



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI

CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

ENGENHARIA DE BIOPROCESSOS

DANIEL VIEIRA MENDES

Desenvolvimento de em sensor virtual para o controle da resistência ao estouro do papel (Teste de Mullen) em uma planta de polpa kraft

OURO BRANCO - MG

2022

DANIEL VIEIRA MENDES

Desenvolvimento de em sensor virtual para o controle da resistência ao estouro do papel (Teste de Mullen) em uma planta de polpa kraft

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso Engenharia de
Bioprocessos da Universidade Federal de
São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba,
como parte das exigências para a obtenção
do título de Bacharel em Engenheiro de
Bioprocessos.

Orientador: Prof. Dr. Edson Romano Nucci

OURO BRANCO - MG

2022

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer imensamente a minha família por todo apoio, em especial minha Avó Inês e minha Tia Lurdinha que com sua amizade e carinho me fizeram chegar até aqui.

Agradeço à Veronica, que desde o primeiro dia na universidade foi minha melhor companhia.

Agradeço o Prof. Dr. Edson Nucci pelos ensinamentos e aprendizados desenvolvidos durante esse trabalho.

Por fim, agradeço os profissionais da Klabin Otacílio Costa pela oportunidade de desenvolver este trabalho durante meu período de Estágio.

RESUMO

A criação de sensores virtuais é uma importante ferramenta que associa a modelagem de sistemas, de duas ou mais variáveis, para se prever uma variável de interesse com base em instrumentos em campo. O presente trabalho apresenta um modelo de regressão linear com múltiplas variáveis sendo aplicado como um sensor virtual para a aferição da qualidade do papel sendo produzido em uma fábrica de papel kraft da Klabin em Otacílio Costa no estado de Santa Catarina. Para a construção do modelo foi considerado o histórico de produção referente ao ano de 2020 e os dados foram obtidos por meio do sistema PI System, que coleta as informações de processo por meio de instrumentos na máquina de papel. Ao todo foram utilizadas 37 variáveis para a construção de um modelo preditivo utilizando o *software* Minitab, tendo um R^2 de 90,82%. O sensor foi aplicado em teste para complementar os testes de qualidade durante os meses de janeiro a maio de 2021, tendo o melhor resultado no mês de maio/21, onde foi capaz de prever os resultados dos testes de qualidade em 92,18% das observações experimentais.

Palavras-chave: Sensor Virtual; Modelagem, Teste de Mullen; Papel; Kraft

ABSTRACT

The creation of virtual sensors is an important tool that combines the modeling of systems of two or more variables to predict a variable of interest based on field instruments. The present work presents a linear regression model with multiple variables being applied as a virtual sensor to measure the quality of the paper being produced in a Klabin kraft paper factory in Otacílio Costa in the state of Santa Catarina. For the construction of the model, the production history of 2020 was considered and the data were obtained through the PI System that collects process information through instruments in the paper machine. Altogether, 37 variables were used to build a predictive model using Minitab *software*, with an R^2 of 90.82%. The sensor was applied in a test to complement the quality tests during the months of January to May 2021, having the best result in May/21, where it was able to predict the results of the quality tests in 92.18% of the experimental observations.

Keywords: Virtual Sensor, Modelling, Mullen Test, Paper, Kraft

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sumário do modelo estatístico.....	15
Figura 2 - Gráficos dos resíduos da resistência ao estouro	17
Figura 3 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de janeiro de 2021	18
Figura 4 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de fevereiro de 2021.	18
Figura 5 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de março de 2021	19
Figura 6 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de abril de 2021.....	19
Figura 7 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de maio de 2021	20
Figura A1. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (jan/21).....	23
Figura A2. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (fev/21)	23
Figura A3. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (mar/21)	24
Figura A4. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (abril/21)	24
Figura A5. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (maio/21)	25

LISTA DE TABELA

Tabela 1- Variáveis utilizadas na construção do modelo preditivo do teste de qualidade de resistência ao estouro.	12
Tabela 2 - Propriedades estatísticas do modelo preditivo da resistência ao estouro	16
Tabela 3 - Valores de R^2 e Equação da reta obtida para cada mês de avaliação	21

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	6
SUMÁRIO	8
1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	11
3 METODOLOGIA	11
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	12
5 CONCLUSÃO	21
6 DIREITOS AUTORAIS	21
REFERÊNCIAS	22
ANEXO	23

Desenvolvimento de em sensor virtual para o controle da resistência ao estouro do papel (Teste de Mullen) em uma planta de polpa kraft

Development of a virtual sensor for controlling the burst resistance of paper (Mullen test) in a kraft pulp site

Daniel Vieira Mendes

Formação acadêmica mais alta: Graduando em Engenharia de Bioprocessos, UFSJ

Endereço completo (pode ser institucional ou pessoal, como preferir): Campus Alto

Paraopeba - Rod.: MG 443, KM 7 Ouro Branco - MG 36420 000

Email: danielvieiradm@gmail.com

Edson Romano Nucci

Formação acadêmica mais alta: Doutorado em Engenharia Química, UFSCar

Instituição de atuação atual: UFSJ

Endereço completo (pode ser institucional ou pessoal, como preferir): Campus Alto

Paraopeba - Rod.: MG 443, KM 7 Ouro Branco - MG 36420 000

Email: nucci@ufs.br; edsonnucci@gmail.com

RESUMO

A criação de sensores virtuais é uma importante ferramenta que associa a modelagem de sistemas, de duas ou mais variáveis, para se prever uma variável de interesse com base em instrumentos em campo. O presente trabalho apresenta um modelo de regressão linear com múltiplas variáveis sendo aplicado como um sensor virtual para a aferição da qualidade do papel sendo produzido em uma fábrica de papel kraft da Klabin em Otacílio Costa no estado de Santa Catarina. Para a construção do modelo foi considerado o histórico de produção referente ao ano de 2020 e os dados foram obtidos por meio do sistema PI System, que coleta as informações de processo por meio de instrumentos na máquina de papel. Ao todo foram utilizadas 37 variáveis para a construção de um modelo preditivo utilizando o *software* Minitab, tendo um R^2 de 90,82%. O sensor foi aplicado em teste para complementar os testes de qualidade durante os meses de janeiro a maio de 2021, tendo o melhor resultado no mês de maio/21, onde foi capaz de prever os resultados dos testes de qualidade em 92,18% das observações experimentais.

Palavras-chave: Sensor Virtual; Modelagem, Teste de Mullen; Papel; Kraft

ABSTRACT

The creation of virtual sensors is an important tool that combines the modeling of systems of two or more variables to predict a variable of interest based on field instruments. The present work presents a linear regression model with multiple variables being applied as a virtual sensor to measure the quality of the paper being produced in a Klabin kraft paper factory in Otacílio Costa in the state of Santa Catarina. For the construction of the model, the production history of 2020 was considered and the data were obtained through the PI System that collects process information through instruments in the paper machine. Altogether, 37 variables were used to build a predictive model using Minitab *software*, with an R^2 of 90.82%. The sensor was applied in a test to complement the quality tests during the months of January to May 2021, having the best result in May/21, where it was able to predict the results of the quality tests in 92.18% of the experimental observations.

Keywords: Virtual Sensor, Modelling, Mullen Test, Paper, Kraft

1 INTRODUÇÃO

Sensores virtuais são ferramentas que associam a modelagem de sistemas com mais de duas variáveis que coletam dados por meio de instrumentos em campo, capazes de induzir parâmetros de processo que sejam de interesse a partir de variáveis secundárias. (LUTOFO e GARCIA, 2008).

A regressão linear com múltiplas variáveis é um conjunto de técnicas estatísticas que correlacionam várias variáveis independentes a uma variável dependente, obtendo-se uma variável resposta de acordo com a variabilidade do sistema em estudo, sendo aplicado em modelagens complexas (TABACHNICK e FIDELL, 1996).

Segundo a Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP), a indústria de celulose do Brasil é a 4^o maior do mundo em volume de produção, enquanto a de papel do País ocupa a 9^o posição no ranking de fabricantes mundiais. De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), o setor de papel e celulose é um dos pilares da indústria nacional ao gerar investimentos, renda e geração de empregos e também é responsável pela arrecadação de R\$ 13 bilhões em tributos federais, estaduais e municipais. As empresas atuam em diversos segmentos do mercado de papel, o qual é

dividido nas seguintes categorias: embalagem (kraft), papel para imprimir e escrever, papel sanitário (tissue), papel cartão e papel imprensa (ABTCP). Logo a aplicação de sistemas de controle modernos no processo de produção do papel se faz necessário na incursão desse setor na indústria 4.0.

2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo aumentar o controle de qualidade dos produtos produzidos em uma máquina de papel tipo kraft por meio da criação de um sensor virtual capaz de prever o físico de qualidade de resistência ao estouro utilizando regressão multilinear.

3 METODOLOGIA

O presente estudo foi embasado nos dados obtidos de uma máquina de papel kraft de fibra virgem, constando duas caixas de entrada de massa de celulose. O equipamento representa 70% da produção líquida da planta produtiva da unidade fabril Klabin Otacílio Costa, tendo uma carteira variada de produtos para a conversão em caixas de papelão com diferentes aplicações.

O equipamento possui um sistema semi-automático de operação, onde algumas variáveis possuem aferição por sensores online, e dessa forma foi realizada a coleta dos dados das variáveis de processo listadas pela operação via sistema PI System do ano de 2020, constando parâmetros operacionais de processos aferidos por sensores online.

A partir da obtenção dos dados brutos, foi realizada a validação do banco de dados obtidos, excluindo-se valores obtidos em momentos de PPM (parada programada de manutenção), PE (paradas de emergências) e momentos de falhas na coleta de dados pelos sensores online por falta de calibração ou falha no equipamento.

A análise estatística dos dados obtidos foi realizada por meio do *software* Minitab com o comando de ajuste de modelo de regressão, combinando-se de diferentes grupos de variáveis para se obter o maior R^2 preditivo possível com os dados obtidos. Em seguida foi realizada a análise estatística secundária pelos P valores e o fator de inflação da variância (VIF), dessa forma foi-se ajustando o modelo para a melhor condição estatística obtida.

Após a obtenção do modelo preditivo com o melhor ajuste teórico ao processo, foi realizado o acompanhamento do modelo, comparando-o com os resultados obtidos em

laboratório para o teste de resistência ao estouro, verificando sua capacidade de prever as alterações na qualidade do papel por meio das variações do processo. O modelo foi comparado com os dados reais no período de janeiro a maio de 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a investigação das variáveis e múltiplas combinações para a obtenção da melhor equação preditiva, foram determinados trinta e sete parâmetros essenciais para o controle de qualidade do papel em relação à resistência ao estouro. Tais parâmetros foram classificados em: *Parâmetros operacionais* quando possuem controle automatizado no processo e são relacionados a operação de equipamentos; e *parâmetros físico-químicos* quando estão relacionados a aspectos inerentes a interação das fibras de celulose com as etapas do processo e químicos que são aplicados durante a produção. As informações encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1- Variáveis utilizadas na construção do modelo preditivo do teste de qualidade de resistência ao estouro.

Variável	Descrição	Classificação
pH Torre A	pH da massa na torre de estocagem de celulose que alimenta a máquina de papel	Físico-química
Consistência Torre A	Consistência (% m/v) da massa na torre de estocagem de celulose que alimenta a máquina de papel	Físico-química
Consumo Enzima	Consumo específico de enzima em kg produto/t de papel	Operacional
Consumo de Cola CX 1º	Consumo específico de cola em kg produto/t de papel na caixa primária	Operacional
Consumo de Cola CX 2º	Consumo específico de cola em kg produto/t de papel na caixa secundária	Operacional

continuação

Sulfato Cx. 1º	Consumo específico de sulfato em kg produto/t de papel na caixa primária	Operacional
Sulfato Cx. 2º	Consumo específico de sulfato em kg produto/t de papel na caixa secundária	Operacional
Polímero Cx. 1º	Consumo específico de polímero em kg produto/t de papel na caixa primária	Operacional
Consistência Tanque 2	Consistência (% m/v) da massa no tanque de estocagem de celulose que alimenta a caixa secundária a máquina de papel	Físico-química
Energia Ref. 1	Consumo específico de energia de refinação (kWh/t) no refinador 1 da camada base do papel	Operacional
Energia Ref. 2	Consumo específico de energia de refinação (kWh/t) no refinador 2 da camada base do papel	Operacional
Energia Ref. 3	Consumo específico de energia de refinação (kWh/t) no refinador 3 da camada base do papel	Operacional
Energia Ref. 6	Consumo específico de energia de refinação (kWh/t) no refinador 6 da camada topo do papel	Operacional
Energia Ref. 7	Consumo específico de energia de refinação (kWh/t) no refinador 7 da camada topo do papel	Operacional
Energia Ref. 8	Consumo específico de energia de refinação (kWh/t) no refinador 8 da camada base do papel	Operacional
pH Cx. 1º	pH da massa de celulose na aplicação da caixa primária	Físico-química

continuação

Vácuo 1	Vácuo gerado pela bomba 1 na mesa plana	Operacional
Vácuo 2	Vácuo gerado pela bomba 2 na mesa plana	Operacional
Vácuo 3	Vácuo gerado pela bomba 3 na mesa plana	Operacional
Vácuo 4	Vácuo gerado pela bomba 4 na mesa plana	Operacional
Vácuo 5	Vácuo gerado pela bomba 5 na mesa plana	Operacional
Vácuo 6	Vácuo gerado pela bomba 6 na mesa plana	Operacional
Vácuo 7	Vácuo gerado pela bomba 7 na mesa plana	Operacional
Vácuo 8	Vácuo gerado pela bomba 8 na mesa plana	Operacional
Vácuo 9	Vácuo gerado pela bomba 9 na mesa plana	Operacional
Vácuo 10	Vácuo gerado pela bomba 10 na mesa plana	Operacional
Vácuo 11	Vácuo gerado pela bomba 11 na mesa plana	Operacional
Vácuo 12	Vácuo gerado pela bomba 12 na mesa plana	Operacional
Vácuo 13	Vácuo gerado pela bomba 13 na mesa plana	Operacional
Vácuo 14	Vácuo gerado pela bomba 14 na mesa plana	Operacional
Rolo Couch	Velocidade do último rolo da mesa plana, responsável por dar acabamento a folha de papel antes do processo de secagem térmica	Operacional
Temperatura D-Super	Controle da temperatura do vapor aplicado nos rolos de secagem de massa	Operacional

continuação

Demanda Iônica	Demanda iônica da água retirada na mesa plana	Físico-química
Cons. CX 1º Online	Consistência da massa de celulose na caixa primária Demanda Iônica	Físico-química
Velocidade	Velocidade da enroladeira da máquina	Operacional
VJ/VT	Relação entre a velocidade do jato de vapor na caixa primária e a velocidade da tela formadora	Operacional
Temp. Água Branca	Temperatura da água retirada na mesa plana	Físico-química

A partir destas variáveis foi possível obter a Equação de regressão (Equação 1) que representa o ajuste dos dados à predição do teste de resistência ao estouro.

Equação de Regressão: (1)

Resistência ao estouro = 1478,9 – 5,016 pH Torre A - 7,92 Consistência Torre A - 11,71 Consumo Enzima - 70,17 Consumo de Cola CX 1º + 1,1562 Consumo de Cola CX 2º - 0,1624 Sulfato cx 1º + 1,1106 Sulfato cx 2º - 296,5 Polímero Cx 1º - 46,53 Consistência Tanque 2 + 0,3531 Energia Ref. 1 + 0,1617 Energia Ref. 2 - 0,5182 Energia Ref. 3 - 0,5707 Energia Ref. 6 + 0,1761 Energia Ref. 7 - 0,4909 Energia Ref. 8 - 24,64 pH Caixa 1º - 0,2242 Vácuo 1 - 1,087 Vácuo 2 - 0,2190 Vácuo 3 - 0,8621 Vácuo 4 - 2,527 Vácuo 5 + 0,6025 Vácuo 6 + 0,4973 Vácuo 7 - 0,8949 Vácuo 8 - 0,0864 Vácuo 9 - 0,1723 Vácuo 10 - 0,2616 Vácuo 11 + 0,0581 Vácuo 12 + 0,0938 Vácuo 13 - 0,6241 Vácuo 14 - 0,1218 Rolo Couch - 0,3914 Temperatura D-Super + 0,00375 Demanda Iônica - 34,10 Cons. CX 1º Online - 1,08957 Velocidade - 351,1 VJ/VT + 5,340 Temp. Água Branca

O sumário do modelo apresentou um ajuste preditivo do R² em 90,82%, como consta na Figura 1.

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
49,9854	90,85%	90,85%	90,82%

Figura 1 - Sumário do modelo estatístico.

A partir do *software* Minitab também foi possível obter as propriedades estatísticas da Equação de regressão ao conjunto de dados. Os valores obtidos para valor P e fator de inflação da variância estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades estatísticas do modelo preditivo da resistência ao estouro

Variável	Valor P	VIF
Constante	0,0000	-
pH Torre A	0,0000	1,49
Consistência Torre A	0,00004	1,64
Consumo Enzima	0,00000	1,08
Consumo de Cola CX 1º	0,0000	1,46
Consumo de Cola CX 2º	0,0000	1,38
Sulfato Cx. 1º	0,0018	1,44
Sulfato Cx. 2º	0,0003	2,70
Polímero Cx. 1º	0,0000	1,35
Consistência Tanque 2	0,0000	1,29
Energia Ref. 1	0,0000	3,37
Energia Ref. 2	0,0007	3,36
Energia Ref. 3	0,0000	3,53
Energia Ref. 6	0,0000	1,23
Energia Ref. 7	0,0005	1,36
Energia Ref. 8	0,0008	3,52
pH Cx. 1º	0,0003	1,28
Vácuo 1	0,0000	1,28
Vácuo 2	0,0000	1,80
Vácuo 3	0,0000	1,44
Vácuo 4	0,0000	1,74
Vácuo 5	0,0000	3,89
Vácuo 6	0,0000	3,02
Vácuo 7	0,0000	1,60
Vácuo 8	0,0000	2,14
Vácuo 9	0,0005	1,76
Vácuo 10	0,0000	1,15
Vácuo 11	0,0000	1,46
Vácuo 12	0,0000	1,48
Vácuo 13	0,0000	1,50
Vácuo 14	0,0000	2,08
Rolo Couch	0,0000	2,54
Temperatura D-Super	0,0000	1,11
Demanda Iônica	0,0007	1,44
Cons. CX 1º Online	0,0000	1,71
Velocidade	0,0000	3,09
VJ/VT	0,0000	1,10
Temp. Água Branca	0,0000	1,76

Como parâmetro estatístico de seletividade, cada variável deveria conter valor P menor do que 0,05, rejeitando a hipótese H_0 , indicando que a variável é significativa para

o modelo aplicado (FERREIRA, PATINO, 2015) e fator de inflação da variância (VIF) entre 1,0 e 4,0, que aponta se a variância de cada coeficiente de regressão do modelo possui inflação em que as variáveis independentes não estão correlacionadas (BIAGGI, MEDVID, DE ASSIS, 2017).

Outros parâmetros importantes para a análise estatística do modelo preditivo são o conjunto de gráfico dos resíduos, destacando o gráfico de probabilidade normal, o gráfico de resíduos versus ajustados, o histograma e o gráfico de resíduos vs ordem, como ilustra a Figura 2.

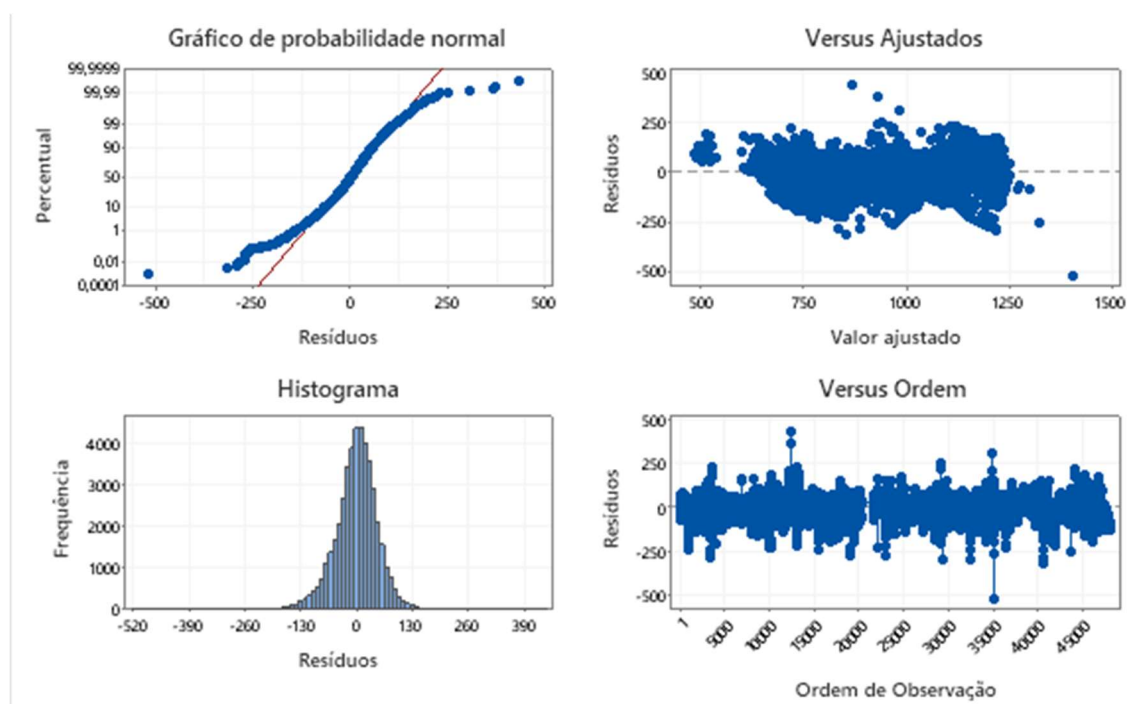


Figura 2 - Gráficos dos resíduos da resistência ao estouro

A partir da obtenção da Equação do modelo e as Análises Estatísticas, o modelo foi aplicado para o acompanhamento do teste de resistência ao estouro durante os meses de janeiro e maio de 2021, tendo seus valores confrontados com os resultados obtidos experimentalmente a cada 40 min, tempo médio este da análise do papel produzido na unidade fabril. Os resultados obtidos são ilustrados nas Figuras 3 a 7, onde pode-se observar que a equação obtida pode ilustrar o perfil da resistência do estouro.

No mês de fevereiro (Figura 4) é possível observar uma grande variação entre os dados simulados e os dados reais obtidos pelo processo, obtendo-se um ajuste com R^2 de 0,5458 (Tabela 3). Durante este período só foi possível aplicar o modelo preditivo durante 7 dias, no intervalo entre os dias 22/02/2021 e 28/02/2021 como demonstrado na Figura 4 e Figura A2 (Anexo). Essa variação na aplicação do modelo se deu devido a problemas

de instrumentação nos sensores de pH e consistência das caixas de entrada de massa do equipamento estudado, levando a operação manual do equipamento, não sendo possível a aplicação do modelo durante este período.

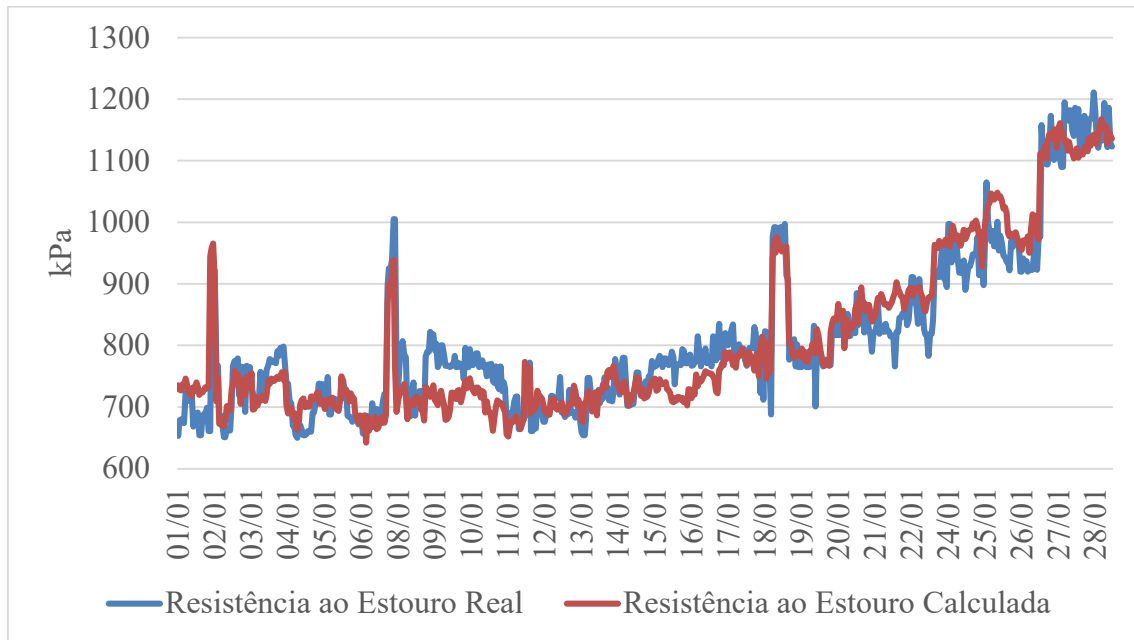


Figura 3 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de janeiro de 2021



Figura 4 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de fevereiro de 2021.

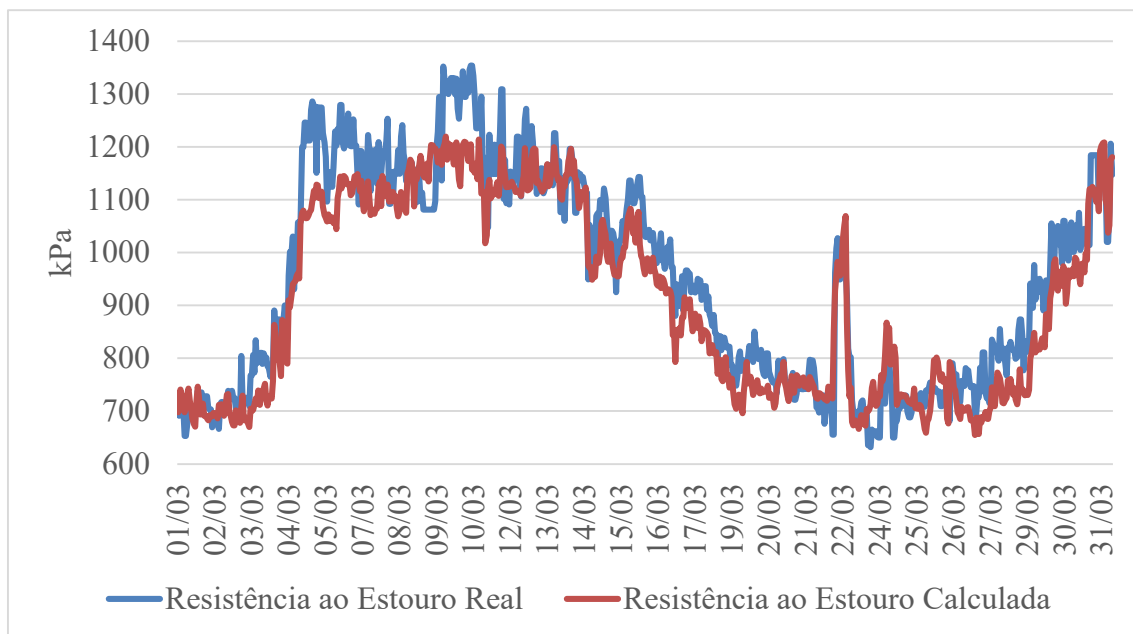


Figura 5 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de março de 2021

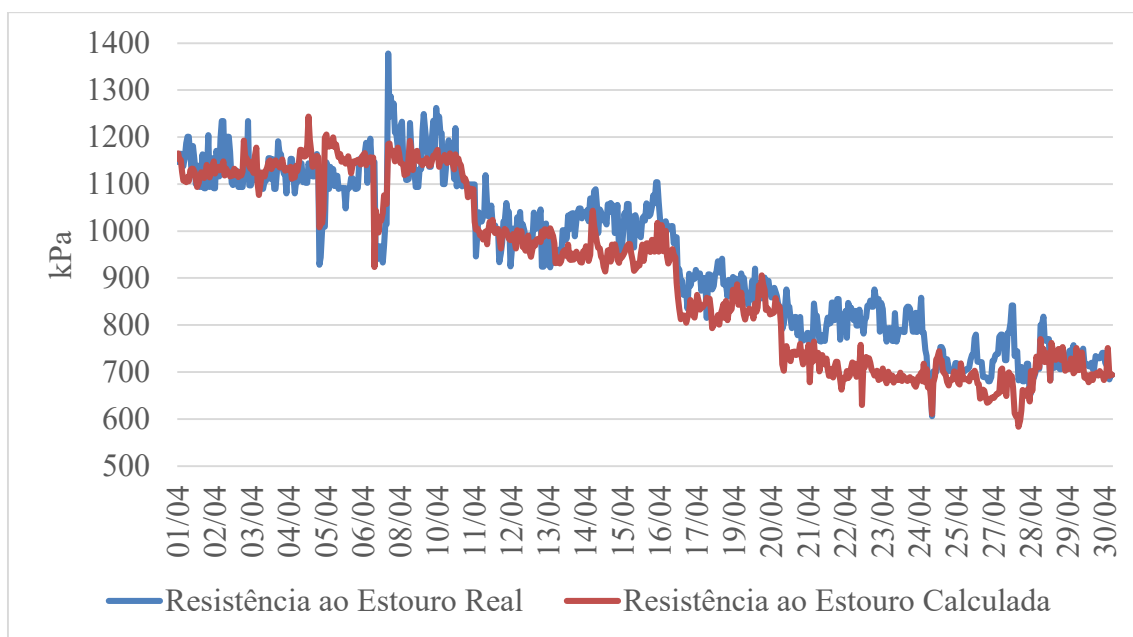


Figura 6 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de abril de 2021

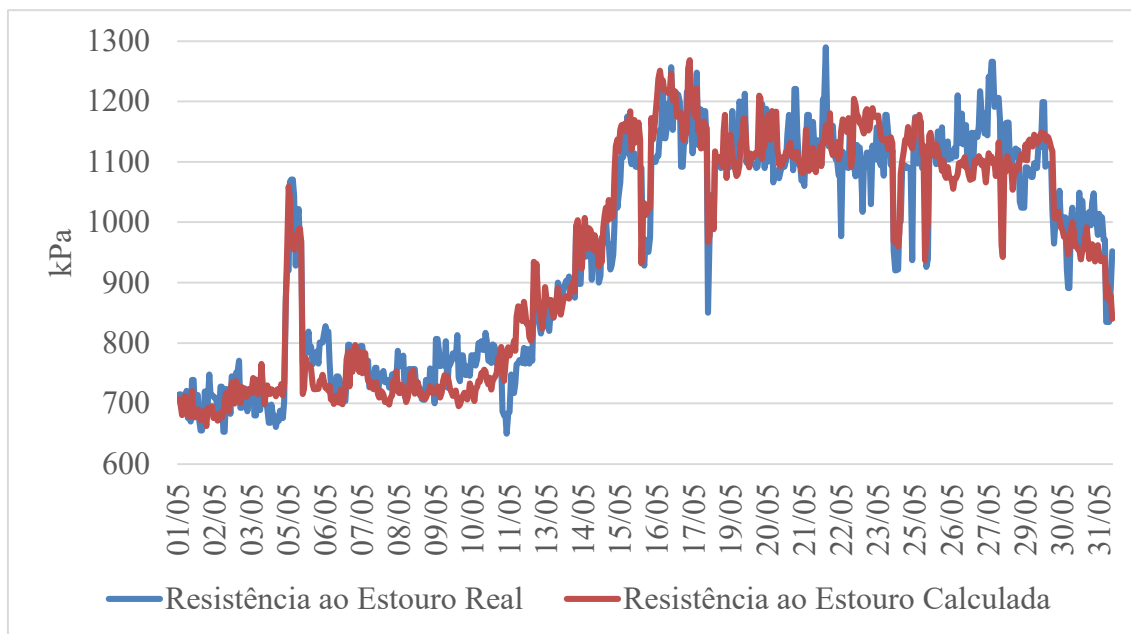


Figura 7 – Resistência ao Estouro real vs calculada obtida no mês de maio de 2021

No escopo de produção da máquina de papel estudada está prevista uma extensa carteira de produtos, dessa forma as variações observadas nos limites dos valores da resistência ao estouro ao longo dos meses se dão pela variação na faixa de gramaturas de papel produzidos pela unidade, indo desde o papel 170 g/m^2 até 480 g/m^2 . Além disso, produtos da mesma gramatura possuem especificações de qualidade diferentes dependendo da finalidade do produto ou da especificação requisitada pelo cliente.

Por se tratar de um modelo que depende de uma série de instrumentos que realizam leituras online durante o processo produtivo, uma das limitações encontradas na modelagem é a calibração de todos os instrumentos, o que pode impactar na qualidade e confiabilidade do dado obtido.

Plotando os dados obtidos pela equação e os dados experimentais, foi possível obter a equação da reta para cada mês em que o modelo preditivo foi utilizado como ferramenta. Os dados referentes ao mês de janeiro a maio de 2021 estão dispostos em Anexo, e os valores de R^2 e a Equação obtida para cada mês estão descritos na Tabela 3.

Os melhores resultados obtidos foram nos meses de maio, março e abril, respectivamente, onde o intervalo de confiança dos dados obtidos superou 90%, sendo o melhor resultado o do mês de maio de 2021, tendo um $R^2 = 0,9218$. Instabilidades no processo de medição dos sensores podem interferir na eficiência do modelo apresentado, bem como parâmetros de processo que não estão presentes no modelo, como os de

produção de celulose e qualidade da matéria prima utilizada, podem gerar variações na qualidade do papel produzido e afetar a performance do sensor virtual.

Tabela 3 - Valores de R^2 e Equação da reta obtida para cada mês de avaliação

Mês/Ano	R^2	Equação da Reta
mai/21	0,9218	$Y = 0,9918 \cdot X + 7,6105$
mar/21	0,9172	$Y = 0,8742 \cdot X + 79,913$
abr/21	0,9111	$Y = 1,0767 \cdot X - 108,05$
jan/21	0,8968	$Y = 0,9884 \cdot X + 8,1354$
fev/21	0,5458	$Y = 0,5597 \cdot X + 293,85$

Modelos de regressão linear multivariada são encontrados na literatura em diversas aplicações para o monitoramento de fatores de qualidade. Em seu trabalho, SANTOS et al. (2021) discutem a aplicação de um modelo multilinear para a determinação do índice de qualidade da água (IQA), tendo uma capacidade preditiva de 93,30% dos dados simulados em relação aos dados obtidos em coletas de diferentes pontos do Arroio Moreira/Fragata no estado de Alagoas.

Em uma aplicação voltada a previsão de parâmetros de qualidade na indústria de papel e celulose, DOMINGUES (2019) relata a aplicação de regressão multilinear e redes neurais para a obtenção de um sensor virtual para a aferição do teste de qualidade de resistência a tração, identificando 30 variáveis de processo que iam desde parâmetros do cozimento da celulose até a formação da folha de papel, obtendo um R^2 de 0,89.

5 CONCLUSÃO

A equação do modelo obtido representou um bom ajuste estatístico aos dados reais, tendo um R^2 preditivo 90,82%. A aplicação do modelo como ferramenta de acompanhamento da qualidade do papel produzido na planta fabril se mostrou promissora, contudo a dependência do modelo da calibração e funcionamento dos equipamentos que representam as 37 variáveis do processo se torna uma limitação à sua aplicação durante todo o processo produtivo.

6 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. O setor. Abtcp.org.br. Disponível em: <<https://www.abtcp.org.br/quem-somos/osetor/osetor>>. Acesso em: 3 Jun. 2021.

Dados Estatísticos. **IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores.** Disponível em: <<https://iba.org/dados-estatisticos>>. Acesso em: 21 Jun. 2021.

DOMINGUES, M.CA. **Desenvolvimento de um sensor virtual para controle da resistência à tração do papel em uma planta de polpa CTMP.** 2019. 45f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

FERREIRA, J. C.; PATINO, C. M. **O que realmente significa o valor-p?**. Brasília: Jornal Brasileiro de Pneumologia e Tisiologia, v.41, p.485-485, 2015.

LOTUFO, F. A.; GARCIA, C (2008). **Sensores Virtuais ou Soft Sensors: Uma Introdução.** 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications. Presidente Prudente, SP: [s.n.]. p. 1-11.

SANTOS et al. **Análise de regressão linear aplicada à modelagem de uma nova equação para o monitoramento de qualidade da água: estudo de caso do Arroio Moreira/Fragata.** Arapiraca: Revista *Ambientale*, v.13, p.13-27, 2021.

SMOOK, G.A. **Handbook for pulp and paper technologists.** Atlanta. TAPPI. 419p. 1989.

TABACHNICK, B. FIDELL, L. S. **Using multivariate statistics** 3a ed.). New York: Harper Collins. 1996.

ANEXO

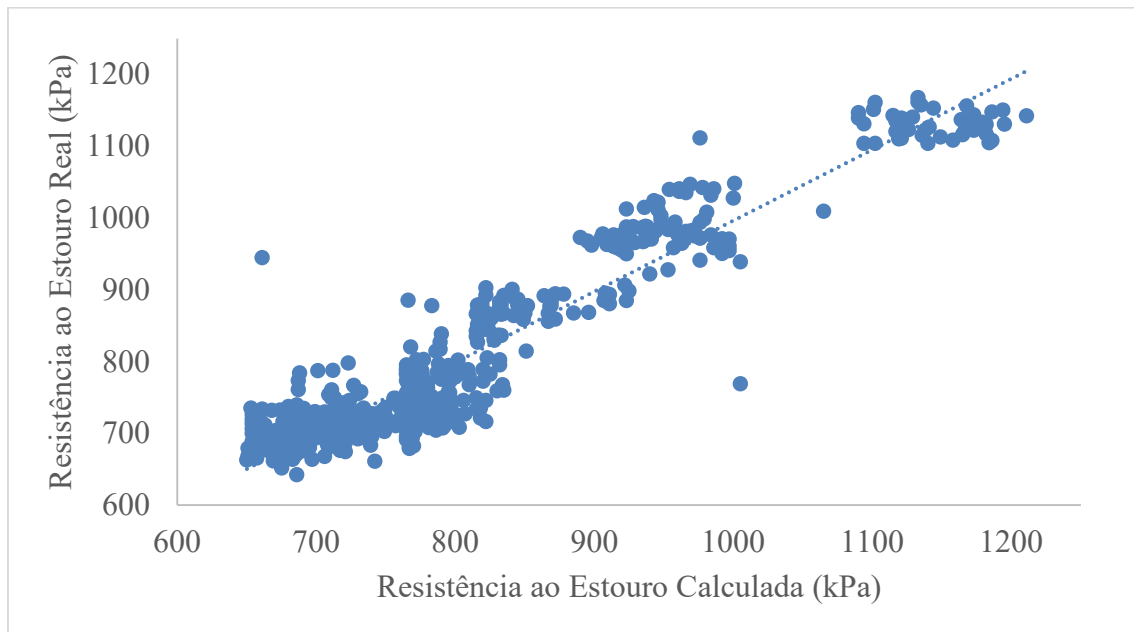


Figura A1. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (jan/21)

A equação linear a seguir representa o ajuste aos dados obtidos no mês de janeiro/21

$$y = 0,9884 x + 8,1354$$
$$R^2 = 0,8968$$

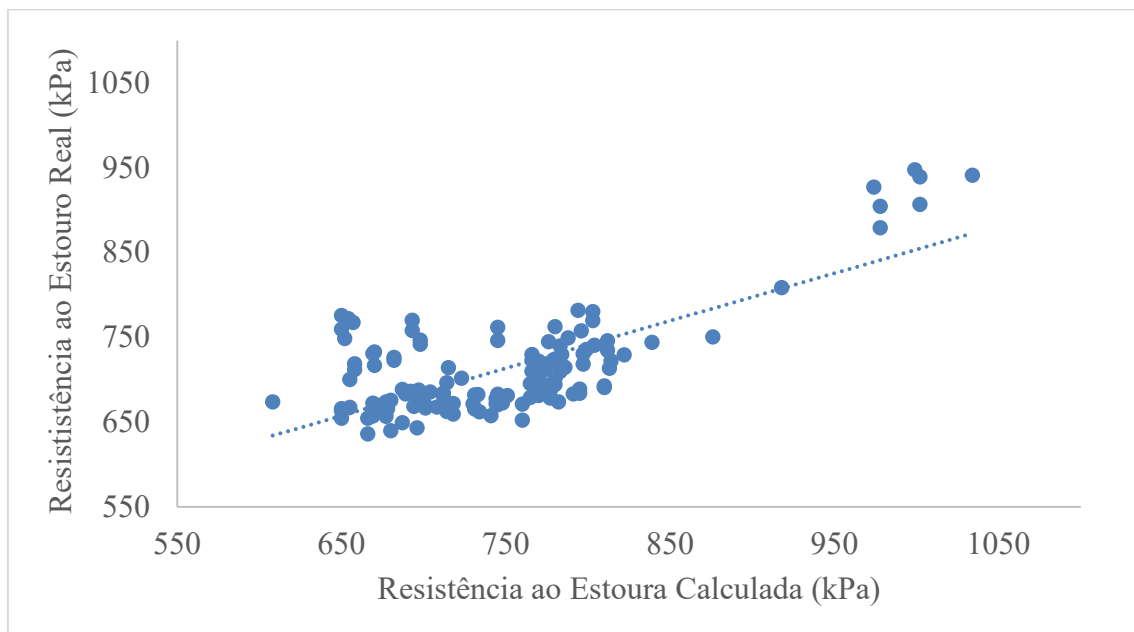


Figura A2. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (fev/21)

A equação linear a seguir representa o ajuste aos dados obtidos no mês de fevereiro/21

$$y = 0,5597x + 293,85$$

$$R^2 = 0,5458$$

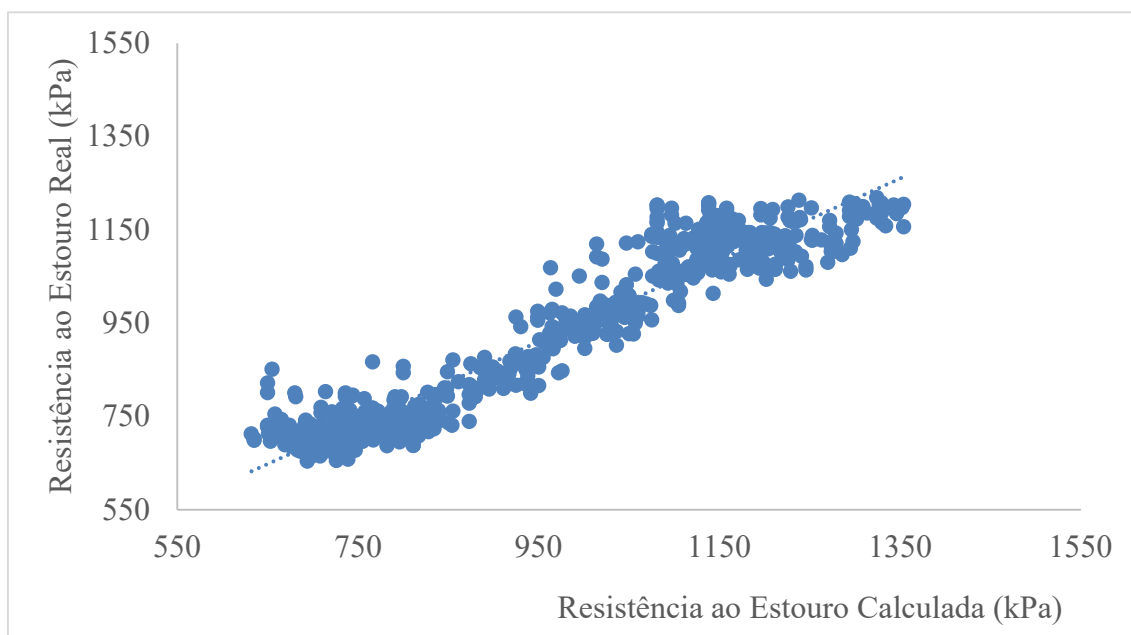


Figura A3. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (mar/21)

A equação linear a seguir representa o ajuste aos dados obtidos no mês de março/21

$$y = 0,8742x + 79,913$$

$$R^2 = 0,9172$$

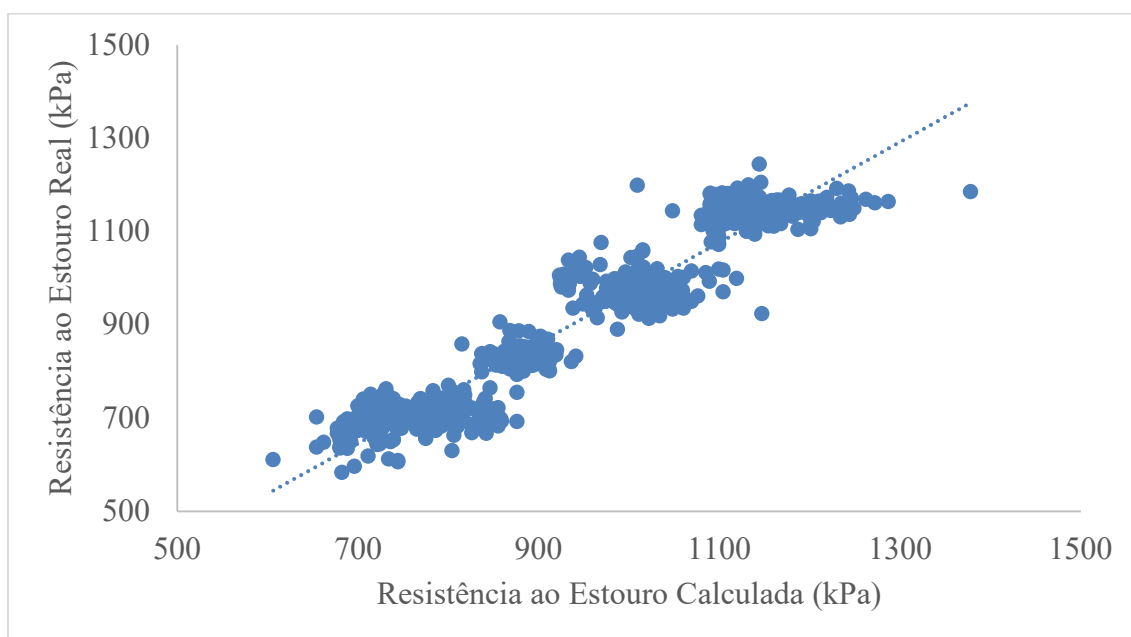


Figura A4. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (abril/21)

A equação linear a seguir representa o ajuste aos dados obtidos no mês de abril/21

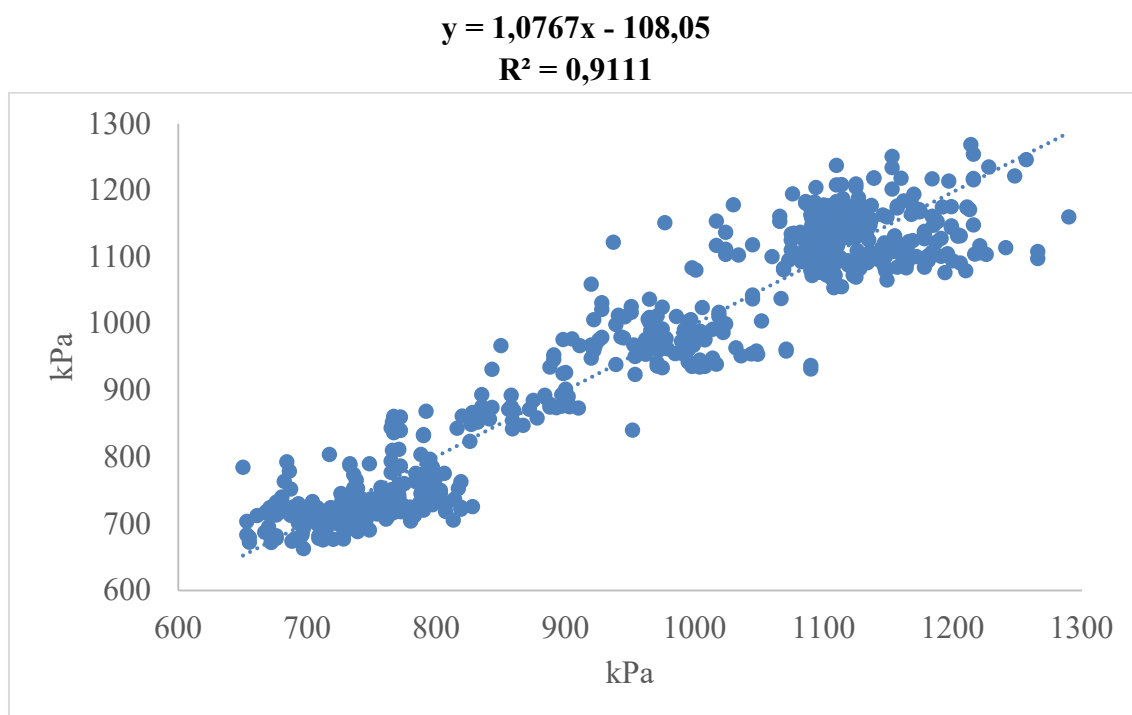


Figura A5. – Ajuste linear referente à Resistência ao Estouro real vs calculada (maio/21)

A equação linear a seguir representa o ajuste aos dados obtidos no mês de maio/21

$$y = 0,9918x + 7,6105$$

$$R^2 = 0,9218$$