade na fiação. O AMPA e IMAMT (2014) enfatiza que a manutenção de condições estáveis de transporte é indispensável para garantir a consistência do material fibroso e a eficiência das etapas subsequentes de processamento. Dessa forma, o transporte não pode ser compreendido isoladamente, mas sim como parte integrante de um sistema contínuo de controle da qualidade da fibra.

As consequências de falhas no transporte das fibras manifestam-se de forma progressiva ao longo da cadeia produtiva têxtil. A presença de variações no fluxo de alimentação pode comprometer a eficiência da cardagem, gerar irregularidades na fita e impactar diretamente a uniformidade da fiação. Além disso, o acúmulo de fibras em determinados pontos do sistema pode provocar paradas operacionais, redução da produtividade e aumento dos custos industriais. Segundo o AMPA e IMAMT (2014), a instabilidade no transporte está diretamente relacionada ao aumento de defeitos estruturais no fio, especialmente em aplicações de alta exigência técnica como o

denim, onde pequenas variações são amplificadas durante os processos de tingimento e acabamento. Dessa forma, o controle do transporte das fibras representa um elemento estratégico para a eficiência global da produção têxtil.

A análise técnica do transporte das fibras evidencia que esta etapa desempenha função muito mais complexa do que um simples deslocamento físico da matéria-prima entre máquinas. Trata-se de um sistema de integração logística e mecânica responsável por assegurar a continuidade, a regularidade e a estabilidade do fluxo produtivo. A eficiência deste processo influencia diretamente a qualidade final do fio, a uniformidade do tecido e o desempenho operacional de toda a cadeia de fiação. Conforme destaca o AMPA e IMAMT (2014), o domínio do transporte de fibras depende da integração entre conhecimento técnico da matéria-prima, controle preciso dos sistemas pneumáticos e manutenção adequada dos equipamentos industriais.

Em síntese, o transporte das fibras pode ser compreendido como uma etapa invisível, porém essencial, na construção da qualidade têxtil. Sua função vai além da simples movimentação de material, atuando como um mecanismo de estabilização do fluxo produtivo e de preservação das características físicas da fibra. A regularidade obtida nesta etapa sustenta a eficiência das operações subsequentes e garante a consistência necessária para a produção de fios destinados a tecidos denim de alta performance. Conforme conclui o AMPA e IMAMT (2014), a estabilidade do transporte é um dos fatores determinantes para a obtenção de padrões industriais elevados, nos quais a precisão operacional se traduz diretamente em qualidade final do produto têxtil.

5.2.4 Cardagem

O processo de cardagem, frequentemente reverenciado como o coração pulsante da fiação têxtil, desempenha um papel determinante e insubstituível na arquitetura de fios destinados à produção de tecidos denim de alta performance. Dentro da cadeia produtiva, a cardagem atua como o divisor de águas entre a massa desordenada de tufo provenientes da linha de abertura e a estrutura organizada e limpa necessária para as etapas subsequentes de estiragem e fiação. De acordo com o que se observa nas diretrizes técnicas, a natureza fundamental deste processo reside na individualização absoluta das fibras, um estágio onde a matéria-prima deixa

de ser tratada como um aglomerado para ser processada em sua unidade fundamental. Conforme destaca o IMAMT (2018), essa individualização é o alicerce para a remoção eficiente de impurezas remanescentes e para a eliminação de fibras excessivamente curtas, garantindo que apenas o material com potencial de contribuição estrutural siga no fluxo produtivo (Figura 16).

Figura 16 - Cardagem



Fonte: IFSC (s.d.).

No contexto específico do denim, que exige fios capazes de suportar as severas tensões mecânicas dos teares de alta velocidade e os processos químicos agressivos de lavanderia industrial, a cardagem não é apenas uma etapa de limpeza, mas um processo de refinamento de propriedades físicas. A compreensão profunda da cardagem exige uma análise detalhada dos princípios de ação das guarnições metálicas, conhecidas como card clothing. Estas guarnições, compostas por milhares de dentes de aço com geometrias precisamente calculadas, são responsáveis pela interação mecânica que define a qualidade da fita produzida. O princípio operacional baseia-se na passagem das fibras entre duas superfícies revestidas por esses dentes, que se movem em velocidades distintas ou direções opostas. Essa interação gera uma força de tração e fricção que obriga cada fibra a se separar de suas adjacentes, permitindo que impurezas microscópicas, como fragmentos de casca de semente e poeira fina, sejam projetadas para fora do fluxo principal. Segundo o IMAMT (2018), a

eficácia dessa ação cardante é o que determina a redução drástica no índice de neps, que são pequenos emaranhados de fibras que, se não eliminados nesta fase, manifestar-se-ão como defeitos visíveis e pontos de descontinuidade tintorial no tecido denim acabado. A ação das guarnições é, portanto, uma batalha microscópica pela pureza e pelo paralelismo, onde a geometria do dente e a densidade de pontas por polegada quadrada tornam-se variáveis de engenharia críticas para o sucesso da fiação. Ao analisar os equipamentos envolvidos, a carda moderna revela-se uma máquina de alta precisão composta por componentes que trabalham em harmonia sinérgica. O processo inicia-se no cilindro alimentador e no batedor de entrada, conhecido como licker-in, que realiza uma abertura preliminar agressiva antes de entregar as fibras ao cilindro principal. Este cilindro, de grande diâmetro e alta velocidade periférica, é o protagonista do processo, transportando as fibras para a zona de cardagem propriamente dita, onde interage com os flats ou chapéus. Os flats podem ser rotativos ou fixos e sua função é pentear as fibras contra a guarnição do cilindro principal, promovendo a paralelização e a captura de impurezas finas.

É nesta interface entre o cilindro principal e os flats que ocorre a mágica técnica da cardagem: a transformação de uma massa caótica em uma camada delgada e uniforme de fibras individualizadas (Figura 17).

Figura 17 - Formação da fita a partir do véu no processo de cardagem



Fonte: DREAMSTIME (2024).

Conforme ressaltado pelo IMAMT (2018), a precisão mecânica nesta zona é tão vital que variações de milésimos de milímetro nos ajustes podem comprometer toda a produção de um lote. Após essa fase, o cilindro doffer entra em ação, condensando as fibras cardadas e transferindo-as para o sistema de formação da fita, que as agrupa em uma estrutura contínua e leve, pronta para ser depositada nos vasos. Para o segmento de tecidos denim, a relação entre os parâmetros operacionais da carda e a qualidade final do produto é direta e inquestionável. A velocidade do cilindro principal e a taxa de produção em quilogramas por hora são variáveis que devem ser equilibradas com extremo rigor. Embora a busca por produtividade pressione o aumento das velocidades, o engenheiro têxtil deve considerar que o excesso de energia mecânica pode resultar no rompimento de fibras maduras e no aumento do conteúdo de fibras curtas, o que é desastroso para a resistência do fio de denim. O IMAMT (2018) adverte que o ajuste entre as guarnições, conhecido como setting, é o parâmetro mais sensível da operação. Um ajuste muito fechado aumenta a eficiência de limpeza e a eliminação de neps, mas eleva o risco de dano térmico e mecânico à fibra de algodão. Por outro lado, um ajuste muito aberto permite a passagem de impurezas que causarão instabilidade na fiação open-end ou anel, resultando em quebras frequentes e perda de eficiência no tear. Portanto, a gestão da cardagem para denim exige um monitoramento constante da carga de fibras sobre as guarnições e do estado de afiação dos dentes metálicos. A análise técnica das consequências de falhas no processo de cardagem revela uma complexa teia de relações de causa e efeito que impactam toda a viabilidade do produto têxtil. A presença de neps remanescentes, por exemplo, é um dos maiores vilões na produção de denim de alta qualidade. Estes emaranhados não apenas reduzem a resistência local do fio, criando pontos de ruptura, mas também agem como barreiras à penetração do corante índigo durante o tingimento em corda ou slasher. O resultado é o aparecimento de pontos brancos ou irregularidades de cor no tecido após o processo de lavanderia e estonagem, o que deprecia o valor comercial da peça. Além disso, a irregularidade de massa da fita de carda, se não controlada, propaga-se por todo o processo, gerando fios com variações de título que causam o indesejado efeito de "barramento" no tecido plano.

De acordo com o IMAMT (2018) a instabilidade na fiação é muitas vezes o sintoma final de uma cardagem negligenciada, onde a incapacidade de remover

poeira fina e microimpurezas leva ao acúmulo de resíduos nos rotores das máquinas open-end, provocando paradas constantes e queda na qualidade estrutural do fio. Dessa forma, aprofundar-se nos princípios operacionais da cardagem é reconhecer que a qualidade do denim nasce na precisão mecânica e no rigor dos parâmetros de preparação. A ação cardante, ao promover a limpeza profunda e a orientação longitudinal das fibras, prepara o substrato para que as etapas de estiragem possam atuar de forma eficiente, garantindo que o fio final possua a tenacidade necessária para suportar os processos de tecelagem e os acabamentos químicos e mecânicos. A integração fluida entre o conhecimento da matéria-prima e o domínio tecnológico da máquina permite que a cardagem atue como um filtro de excelência, eliminando o que é prejudicial e potencializando as virtudes naturais da fibra de algodão. Em última análise, a estabilidade do processo de fiação e a satisfação do consumidor final de jeanswear dependem da invisível, porém onipresente, eficácia dos dentes metálicos da carda. Conforme conclui o IMAMT (2018), a maestria na condução deste processo é o que diferencia uma indústria têxtil comum de uma unidade de produção de classe mundial, onde cada detalhe técnico é uma promessa de durabilidade e estética para o produto final.

5.2.5 Passadores I e II

Após a etapa de cardagem, as fitas produzidas seguem para os passadores I e II, equipamentos responsáveis pela regularização, paralelização e homogeneização da massa fibrosa no processo de fiação open-end. Essa etapa possui elevada importância técnica dentro da cadeia de preparação das fibras, pois atua diretamente na redução das irregularidades provenientes da carda e na estabilização da estrutura linear da fita destinada às etapas subsequentes da fiação. Conforme apresentado pela SEDUC-CE (2012), a uniformidade da fita constitui um dos fatores determinantes para a qualidade do fio produzido, especialmente em sistemas de elevada produtividade, como a fiação open-end (Figura 18).

Figura 18 - Passador

Fonte: IFSC (s.d.).

O passador I atua como a primeira etapa de equalização das fitas cardadas. Nesse processo, diversas fitas são reunidas e submetidas à estiragem controlada por cilindros alimentadores e estiradores, promovendo melhor distribuição das fibras e reduzindo variações de massa. Segundo a SEDUC-CE (2012), a função principal do passador consiste em melhorar a homogeneidade da fita por meio da combinação de diferentes massas fibrosas, permitindo maior regularidade ao produto intermediário. Essa operação contribui significativamente para o alinhamento das fibras e para a diminuição de irregularidades que poderiam comprometer a resistência e o desempenho do fio final.

Além da equalização da massa fibrosa, o passador I também auxilia no controle parcial de impurezas e resíduos presentes no material. No sistema open-end, a estabilidade da alimentação do rotor depende diretamente da limpeza e da uniformidade das fibras processadas. Nesse contexto, o IMAMT (2018) destaca que “é importante analisar o poder de limpeza entre e intrapassadores” (IMAMT, 2018, p. 170), evidenciando que a eficiência operacional dessa etapa interfere diretamente na qualidade da fita e na estabilidade da fiação.

O passador II complementa o processo iniciado no primeiro passador, promovendo nova estiragem e paralelização das fibras com o objetivo de reduzir ainda mais as irregularidades lineares da fita. De acordo com a SEDUC-CE (2012), a

repetição controlada da operação melhora significativamente a regularidade da massa fibrosa, proporcionando melhores condições para alimentação contínua das máquinas de fiação open-end. Dessa forma, o passador II atua como um refinamento técnico da preparação das fibras, assegurando maior homogeneidade estrutural ao material processado como ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Passador I e II



Fonte: IMAMT (2018).

Sob a ótica operacional, os passadores representam uma etapa estratégica para o controle da qualidade do fio. O IMAMT (2018) ressalta que a eficiência da estiragem, a estabilidade da alimentação e o controle da limpeza das fibras são fatores indispensáveis para minimizar defeitos, reduzir rupturas e assegurar estabilidade produtiva durante a fiação. No segmento denim, onde pequenas irregularidades podem gerar defeitos visuais perceptíveis após o tingimento com índigo, o controle rigoroso dos passadores torna-se ainda mais relevante para garantir uniformidade estética e resistência mecânica do fio produzido.

Assim, os passadores I e II desempenham papel fundamental na preparação da matéria-prima para a fiação open-end, consolidando a regularidade estrutural das fitas cardadas e contribuindo diretamente para a obtenção de fios mais uniformes, resistentes e compatíveis com os padrões de qualidade exigidos pela indústria têxtil contemporânea.

5.2.6 Trem de estiragem dos passadores

A compreensão técnica da preparação da fita exige o entendimento dos princípios mecânicos que regem a combinação, equalização e alimentação controlada das massas fibrosas. Após o processo de cardagem, as fitas produzidas apresentam inevitáveis variações de espessura e distribuição de fibras, resultado das próprias limitações físicas inerentes à abertura e individualização do algodão. A etapa de preparação atua justamente sobre essas irregularidades por meio da sobreposição e estiragem controlada de múltiplas fitas, promovendo um efeito estatístico de compensação de massa. Conforme ressaltado pelo IMAMT (2018), o princípio fundamental da equalização está baseado na redução do coeficiente de variação linear, permitindo que defeitos localizados sejam distribuídos ao longo do material e reduzidos em intensidade. Dessa forma, a alimentação simultânea de diversas fitas em sistemas de passadores ou reguladores transforma-se em uma operação matemática aplicada à engenharia têxtil, onde a homogeneidade final depende diretamente da estabilidade da alimentação e da precisão mecânica dos cilindros estiradores (Figura 20).

Figura 20 - Trem de estiragem dos passadores



Fonte: IMAMT (2018).

O conjunto de cilindros de estiragem, operando com diferenças progressivas de velocidade periférica, promove o alongamento controlado da massa fibrosa, permitindo que as fibras assumam posicionamento mais paralelo e uniforme.

Conforme observa o IMAMT (2018), a precisão geométrica entre os cilindros e a estabilidade da pressão aplicada sobre as fibras são fatores críticos para evitar deslizamentos irregulares e rupturas localizadas na estrutura da fita. No segmento denim, onde pequenas variações de massa podem resultar em defeitos visuais amplificados após o tingimento com índigo, o controle desta etapa assume importância absoluta para a estabilidade estética e estrutural do tecido.

Ao analisar os parâmetros operacionais da preparação da fita, torna-se evidente que a relação entre produtividade e qualidade exige equilíbrio extremamente rigoroso. A velocidade de alimentação das fitas e a taxa de estiragem devem ser ajustadas de maneira compatível com as características da matéria-prima utilizada, especialmente no caso de algodões destinados à produção de fios resistentes para denim. O IMAMT (2018) adverte que o excesso de estiragem pode provocar descontrole no movimento das fibras, gerando pontos de concentração de tensão capazes de comprometer a coesão da fita e aumentar significativamente a incidência de irregularidades lineares. Por outro lado, uma estiragem insuficiente reduz a capacidade de paralelização e mantém defeitos oriundos da cardagem, dificultando a obtenção de fios homogêneos nas etapas posteriores. Dessa forma, a alimentação da fita deve ser conduzida sob monitoramento constante, considerando variáveis como umidade ambiente, atrito entre fibras, carga mecânica dos cilindros e estabilidade da alimentação contínua.

5.2.7 Preparação e alimentação da fita da cardagem

A preparação e alimentação da fita constituem uma das etapas mais estratégicas e sensíveis dentro da cadeia de fiação têxtil voltada à produção de fios para tecidos denim de alta performance. Muito além de uma simples operação de transporte de material fibroso entre máquinas, este processo representa o elo responsável por preservar a regularidade estrutural conquistada nas etapas anteriores de abertura e cardagem, garantindo que a massa fibrosa siga para os sistemas de estiragem e fiação com estabilidade dimensional, homogeneidade linear e equilíbrio de massa. Dentro da arquitetura industrial da fiação, a preparação da fita atua como um mecanismo de equalização técnica, cuja finalidade é minimizar irregularidades provenientes da carda e assegurar que o fluxo de fibras mantenha comportamento

previsível sob elevadas velocidades produtivas. Conforme destaca o IMAMT (2018), a eficiência dessa etapa é determinante para a estabilidade operacional das máquinas subsequentes, uma vez que qualquer oscilação na uniformidade da fita tende a amplificar-se progressivamente ao longo do processo de transformação têxtil (Figura 21).

Figura 21 - Fitas de alimentação



Fonte: INCOFIOS (s.d.).

No contexto específico da produção de denim, onde os fios precisam suportar intensos esforços de torção, tensão e abrasão durante a tecelagem e os acabamentos industriais, a preparação da fita deixa de ser apenas uma operação intermediária para assumir papel central na engenharia da qualidade do produto final.

A compreensão técnica da preparação da fita exige o entendimento dos princípios mecânicos que regem a combinação, equalização e alimentação controlada das massas fibrosas. Após o processo de cardagem, as fitas produzidas apresentam inevitáveis variações de espessura e distribuição de fibras, resultado das próprias limitações físicas inerentes à abertura e individualização do algodão. A etapa de preparação atua justamente sobre essas irregularidades por meio da sobreposição e estiragem controlada de múltiplas fitas, promovendo um efeito estatístico de compensação de massa. Conforme ressaltado pelo IMAMT (2018), o princípio fundamental da equalização está baseado na redução do coeficiente de variação

linear, permitindo que defeitos localizados sejam distribuídos ao longo do material e reduzidos em intensidade. Dessa forma, a alimentação simultânea de diversas fitas em sistemas de passadores ou reguladores transforma-se em uma operação matemática aplicada à engenharia têxtil, onde a homogeneidade final depende diretamente da estabilidade da alimentação e da precisão mecânica dos cilindros estiradores.

No ambiente industrial de produção de denim, as consequências de falhas na preparação e alimentação da fita manifestam-se de maneira direta sobre a qualidade visual e estrutural do tecido acabado. Irregularidades de massa não corrigidas nesta fase propagam-se por toda a cadeia produtiva, resultando em fios com variações de título que comprometem a uniformidade da tecelagem. O efeito conhecido como barramento, caracterizado pela presença de faixas visíveis no tecido plano após o tingimento, frequentemente possui origem em oscilações não controladas na alimentação das fitas. Segundo o IMAMT (2018), a instabilidade da alimentação também contribui para o aumento de rupturas durante a fiação open-end e anel, reduzindo significativamente a eficiência produtiva e elevando os índices de desperdício industrial. Além disso, a má equalização da massa fibrosa compromete a absorção homogênea do corante índigo, gerando diferenças de tonalidade perceptíveis após os processos de lavanderia e estonagem característicos do jeanswear contemporâneo.

A análise técnica desta etapa demonstra que a preparação e alimentação da fita representam muito mais do que uma simples transferência de material entre equipamentos industriais. Trata-se de um processo de refinamento estrutural responsável por consolidar a regularidade necessária para a construção de fios capazes de atender às exigências mecânicas e estéticas do mercado denim. A ação combinada de estiragem, paralelização e equalização permitem que a fita alcance um estado de estabilidade dimensional indispensável para a eficiência das etapas subsequentes. Conforme enfatiza o IMAMT (2018), o domínio técnico desta operação depende da integração precisa entre controle operacional, conhecimento das propriedades da fibra de algodão e manutenção rigorosa dos sistemas mecânicos envolvidos.

Em última análise, a preparação e alimentação da fita podem ser compreendidas como um mecanismo silencioso de estabilização da qualidade têxtil,

cuja eficácia determina diretamente a performance do fio e a excelência do tecido denim produzido. A uniformidade obtida nesta fase sustenta não apenas a resistência mecânica do fio, mas também a regularidade visual, a eficiência tintorial e a estabilidade produtiva de toda a cadeia de fiação. Dessa forma, a precisão no controle da alimentação e da estiragem transforma-se em um diferencial competitivo para a indústria têxtil moderna, onde a busca por produtividade deve coexistir com elevados padrões de qualidade técnica. Conforme conclui o IMAMT (2018), a excelência na preparação da fita é um dos pilares fundamentais para a obtenção de fios estáveis, tecidos uniformes e produtos denim capazes de atender às exigências estéticas e funcionais do mercado global (Figura 22).

Figura 22 - Uniformidade da fita

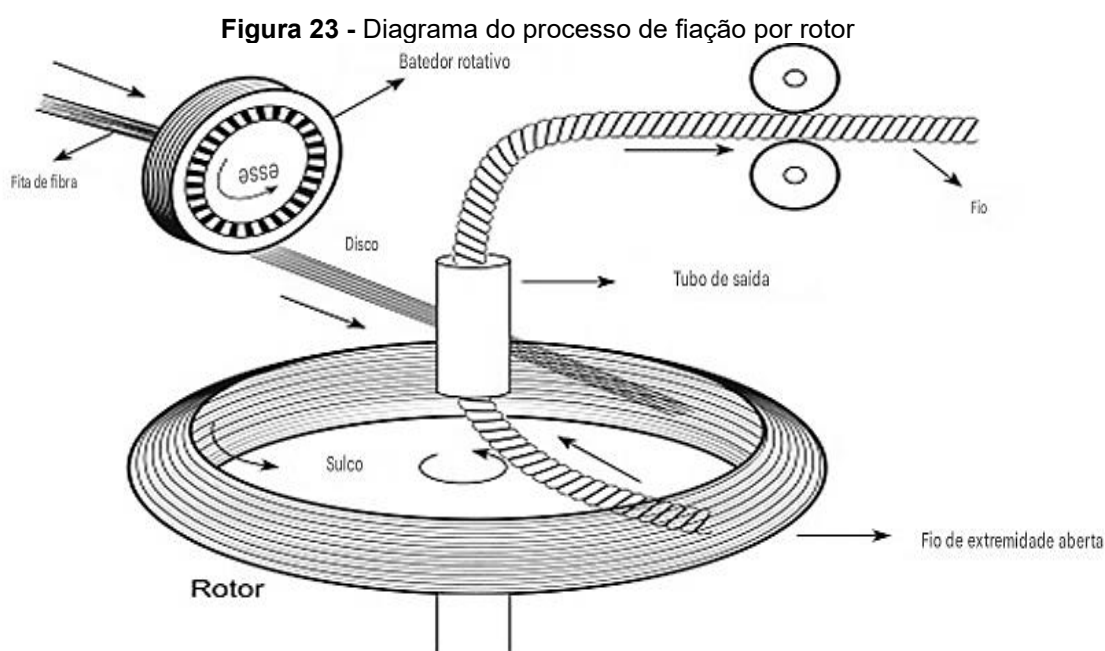


Fonte: Adaptado de RIETER (s.d.).

5.2.8 Formação do fio por rotor

A formação do fio no rotor constitui uma das etapas mais complexas e tecnologicamente relevantes do sistema de fiação open-end, desempenhando papel central na conversão da massa fibrosa previamente individualizada em um fio contínuo, uniforme e funcionalmente adequado às exigências da indústria têxtil moderna. Inserido no contexto da fiação por rotor, este processo representa a culminação de uma sequência de operações que incluem abertura, limpeza, transporte e alimentação da fibra, sendo responsável pela consolidação estrutural final

do fio por meio de forças aerodinâmicas e centrífugas altamente controladas. No segmento de produção de fios destinados ao denim, a formação no rotor assume importância ainda mais crítica, uma vez que a regularidade estrutural e a resistência mecânica do fio impactam diretamente a performance do tecido durante processos de tecelagem, tingimento e beneficiamento industrial. Conforme destaca o IMAMT (2018), a estabilidade da formação do fio é um dos principais determinantes da qualidade final do produto têxtil, especialmente em sistemas de alta produtividade como a fiação open-end (Figura 23).



Fonte: Adaptado de ELHAWARY (2015).

A compreensão do processo de formação do fio no rotor exige a análise detalhada dos princípios físicos que regem a deposição e a consolidação das fibras dentro da câmara de fiação. Após a alimentação contínua de fibras individualizadas, estas são transportadas por fluxo de ar até o interior do rotor, onde são submetidas a forças centrífugas geradas por sua alta rotação. Esse movimento promove a deposição das fibras na parede interna do rotor, formando uma fina camada fibrosa que, gradualmente, é convertida em fio por meio da torção contínua aplicada ao conjunto. Conforme observa o IMAMT (2018), a uniformidade dessa deposição é fundamental para evitar variações de massa e falhas estruturais no fio, sendo diretamente influenciada pela estabilidade do fluxo de alimentação e pela condição das fibras provenientes das etapas anteriores. Nesse sentido, a formação do fio no

rotor depende de um equilíbrio preciso entre dinâmica do ar, força centrífuga e características intrínsecas da fibra.

Sob a perspectiva dos equipamentos industriais, o sistema de fiação por rotor é composto por elementos altamente sincronizados, incluindo o canal de alimentação, a abertura final da fibra, a câmara de separação, o rotor de alta rotação e o sistema de retirada do fio formado (Figura 24).

Figura 24 - Filatório por rotor



Fonte: IMAMT (2014).

O rotor, elemento central do processo, opera em velocidades extremamente elevadas, gerando um campo centrífugo responsável tanto pela deposição quanto pela consolidação das fibras. A eficiência deste sistema depende da precisão geométrica do rotor, da estabilidade da rotação e da regularidade da alimentação de fibras. Segundo o IMAMT (2018), pequenas variações na geometria interna do rotor ou na taxa de alimentação podem gerar instabilidades na formação do fio, resultando em defeitos como espessamentos, afinamentos ou irregularidades periódicas ao longo da estrutura linear do fio.

No contexto da produção de fios para denim, a formação no rotor desempenha papel decisivo na definição das propriedades mecânicas e estéticas do tecido final. O denim, submetido a intensos processos de abrasão, lavagem industrial e tingimento com corantes índigo, exige fios com elevada resistência à tração e boa uniformidade

estrutural. A tecnologia open-end, por meio da formação no rotor, permite a produção de fios com características específicas de regularidade e eficiência produtiva, embora apresente particularidades estruturais distintas da fiação convencional por anel. Conforme ressalta o IMAMT (2018), a qualidade do fio formado no rotor está diretamente relacionada à homogeneidade da massa fibrosa alimentada, sendo qualquer variação nesta etapa capaz de comprometer a performance do tecido denim em processos posteriores de beneficiamento (Figura 25).

A análise dos parâmetros operacionais da formação do fio no rotor evidencia a importância do controle rigoroso das variáveis envolvidas no processo.

Figura 25 - Formação do fio por rotor



Fonte: Adaptado de IMAMT (2014).

A qualidade do fio resultante depende não apenas da eficiência do rotor, mas também da integridade das fibras fornecidas pelas etapas anteriores, reforçando o caráter sistêmico da cadeia produtiva têxtil. Conforme enfatiza o IMAMT (2018), a excelência na fiação open-end é resultado direto da estabilidade integrada de todas as etapas do processo, sendo a formação no rotor o ponto de consolidação final dessa cadeia tecnológica.

Em síntese, a formação do fio no rotor pode ser compreendida como o estágio final de transformação da matéria fibrosa em produto industrial funcional, no qual princípios físicos complexos são aplicados para garantir a continuidade, uniformidade

e resistência do fio. Sua eficiência determina diretamente a qualidade do tecido denim produzido, influenciando aspectos estruturais e estéticos do produto final. A estabilidade deste processo representa, portanto, um dos pilares fundamentais da fiação moderna, especialmente em sistemas de alta produtividade. Conforme conclui o IMAMT (2018), o domínio técnico da formação no rotor é indispensável para a obtenção de fios consistentes e tecidos de alto desempenho, nos quais a precisão operacional se traduz em qualidade industrial superior

5.2.9 Extração e bobinamento

A extração e o bobinamento constituem etapas finais e estrategicamente decisivas no sistema de fiação têxtil, desempenhando papel essencial na consolidação, organização e preparação do fio para as fases subsequentes de armazenamento, transporte e tecelagem. Inserido no contexto da fiação open-end e também de sistemas convencionais, este processo representa a transição entre a formação contínua do fio e sua adequação logística e industrial, garantindo que o material produzido atenda aos requisitos de resistência mecânica, regularidade estrutural e estabilidade dimensional exigidos pela cadeia produtiva têxtil. No segmento de produção de fios destinados ao denim, a eficiência da extração e do bobinamento assume importância crítica, uma vez que qualquer irregularidade nesta etapa pode comprometer o comportamento do fio durante a tecelagem e impactar diretamente a uniformidade do tecido final. Conforme destaca o IMAMT (2018), a estabilidade no processo de retirada e enrolamento do fio é determinante para a preservação de suas características estruturais, especialmente em sistemas de produção contínua e de alta velocidade. A compreensão técnica da extração e do bobinamento exige a análise detalhada dos princípios mecânicos que regem a retirada controlada do fio formado e sua posterior deposição em suportes de armazenamento, como bobinas ou cones. Após a formação do fio no rotor ou em sistemas equivalentes de fiação, o material passa por dispositivos de extração responsáveis por garantir uma saída contínua, uniforme e livre de tensões excessivas. Em seguida, o fio é conduzido ao sistema de bobinamento, onde é enrolado de forma ordenada em estruturas cônicas ou cilíndricas, permitindo sua posterior utilização em processos de tecelagem ou beneficiamento (Figura 26).

Figura 26 - Bobinamento

Fonte: BEYOĞLU (2025).

Conforme observa o IMAMT (2018), a regularidade da tensão aplicada durante a extração e o bobinamento é um fator crítico para evitar deformações estruturais no fio, sendo essencial para a manutenção de sua integridade física ao longo do tempo.

Sob a perspectiva dos equipamentos industriais, o sistema de extração e bobinamento é composto por uma série de mecanismos integrados, incluindo guias de fio, controladores de tensão, sensores de velocidade e unidades de enrolamento de alta precisão. A extração do fio exige controle rigoroso da força aplicada, de modo a evitar estiramentos indevidos ou relaxamento excessivo da estrutura fibrosa. Já o bobinamento depende da sincronização entre a velocidade de alimentação do fio e a rotação do suporte de enrolamento, garantindo a formação de bobinas compactas, estáveis e livres de irregularidades. Segundo o IMAMT (2018), a uniformidade do bobinamento está diretamente relacionada à estabilidade dos sistemas de controle de tensão, sendo qualquer variação capaz de gerar defeitos como sobreposição irregular, afrouxamento do fio ou deformações na estrutura da bobina.

No contexto da produção de fios para denim, a extração e o bobinamento desempenham papel fundamental na preservação das propriedades adquiridas ao longo das etapas anteriores de fiação. O denim, submetido a intensos processos de tingimento com corantes índigo e posteriores tratamentos mecânicos e químicos, exige fios com elevada resistência à tração e comportamento uniforme durante a

tecelagem. Irregularidades no bobinamento podem gerar variações de tensão no desenrolamento do fio, resultando em falhas de alimentação nos teares e comprometendo a uniformidade do tecido final. Conforme ressalta o IMAMT (2018), a qualidade do bobinamento influencia diretamente a eficiência dos processos subsequentes, sendo um dos fatores determinantes para a estabilidade produtiva da indústria têxtil.

A análise dos parâmetros operacionais da extração e do bobinamento evidencia a necessidade de controle preciso de variáveis como tensão do fio, velocidade de enrolamento, alinhamento dos guias e pressão de compactação da bobina. O equilíbrio entre essas variáveis garante a formação de bobinas regulares, com densidade homogênea e distribuição uniforme do fio ao longo de sua estrutura. O IMAMT (2018) enfatiza que o descontrole dessas variáveis pode gerar problemas acumulativos, como variação de densidade da bobina e instabilidade no desenrolamento, comprometendo a eficiência dos processos industriais subsequentes. Dessa forma, o controle técnico desta etapa é essencial para assegurar a continuidade e a estabilidade da produção têxtil.

As consequências de falhas na extração e no bobinamento manifestam-se de maneira significativa ao longo da cadeia produtiva, afetando tanto a eficiência operacional quanto a qualidade do produto final. Bobinas mal formadas podem gerar irregularidades na alimentação dos teares, provocando paradas frequentes, aumento de desperdícios e redução da produtividade industrial. Além disso, variações na tensão do fio durante o bobinamento podem comprometer sua resistência mecânica, resultando em quebras durante o processo de tecelagem e defeitos estruturais no tecido denim acabado. Segundo o IMAMT (2018), a instabilidade nesta etapa está diretamente associada ao aumento de falhas operacionais e à redução da qualidade global do produto têxtil, especialmente em sistemas de produção de alta velocidade.

A análise técnica da extração e do bobinamento demonstra que esta etapa desempenha função estratégica na consolidação final do fio, atuando como elo entre a fiação e os processos de transformação têxtil subsequentes. Trata-se de um sistema altamente controlado, no qual a precisão mecânica e a estabilidade operacional são fundamentais para garantir a integridade do material produzido. A eficiência desta etapa influencia diretamente o desempenho do fio durante o armazenamento, transporte e utilização industrial, reforçando sua importância dentro da cadeia

produtiva. Conforme destaca o IMAMT (2018), a qualidade do bobinamento é um dos fatores determinantes para a obtenção de fios estáveis e tecidos com elevado padrão de desempenho técnico.

Em síntese, a extração e o bobinamento podem ser compreendidos como etapas de estabilização final do fio, nas quais se consolida sua forma estrutural e se garante sua adequação às exigências industriais. Sua função vai além do simples enrolamento, representando um processo de controle de qualidade essencial para a preservação das propriedades adquiridas ao longo da fiação. A estabilidade obtida nesta etapa assegura a eficiência dos processos subsequentes e contribui diretamente para a qualidade do tecido denim produzido. Conforme conclui o IMAMT (2018), o domínio técnico da extração e do bobinamento é indispensável para a obtenção de fios

6 ANÁLISE TÉCNICA DO PROCESSO OPEN-END

6.1 Avaliação laboratorial dos fios de algodão

No processo de fiação open-end, os fios produzidos são submetidos a uma série de ensaios laboratoriais destinados à verificação de sua conformidade técnica, estabilidade estrutural e adequação aos requisitos industriais exigidos pelos processos subsequentes de transformação têxtil. A realização desses testes constitui uma etapa estratégica dentro do sistema de controle de qualidade, uma vez que as propriedades físicas, mecânicas e superficiais do fio influenciam diretamente a eficiência operacional em processos como urdimento, tecelagem, malharia e acabamento têxtil. Conforme discutido no *Manual-de-Beneficiamento-IMAMT*, a qualidade final do fio está diretamente relacionada às características intrínsecas da fibra de algodão, à eficiência das operações de beneficiamento e à estabilidade dos parâmetros operacionais da fiação, fatores que determinam o comportamento estrutural do produto ao longo de sua aplicação industrial (IMAMT, 2018). Nesse contexto, os ensaios laboratoriais não possuem apenas função corretiva ou classificatória, mas atuam como ferramentas técnicas de monitoramento contínuo da estabilidade produtiva. A análise sistemática dos resultados permite identificar desvios operacionais, avaliar o impacto do beneficiamento sobre a integridade física das fibras e verificar a uniformidade estrutural do fio produzido. Pequenas alterações relacionadas à presença de fibras curtas, impurezas, neps ou irregularidades na alimentação da manta podem provocar variações significativas na resistência, regularidade e comportamento superficial do fio, comprometendo diretamente sua processabilidade industrial.

• Contagem ou título do fio

O ensaio de contagem ou título do fio corresponde à determinação de sua densidade linear, parâmetro responsável por estabelecer a relação entre massa e comprimento do material produzido. Trata-se de um dos principais controles dimensionais da indústria têxtil, pois a espessura do fio influencia diretamente a gramatura do tecido, o rendimento produtivo, o consumo de matéria-prima e a

estabilidade dos processos subsequentes. A determinação do título pode ser realizada nos sistemas Tex, Ne ou Denier, utilizando métodos gravimétricos ou sistemas automatizados de medição eletrônica de alta precisão (Figura 27).

Figura 27 - Aspa para titulação de fibras têxteis



Fonte: TEXCONTROL (2024).

A estabilidade desse parâmetro é fundamental para assegurar padronização dimensional e conformidade com as especificações comerciais e normativas exigidas pelo mercado têxtil. Variações excessivas no título indicam instabilidade operacional, irregularidade na alimentação da fita ou oscilações durante o processo de formação do fio. Segundo o AMPA e IMAMT (2014), a preservação das propriedades físicas da fibra durante o beneficiamento exerce influência decisiva sobre a uniformidade dimensional do fio, especialmente no que se refere à manutenção do comprimento médio das fibras e à redução da fragmentação fibrosa causada por agressão mecânica excessiva (IMAMT, 2018)

• Resistência à tração e alongamento

A análise de resistência à tração e alongamento constitui um dos ensaios mais importantes para avaliação do desempenho mecânico do fio open-end. Esse teste tem como finalidade determinar a capacidade do fio suportar esforços mecânicos

progressivos até o rompimento, simulando as tensões aplicadas durante operações industriais de elevada velocidade, como urdimento, tecelagem, malharia e acabamento. Durante o ensaio são determinados parâmetros relacionados:

- à carga de ruptura;
- à tenacidade específica;
- ao alongamento percentual;
- ao índice RKM.

Os testes são realizados em dinamômetros eletrônicos de alta precisão, como os sistemas Tensorapid e Statimat, capazes de registrar automaticamente o comportamento mecânico do fio ao longo da aplicação de carga.

$$\text{Tenacidade} = \frac{\text{Carga de ruptura}}{\text{Título linear}}$$

A resistência mecânica do fio depende diretamente:

- da coesão interfibrilar;
- da uniformidade da torção;
- da integridade estrutural das fibras;
- da estabilidade da massa linear.

Conforme enfatizado no IMAMT (2018), operações inadequadas de beneficiamento podem provocar aumento significativo do índice de fibras curtas e danos mecânicos às fibras, reduzindo sua resistência individual e comprometendo a tenacidade final do fio produzido. Valores insuficientes de resistência ocasionam aumento dos índices de rompimento durante a tecelagem e a malharia, reduzindo a eficiência operacional e elevando custos produtivos relacionados a paradas de máquina e desperdícios industriais.

- **Regularidade de massa (U% e CVm%)**

A regularidade de massa constitui um dos principais parâmetros utilizados para avaliação da estabilidade estrutural dos fios open-end. Esse ensaio possui como objetivo analisar a uniformidade da massa linear ao longo do comprimento do fio, permitindo identificar irregularidades decorrentes de oscilações de alimentação, falhas na abertura de fibras ou instabilidades operacionais durante a fiação. A análise é realizada em equipamentos eletrônicos de elevada sensibilidade, como os sistemas Uster Tester, que utilizam sensores capacitivos para detectar pequenas variações de massa em alta velocidade. Os principais indicadores obtidos são o U% e o coeficiente de variação da massa (CVm%), parâmetros estatísticos utilizados para quantificar o grau de irregularidade estrutural do fio.

Valores elevados de CVm% indicam:

- maior irregularidade estrutural;
- instabilidade operacional;
- deficiência de paralelização;
- falhas na alimentação da manta;
- inadequada individualização das fibras.

Essas irregularidades comprometem diretamente a aparência visual do tecido, podendo provocar barramentos, falhas de tingimento e defeitos perceptíveis na superfície do produto final. O IMAMT (2018) destaca que a eficiência das operações de limpeza e preparação da fibra exerce influência decisiva sobre esse parâmetro, especialmente na eliminação de impurezas e preservação da integridade fibrosa durante o beneficiamento.

• Imperfeições (IPI – neps, thick places e thin places)

O ensaio de imperfeições, conhecido como IPI (*Imperfection Index*), consiste na quantificação eletrônica de defeitos estruturais ao longo do fio produzido. Esse teste avalia a ocorrência de:

- neps;
- pontos grossos (*thick places*);

- pontos finos (*thin places*).

Os neps correspondem a pequenos aglomerados de fibras formados principalmente em decorrência de excesso de agressão mecânica durante as etapas de beneficiamento, limpeza e cardagem do algodão. Já os pontos grossos e pontos finos representam variações localizadas da massa linear do fio, normalmente associadas à instabilidade operacional e à alimentação irregular da matéria-prima. Segundo o IMAMT (2018), práticas inadequadas de beneficiamento podem intensificar significativamente a formação de neps e fibras curtas devido à fragmentação excessiva da estrutura fibrosa. A presença elevada dessas imperfeições compromete:

- a eficiência da tecelagem;
- a estabilidade operacional;
- a uniformidade visual do tecido;
- a qualidade superficial do produto acabado.

Além disso, o aumento do índice de imperfeições eleva significativamente os índices de rompimento durante o processamento industrial.

• Pilosidade (Hairiness)

A pilosidade corresponde à quantidade de fibras projetadas para fora da superfície estrutural do fio e constitui um dos parâmetros mais relevantes para avaliação do comportamento superficial dos fios open-end. Esse ensaio permite analisar a protrusão fibrosa ao longo da superfície do fio, característica diretamente relacionada:

- ao comprimento médio das fibras;
- ao índice de fibras curtas;
- à eficiência da paralelização;
- à intensidade da torção aplicada.

A determinação da pilosidade é realizada por equipamentos ópticos e eletrônicos capazes de medir quantitativamente o nível de projeção fibrosa ao longo do fio. Elevados índices de pilosidade favorecem:

- formação de pilling;
- abrasão superficial;
- retenção irregular de corantes;
- aumento da geração de partículas fibrosas;
- alterações no toque do tecido.

O (IMAMT, 2018) ressalta que o excesso de fibras curtas decorrente de beneficiamento inadequado constitui um dos principais fatores responsáveis pela elevação da pilosidade em fios de algodão.

• **Torção do fio**

A medição da torção integra o conjunto de ensaios fundamentais para avaliação da coesão estrutural do fio open-end. A torção é responsável pela união das fibras ao longo da estrutura do fio e influencia diretamente propriedades como resistência mecânica, elasticidade, flexibilidade e estabilidade dimensional. O ensaio consiste na determinação do número de torções por unidade de comprimento, normalmente expresso em torções por metro (TPM).

$$\text{TPM} = \frac{\text{Número de torções}}{\text{Comprimento}}$$

Baixos níveis de torção provocam:

- redução da resistência mecânica;
- aumento da pilosidade;
- maior índice de rompimentos.

Por outro lado, torções excessivas resultam em:

- rigidez estrutural elevada;

- redução da flexibilidade;
- dificuldades de processamento.

O equilíbrio adequado da torção é indispensável para assegurar estabilidade operacional e desempenho satisfatório nos processos industriais subsequentes.

• **Classimat (classificação eletrônica de defeitos)**

Além dos ensaios convencionais, os fios open-end são frequentemente submetidos ao sistema Classimat, tecnologia eletrônica destinada à identificação automática de defeitos raros e severos ao longo do fio produzido. Esse equipamento realiza classificação eletrônica de:

- falhas críticas;
- irregularidades extensas;
- contaminações;
- defeitos estruturais severos.

O sistema permite monitoramento contínuo da estabilidade produtiva e identificação de problemas operacionais específicos que poderiam comprometer significativamente a qualidade do tecido final. Sua utilização contribui para:

- redução de defeitos;
- aumento da eficiência operacional;
- melhoria da uniformidade estrutural;
- maior estabilidade industrial.

A fiação open-end destaca-se pela elevada produtividade e redução de custos operacionais, sendo amplamente utilizada em aplicações industriais. Entretanto, sua eficiência está diretamente relacionada à qualidade da matéria-prima e ao controle do processo. Segundo o IMAMT (2018), impurezas e fibras curtas são fatores críticos que afetam negativamente o desempenho do fio.

Além disso, HABIB et al. (2024) demonstram que o uso de fibras recicladas, embora sustentável, pode comprometer propriedades mecânicas, exigindo maior controle operacional. Dessa forma, observa-se que o desempenho do sistema open-end depende da integração entre qualidade da fibra, parâmetros de processo e aplicação final, sendo essencial para a produção eficiente de tecidos como o denim

6.2 Garantia da qualidade e liberação técnica do fio para processos subsequentes

Após a realização dos ensaios laboratoriais, diversas medidas industriais são executadas com o objetivo de assegurar que o fio produzido apresente condições adequadas para os processos subsequentes de transformação têxtil. Essas ações envolvem procedimentos integrados de inspeção, monitoramento estatístico, rastreabilidade produtiva e controle operacional, constituindo um sistema estruturado de garantia da qualidade industrial. Conforme estabelecido no IMAMT (2018), a estabilidade da fiação depende diretamente da integração entre qualidade da matéria-prima, eficiência do beneficiamento e rigoroso controle das variáveis operacionais e laboratoriais. A garantia da qualidade não se restringe à análise final do produto, mas envolve monitoramento contínuo da estabilidade produtiva e prevenção de desvios operacionais capazes de comprometer a uniformidade estrutural do fio. Nesse contexto, os dados laboratoriais obtidos são utilizados como ferramentas estratégicas para controle estatístico do processo e tomada de decisões corretivas dentro do ambiente industrial.

• Liberação da produção e controle estatístico do processo

Inicialmente, os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais são comparados com especificações normativas internas e requisitos técnicos previamente estabelecidos para o produto. Essa etapa de liberação da produção utiliza ferramentas de Controle Estatístico de Processo (CEP), permitindo monitorar a estabilidade produtiva por meio de:

- cartas de controle;

- análise de tendências;
- estudos de capacidade do processo;
- monitoramento da variabilidade.

Quando são identificadas não conformidades, são implementadas ações corretivas envolvendo:

- ajustes na velocidade do rotor;
- regulação da alimentação da fita;
- controle da torção;
- manutenção dos sistemas de abertura e limpeza.

O monitoramento contínuo da variabilidade permite identificar tendências operacionais antes que estas comprometam significativamente a qualidade do lote produzido.

• **Inspeção visual e física das bobinas**

Além do controle estatístico, realiza-se inspeção visual e física das bobinas produzidas, verificando:

- integridade superficial do fio;
- presença de contaminações;
- qualidade das emendas;
- estabilidade dimensional;
- formação do bobinamento.

A formação adequada das bobinas é fundamental para garantir desempenho satisfatório durante o desenrolamento nos processos subsequentes. Bobinas com deformações estruturais, densidade irregular ou tensão inadequada podem provocar:

- rompimentos;
- falhas de alimentação;
- instabilidades operacionais;

- interrupções produtivas.

- **Controle da umidade relativa**

Outro fator de elevada importância corresponde ao controle da umidade relativa do ambiente industrial. A umidade influencia diretamente propriedades físicas do fio relacionadas:

- à resistência mecânica;
- à flexibilidade;
- à estabilidade dimensional;
- ao comportamento eletrostático.

Ambientes excessivamente secos favorecem a geração de eletricidade estática, dificultando o processamento das fibras e aumentando os índices de ruptura durante o processamento subsequente. O controle higroscópico adequado proporciona maior estabilidade operacional e reduz significativamente problemas relacionados ao manuseio industrial do fio.

- **Sistemas automáticos de limpeza e purga eletrônica**

Os sistemas automáticos de limpeza e purga eletrônica desempenham papel fundamental na garantia da qualidade estrutural do fio antes do próximo processo. Esses sistemas são capazes de identificar eletronicamente defeitos críticos ao longo do fio, realizando cortes automáticos e eliminação seletiva das imperfeições detectadas. Essa tecnologia reduz significativamente:

- a presença de pontos grossos;
- pontos finos;
- defeitos severos;
- irregularidades estruturais.

Além disso, contribui para:

- melhoria da uniformidade do fio;
- redução de falhas em teares;
- aumento da eficiência operacional;
- estabilidade dos processos subsequentes.

• **Controle do bobinamento**

O controle do bobinamento constitui uma etapa crítica da garantia da qualidade industrial. Durante essa operação são monitorados parâmetros relacionados:

- à tensão de enrolamento;
- à densidade da bobina;
- à estabilidade dimensional;
- à qualidade do desenrolamento.

Bobinas mal formadas comprometem o desenrolamento contínuo do fio e podem ocasionar:

- aumento de rompimentos;
- interrupções produtivas;
- falhas de alimentação;
- instabilidade operacional.

Dessa forma, a estabilidade do bobinamento influencia diretamente a eficiência das etapas posteriores da cadeia têxtil.

• **Rastreabilidade industrial**

Outro aspecto essencial corresponde à rastreabilidade industrial dos lotes produzidos. Os sistemas modernos de gestão da qualidade registram informações detalhadas relacionadas:

- aos parâmetros operacionais;

- à identificação das máquinas;
- ao histórico produtivo;
- aos resultados laboratoriais;
- à origem da matéria-prima utilizada.

Segundo O IMAMT (2018), a rastreabilidade constitui ferramenta indispensável para identificação de causas de defeitos e implementação de programas de melhoria contínua no ambiente industrial. Por fim, destaca-se que a garantia da qualidade na fiação open-end depende da integração sistêmica entre controle da matéria-prima, estabilidade operacional, monitoramento laboratorial e inspeção contínua do processo produtivo. A combinação dessas práticas permite reduzir defeitos, aumentar a eficiência industrial, minimizar perdas produtivas e assegurar que o fio apresente desempenho técnico adequado nos processos subsequentes de transformação têxtil.

7 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo analisar de forma aprofundada o processo de fiação open-end, enfatizando suas características operacionais, os princípios mecânicos envolvidos na formação do fio e a influência das propriedades físico-mecânicas da fibra de algodão sobre a qualidade final do produto têxtil. Ao longo do desenvolvimento deste estudo, buscou-se compreender como as diferentes etapas do fluxo produtivo, desde a preparação da matéria-prima até a formação do fio no rotor interferem diretamente na eficiência operacional, na regularidade estrutural do fio e no desempenho do tecido denim produzido industrialmente. Com base na análise bibliográfica e técnica realizada, conclui-se que o objetivo geral proposto foi plenamente alcançado, uma vez que o trabalho permitiu integrar fundamentos científicos, conceitos tecnológicos e aplicações industriais relacionadas à fiação open-end, demonstrando a relevância estratégica desse sistema para a indústria têxtil contemporânea.

No que se refere ao problema de pesquisa, que consistiu em compreender de que maneira as propriedades da fibra de algodão e os parâmetros operacionais do processo influenciam a qualidade e a estabilidade da fiação open-end, os resultados obtidos evidenciaram que existe uma relação direta entre a qualidade da matéria-prima, o controle das etapas de preparação têxtil e o desempenho final do fio produzido. Verificou-se que propriedades como comprimento, tenacidade, finura, maturidade, uniformidade, higroscopicidade, elasticidade e flexibilidade da fibra exercem influência determinante sobre a eficiência do processo, especialmente devido à elevada sensibilidade do sistema open-end às variações estruturais da matéria-prima (LAWRENCE, 2010; BELOT, 2018). Diferentemente da fiação convencional por anel, o sistema open-end apresenta menor capacidade de compensação de irregularidades fibrosas, tornando indispensável o controle rigoroso das características do algodão e das condições operacionais do rotor.

Os principais resultados observados ao longo do estudo demonstraram que a qualidade do fio open-end depende de uma interação complexa entre propriedades da fibra, estabilidade do fluxo fibroso e regulação mecânica dos equipamentos industriais. A análise do fluxo produtivo permitiu compreender que etapas como abertura, limpeza, cardagem, preparação e alimentação da fita possuem papel

fundamental na eliminação de impurezas, redução de neps, paralelização das fibras e controle da uniformidade de massa. Verificou-se ainda que a cardagem atua como uma das etapas mais críticas do processo, sendo responsável pela individualização eficiente das fibras e pela estabilidade da estrutura fibrosa que seguirá para a formação do fio. Da mesma forma, a preparação e equalização da fita demonstraram ser essenciais para minimizar irregularidades lineares e garantir estabilidade dimensional durante a alimentação do rotor (LORD, 2003; KLEIN, 2014).

Os resultados também evidenciaram que a dinâmica de formação do fio no rotor depende diretamente do equilíbrio entre forças centrífugas, atrito interfibra e comportamento aerodinâmico das fibras no interior da máquina. A estrutura do fio open-end, embora apresente menor resistência mecânica quando comparada ao fio produzido pelo sistema ring spinning, oferece vantagens significativas relacionadas à produtividade, regularidade, redução de custos operacionais e capacidade de processamento em larga escala (SAVILLE, 1999). Essas características justificam a ampla aplicação do sistema open-end na fabricação de tecidos denim, toalhas, malhas básicas e outros produtos têxteis de elevado volume produtivo.

Quanto à hipótese inicialmente considerada neste trabalho, verificou-se sua confirmação ao constatar que a qualidade da fibra de algodão e o controle técnico das etapas do processo exercem influência direta sobre a estabilidade operacional e sobre as propriedades finais do fio open-end. Confirmou-se, portanto, que o desempenho do sistema depende não apenas da modernização tecnológica dos equipamentos, mas principalmente da integração eficiente entre matéria-prima adequada, parâmetros operacionais corretamente ajustados e controle rigoroso da preparação têxtil. Além disso, observou-se que pequenas variações no comprimento da fibra, no índice de fibras curtas, na maturidade ou na uniformidade podem provocar impactos significativos na resistência do fio, na regularidade da massa linear e na eficiência da produção industrial (NUNES et al., 1999; KAYNAK et al., 2017).

Durante o desenvolvimento da pesquisa, algumas limitações foram identificadas. A principal delas refere-se à predominância de abordagem bibliográfica e documental, sem a realização de análises laboratoriais práticas ou testes industriais em ambiente fabril. Dessa forma, embora o estudo tenha proporcionado amplo aprofundamento técnico e teórico acerca do processo de fiação open-end, não foi possível realizar medições experimentais relacionadas à resistência do fio,

comportamento do rotor, índice de imperfeições ou desempenho produtivo em condições reais de operação. Também se destaca a limitação relacionada ao acesso restrito a informações industriais confidenciais sobre regulagens específicas de máquinas e parâmetros produtivos adotados por grandes indústrias têxteis.

Apesar dessas limitações, o estudo contribui significativamente para o entendimento técnico da fiação open-end, sobretudo ao reunir de maneira sistematizada informações relacionadas às propriedades da fibra, à preparação têxtil e à dinâmica de formação do fio no rotor. Nesse sentido, esta pesquisa apresenta importante contribuição acadêmica ao consolidar fundamentos científicos e tecnológicos frequentemente dispersos em manuais industriais, livros técnicos e artigos científicos especializados. Sob a perspectiva prática, o trabalho também contribui para profissionais e estudantes da área têxtil ao fornecer uma visão ampla e integrada sobre os fatores que influenciam a estabilidade operacional, a produtividade e a qualidade do fio open-end, especialmente na produção de denim.

Adicionalmente, o estudo evidencia a importância crescente da sustentabilidade na indústria têxtil contemporânea, principalmente diante da incorporação de fibras recicladas no processo de fiação. Observou-se que a utilização de algodão reciclado representa alternativa relevante para redução de impactos ambientais e reaproveitamento de resíduos têxteis, embora também introduza desafios relacionados à resistência mecânica, uniformidade e estabilidade estrutural do fio (HABIB et al., 2024). Dessa forma, a pesquisa reforça a necessidade de contínuo desenvolvimento tecnológico voltado ao equilíbrio entre produtividade industrial, qualidade do produto e responsabilidade ambiental.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a realização de pesquisas experimentais em ambiente industrial, envolvendo análises laboratoriais de resistência, alongamento, irregularidade e comportamento estrutural de fios produzidos com diferentes composições de fibras e regulagens de rotor. Sugere-se também o aprofundamento de estudos relacionados à aplicação de fibras recicladas no sistema open-end, especialmente quanto aos limites de incorporação sem comprometimento significativo da qualidade do fio. Além disso, futuras pesquisas podem explorar o uso de inteligência artificial, sensores industriais e sistemas automatizados de monitoramento aplicados à otimização da fiação open-end, contribuindo para o avanço da indústria têxtil dentro dos princípios da Indústria 4.0.

Por fim, conclui-se que a fiação open-end representa um dos sistemas mais relevantes da engenharia têxtil moderna, reunindo elevada produtividade, automação e viabilidade econômica para aplicações industriais em larga escala. Entretanto, sua eficiência depende diretamente da qualidade da matéria-prima, da estabilidade das etapas de preparação têxtil e do controle rigoroso dos parâmetros operacionais envolvidos na formação do fio. A compreensão aprofundada desses fatores torna-se essencial para garantir competitividade, qualidade e sustentabilidade à indústria têxtil contemporânea. Assim, o presente trabalho não apenas contribui para o fortalecimento do conhecimento técnico relacionado à fiação open-end, mas também reforça a importância da pesquisa científica como ferramenta indispensável para o desenvolvimento tecnológico e industrial do setor têxtil brasileiro e internacional.

REFERÊNCIAS

AMPA; IMAmt. *Manual de beneficiamento do algodão*. Cuiabá, MT: AMPA; IMAmt, 2014.

ARAÚJO, M. de; CASTRO, E. M. M. de. *Manual de engenharia têxtil*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1984. Disponível em: <https://catalogo.bnportugal.gov.pt/ipac20/ipac.jsp?profile=bn&index=.GW&term=126131>. Acesso em: 24 abr. 2026.

ARTZT, P. The influence of cotton properties on rotor spinning. In: *INTERNATIONAL COTTON CONFERENCE*, 29., 2008, Bremen. Proceedings [...]. Bremen: Bremer Baumwollbörse, 2008.

ASSAD, F. T.; ANDRADE, E. de B. e S. P.; ANDRADE, Z. N. de. Processamento do algodão para a produção têxtil. In: AZEVEDO, D. M. P. de; BELTRÃO, N. E. de M. (org.). *O agronegócio do algodão no Brasil: desafios e estratégias*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2012. p. 307–334.

BATALHA, M. O.; BUAINAIN, A. M. *Cadeia produtiva do algodão*. Brasília, DF: IEL; CNPq; FINEP; SEBRAE, 2007.

BELOT, Jean-Louis. *A indústria têxtil e a qualidade de fibra*. Cuiabá: IMAmt, 2018.

BESSEN, G. M. P.; LEYVA, E. C.; FIGUEIREDO, S. M. Desenvolvimento da produção de têxteis de algodão no Brasil. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 1995.

BEYOĞLU, Serkan. Yeni Rieter OMEGAlap E 40: penye vatkası üretmenin en iyi yolu. *Tekstil Teknik Dergisi*, Istanbul, 2025. Disponível em: <https://www.tekstilteknik.com.tr/yeni-rieter-omegalap-e-40-penye-vatkasi-uretmenin-en-iyi-yolu/>. Acesso em: 18 maio 2026.

BORELLI, Camilla. *Análise de processos têxteis e qualidade de fibras*. Americana: Fatec Americana, 2024.

CARVALHO, L. H. et al. *Cultura do algodoeiro*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2005.

COTTON GINS. Micronaire in cotton: why it matters for the spinning stage. 2026. Disponível em: <https://cottongins.org/blog/micronaire-cotton-spinning-stage-importance>. Acesso em: 23 abr. 2026.

COTTON INCORPORATED. *Life Cycle Assessment of Cotton Fiber & Fabric*. Cary, NC: Cotton Incorporated, 2012. Disponível em: <https://cottoncultivated.cottoninc.com/wp-content/uploads/2015/06/2012-LCA-Full-Report.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2026.

CUNHA, J. M. P. da; FREIRE, E. C. *A cultura do algodoeiro no Brasil*. Brasília, DF: Embrapa, 2011.

DREAMSTIME. Wool fibers enter carding machine in textile plant for further yarn production. 2024. Fotografia. Disponível em: <https://www.dreamstime.com/wool-fibers-enter-carding-machine-textile-plant-further-yarn-production-image>. Acesso em: 11 maio 2026.

ELHAWARY, I. A. Fibre to yarn. In: HUNTER, L. (ed.). *Textile terms and definitions*. 11. ed. Manchester: The Textile Institute, 2015.

GORDON, S.; COOKLIN, G. *Handbook of textile fibres: natural fibres*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.

GULATI, A. N.; IYER, K. R. K. *Fibre maturity*. New Delhi: Aditya Books, 1995.

HABIB, Ahsan et al. Sustainable production of open-end rotor yarn for denim with maximum utilization of recycled cotton sourced from pre-consumer hard waste. *Textile & Leather Review*, v. 7, p. 831–853, 2024.

INCOFIOS. Controle de qualidade. Indaial, [s.d.]. Disponível em: <https://www.incofios.com.br/tecnologia-e-inovacao/controle-de-qualidade/>. Acesso em: 18 maio 2026.

IFSC – INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA. *Apostila de MPTEX*. Florianópolis: IFSC, [s.d.]. Disponível em: https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/0/03/Apostila_de_MPTEx.pdf. Acesso em: 16 maio 2026.

IMAMT. *Manual de qualidade da fibra – Parte 3: a indústria têxtil e a qualidade da fibra*. Cuiabá, MT: IMAMT, 2018.

JACOBSEN, K. R. et al. Neps, seed-coat fragments, and non-seed impurities in processed cotton. *Textile Research Journal*, v. 71, n. 11, p. 955–960, 2001.

KAYNAK, H. K. et al. Effects of spinning technology on denim fabric performance. *Industria Textilă*, v. 68, n. 3, p. 197–203, 2017.

KIRON, Mazharul Islam. Blowroom: objectives, functions and operations. 2012. Disponível em: <https://textilelearner.net/blowroom-objectives-functions-operations/>. Acesso em: 8 maio 2026.

KLEIN, W. *Manual of textile technology: spinning*. Manchester: The Textile Institute, 2014.

LAWRENCE, C. A. *Fundamentals of spun yarn technology*. Boca Raton: CRC Press, 2003.

LAWRENCE, C. A. *Open-end spinning*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010.

LOPO, Wallace Nóbrega. Uso do PET reciclado em tecidos de malha. *REAI – Revista de Estudos Acadêmicos Interdisciplinar*, v. 1, n. 1, 2017. Disponível em: <https://periodicos.unifebe.edu.br/index.php/reai/article/view/640>. Acesso em: 16 maio 2026.

LORD, P. R. *Handbook of yarn production: technology, science and economics*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003.

NEVES, M. F. *Agronegócio do Brasil*. São Paulo: Saraiva, 2008.

NUNES, F. R. M. et al. Propriedades mecânicas das fibras de algodão. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 15., 1999, Águas de Lindóia. Anais [...]. 1999.

PAL, Supriya. *Technology of denim production: part I*. Ahmedabad: Fibre2Fashion, 2010.

RIETER. *Blowroom Line VARIOline: the variable concept for optimal fiber preparation*. Winterthur: Rieter Machine Works Ltd., 2025.

RIETER HOLDING AG. Spinning Mill Automation – Smart Spinning Mill. Winterthur: Rieter, [s.d.]. Disponível em: <https://www.rieter.com/products/smart-spinning-mill/spinning-mill-automation>. Acesso em: 20 maio 2026.

RIETER. *Rieter manual of spinning: volume 4 – rotor spinning*. Winterthur: Rieter Machine Works Ltd., 2017.

SAVILLE, B. P. *Physical testing of textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999.

SEDUC-CE. *Têxtil: tecnologia da fiação*. Fortaleza: SEDUC-CE, 2012. Disponível em: https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/textil_tecnologia_da_fiacao.pdf. Acesso em: 18 maio 2026.

SINFIOCE. Convenção coletiva de trabalho. Fortaleza, 2012. Disponível em: <https://www.sinfioce.org.br/>. Acesso em: 18 maio 2026.

TEXCONTROL EQUIPAMENTOS E CONTROLES DE QUALIDADE LTDA. Home. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://texcontrol.com.br/>. Acesso em: 18 maio 2026.

TESTEX TEXTILE. Spinning process overview: from fiber material to yarn. 2021. Disponível em: <https://www.testextextile.com/pt/spinning-process-overview-from-fiber-material-to-yarn/>. Acesso em: 20 maio 2026.

VITA CAMPO. Fio 100% algodão fios open end. Maringá, 2024. Disponível em: <https://www.vitacampo.com.br/produtos-cocari/fios/fio-100-algodao-fios-open-end-ne-41-a-301-100-algodao>. Acesso em: 18 maio 2026.