

ANÁLISE ESTATÍSTICA EXPLORATÓRIA DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS ASSOCIADAS À PLANICIDADE DO PAPEL CARTÃO EM MÁQUINA INDUSTRIAL UTILIZANDO CORRELAÇÃO DE PEARSON

Luiz Antonio Neves Roma¹, Caliane Bastos Borba Costa¹, Leandro Vitor Pavão¹

¹Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (luizantonionevesroma@gmail.com)

Resumo: A planicidade do papel cartão é um atributo crítico na indústria de embalagens, sendo influenciada por múltiplas variáveis operacionais. Este trabalho apresenta resultados preliminares da análise de dados industriais, aplicando a matriz de correlação de Pearson para investigar a relação entre variáveis de processo e desvios de planicidade (encanoamento e torção). Os resultados indicam a influência de parâmetros de refinação, formação e secagem.

Palavras-chave: planicidade; encanoamento e torção; análise exploratória; papel cartão; correlação de Pearson.

INTRODUÇÃO

O papel cartão representa um insumo estratégico na indústria de embalagens, sendo amplamente utilizado em aplicações de alto valor agregado, como embalagens para alimentos, produtos farmacêuticos e bens de consumo. Nesse contexto, além das propriedades mecânicas e ópticas, a estabilidade dimensional do material desempenha papel fundamental na sua processabilidade e desempenho durante conversão e impressão. Dentre os parâmetros de qualidade associados à estabilidade dimensional, a planicidade destaca-se como um dos mais críticos, uma vez que deformações fora do plano comprometem diretamente a operação em equipamentos industriais, resultando em perdas produtivas e redução da qualidade final do produto (SMOOK, 2002; NISKANEN, 1998).

Os principais desvios de planicidade observados em papel cartão incluem o encanoamento (*curl*) e a torção (*twist*), que se manifestam como deformações geométricas da folha quando ela se encontra livre de cargas externas. Esses fenômenos apresentam origens distintas, porém frequentemente interdependentes. O encanoamento está tipicamente associado a gradientes de propriedades ao longo da espessura da folha, como diferenças de umidade, densidade ou composição fibrosa entre as faces superior e inferior. Por outro lado, a torção está mais relacionada à anisotropia estrutural do material e à distribuição da orientação das fibras ao longo da largura e da espessura do papel (CARLSSON, 1981; NISKANEN, 1998).

A origem desses desvios está diretamente ligada ao caráter higroscópico das fibras celulósicas, que

interagem continuamente com a umidade do ambiente. Esse comportamento resulta em fenômenos de higroexpansão e contração, os quais, quando ocorrem de maneira não uniforme na estrutura do papel, geram tensões internas responsáveis por deformações fora do plano. Além disso, a natureza anisotrópica do papel, decorrente da orientação preferencial das fibras na direção da máquina (*Machine Direction* – MD), contribui para respostas dimensionais distintas nas direções MD e transversal (*Cross Direction* – CD), intensificando a ocorrência de defeitos de planicidade (NISKANEN, 1998; UESAKA, 1994).

Outro fator relevante para a estabilidade dimensional do papel cartão é o desenvolvimento de tensões residuais durante o processo de fabricação, especialmente nas etapas de prensagem e secagem. Durante a secagem, a folha é submetida a restrições mecânicas que limitam o encolhimento natural das fibras, promovendo o armazenamento de energia elástica na estrutura do material. Quando o papel é posteriormente exposto a variações ambientais de umidade, essas tensões podem ser liberadas de forma não uniforme, resultando em deformações como encanoamento e torção (UESAKA et al., 1992; SALMÉN et al., 1987).

A complexidade desses fenômenos é ainda maior no caso de papéis cartões multicamadas, nos quais diferentes camadas são projetadas com composições fibrosas distintas e submetidas a condições de processamento diferenciadas. Essa heterogeneidade estrutural, embora essencial para o desempenho funcional do produto, favorece o desenvolvimento de gradientes de propriedades ao longo da espessura e da largura da folha, ampliando a suscetibilidade a desvios



de planicidade (LEVLIN et al., 1999; BORTOLIN, 2002).

No ambiente industrial, a produção de papel cartão ocorre em máquinas de alta produtividade, nas quais um grande número de variáveis operacionais atua simultaneamente ao longo das etapas de preparo de massa, formação, prensagem e secagem. Variáveis como intensidade de refinação, razão entre velocidades do jato e da tela (V_j/V_t), condições de drenagem, perfis térmicos de secagem e controle de umidade influenciam diretamente a estrutura do papel e seu comportamento higromecânico. Essas variáveis apresentam elevado grau de acoplamento e relações não lineares, o que dificulta a identificação dos fatores responsáveis pelos desvios de planicidade por meio de análises convencionais (NISKANEN, 2011; SCHNEID et al., 2016).

Nesse contexto, abordagens baseadas em dados têm se tornado cada vez mais relevantes para a análise de processos industriais complexos. Técnicas estatísticas e de aprendizado de máquina permitem explorar bases de dados operacionais, identificando padrões e relações entre variáveis de processo e indicadores de qualidade do produto. Como etapa inicial, a análise exploratória por meio da matriz de correlação de Pearson constitui uma ferramenta importante para identificar relações lineares entre variáveis, além de auxiliar na detecção de redundâncias e multicolinearidade no conjunto de dados (DEVORE, 2016).

Dessa forma, este trabalho apresenta uma análise estatística exploratória voltada à análise da planicidade do papel cartão a partir de dados industriais reais. O estudo consiste na estruturação da base de dados e na aplicação da matriz de correlação de Pearson para investigar a relação entre variáveis operacionais do processo e os desvios de encanoamento e torção. Os resultados obtidos fornecem um diagnóstico quantitativo para a compreensão dos principais fatores que influenciam a estabilidade dimensional do material, constituindo base para o desenvolvimento posterior de modelos preditivos mais avançados.

MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção apresenta os procedimentos metodológicos empregados para a condução do estudo, incluindo a caracterização da base de dados industrial, as etapas de pré-processamento, a seleção das variáveis de interesse e a aplicação da análise estatística baseada na correlação de Pearson.

Base de dados e objeto de estudo

O presente estudo foi conduzido a partir de dados reais provenientes da operação de uma máquina industrial de produção de papel cartão multicamadas. O produto selecionado corresponde a um papel cartão do tipo

LPB (*Liquid Packaging Board*), com gramatura aproximada de 275 g/m², escolhido em função de sua elevada representatividade na produção industrial e da recorrência de desvios de planicidade observados em sua fabricação.

A base de dados utilizada foi composta por aproximadamente 7.000 registros históricos de papel cartão produzido ao longo do ano de 2025, constituindo um conjunto amostral robusto e representativo das condições reais de operação. Para cada rolo jumbo de papel cartão, foram consideradas dez posições ao longo da direção CD, correspondentes aos pontos de amostragem empregados nas medições laboratoriais de qualidade.

As variáveis de saída do sistema foram definidas como:

- Encanoamento (*curl*), expresso em milímetros;
- Torção (*twist*), obtida a partir da diferença de leituras nas extremidades das amostras.

Esses dados foram obtidos a partir de análises laboratoriais realizadas de acordo com procedimentos internos da unidade industrial.

Aquisição e pré-processamento de dados

A base de dados foi estruturada a partir da integração de diferentes fontes industriais, incluindo:

- Sistema de controle distribuído (DCS),
- Historiadores de processo,
- Banco de dados laboratoriais.

Devido à natureza contínua do processo e à defasagem entre variáveis operacionais e medições de qualidade, foi realizada uma etapa de sincronização temporal e espacial, permitindo associar corretamente os dados de processo às medições de planicidade.

Adicionalmente, foi conduzido um procedimento de pré-processamento dos dados, envolvendo:

- Eliminação de registros incompletos ou inconsistentes;
- Tratamento de valores ausentes;
- Identificação e remoção de *outliers*;
- Organização e padronização das variáveis.

Essas etapas são fundamentais para garantir a consistência da base de dados, uma vez que dados industriais frequentemente apresentam ruídos e irregularidades decorrentes das condições reais de operação.

Seleção de variáveis

A definição das variáveis de entrada foi realizada com base no conhecimento físico do processo de fabricação do papel cartão e nos mecanismos associados à planicidade.

Foram consideradas variáveis distribuídas ao longo das principais etapas do processo, incluindo:



- Preparo de massa: consumo de refinadores e *freeness*;
- Formação da folha: razão entre velocidades do jato e da tela (V_j/V_t), abertura e afastamento de lábios, pressões e parâmetros operacionais da caixa de entrada que atuam na orientação de fibras;
- Secagem: pressões de vapor, temperaturas das capotas e umidade;
- Acabamento: gramaturas de tinta e amido, pressões de prensa e das barras aplicadoras.

Essa seleção inicial teve como objetivo garantir representatividade física das variáveis em relação aos mecanismos que levam a desvios de planicidade.

Entre as variáveis estruturais avaliadas, destaca-se o TSO (*Tensile Stiffness Orientation* - Orientação da Rigidez à Tração), parâmetro utilizado para quantificar o grau de orientação preferencial das fibras na folha de papel. O TSO está diretamente relacionado à anisotropia do material, refletindo diferenças de propriedades entre as direções longitudinal (MD) e transversal (CD). Como a orientação das fibras influencia a distribuição de tensões internas, a estabilidade dimensional e a tendência à ocorrência de deformações como encanoamento e torção, esse parâmetro é amplamente utilizado para monitorar e controlar a qualidade de papéis e cartões.

Análise de correlação de Pearson

Como etapa principal do estudo, foi aplicada a matriz de correlação de Pearson com o objetivo de investigar relações lineares entre as variáveis operacionais e os desvios de planicidade.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi utilizado como medida de associação linear entre pares de variáveis, assumindo valores no intervalo de -1 a 1, onde:

- Valores próximos de ± 1 indicam forte correlação linear;
- Valores próximos de 0 indicam baixa ou nenhuma correlação linear (DEVORE, 2016).

A análise de correlação de Pearson foi aplicada para as dez posições avaliadas ao longo da direção transversal da folha (CD). Para fins de apresentação e discussão dos resultados, foram selecionadas as posições 2, 5 e 9, representativas das regiões das bordas e da região central da folha.

A aplicação da matriz de correlação teve como finalidade:

- Identificar variáveis com maior influência potencial sobre os desvios de planicidade;
- Observar tendências iniciais do comportamento do sistema;

- Apoiar a interpretação física dos fenômenos envolvidos.

Cabe ressaltar que esta abordagem possui caráter exploratório, sendo limitada à identificação de relações lineares, mas adequada para análise inicial de sistemas industriais complexos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos a partir da análise das matrizes de correlação de Pearson, bem como sua interpretação à luz dos mecanismos físicos associados à planicidade do papel cartão.

Análise exploratória dos desvios de encanoamento

As matrizes de correlação de Pearson obtidas para o encanoamento nas dez posições avaliadas ao longo da direção transversal da máquina revelaram um comportamento relativamente consistente, indicando que determinados grupos de variáveis exercem influência recorrente sobre o defeito independentemente da região analisada da folha.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam exemplos representativos dos resultados observados para o encanoamento nas posições CD 2, 5 e 9, escolhidas para representar o comportamento nas extremidades (bordas, posições 2 e 9) e na região central (posição 5) do perfil transversal da folha.

Os maiores coeficientes positivos foram observados para as variáveis associadas ao consumo dos refinadores da camada base e da camada de cobertura, que permaneceram entre as primeiras posições em praticamente todas as matrizes analisadas. Nas regiões centrais da folha, os coeficientes atingiram valores próximos de 0,40, enquanto nas regiões laterais mantiveram-se próximos a no máximo de 0,30.

Esse comportamento sugere que a intensidade da refinação desempenha papel importante na formação do encanoamento. O processo de refino promove modificações morfológicas nas fibras, aumentando a fibrilação externa e a área específica disponível para ligações interfibras. Embora tais alterações contribuam para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do papel, também elevam a capacidade de absorção de água e a sensibilidade higroscópica da rede fibrosa, aumentando sua susceptibilidade a deformações dimensionais (NISKANEN, 1998; SMOOK, 2002).

Outro conjunto de variáveis que apresentou correlações positivas consistentes foi formado pelos parâmetros relacionados à formação da folha, especialmente V_j/V_t Base e $V_j - V_t$ Base, que figuram entre os maiores coeficientes observados nas posições centrais e laterais.

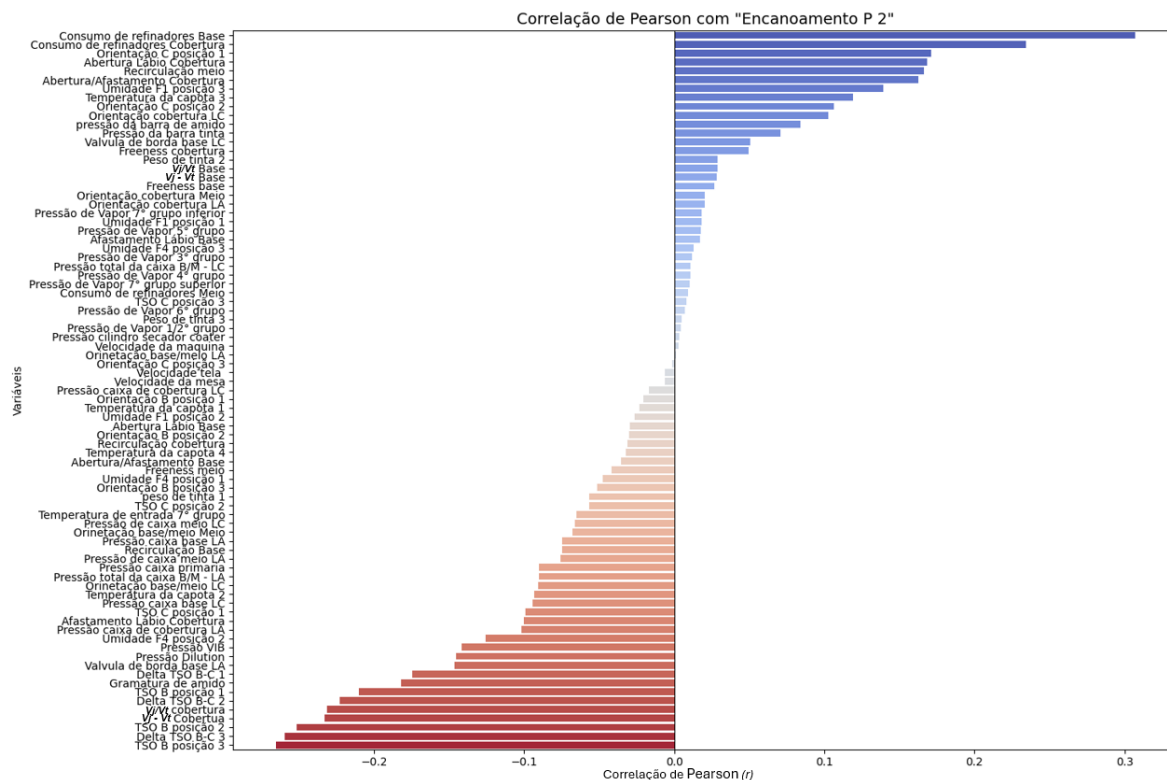


Figura 1. Correlação de Pearson para o encanoamento na posição 2.

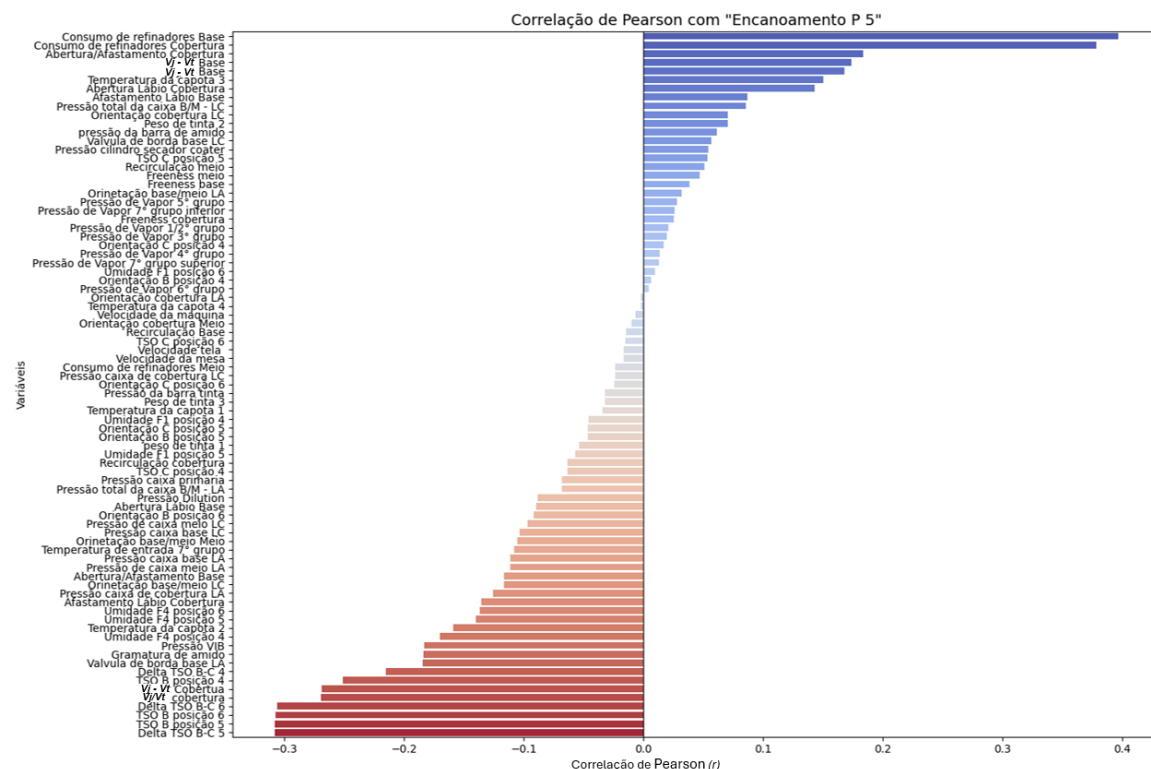


Figura 2. Correlação de Pearson para o encanoamento na posição 5.

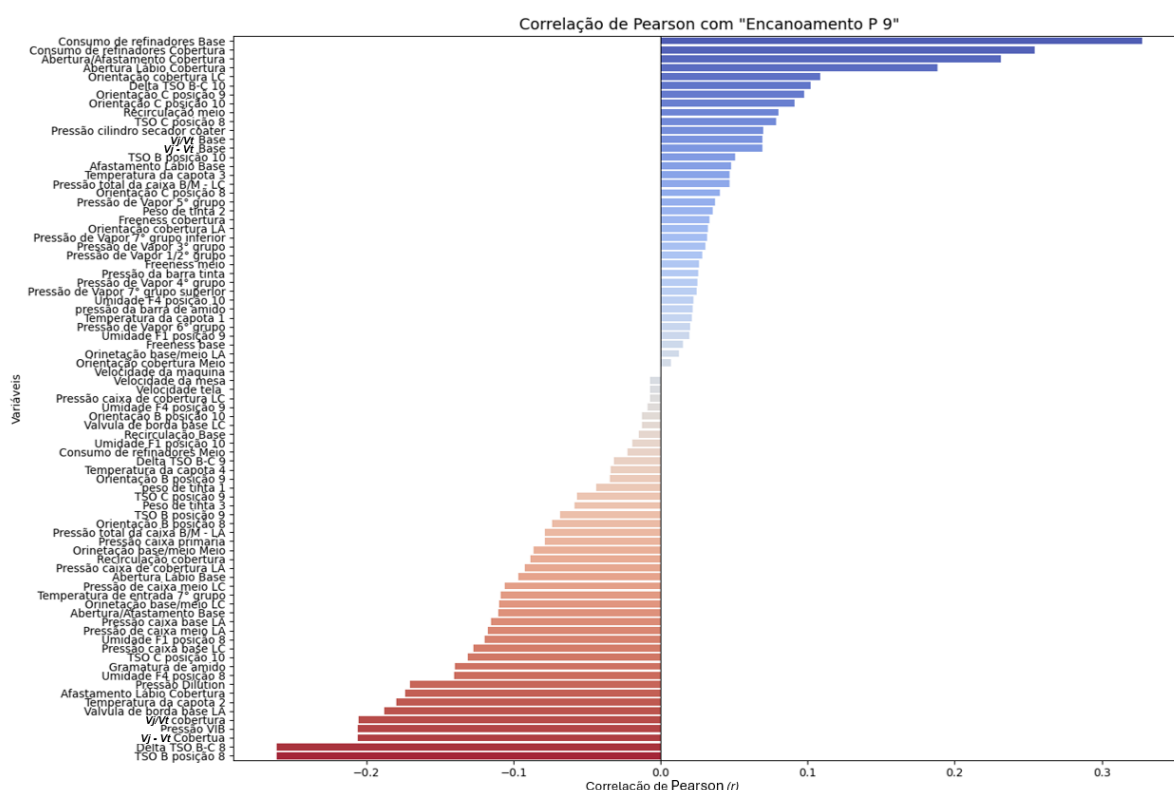


Figura 3. Correlação de Pearson para o encanoamento na posição 9.

A razão entre velocidade do jato e velocidade da tela é amplamente reconhecida como uma das variáveis mais importantes para a orientação das fibras durante a formação da folha. Alterações nesse parâmetro modificam os mecanismos hidrodinâmicos da caixa de entrada e influenciam a distribuição estrutural do papel, afetando posteriormente seu comportamento dimensional.

Também foram identificadas correlações positivas envolvendo variáveis associadas à secagem, tais como temperaturas das capotas, pressão de vapor nos grupos secadores e pressão do cilindro secador do *coater*. Embora essas correlações apresentem magnitude inferior às observadas para as variáveis de refinação, sua recorrência ao longo de praticamente todas as posições indica contribuição efetiva da etapa de secagem para a formação do encanoamento.

Segundo Uesaka et al. (1992), a secagem constitui uma das principais etapas responsáveis pelo desenvolvimento de tensões residuais na estrutura do papel. Quando essas tensões permanecem armazenadas após a fabricação, alterações ambientais de umidade podem promover redistribuições internas capazes de gerar deformações fora do plano.

Em oposição, as maiores correlações negativas foram observadas para variáveis associadas ao TSO-Base e ao Δ TSO Base-Cobertura (diferença entre TSO da camada base e da camada de cobertura)

comportamento que se mostrou particularmente evidente entre as posições 4 e 10. Os coeficientes negativos atingiram magnitudes próximas de -0,30 em diversas posições analisadas.

Os resultados sugerem que maiores níveis de orientação estrutural e menor diferença de orientação entre camadas contribuem para a redução do encanoamento. Tal comportamento pode estar associado a uma distribuição mais uniforme das tensões internas geradas durante o processo produtivo, reduzindo a tendência de curvatura da folha após o condicionamento.

De forma geral, os resultados indicam que o encanoamento está associado principalmente à interação entre:

- Intensidade de refinação;
- Condições hidrodinâmicas da formação;
- Desenvolvimento de tensões durante a secagem;
- Diferenças estruturais entre camadas.

Essa interpretação está alinhada com os mecanismos higromecânicos descritos na literatura para papéis multicamadas.

A Tabela 1 apresenta de forma direta os 10 parâmetros, que de acordo com a matriz de correlação de Pearson, mais possuem associação à formação do encanoamento.



Tabela 1. Principais variáveis associadas ao encanoamento identificadas pela correlação de Pearson

Variável	Tendência observada	Faixa aproximada de r
Consumo de refinadores Base	Positiva	0,30 a 0,40
Consumo de refinadores Cobertura	Positiva	0,25 a 0,35
Abertura/Afastamento Cobertura	Positiva	0,20 a 0,30
V_j/V_t Base	Positiva	0,15 a 0,25
$V_j - V_t$ Base	Positiva	0,15 a 0,25
Temperatura da Capota 3	Positiva	0,10 a 0,20
TSO Base	Negativa	-0,20 a -0,30
Delta TSO Base-Cobertura	Negativa	-0,20 a -0,30
V_j/V_t Cobertura	Negativa	-0,15 a -0,25
Gramatura de Amido	Negativa	-0,10 a -0,20

A Tabela 1 evidencia que as variáveis relacionadas à refinação apresentam os maiores coeficientes de correlação positiva ao encanoamento, destacando-se o consumo dos refinadores das camadas base e cobertura. Esse comportamento foi observado de forma consistente ao longo das dez posições avaliadas, sugerindo que alterações na intensidade de refino influenciam diretamente a estabilidade dimensional da estrutura fibrosa. Adicionalmente, parâmetros associados à formação da folha, como a razão V_j/V_t , e variáveis relacionadas à secagem também apresentaram correlações relevantes. Por outro lado, os parâmetros TSO Base e Delta TSO Base-Cobertura apresentaram correlações negativas recorrentes, indicando que diferenças na orientação estrutural do papel podem atuar como fatores associados à redução do defeito.

Os resultados encontrados corroboram a literatura clássica, que associa gradientes estruturais e tensões de secagem ao desenvolvimento de deformações higromecânicas em papéis multicamadas.

Análise exploratória dos desvios de torção

Os resultados obtidos para torção apresentaram comportamento distinto daquele observado para o encanoamento, indicando a atuação predominante de

mecanismos relacionados à anisotropia estrutural da folha.

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam exemplos importantes dos resultados observados para a torção nas posições 2, 5 e 9.

Nas posições localizadas próximas às bordas da máquina (P1, P2, P9 e P10), observou-se que variáveis associadas ao TSO Base, ao Delta TSO Base-Cobertura e aos parâmetros de orientação das fibras figuram entre os maiores coeficientes positivos encontrados.

Nas posições centrais (P4 a P7), verificou-se aumento da influência das variáveis V_j/V_t Base e $V_j - V_t$ Base, que frequentemente aparecem entre os maiores coeficientes positivos observados para torção. Em diversas posições essas correlações apresentaram magnitude próxima de 0,25 a 0,30.

Esses resultados são coerentes com a função exercida pela razão jato/tela durante a formação da folha. Pequenas alterações nesse parâmetro modificam a orientação preferencial das fibras e, consequentemente, a anisotropia mecânica do material. Como a torção está diretamente relacionada à distribuição não uniforme dessas propriedades ao longo da folha, torna-se esperado que variáveis associadas à orientação apresentem influência significativa sobre o defeito.

Além dos parâmetros estruturais, também foram observadas correlações positivas relevantes para:

- Consumo de refinadores;
- Pressão do cilindro secador do *coater*;
- Pressões da caixa de entrada;
- Temperatura das capotas.

Entretanto, essas variáveis apresentaram comportamento menos uniforme ao longo das dez posições quando comparadas às variáveis relacionadas à orientação estrutural.

As maiores correlações negativas foram observadas principalmente para variáveis de recirculação, umidade, parâmetros de cobertura e algumas variáveis associadas à orientação da camada de cobertura. Embora essas correlações possuam menor magnitude absoluta, sua recorrência sugere que uma maior uniformidade estrutural ao longo da largura da folha tende a reduzir a ocorrência de torção.

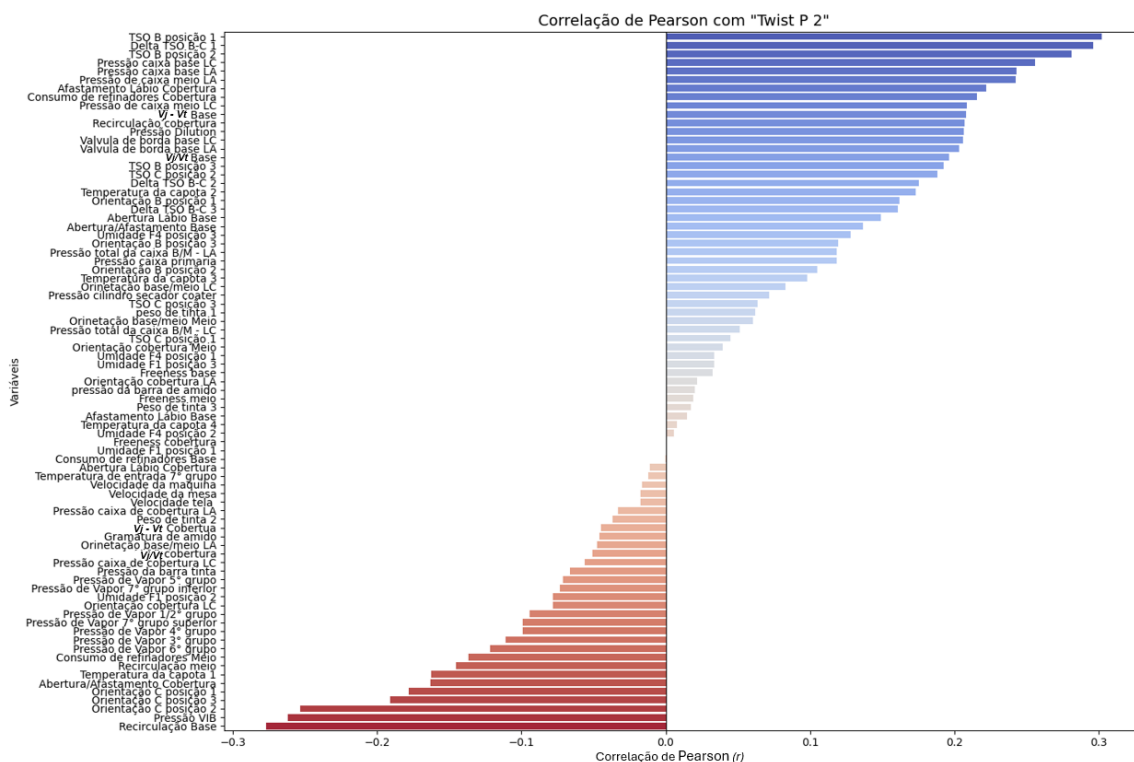


Figura 4. Correlação de Pearson para a torção na posição 2.

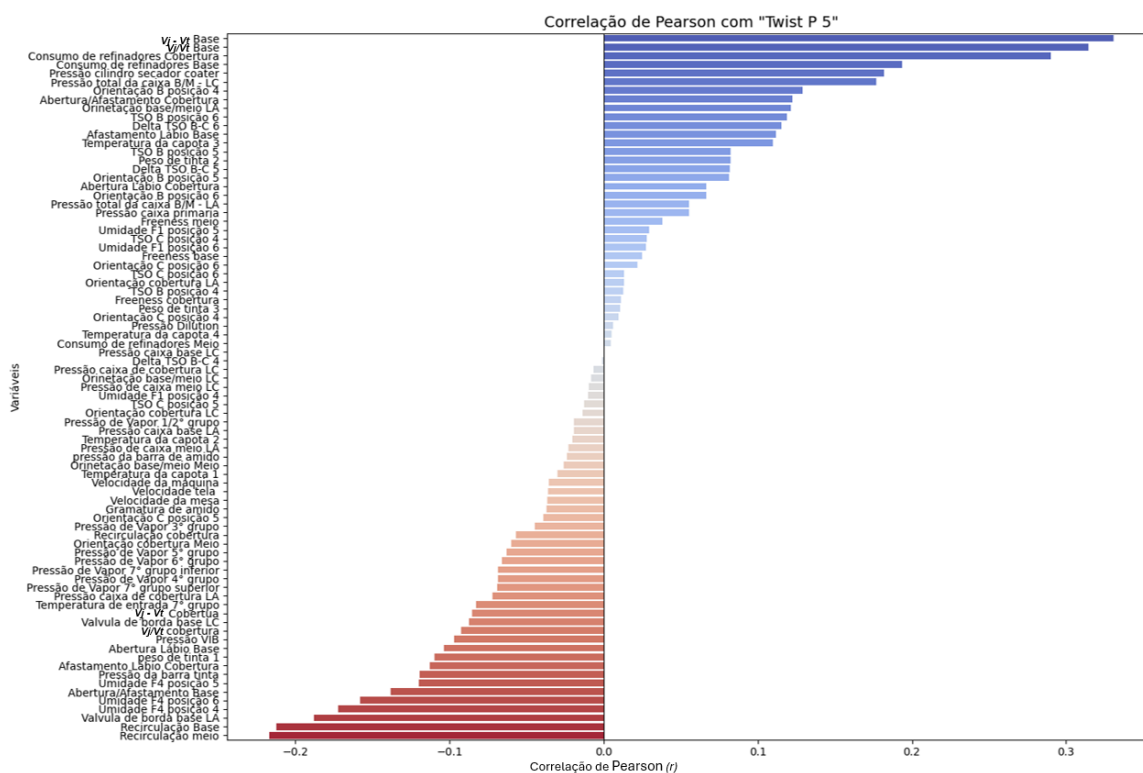


Figura 5. Correlação de Pearson para a torção na posição 5.

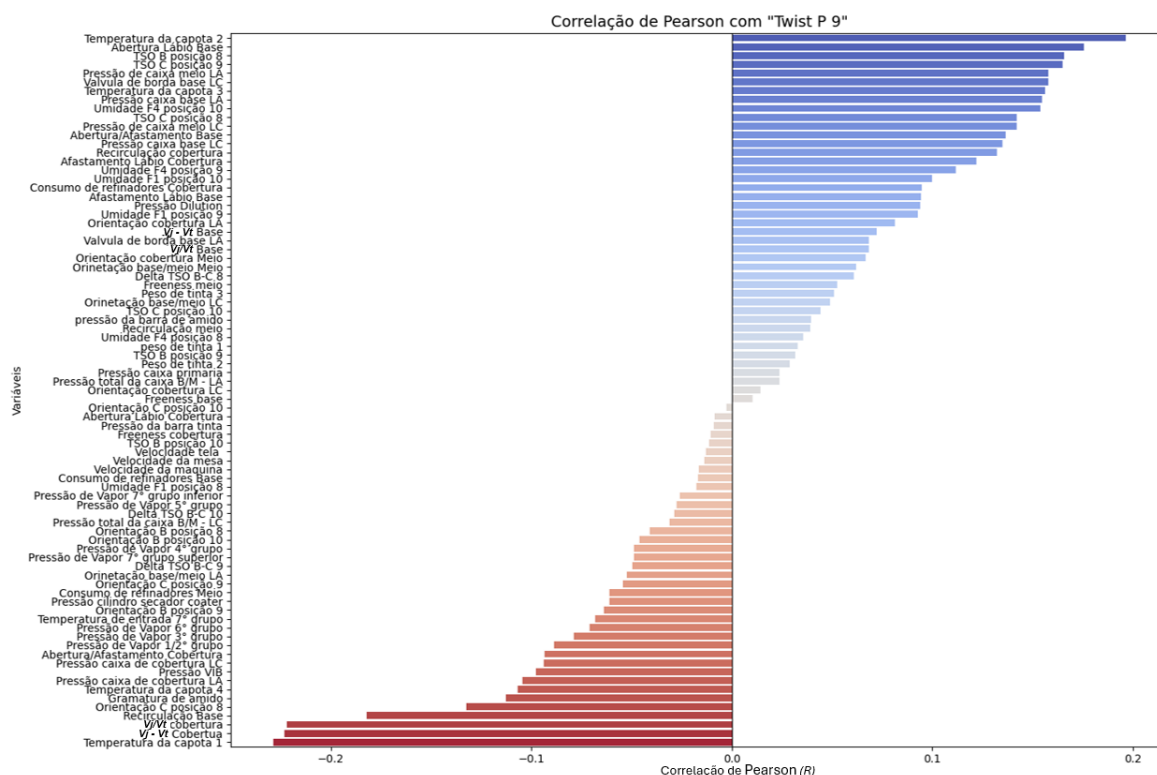


Figura 6. Correlação de Pearson para a torção na posição 9.

A Tabela 2 reúne de forma direta os 10 parâmetros, que, de acordo com a matriz de correlação de Pearson, possuem maior associação à formação da torção.

Tabela 2. Principais variáveis associadas a torção identificadas pela correlação de Pearson.

Variável	Tendência observada	Faixa aproximada de r
V_j/V_t Base	Positiva	0,20 a 0,30
$V_j - V_t$ Base	Positiva	0,20 a 0,30
Consumo de refinadores Cobertura	Positiva	0,15 a 0,30
Consumo de refinadores Base	Positiva	0,10 a 0,25
TSO Base	Positiva	0,15 a 0,30
Δ TSO Base-Cobertura	Positiva	0,10 a 0,25
Pressão do cilindro secador do coater	Positiva	0,10 a 0,20
Pressão total da caixa B/M (LC)	Positiva	0,10 a 0,20
Recirculação Base	Negativa	-0,15 a -0,25
Recirculação Meio	Negativa	-0,10 a -0,20

A Tabela 2 mostra que a torção apresentou maior associação com variáveis relacionadas à formação da folha e à orientação das fibras, destacando-se os

parâmetros V_j/V_t Base, $V_j - V_t$ Base, TSO Base e Δ TSO Base-Cobertura. Essas variáveis apareceram de forma recorrente entre as maiores correlações observadas ao longo das dez posições avaliadas.

Também foram identificadas correlações positivas para os consumos dos refinadores da base e da cobertura, indicando que alterações promovidas na estrutura fibrosa durante o preparo da massa podem influenciar a ocorrência do defeito. Em contrapartida, as variáveis associadas à recirculação apresentaram correlações predominantemente negativas, sugerindo contribuição para a redução da torção.

De forma geral, os resultados indicam que a torção está mais relacionada à anisotropia estrutural do papel e às condições de formação da folha, diferentemente do encanoamento, que apresentou maior influência das variáveis de refinação e secagem.

Comparação entre os mecanismos de encanoamento e torção

A análise conjunta dos resultados evidencia diferenças claras entre os mecanismos associados aos dois defeitos avaliados.

Para o encanoamento, os maiores coeficientes concentram-se principalmente em variáveis relacionadas à refinação e aos processos térmicos de secagem. Isso sugere predominância de mecanismos



ligados à resposta higromecânica da estrutura fibrosa e ao desenvolvimento de tensões residuais.

Por outro lado, a torção apresentou maior associação com variáveis relacionadas à orientação das fibras e aos parâmetros estruturais derivados do TSO. Esse comportamento indica maior influência da anisotropia da folha e da distribuição das propriedades mecânicas ao longo da largura do papel.

Apesar dessas diferenças, ambos os defeitos demonstraram sensibilidade às condições de refinação, evidenciando que alterações promovidas na estrutura das fibras durante o preparo da massa influenciam globalmente a estabilidade dimensional do produto.

Finalmente, observa-se que os coeficientes encontrados apresentam magnitudes predominantemente moderadas, raramente ultrapassando valores absolutos de 0,40. Esse resultado era esperado devido à elevada complexidade do processo industrial de fabricação de papel cartão, no qual múltiplas variáveis atuam simultaneamente e interagem de forma acoplada. Ainda assim, as tendências identificadas pela correlação de Pearson fornecem evidências importantes sobre os mecanismos mais relevantes para a formação dos desvios de planicidade observados no produto analisado.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise estatística exploratória da influência de variáveis operacionais sobre os desvios de planicidade de um papel cartão multicamadas produzido em escala industrial. A partir de uma base contendo aproximadamente 7.000 registros de produção, foi aplicada a correlação de Pearson para investigar associações lineares entre variáveis de processo e os defeitos de encanoamento e torção.

Os resultados indicaram que o encanoamento está predominantemente associado a variáveis relacionadas à etapa de refinamento, às condições de formação da folha e aos parâmetros de secagem. Em particular, o consumo energético dos refinadores das camadas base e cobertura apresentaram as correlações positivas mais consistentes ao longo das diferentes posições analisadas, sugerindo influência relevante da estrutura fibrosa e dos fenômenos higromecânicos sobre a estabilidade dimensional do produto.

Para a torção, observou-se maior influência de variáveis relacionadas à orientação das fibras, destacando-se os parâmetros V_j/V_t Base, V_j-V_t Base, TSO Base e Δ TSO Base-Cobertura. Esses resultados evidenciam a importância da anisotropia estrutural desenvolvida durante a formação da folha na ocorrência desse defeito.

Embora os coeficientes de correlação observados apresentem magnitudes predominantemente moderadas, as tendências identificadas mostraram-se consistentes ao longo da largura da máquina, fornecendo evidências importantes sobre os mecanismos envolvidos na formação dos desvios de planicidade.

A forte presença de variáveis associadas ao grau de refinação, TSO e à razão V_j/V_t sugere que a anisotropia estrutural e a higroexpansibilidade possuem papel predominante no desenvolvimento da torção e do encanoamento, assim como descrito por Bortolin (2002) para cartões multicamadas.

Por fim, ressalta-se que a correlação de Pearson permite identificar apenas relações lineares entre as variáveis analisadas. Considerando a elevada complexidade do processo de fabricação de papel cartão e a existência de interações não lineares entre os parâmetros operacionais, estudos futuros poderão empregar técnicas de modelagem multivariada para aprofundar a compreensão dos mecanismos associados à planicidade e apoiar o desenvolvimento de ferramentas preditivas para controle do processo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade estadual de Maringá – UEM, e a Fundação de Apoio ao Desenvolvimento Científico da Universidade Estadual de Maringá – FADEC-UEM pela oportunidade da realização deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, bem como do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, processo 307705/2025-0.

REFERÊNCIAS

- BORTOLIN, G. On Modelling and Estimation of Curl and Twist in Multi-ply Paperboard. 2002. 106. Doctor. Royal Institute of Technology. Stockholm.
- CARLSSON, L. Out-of-Plane Hygroinstability of Multi-Ply Paperboard. **Fibre Science and Technology**, Amsterdam, v. 14, p. 201-212, 1981.
- DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.
- LEVLIN, J.; SÖDERHJELM, L. (ed.). **Papermaking science and technology: Board grades**. Helsinki: Fapet Oy, 1999.
- NISKANEN, K. J., Papel e Madeira, & Associação Finlandesa de Engenheiros de Papel. (1998). **Ciência e tecnologia da fabricação de papel**: Livro 16, física do papel. Fapet.
- NISKANEN, K. (ed.). **Mechanics of paper products**. Walter de Gruyter, 2011



SALMÉN, L. et al. The implications of fiber and sheet structure for the hygroexpansivity of paper. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, vol.2, n.4, p.127-131, 1987

SCHNEID, G. N.; DE OLIVEIRA, R. C.; VIEIRA, O. Análise de sensibilidade, por meio de rede neural artificial, das variáveis que influenciam o encanoamento diagonal em uma máquina de papel cartão. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 1291–1299, 2016. DOI: 10.5902/1980509825149

SMOOK, G. A. **Handbook for pulp and paper technologists**. 3. ed. Vancouver: Angus Wilde Publications, 2002.

UESAKA, T. Factors controlling hygroexpansion of paper. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v. 20, n. 6, p. J175–J179, 1994.

UESAKA, T.; MOSS, R.; NANRI, Y. Drying stresses and shrinkage behavior in paper. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v. 18, n. 4, p. J123–J130, 1992.