

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE BOBINAMENTO DE  
NÃOTECIDO SOBRE O DIÂMETRO FINAL DA BOBINA ATRAVÉS DE UM MÉTODO  
DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

por

Leonardo Guilherme Bohn Zanin

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Sobrenome, Nome do Autor, ano de nascimento-

Título principal: subtítulo / Nome e sobrenome do autor. Ano de conclusão.

n. de f. : il. color. (*“ilustrado” e “colorido” abreviado. Considere ilustrado se contiver ilustrações relevantes. Tabelas contendo apenas palavras e/ou números não são consideradas ilustrações. Caso não seja ilustrado ou esta seja em preto e branco, não mencionar; exemplos: “n. de f. ; altura...” ou “n. de f. : il. ; altura...”*) ; altura da encadernação ou das folhas em cm (*arredondando as frações para cima*)

Orientador: Xxxx Xxxx xx Xxxx. (*Apesar do AACR2 não destacar esta informação, a prática o registra*)

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Xxxx Xxxx, Curso de Xxxxxxxxxx, ano de conclusão.

Leonardo Guilherme Bohn Zanin

DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE BOBINAMENTO DE  
NÃOTECIDO NO DIÂMETRO FINAL DA BOBINA ATRAVÉS DE UM MÉTODO DE  
SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Processos de Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, novembro de 2021

Bohn Zanin, Leonardo Guilherme. **Determinação da Influência dos Parâmetros de Bobinamento de Nãotecido no Diâmetro Final da Bobina Através de Um Método de Superfície de Resposta**. 2021. 15 pgs. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## RESUMO

O processo de bobinamento é uma parte essencial de qualquer linha de produção de nãotecidos, a partir do qual é possibilitado o transporte e armazenagem dos produtos acabados na forma de bobinas. Apesar de existirem muitos estudos sobre a influência desse processo para as tensões internas da bobina e como essas influenciam sua estrutura e acarretam a ocorrência de defeitos de formação, pouco foi desenvolvido sobre como esses mesmos parâmetros afetam o diâmetro da bobina resultante. Este trabalho busca avaliar a influência dos principais parâmetros de bobinamento sobre o diâmetro, permitindo assim a predição e otimização de resultados futuros. Para a confecção do modelo foi utilizado um método de superfície de resposta que pudesse ser inserido no meio industrial, com pouco ou nenhum impacto sobre a rotina de produção. Observou-se que, dos três principais parâmetros para o processo de bobinamento, a compressão exercida sobre a bobina durante sua formação apresenta maior influência sobre o diâmetro que as demais, seguida pela tensão. O método de superfície de resposta escolhido foi suficiente para determinar com exatidão a influência individual das variáveis independentes e, conseqüentemente, definir a condição ótima para atingir valores máximos e mínimos de diâmetro.

Bohn Zanin, Leonardo Guilherme. **Assessment of Influence of Nonwoven Winding Parameters on the Final Roll Diameter Using a Response Surface Method**. 2021. 15 pgs. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## ABSTRACT

The winding process is an essential part of any nonwoven production line, and allows the transport and storage of finished products in the form of rolls. Although there are many studies on the influence of this process on the internal stresses of the roll and their influence on material structure and formation defects, little has been developed about how these same parameters affect the resulting roll diameter. This work aims to evaluate the influence of the main winding parameters on the diameter of the roll, thus allowing the prediction and optimization of future results. For the development of the model a response surface method that could be implemented in an industrial environment with small impact on the production routine was used. It was observed that, of the three main parameters of the winding process, NIP over the roll during its formation has more influence on the diameter than the others, followed by tension. The response surface method chosen was sufficient to accurately determine the individual influence of the independent variables and, consequently, to define the optimal condition to achieve maximum and minimum diameter values.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	1
<b>2.1. Não tecidos</b> .....	1
<b>2.1.1. História e Definição</b> .....	1
<b>2.1.2. Fabricação</b> .....	2
<b>2.1.3. Propriedades</b> .....	3
<b>2.2. Bobinadeira</b> .....	4
<b>2.2.1. Tecnologias</b> .....	4
<b>2.2.2. Parâmetros de processo</b> .....	5
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	7
<b>3.1. Definição de parâmetros e abordagem</b> .....	7
<b>3.2. Aquisição de dados</b> .....	8
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	9
<b>4.1. Resultados</b> .....	9
<b>4.2. Validação da Equação</b> .....	13
<b>4.3. Aplicabilidade na indústria</b> .....	14
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	15
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

Em um ambiente industrial de alta demanda como do mercado de não tecidos, onde estoques são pequenos e as produções são feitas sob demanda ininterruptamente, tempo de máquina parada não representa somente custo para o fabricante, mas também riscos de parada na linha de produção do cliente. Essa realidade ficou evidente durante a pandemia da Covid-19, quando o mercado de produtos médicos oriundos de não tecidos (aventais, máscaras, blocos cirúrgicos etc.) viu um aumento significativo no número de vendas, ao mesmo tempo que o número de fornecedores de não tecidos diminuía devido às medidas restritivas de comércio impostas pelos agentes governamentais. Essa realidade aumentou a dificuldade para realização de testes em máquina, ao mesmo tempo que demandou que soluções para aumentar a produtividade fossem desenvolvidas.

Em meio à recente alta de demanda percebeu-se que o fator limitante para a venda não era a baixa produtividade, mas sim o transporte do produto acabado. Na indústria de não tecidos e de outros materiais delgados similares como o papel, aço e tecidos em geral, o produto do processo de fabricação é acondicionado em bobinas para facilitar o transporte e armazenagem. Quando essas são produzidas para serem comercializadas (e não reutilizadas em outra etapa do processo interno da empresa fabricante), seus valores de largura, comprimento e peso objetivos são definidos pelo cliente para que esse possa utilizá-la como melhor lhe convir. Diferentemente das outras propriedades da bobina, o diâmetro é apenas especificado quanto ao seu valor máximo, para que caiba em outras máquinas. Dessa forma, é economicamente justificável produzir bobinas com a mesma quantidade de material, porém de menor diâmetro e que, portanto, ocupam menos espaço de armazenagem e podem ser transportadas em maior quantidade.

Com o objetivo de aumentar a capacidade de fornecimento de não tecidos para o mercado médico, esse trabalho busca determinar experimentalmente, através de um método de superfície de resposta, uma equação que rege a influência dos principais parâmetros de corte sobre o diâmetro final da bobina de um material específico. A partir desse levantamento, será determinado qual combinação de parâmetros resulta no menor diâmetro de bobina. Considerando as complicações apresentadas acima para a realização de testes em máquina, a abordagem para os testes também será avaliada quanto à sua capacidade de aplicação no ambiente industrial descrito.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Não tecidos

#### 2.1.1. História e Definição

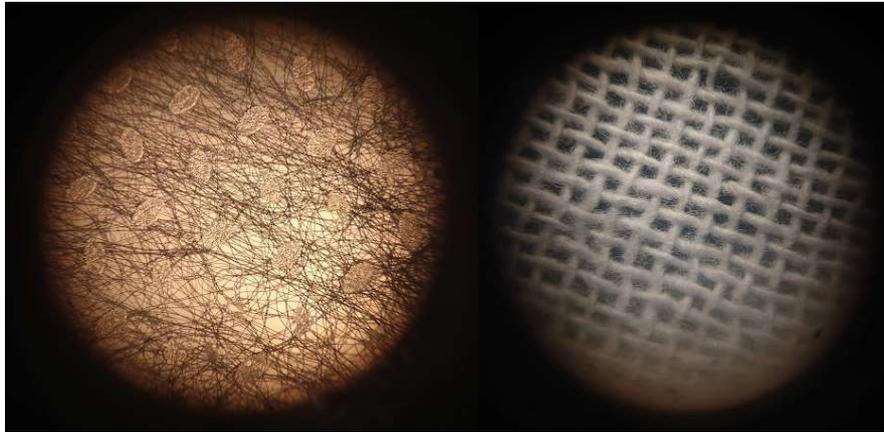
Muito similar ao não tecido e compartilhando uma parte de sua história, o papel é produzido e utilizado para os mais diversos fins desde 2400 a.C. Contudo, sua indústria surgiu efetivamente três mil e quatrocentos anos depois, em 1799, com a criação do primeiro equipamento para produção de papel. Alguns anos depois, em 1860, essa indústria evoluiu para o sistema de produção utilizado hoje com a criação da primeira máquina de produção contínua, conhecida como Fourdrinier.

No final da década de 50, utilizando o maquinário destinado à fabricação de papel, surgiram os primeiros desenvolvimentos de materiais cujas estruturas se assemelham às dos não tecidos, fabricados a partir de polpa de celulose, bambu, amianto, algodão, raiom, poliamida, vidro, poliéster e outras fibras químicas. Mais do que a indústria do papel, o que motivou a indústria têxtil a desenvolver os não tecidos foi a necessidade de simplificar o seu

processo de fabricação, desenvolver novos produtos, possibilitar a reciclagem de fibras e a aplicação desses em outras áreas da indústria. Logo no começo da década de 60 foram criadas as primeiras patentes para a fabricação de não tecidos, junto com o desenvolvimento de máquinas específicas para isso, sem mais depender de adaptações da indústria do papel.

A Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos (ABINT), referenciando a NBR-13370:2017, define não tecido como uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão). Ainda com o intuito de caracterizar os não tecidos, a ABINT, com base na NBR-12546:2017, apresenta como distinção mais clara entre esses e os tecidos suas estruturas, como apresentado na Figura 1. Enquanto a disposição das fibras ou filamentos que constituem os não tecidos é aleatória, os tecidos possuem fios entrelaçados em ângulos de 90° bem definidos, podendo ser oriundos de um único conjunto de fios paralelos, ou dois perpendiculares.

Figura 1 - Imagens das estruturas de não tecido (esq.) e tecido (dir.).



Fonte: Autoria própria

Não tecidos podem ser classificados de acordo com seu processo de fabricação, matérias primas, características das fibras/filamentos, processo de consolidação, gramatura, processo de transformação e/ou conversão. A aplicação desse material como insumo para outro processo depende muito das classificações anteriores, visto que essas alteram drasticamente as características do não tecido. Propriedades químicas como hidrofília, ou mecânicas como resistência à abrasão, são fundamentais para garantir eficiência e praticidade do produto. Os três grandes mercados aos quais a fabricação de não tecidos é destinada são: descartáveis higiênicos, médico-hospitalares e filtros em geral.

### 2.1.2. Fabricação

Uma das principais características dos não tecidos é a possibilidade de terem, teoricamente, qualquer relação de massa por área  $\rho$  (kg/m<sup>2</sup>), também chamado de gramatura. Isso ocorre porque contam com um sistema de fabricação por deposição sobre esteira, cuja velocidade influencia diretamente a formação do material, independente das demais etapas do processo. Essa relação é dada pela Equação 1.

$$\rho = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{X}_i}{L * V} \quad (1)$$

com  $\dot{X}_i$  [kg/s] sendo a vazão mássica de uma extrusora,  $L$  [m] a largura útil da esteira e  $V$  [m/s] a velocidade da esteira.

Dependendo do comprimento dessa esteira, é possível dispor várias unidades de produção em sequência, garantindo assim maior vazão de material e novas propriedades físicas e químicas ao produto caso essas extrusoras sejam de processos distintos das demais. Dentre os diferentes tipos de não tecidos, dois processos de fabricação se destacam dentre os demais por apresentarem melhora significativa de suas propriedades quando unificados e, conseqüentemente a isso, pelo seu produto dominar o mercado médico-hospitalar e higiênico. Esses são o *Spunbonded* (SB) e o *Meltblown* (MB).

No processo *Spunbonded* milhares de filamentos de material polimérico, os mais comuns sendo polipropileno (PP) e polietileno (PE), são extrudados e depositados ininterruptamente sobre uma esteira em velocidade constante. A gramatura oriunda desse processo é regida pela Equação 1. A área transversal dos filamentos depende do formato dos orifícios da matriz, do processo de resfriamento e do seu estiramento, que ocorre entre a matriz e a esteira. Dependendo da configuração da extrusora e da matriz é possível obter filamentos heterogêneos de dois polímeros. Essa variação do SB é denominada *BiComponent*. Assim como o anterior, o processo de *Meltblown* também ocorre através da extrusão de termoplástico, porém exclusivamente de PP e com diâmetros de filamentos significativamente inferiores ao *Spunbonded*. Essa característica torna o material resultante muito eficiente como elemento filtrante, porém com baixa resistência mecânica.

Como previamente mencionado, a combinação desses dois processos em um só material é bem comum dentro do mercado de não tecidos. A característica filtrante do MB, acompanhada da resistência mecânica oriunda do SB configura um material perfeito para aplicações em vestimentas com exposição a líquidos, como aventais médicos e alguns componentes de fraldas descartáveis.

### 2.1.3. Propriedades

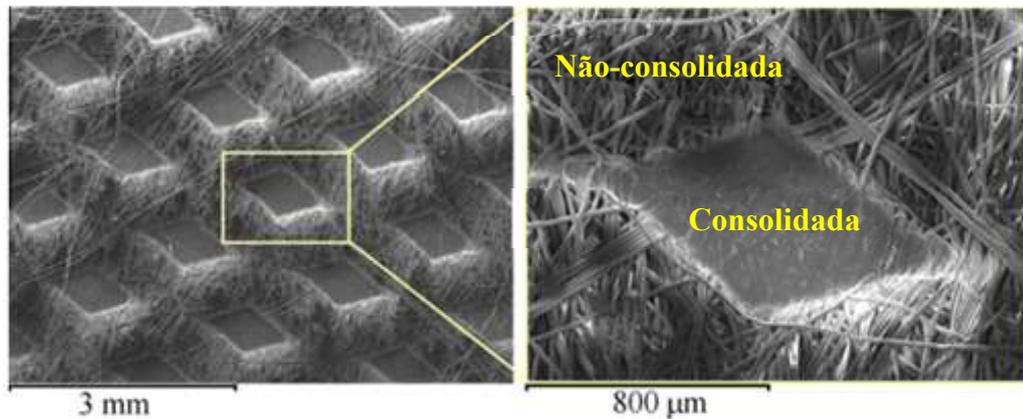
Segundo Adanur (1999), as características dos não tecidos são ditadas pelas propriedades dos materiais que constituem seus filamentos, bem como por suas orientações e distribuições. Os não tecidos são, em sua maioria, produzidos a partir de materiais poliméricos termoplásticos, principalmente o polipropileno (PP). Durante seu processo de transformação, desde a fusão até sua consolidação térmica, química ou mecânica, diversos estágios do processo acarretam alterações nas características dos filamentos individuais que constituem a manta, assim como afetam sua distribuição. Ainda, durante a etapa de consolidação, principalmente a térmica e a mecânica, a manta é dividida em duas partes distintas, a consolidada e a não consolidada, apresentadas na Figura 2. Demicri (2011) afirma que essas regiões diferentes apresentam comportamentos diferentes, fazendo com que os não tecidos tenham uma forma única de deformação, distinta de compósitos e tecidos.

Além dos efeitos da consolidação, a própria deposição do material o torna anisotrópico. Isso se deve à forma aleatória como ocorre a formação da manta ao final de cada unidade de extrusão, seja *Spunbonded* ou *Meltblown*. Demicri (2011) ainda afirma que essa característica é a principal responsável pela relação entre o sentido de produção e as propriedades mecânicas, como observado nos resultados de ensaios de tração de não tecidos.

Para Roisum (1990), as propriedades do material que mais influenciam a formação da bobina durante o processo de bobinamento são espessura, densidade, resistência a tração, alongamento, coeficiente de atrito e porosidade. O autor ainda complementa que, apesar dessas propriedades poderem ser medidas antes do processo para um sistema offline, elas variam ao longo dos sentidos longitudinal e transversal à produção. Por esse motivo, as principais causas de defeitos ou falhas de processo não são os valores médios das propriedades mecânicas, mas

sim suas variabilidades. A ocorrência dessas inconsistências de formação se torna menos comum conforme aumenta a gramatura do nãotecido, de modo que apesar da orientação dos filamentos definir o comportamento do material, a relação de peso por área define os modos de falha (Pourdeyhimi, 2019).

Figura 2 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura de solda térmica de um nãotecido.



Fonte: Adaptado de Demirci (2011)

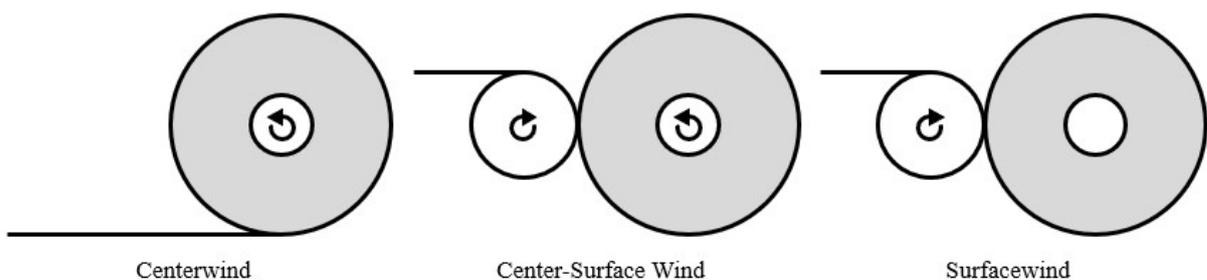
Por mais que as propriedades de um determinado nãotecido dependam das nuances do processo e das variabilidades intrínsecas a esse, para produtos distintos produzidos na mesma extrusora as propriedades dependem principalmente da densidade do material. Isso ocorre de tal forma que uma manta com  $40 \text{ g/m}^2$  tende a ter o dobro da resistência a tração no sentido MD e CD que um material  $20 \text{ g/m}^2$  (sempre sujeito a variações ao longo da manta).

## 2.2. Bobinadeira

### 2.2.1. Tecnologias

Roisum (1998) apresenta três classificações básicas de máquinas bobinadeiras. Essas se diferenciam pela existência, ou não, de um rolo em contato com a superfície da bobina no ponto por onde essa é bobinada, assim como considera o acionamento desse rolo ou do eixo da bobina, como apresentado pela Figura 3. Existem ainda algumas variações desses três, como o *Gap Wind*, onde o rolo extra característico do *Surfacewind* não está realmente em contato com a bobina em formação, ou uma variação do *Center-Surface Wind* onde apenas o eixo da bobina é acionado.

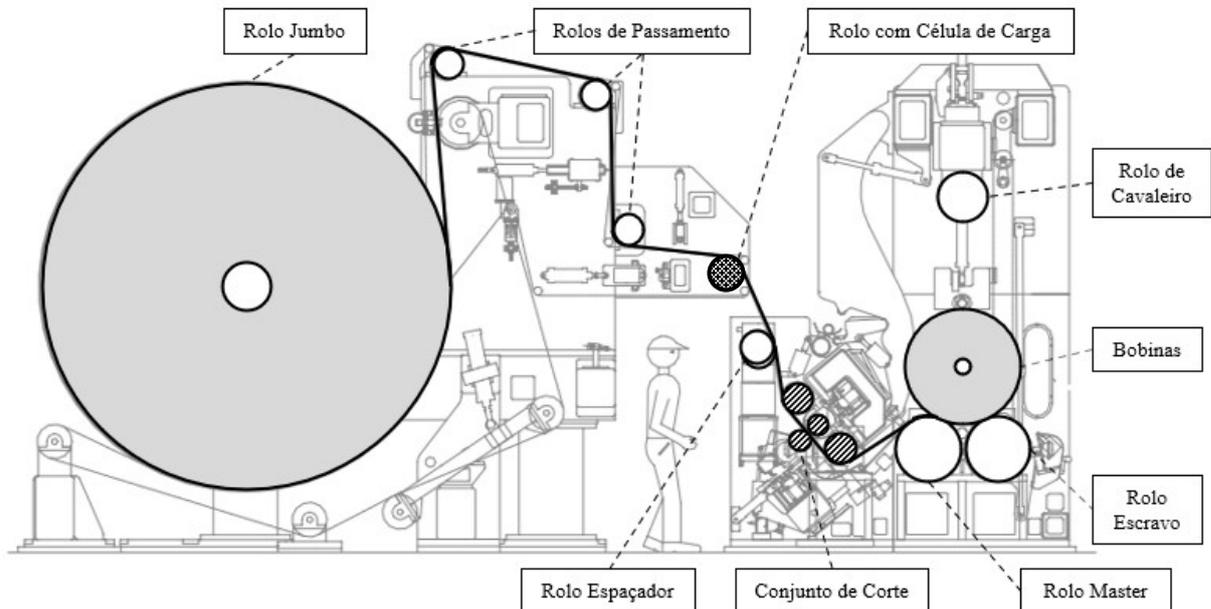
Figura 3 – Desenho esquemático das principais classes de bobinadeiras



Fonte: Adaptado de Roisum (1998)

Ainda segundo o autor existem diversas configurações de bobinadeiras, que inevitavelmente se enquadram em alguma das classes apresentadas anteriormente. Nas indústrias de não-tecido e papel, a mais difundida é a *Two-Drum* que, a critério do fabricante, pode ser tanto *Center-Surface Wind* quanto *Surfacewind*. Independente da classe ou configuração, a maioria dos componentes que integram essas máquinas tende a ser utilizada nos demais modelos, variando apenas em posição ou quantidade. A Figura 4 apresenta uma vista lateral de uma bobinadeira de configuração *Two-Drum*, assim como identifica seus principais componentes. Essa máquina é a mesma utilizada para a realização deste trabalho, e conta com uma estação prévia de desbobinamento de rolo jumbo por ser empregada em uma linha de operação offline. O rolo jumbo é, na verdade, a grande bobina resultante da extrusão.

Figura 4 – Desenho esquemático de rebobinadeira de dois tambores



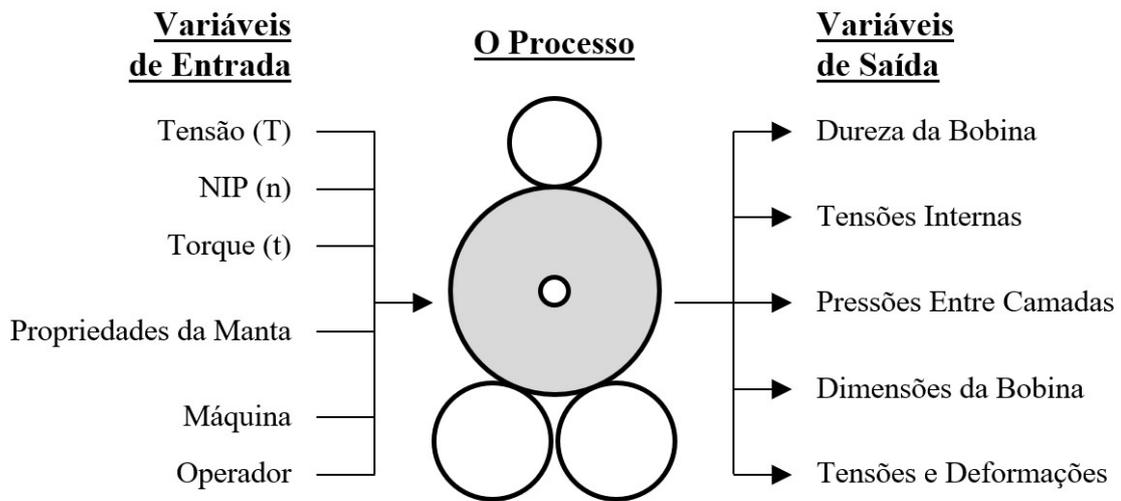
Fonte: Adaptado do manual da máquina

A principal característica do modelo *Two-Drum* e que o diferencia dos demais é que a bobina, durante seu processo de formação, se encontra sobre dois rolos, sendo o Master responsável por controlar sua velocidade tangencial. Dependendo da máquina utilizada é possível que exista um terceiro rolo, denominado Cavaleiro, responsável por pressionar a bobina contra o Master e o Escravo durante o bobinamento. Outros modelos conhecidos são o *Turret*, cujo eixo da bobina pode transladar ao longo do processo, possibilitando sua troca sem que seja necessário parar a máquina, e o *Duplex*, que possui mais de um eixo sendo bobinado simultaneamente.

### 2.2.2. Parâmetros de processo

O processo de formação de bobinas de materiais delgados pode ser simplificado por um sistema de caixa preta, onde apenas as variáveis de entrada e saída são consideradas, como apresentado na Figura 5. Nesse caso, em que uma bobinadora modelo *Two-Drum* é utilizada, as variáveis de entrada atuantes ao longo do processo que exercem influência sobre as características finais da bobina são a tensão ( $T$ ), o torque ( $t$ ), o termo conhecido como NIP ( $n$ ), as propriedades mecânicas do material e outras influências inerentes à máquina e ao processo. Como variáveis de saída existem todas as características estruturais e morfológicas da bobina, sendo a principal para este trabalho o diâmetro final.

Figura 5 – Modelo caixa preta da formação da bobina



Fonte: Adaptado de Roisum (1990)

Considerando que em um processo real de operação de máquina de rebobinamento não é possível variar as propriedades do material ou inerentes à máquina, as únicas entradas restantes são a tensão, o NIP, o torque e a influência do operador, sendo o efeito dessa última desprezível no uso de máquinas modernas. Para tornar mais fácil referenciar as três variáveis restantes, será usado o termo TNT. Essa abreviação é oriunda das iniciais dos termos em inglês *tension*, *NIP* e *torque* e é frequentemente empregada nessa área de pesquisa para referenciar essas variáveis.

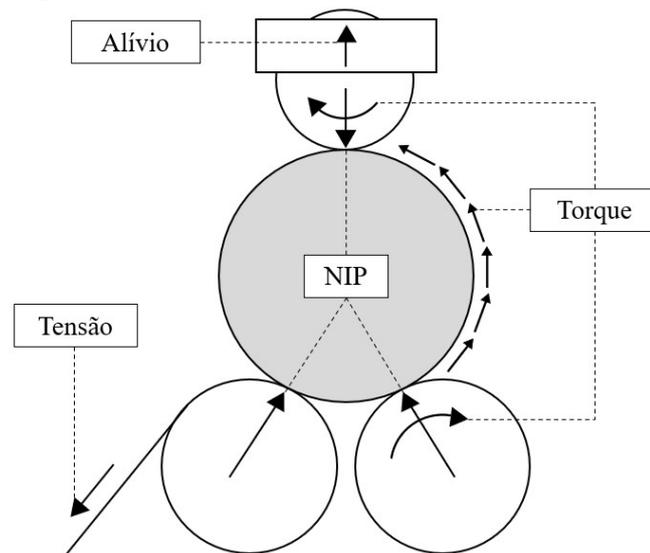
O termo chamado no meio técnico de tensão representa, na verdade, a razão entre a força de tração aplicada sobre a manta e sua largura, em N/m. Essa força de tração ocorre devido à diferença de velocidade tangencial entre os rolos acionados que delimitam cada seção do passamento da manta pela máquina, principalmente entre o rolo jumbo e a bobina em formação. No entanto está sujeita a pequenas variações devido às rotações dos rolos de passamento (ou suas inércias, caso não sejam acionados). A influência desses rolos sobre a tensão é sempre limitada pela sua força de atrito estático máxima com a manta. O controle dessa variável pode ser feito de duas formas: através da rotação dos rolos e conhecimento das propriedades do material ou pela leitura de uma ou mais células de carga acopladas a mancais ao longo da máquina. Apesar do segundo método oferecer uma estimativa mais exata da tensão na manta, os resultados das medições só representam fielmente as condições nas seções onde foi realizada a medição. Isso quer dizer que, para uma situação em que a célula de carga esteja no meio do caminho entre o rolo jumbo e a bobina, o valor real da tensão no final do processo (e que efetivamente afeta a formação da bobina) será uma função da sua leitura e da influência das subsequentes etapas do processo. Por estar presente ao longo de todo sistema, a tensão inevitavelmente causará algum grau de estreitamento da manta, principalmente após o conjunto de corte, impactando significativamente a largura das bobinas resultantes.

O NIP está associado à compressão atuando sobre a bobina e depende das forças normais à sua superfície. Esse parâmetro é utilizado em bobinadeiras de classes como a *Surfacewind*, onde existe, no mínimo, um rolo em contato com a bobina em formação, denominado rolo Cavaleiro. Para situações em que a bobina está apoiada sobre outros rolos, como é o caso do modelo *Two-Drum*, o aumento do seu peso ao longo do processo resulta no aumento das forças normais oriundas desses rolos de suporte. Como a massa da bobina e sua variação são intrínsecos ao processo, o controle da compressão nesse modelo só pode ser feito com o auxílio do rolo Cavaleiro, cuja influência máxima é equivalente ao seu peso quando suportado inteiramente pela bobina. A força aplicada pelo cavaleiro pode ser controlada através de um

sistema paralelo que suporte, parcial ou totalmente, seu peso. Para essa máquina específica, o controle desse sistema é chamado de alívio. Caso se deseje uma compressão constante ao longo do bobinamento, basta reduzir a parcela do peso do Cavaleiro suportado pela bobina, ao mesmo passo que a massa dessa aumenta. Além da influência do peso, o aumento do diâmetro da bobina também afeta a resultante das forças radiais sobre ela. Isso porque quanto maior for o seu diâmetro, menor será o ângulo entre a normal do ponto de contato da bobina com o rolo de suporte e a componente de resposta ao seu peso. Algumas máquinas de modelo *Two-Drum* possuem rolos inferiores com distância variável, podendo compensar o aumento do diâmetro, assim como são capazes de medir o peso da bobina e corrigir o efeito do Cavaleiro para uma compressão constante.

O torque ocorre devido à transmissão de movimento do rolo acionado em contato com a bobina para a última camada sendo bobinada. Essa variável só existe para máquinas que possuam pelo menos um rolo acionado tangente à bobina, e acrescenta ao tracionamento da última camada sendo bobinada além do que foi obtido pelo efeito da tensão. Apesar de compartilhar a mesma influência da tensão sobre a estrutura da bobina, o torque tende a ser mais versátil, pois não impacta o restante do processo. A atuação dessa e das demais variáveis TNT é representada na Figura 6.

Figura 6 – Representação das variáveis TNT sobre a bobina em formação



Fonte: Adaptado do manual da máquina

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Definição de parâmetros e abordagem

Com o intuito de obter a influência dos parâmetros TNT sobre o diâmetro de uma bobina, considerando os projetos de experimentos (DOE, do inglês Design Of Experiments) disponíveis, optou-se por adotar um método de superfície de resposta. Considerando o ambiente industrial, onde o tempo de máquina despendido na realização de testes equivale, em um primeiro momento, à perda de produtividade, buscou-se o método que, para três variáveis de entrada, exigisse o menor número de ensaios. Ao mesmo tempo, era necessário que o material resultante não fosse inviabilizado pelos experimentos, o que restringiu a máquina a rodar exclusivamente em uma condição de operação. Considerando essas premissas, optou-se pelo método Box-Behnken (BBD) de três fatores.

Dentre as variáveis TNT, o NIP se destaca das demais por não poder ser controlado diretamente, devido à influência que o diâmetro e a massa da bobina em formação têm sobre a compressão dela. Já que para cada ensaio do BBD é necessário que as variáveis de entrada independentes sejam mantidas constantes, o NIP não pode ser usado no modelo de um sistema que não possua correção automática do efeito do cavaleiro. Sendo assim, a única variável restante que afeta a compressão e que pode ser mantida constante é o percentual do peso do Cavaleiro suportado pela bobina ao longo do processo, controlado pelo alívio ( $n'$ ). Por esse motivo, o NIP foi substituído pelo alívio como variável de controle da compressão.

Para a escolha do material, optou-se por utilizar aquele que tivesse menor potencial de ser inviabilizado. Em outras palavras, um material cujas características finais da bobina fossem mais tolerantes a grandes variações, idealmente de consumo interno da empresa (utilizado em outros processos pelo próprio fabricante) e que, portanto, pudesse ter suas dimensões mais facilmente aceitas na próxima etapa da cadeia. O produto escolhido possuía  $20 \text{ g/m}^2$  e era oriundo de um processo exclusivamente *Spunbonded*, um Spun 20. As bobinas resultantes deveriam ter 9400 m de comprimento, qualquer diâmetro, mínimo 1700 mm de largura e ser bobinadas em torno de um tubete de papelão de 76,2 mm de diâmetro interno, com 9,5 mm de espessura.

Para a determinação dos valores máximos e mínimos de cada um dos parâmetros de entrada foi primeiramente definido o valor médio de cada como sendo o padrão de processo para o bobinamento do material em condições normais de produção. A partir desse, definiu-se o quão distante seriam os máximos e mínimos. Para o torque e o alívio, ambos controlados pelo percentual da capacidade máxima de cada, sendo 50% o padrão, optou-se por 90% como máximo e 10% como mínimo. Para tensão o valor padrão é 35 N/mm, o mínimo foi definido como o mínimo da máquina, 20 N/mm, e, por consequência, o máximo como 50 N/mm. Todos os demais parâmetros de entrada, como relações de escorrimento, velocidade objetivo e rampas de aceleração e desaceleração se mantiveram inalterados para todos os ensaios, sendo seus valores os mesmos da condição padrão de operação da máquina para o Spun 20.

### 3.2. Aquisição de dados

Como o rolo Cavaleiro permanece sobre a bobina em formação durante o processo, fez-se uso da sua altura para determinar o diâmetro resultante do bobinamento. A medição da altura do Cavaleiro foi feita por um encoder acoplado ao sistema de movimentação vertical do rolo. A exatidão dessa medição foi validada antes de serem realizados os ensaios.

Para controle da tensão foi usada a célula de carga acoplada ao rolo indicado na Figura 4. O valor medido é, devido às suas condições de montagem, uma função do peso do rolo, da tensão e largura da manta naquela posição e do ângulo de abraçamento entre essa e o rolo. Para garantir a correta interpretação da resposta da célula de carga para a tração aplicada foi feita sua calibração segundo os procedimentos recomendados pelo fabricante. Também foi garantido que o passamento de manta fosse idêntico durante a calibração e os ensaios. O valor de  $T$  [N/m], como função da resposta da célula de carga e dos demais parâmetros é definido pela Equação 2.

$$T = \frac{1}{L} * \frac{R - P * \cos(a)}{\text{sen}(a) + \cos(a)} \quad (2)$$

com  $R$  [N] sendo a resposta da célula de carga,  $P$  [N] o peso do rolo,  $a$  [rad] o ângulo de abraçamento em radianos e  $L$  [m] a largura da manta.

O torque é controlado pela corrente atuando sobre o motor do rolo Cavaleiro. Essa corrente é diretamente proporcional à potência do motor, de tal forma que 100% da tração equivale ao consumo máximo de corrente por parte do motor e, portanto, resulta em mais força

aplicada sobre a última camada da bobina. Um torque de 0% corresponde ao motor desligado, sendo apenas arrastado pelo sistema. Contudo, vale ressaltar que arrastar o rolo não teria um efeito nulo, mas sim negativo, distensionando a manta antes desse. Por isso, uma situação de torque nula é aquela em que a velocidade dos rolos tangentes à bobina são as mesmas pela ação individual de seus respectivos motores. Ainda existe a opção de controlar a corrente do rolo Escravo para se obter um resultado parecido, porém optou-se por manter essa variável constante em 50% e variar apenas a potência do Cavaleiro.

O alívio representa o percentual do peso do rolo superior que não é suportado pela bobina. Dessa forma, 100% de alívio equivale a 0% de compressão oriunda do Cavaleiro, assim como o contrário também se aplica. O ajuste do alívio é feito através de um sistema pneumático, que também foi validado, medindo a força oriunda do cavaleiro para todo o intervalo do alívio, antes da realização dos ensaios. As demais forças que atuam na compressão são intrínsecas ao processo e inviáveis de serem controladas. Considerando todas as variáveis envolvidas, o alívio pode não representar todos os esforços de compressão sobre a bobina, porém é a única que pode ser utilizada como variável independente para o modelo. Os valores máximos, médios e mínimos dessa e das demais variáveis de entrada são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores máx., méd. e min. para as variáveis independentes

Variáveis Independentes	Fatores			Variável Dependente
	-1	0	+1	
Tensão (N/mm)	20	35	50	Diâmetro (mm)
Torque (%)	10	50	90	
Alívio (%)	10	50	90	

Para a aquisição dos dados relevantes ao processo (além dos apresentados na Tabela 1, todos os demais que se mantiveram constantes para todos os ensaios), foi instalado um software em um computador com acesso ao Controlador Lógico Programável (CLP) da máquina. Esse programa foi capaz de coletar e armazenar todas as informações que constavam no CLP, oriundas de todas as células de carga, inversores e demais sensores e controladores envolvidos no processo, em intervalos de tempo de 0,1 s. Com a vantagem de não ser necessário acompanhar a realização dos ensaios para poder coletar os dados, as instruções de como configurar a máquina foram passadas aos operadores de todos os turnos para que o esses pudessem ser realizados em qualquer momento. Os dados adquiridos foram armazenados em arquivos no computador onde o software havia sido instalado, e depois exportados para ser realizado o tratamento dos dados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Resultados

Os 15 ensaios apresentados na Tabela 2, realizados na respectiva ordem (aleatória), na mesma máquina, sob a operação da mesma pessoa e utilizando o mesmo material, resultaram nos valores apresentados na coluna de diâmetro real. As variáveis de entrada foram normalizadas, a fim de evitar problemas de multicolinearidade durante as verificações de significância dos coeficientes da regressão. Os respectivos valores dessas são apresentados nas colunas de variáveis normalizadas, e suas letras de identificação receberam um asterisco para serem distinguíveis.

Tabela 2 – Ensaio, variáveis não normalizadas, variáveis normalizadas e resultados

Ensaio	Variáveis Não Norm.			Variáveis Norm.			Diâmetro		
	T N/mm	t %	n' %	T* N/mm	t* %	n'' %	Real mm	Estimado mm	Resíduo mm
1	35	10	10	0	-1	-1	1016	1015	1
2	20	50	10	-1	0	-1	1024	1021	3
3	35	50	50	0	0	0	1029	1024	5
4	50	90	50	1	1	0	1019	1016	3
5	50	50	90	1	0	1	1070	1069	1
6	35	50	50	0	0	0	1025	1024	1
7	50	50	10	1	0	-1	994	1000	-6
8	35	90	10	0	1	-1	1014	1013	1
9	20	10	50	-1	-1	0	1039	1039	0
10	20	50	90	-1	0	1	1089	1091	-2
11	35	50	50	0	0	0	1021	1024	-3
12	35	90	90	0	1	1	1083	1083	0
13	35	10	90	0	-1	1	1085	1085	0
14	20	90	50	-1	1	0	1032	1037	-5
15	50	10	50	1	-1	0	1016	1018	-2

A partir dos resultados da Tabela 2, 4 regressões distintas foram realizadas para identificar qual tipo de equação melhor representaria os dados coletados. O coeficiente de determinação e suas variações para os 4 modelos foram apresentados na Tabela 3. Com relação à regressão linear, pôde-se perceber que a inclusão de termos quadráticos melhorou significativamente o resultado do R<sup>2</sup> Ajustado, o que indica que pelo menos um termo quadrático das variáveis independentes tem significância grande o suficiente para justificar o aumento na quantidade de termos da equação. Essa melhora dos coeficientes de determinação poderia ser causada por sobreajuste, porém essa hipótese foi descartada com a melhora concomitante do R<sup>2</sup> Predito. Em contrapartida, a inclusão de interações se mostrou prejudicial à fidelidade da equação, constatado pelos mesmos coeficientes.

Tabela 3 – Coeficientes de determinação para cada modelo polinomial

Variável Dependente	Modelo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustado	R <sup>2</sup> Predito
Diâmetro	Linear	85,41%	81,43%	72,49%
	Linear + Quadrados	99,12%	98,46%	96,93%
	Linear + Interações	85,85%	75,24%	40,39%
	Quadrático	99,56%	98,78%	96,56%

Com as análises prévias realizadas sobre os desempenhos de cada equação em descrever o modelo, realizou-se a análise de variância da regressão contendo os termos da equação quadrática completa já normalizados, apresentada na Tabela 4, a fim de identificar quais eram efetivamente significativos e quais prejudicavam o modelo. É possível perceber que, como previsto, as interações das variáveis independentes contribuem menos para o modelo do que seus quadrados e muito menos que a parte linear dele. Contudo, dentro de cada um desses grupos existem termos que não possuem significância maior que 95%, que justificaria desconsiderar a respectiva hipótese nula. Como o objetivo desse trabalho é determinar a equação que melhor descreve o comportamento do sistema de bobinamento de nãotecidos para futuras predições, sobreajustes e termos de baixa significância devem ser removidos do modelo.

Tabela 4 – Análise de variância do modelo quadrático completo

Fonte	GL	SQ	Contribuição	SQ (Ajus.)	QM (Ajus.)	Valor-F	Valor-P
Modelo	9	12404,7	99,56%	12404,7	1378,3	127,03	0
Linear	3	10641,2	85,41%	10641,3	3547,08	326,92	0
Tensão	1	903,1	7,25%	903,1	903,12	83,24	0
Torque	1	8	0,06%	8	8	0,74	0,43
Alívio	1	9730,1	78,10%	9730,1	9730,12	896,79	0
Quadrado	3	1708,2	13,71%	1708,2	569,39	52,48	0
Tensão*Tensão	1	49,1	0,39%	13	12,98	1,2	0,324
Torque*Torque	1	11,4	0,09%	42,1	42,06	3,88	0,106
Alívio*Alívio	1	1647,8	13,23%	1647,8	1647,75	151,87	0
Interação	3	55,2	0,44%	55,2	18,42	1,7	0,282
Tensão*Torque	1	25	0,20%	25	25	2,3	0,189
Tensão*Alívio	1	30,2	0,24%	30,2	30,25	2,79	0,156
Torque*Alívio	1	0	0,00%	0	0	0	1
Erro	5	54,3	0,44%	54,3	10,85		
Falta de Ajuste	3	22,3	0,18%	22,3	7,42	0,46	0,737
Erro Puro	2	32	0,26%	32	16		
Total	14	12458,9	100,00%				

Para a redução do modelo foi realizado um processo iterativo onde removeu-se o termo de menor significância abaixo de 95%. Após cada iteração foi feita uma nova regressão e análise de variância para identificar o novo termo de menor significância, como apresentado na Tabela 5. Vale ressaltar que esse modelo foi mantido como hierárquico para que a equação resultante da regressão pudesse ser convertida de volta para unidades não normalizadas. Sendo assim, variáveis independentes lineares não puderam ser removidas antes de seus múltiplos. A redução do modelo resultou em uma equação de apenas 4 termos, sendo um deles constante e nenhum a variável independente torque ou um produto dela.

Apesar de apresentar bons resultados para o coeficiente de determinação e suas variações, o modelo obtido após a sexta iteração vai contra a teoria por não depender de uma das três variáveis TNT. Tendo considerado a presumida importância torque e o fato de seu quadrado possuir elevada significância na penúltima iteração da redução do modelo, optou-se por reinseri-la. Devido à necessidade de hierarquia, não é possível adicionar o quadrado (cujo Valor-P seria 0,090) sem incluir a própria variável linear antes. Efetivamente, a redução do modelo ficou equivalente à do final da quarta iteração, que é idêntico ao que seria obtido de forma direta caso fosse inicialmente escolhido um nível de significância de 90% ao invés dos 95% idealizados, o que ainda seria adequado.

Tabela 5 – Iterações do processo de eliminação do termo menos significativo

Iteração	Eliminação		Modelo Resultante		
	Termo	Valor-P	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajus.	R <sup>2</sup> pred.
1	Torque*Alívio	1	99,56%	98,98%	96,62%
2	Tensão*Tensão	0,276	99,46%	98,92%	97,07%
3	Tensão*Torque	0,151	99,26%	98,70%	97,23%
4	Tensão*Alívio	0,144	99,02%	98,47%	97,28%
5	Torque*Torque	0,099	98,65%	98,11%	96,82%
6	Torque	0,506	98,58%	98,20%	97,13%

Sendo definidos todos os coeficientes relevantes para o modelo, montou-se a Equação 4 do diâmetro  $D$  [mm] em função das variáveis independentes ainda normalizadas. A partir dessa, devido ao modelo ser hierárquico, foi possível tornar a equação uma função das variáveis não normalizadas através do processo inverso da normalização, Equação 5.

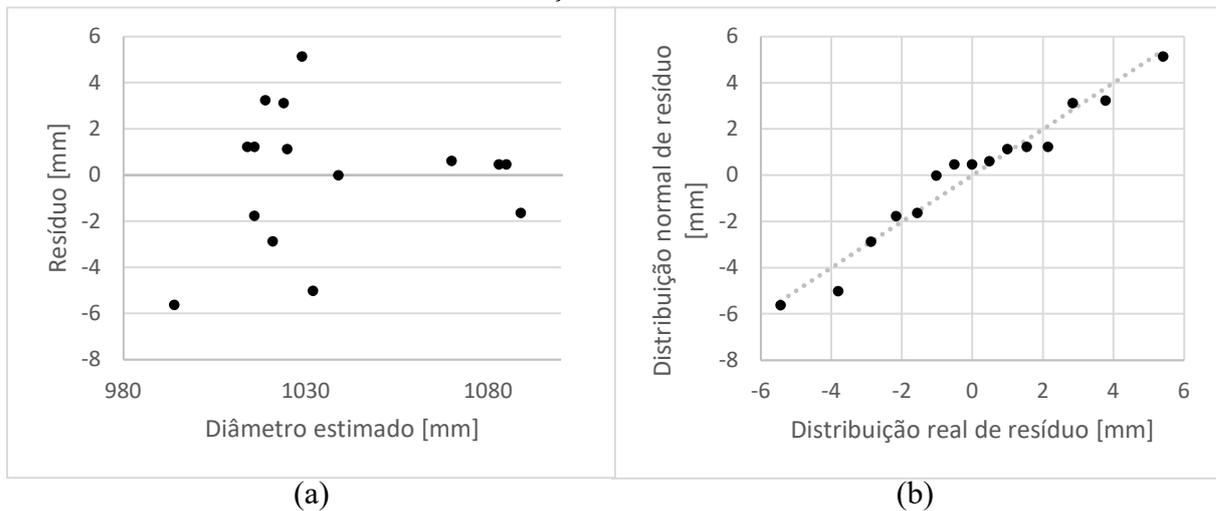
$$D = 1023,85 - 10,63 T^* - 1 t^* + 34,88 n'^* + 3,52 t^{*2} + 21,27 n'^{*2} \quad (4)$$

$$D = 1045,03 - 0,7083 T - 0,245 t - 0,457 n' + 0,0022 t^2 + 0,01329 n'^2 \quad (5)$$

com  $T^*$  adimensional e  $T$  [N/mm] sendo a tensão,  $t^*$  adimensional e  $t$  [%] o torque e  $n'^*$  adimensional e  $n'$  [%] o alívio do Cavaleiro.

Os resultados obtidos pela equação para os mesmos valores das variáveis independentes utilizadas nos ensaios do Box-Behnken foram escritos na Tabela 2 na coluna de diâmetro estimado. A diferença entre os resultados reais e os obtidos pela equação, ou o resíduo do modelo, também é apresentada na tabela. A normalidade do resíduo é confirmada pela distribuição desses resultados sobre a linha que representa uma normal para a mesma média e desvio padrão, apresentada na Figura 7(b). Nenhum padrão de dispersão pode ser percebido analisando os resultados de resíduo em relação ao diâmetro estimado pelo modelo, apresentados na Figura 7(a), sustentando o argumento de que o modelo é adequado para representar a resposta de diâmetro do sistema. Apesar dos pontos de maior resíduo poderem indicar erros de medição durante a coleta de dados, eles podem estar apenas se destacando dos demais devido à baixa quantidade de pontos sendo visualizada.

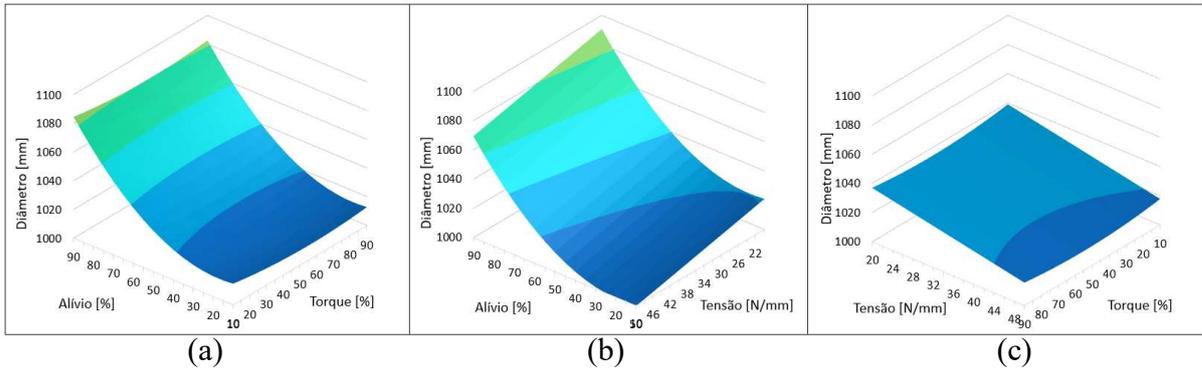
Figura 7 – (a) Resíduo x Diâmetro estimado; (b) Distribuição normal de resíduo x Distribuição real de resíduo



Fonte: Autoria própria

A influência de cada variável independente sobre a variável dependente diâmetro, para a faixa de experimentos realizados, é clara na equação dos termos não normalizados, mas fica mais evidente através dos gráficos de superfície apresentados na Figura 8. A Figura 8(a) indica maior influência do alívio ( $n'$ ) do que do torque ( $t$ ) sobre o diâmetro, ao mesmo tempo que demonstra o impacto do comportamento quadrático do primeiro. Na Figura 8(b), a influência do alívio supera mais uma vez a da outra variável, nesse caso a tensão ( $T$ ). A Figura 8(c) apresenta o efeito combinado da tensão e do torque e deixa claro que o torque possui influência desprezível sobre o diâmetro.

Figura 8 – Resultado de diâmetro [mm] para: (a) Alívio (n') x Tração (t); (b) Alívio (n') x Tração (T); (c) Tração (t) x Tração (T)

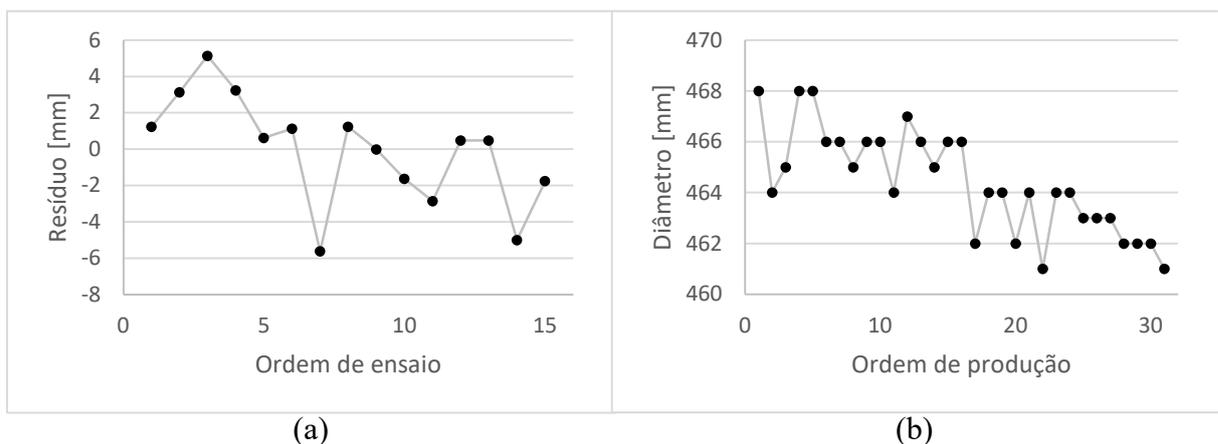


Fonte: Autoria própria

## 4.2. Validação da Equação

Analisando os resultados de resíduo apresentados na Tabela 2 é possível perceber uma tendência, de tal forma que o resíduo seja majoritariamente positivo na primeira metade dos ensaios e majoritariamente negativo na segunda metade. Com o intuito de visualizar melhor esse comportamento, o resíduo por ensaio é apresentado na Figura 9(a). Para identificar se esse comportamento é de fato uma tendência do sistema de produzir diâmetros progressivamente menores ao longo da produção, e não apenas uma coincidência, foi acompanhada outra produção. O diâmetro objetivo desse caso era 465 mm e foram realizados 31 rebobinamentos a partir do rolo jumbo, da mesma forma que foram realizados os 15 ensaios para o Box-Behnken, porém com todas as variáveis constantes. Os resultados de diâmetro por ordem de produção são apresentados na Figura 9(b). Como pode-se perceber, existe uma relação entre o diâmetro resultante e a ordem de produção, e como essa não foi considerada no desenvolvimento desse experimento, é justificável que essa tendência impacte o resíduo.

Figura 9 – (a) Resíduo x Ordem de ensaio; (b) Diâmetro x Ordem de produção



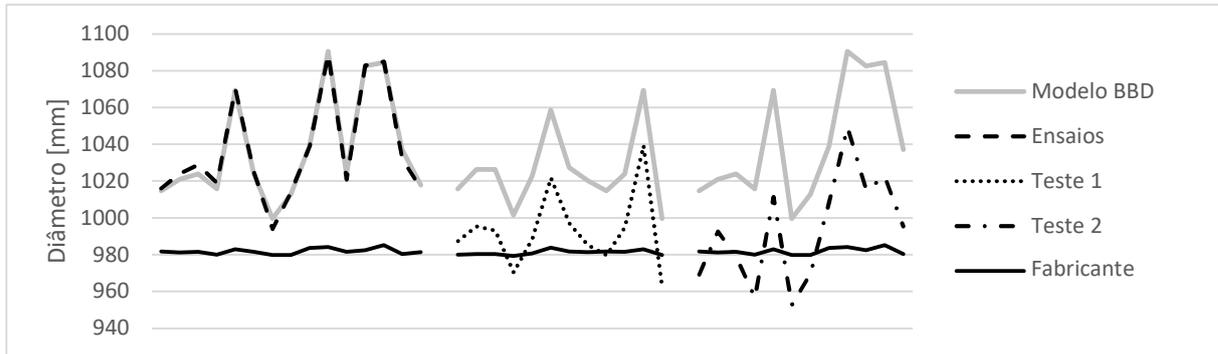
Fonte: Autoria própria

Apesar desse comportamento diminuir a exatidão do modelo, o erro resultante é suficientemente pequeno para que seja desconsiderado em aplicações reais.

Dois testes foram realizados para validar a aplicabilidade da equação resultante no modelo de corte de nãotecido. O primeiro (Teste 1) foi realizado na mesma máquina, com todas as variáveis não contempladas pelo modelo nos níveis utilizados durante a realização dos

ensaios. Além dessas, as três variáveis independentes contempladas pelo modelo tiveram seus valores definidos evitando que fossem apenas os utilizados durante os ensaios. O segundo (Teste 2) foi realizado da mesma forma que o primeiro, porém em outra máquina, também de modelo *Two-Drum*, e com as mesmas condições para as variáveis. Os resultados dos testes foram apresentados na Figura 10. Essa ainda apresenta o resultado estimado pelo modelo usado pelo fabricante, prévio a execução desse trabalho.

Figura 10 – Diâmetros reais e estimados pelo modelo para os ensaios do BBD, validações na mesma máquina (Teste 1), em outra (Teste 2) e estimados pelo modelo do fabricante



Fonte: Autoria própria

O diâmetro resultante da equação do modelo não obteve o mesmo nível de precisão para os resultados dos dois últimos testes que obteve para os medidos durante a realização dos ensaios para o Box-Behnken. Contudo, como pode-se perceber pela distribuição, principalmente para os resultados do Teste 1, mas também é verdade para o Teste 2, o resultado estimado e o real parecem compartilhar o mesmo comportamento, independente de qual configuração de variáveis foi utilizada. Apesar de defasados pelo que parece ser um valor constante, afirmando que o modelo foi incapaz de prever o diâmetro resultante de situações que não a avaliada em seu desenvolvimento, esse demonstra que pode caracterizar a relação entre as três variáveis independentes melhor que o modelo anterior. Para qualquer combinação das variáveis de entrada, o resíduo se manteve estatisticamente constante, como evidenciado pelo desvio padrão dos resíduos, apresentado na Tabela 6. Já o modelo antigo apresentou desempenho pior em prever tanto o diâmetro resultante médio, como também o impacto de cada variável independente, evidenciado pela Figura 9, assim como pelo desvio padrão do seu resíduo na Tabela 6.

Tabela 6 – Média e desvio padrão do resíduo dos modelos para os ensaios e validações

Validação	N	Resíduo			
		Modelo BBD		Modelo Anterior	
		Média	Desv.Pad.	Média	Desv.Pad.
Ensaio	15	0,0	2,96	-55,3	28,37
Teste 1	12	-32,5	3,03	-44,5	19,17
Teste 2	12	-47,3	12,12	-59,0	30,77

### 4.3. Aplicabilidade na indústria

Dentre os modelos de DOE mais conhecidos para analisar sistemas com comportamento quadrático, Box-Behnken se destaca pela menor quantidade de experimentos necessários. Essa característica traz consigo menos robustez ao modelo por estar sujeito a erros de medição com

impacto mais significativo sobre a resposta da regressão, ou pela falta de ensaios para caracterizar a correlação dos extremos das variáveis independentes, devido à forma como esses são estruturados.

Para um ambiente industrial, onde o objetivo da aplicação do modelo é identificar a influência das variáveis de entrada sobre a variável dependente de tal forma que seja possível maximizar ou minimizar seu efeito, o BBD atende essa função perfeitamente. Contudo, assim como qualquer outro método de análise de influência, ele está limitado a modelar o sistema em cima das variáveis de entrada escolhidas. Por conta disso, é esperado que esse método possa não representar com precisão todos os casos de um sistema específico, pelo simples fato de não ter como controlar todas as variáveis que influenciam a resposta e que, muitas vezes, são desconhecidas para o autor do estudo.

A necessidade de menos experimentos do que outros DOEs é uma vantagem por si só, mas também favorece a realização de experimentos dentro da realidade de um meio produtivo, onde nem sempre é possível interromper o processo para realizar os ensaios. Devido à forma como os experimentos são idealizados, nenhum ensaio necessita extrapolar os valores máximos de processo de cada variável, da mesma forma que todos os respectivos valores máximos ou mínimos não serão configurados ao mesmo tempo, o que minimiza a chance dos ensaios inviabilizarem o produto do processo.

## 5. CONCLUSÕES

Através do uso do método Box-Behnken de superfície de resposta foi possível determinar a equação que rege o resultado de diâmetro do processo de bobinamento de não-tecido em função dos principais parâmetros de corte: tensão, NIP (como função do alívio) e torque. Considerando um erro tolerável de 20 mm, o modelo não foi capaz de prever a resposta do sistema com a exatidão desejada. Contudo, a equação foi capaz de representar corretamente o comportamento do diâmetro em função das variáveis TNT, para os mais diversos níveis dessas. Mesmo quando utilizada em outro sistema, a equação se mantém apta a caracterizar a influência das variáveis independentes sobre o diâmetro. Interpretando a equação ou as curvas de superfície resultantes do modelo é possível determinar que a condição ótima de operação para se minimizar o diâmetro equivale a minimizar o alívio, maximizar a tensão, e manter o torque em seu valor médio.

Mesmo mantendo, durante as validações, todas as variáveis nos mesmos níveis usados durante os ensaios do BBD, a resposta de diâmetro do modelo apresentou um erro sistemático para ambas. Esse sintoma indica que algo significativo para o resultado do diâmetro não foi controlado durante a realização dos ensaios, influenciando de forma inesperada o resultado para o sistema. Assim, conclui-se que, para aplicação em um ambiente industrial, esse método se mostrou eficaz em identificar a relação entre as variáveis independentes e a resposta escolhida para um grupo consideravelmente pequeno de ensaios necessários e tempo investido. A partir dessa relação bem definida, é possível otimizar o resultado da variável dependente, reduzindo o diâmetro final em aproximadamente 2 cm, ou 2% do diâmetro nominal.

Como opção para um trabalho futuro existe a investigação de quais são as demais variáveis influentes para a resposta de diâmetro de uma máquina bobinadeiras e, a partir disso, a adequação do formato da equação obtida por esse trabalho. Considerando a baixa significância observada para o torque, um poderia refazer o mesmo método BBD de três fatores com outra variável em seu lugar, ou mesmo um BBD com mais fatores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT – **Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos.**

Disponível em: <https://www.abint.org.br/naotecidos/o-que-sao>. Acessado em 26/09/2021.

ABNT NBR 13370: **Nãotecido – Terminologia**, 09/2017.

ABNT NBR 12546: **Materiais Têxteis – Ligamentos fundamentais de tecidos planos – Terminologia**, 09/2017.

EDANA – **European Disposables and Nonwovens Associaton.** Disponível em:

<https://www.edana.org/nw-related-industry/what-are-nonwovens>. Acessado em 26/09/2021.

POURDEYHIMI, Behnam. et al. **Nonwovens - Structure-process-property relationships.** In: SCHWARTZ, Peter (Org). *Structure And Mechanics Of Textile Fibre Assemblies*. 2ª ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2019. 109-143.

ADANUR, Sabit; LIAO, Tianyi. **Fiber arrangement characteristics and their effects on nonwoven tensile behavior.** *Textile Research Journal*, 1999.

LIM, Hosun. **A Review of spunbond process**, *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, vol. 6, no. 3, pp. 1–13, 2010.

DEMIRCI, E. et al. **Computation of mechanical anisotropy in thermally bonded bicomponent fibre nonwovens.** ELSEVIER. Feb, 2011.

KOÇ, H. et al. **Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs.** *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 197-208, 2002.

RIBEIRO, José Luis Duarte; TEN CATEN, Carla Schwengber. **Série Monográfica Qualidade Projeto de Experimentos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção Porto Alegre, RS

FERREIRA, S.L.C. et al. **Box-Behnken Design: Na Alternative For The Optimization Of Analytical Methods.** ELSEVIER. Jul, 2007.

ROISUM, David R. **The Mechanics Of Web Handling.** Atlanta, GA: TAPPI Press. 1998.

ROISUM, David R. **The Measurements Of Web Stresses During Roll Winding.** May, 1990.

REN, Yao; KANDADAI, Balaji; GOOD, James K. **Center winding versus surface winding: the effect of winder type and web material properties on wound roll stresses.** In *Advances in Pulp and Paper Research*, Cambridge 2013. 403–447.

STEVES, Robert E. **The Effect Of NIP Load On Wound-On-Tension In Surface Winding.** May, 1997.

GOOD, J.K.; HARTWIG, J.; MARKUM, R. **A Comparison Of Center And Surface Winding Using The Wound-In-Tension Method.** 1999.