

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Bruna de Oliveira Caye

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO DURANTE A LAMINAÇÃO DO
AÇO SAE 1015 EM UMA GAIOLA TRIO**

Porto Alegre
1. Semestre
2023

Bruna de Oliveira Caye

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO DURANTE A LAMINAÇÃO DO
AÇO SAE 1015 EM UMA GAIOLA TRIO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel(a) em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Eckert

Porto Alegre
1. Semestre
2023

Bruna de Oliveira Caye

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO DURANTE A LAMINAÇÃO DO
AÇO SAE 1015 EM UMA GAIOLA TRIO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel(a) em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, obtendo conceito A.

Porto Alegre, 13 de setembro de 2023.

Prof. Alexandre Balbinot, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Paulo Roberto Eckert, Dr.
Orientador
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Roberto Petry Homrich, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Lirio Schaeffer, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Hugo e Isabel, em quem sempre pude encontrar apoio e exemplo.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais Hugo e Isabel, pela dedicação em me oferecer estudo de excelência e por me proporcionar todas as condições para que eu pudesse me dedicar inteiramente a ele, além de todo o apoio nos meus projetos ao longo dos anos.

Aos professores Maicon Ramos e Paulo Eckert, pelas orientações em diferentes momentos do trabalho, pelo apoio e pelos esclarecimentos durante a formação desta monografia.

Ao professor Lírio Schaeffer, pelo entusiasmo para ensinar a teoria por trás dos cálculos de esforços de laminação, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Pedro Gazola, pela mentoria ao longo dos últimos dois anos e meio, contribuindo demais para o meu desenvolvimento profissional, aprendizado técnico de laminação e Indústria 4.0 e para o desdobramento deste projeto.

Aos colegas Marlon Manica e Eduardo Lobo, pelo interesse no tema e por todo o apoio na execução prática, parte fundamental para a realização do trabalho.

Aos engenheiros eletricitas Ranieri Bubans e Adalberto José Rossa pelo fornecimento de dados da máquina similar utilizada para simulação, sem os quais não seria possível fazer esta monografia.

Aos indelévels colegas de trabalho Fernando Torres, Flávio Zavalik, Pedro Koppe, Ismael Molz, Lucas Moehlecke, Rafael Mosmann, Rafael Espindola, Bruno Nascimento, Jorge Huff, Airton Burille, Luiza Deckmann, Juliano de Oliveira e Gustavo Caruso, os quais, além de serem exemplos de pessoas e profissionais, tiveram interesse no tema deste trabalho e não mediram esforços para dividir seus conhecimentos e proporcionar recursos para o desenvolvimento do projeto.

À toda equipe operacional da L1 e do LPP da Siderúrgica Riograndense, por me permitirem fazer parte da turma, sendo os meus principais professores do processo de laminação e de gestão de pessoas.

Ao meu grande amigo Nelso Gonçalves, pela compreensão e pelas palavras certas em todas as horas.

Ao meu companheiro Fabricio Klein, pela paciência e pelo apoio ao longo dos anos.

“Creio firmemente em uma lei de compensação. As verdadeiras recompensas são sempre proporcionais ao esforço e aos sacrifícios feitos.”

Nikola Tesla

RESUMO

O aço está presente em grande parte do mercado, desde a construção civil e a agropecuária até o setor automotivo. O presente trabalho aborda a modelagem matemática da laminação do aço SAE 1015 na gaiola trio do desbaste de uma usina siderúrgica. A partir do modelo de carga, do motor e do restante do circuito, foi avaliado o comportamento do motor do laminador trio através de simulação computacional utilizando o *software PowerSim*, comparando curvas de correntes elétricas eficazes que alimentam o motor obtidas a partir do modelo desenvolvido do sistema e obtidas experimentalmente. As medições de corrente foram realizadas com bobinas de Rogowski e armazenadas em um analisador de qualidade de energia *Fluke 438 Series II*. Optou-se por comparar dados com peças sendo laminadas em quatro horários distintos, em que se pode analisar o efeito do encharque do tarugo. Os valores simulados aproximam-se dos medidos com uma diferença entre 0,6% e 11,8%, sendo este, portanto, um modelo viável para análise de esforços sobre o motor. Simulou-se também uma situação crítica que ocorre com frequência, isto é, quando o laminador opera em ritmo máximo de produção, que é a sobreposição de carga na gaiola trio. Por fim, foi avaliado se o motor sofre sobrecarga significativa durante a laminação das peças simultâneas, e foi concluído que a máquina é adequada para operar nesta situação.

Palavras-chave: motor de indução trifásico; laminação; laminador trio; modelagem; simulação.

ABSTRACT

Steel takes part in most sections of the market, from civil construction and agriculture to automotive production. This paper addresses the mathematical modeling of SAE 1015 steel hot rolling mill in a three high rolling mill of a steel plant. The machine's reaction to the load was analyzed through computer simulation on the *PowerSim* software. Motor's effective electric current curves acquired from the developed model and drawn experimentally were compared. Rogowski coils were used to measure the motor's current, and data was stored in a *Fluke* power quality and motor analyzer. Data from billet hot rolling in four different times of the day were compared, in which the effect of the billet's soak could be analyzed. The simulated values are close to the real ones by 0,6% to 11,8% of difference between them. Therefore, it is a viable model for analysis of motor straining. A critical situation that frequently occurs was also simulated: when the rolling mill operates at maximum production rate, there is an overlapping load in the three high rolling mill. It was evaluated whether the motor endures a significant overload during the overlapping load and it was concluded that the machine is suitable for this process.

Keywords: three phase induction motor; hot rolling mill; three high rolling mill; modeling; simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxo simplificado do processo siderúrgico.....	19
Figura 2. Conformação mecânica realizada pelos cilindros de laminação.....	22
Figura 3. Formatos de canais.....	23
Figura 4. Distribuição de tensões na laminação.....	28
Figura 5. Esquemático de um laminador trio visto de lado.....	31
Figura 6. Cilindro de laminação do laminador trio da L1.....	32
Figura 7. Gaiola trio operando na saída do segundo passe.....	33
Figura 8. Redutor de velocidade.....	33
Figura 9. Esquemático de um motor.....	35
Figura 10. Circuito magnético do transformador e do motor de dois polos.....	36
Figura 11. Curva de conjugado em função da velocidade de uma máquina assíncrona.	37
Figura 12. Circuito equivalente do estator de um motor de indução polifásico.....	39
Figura 13. Circuito equivalente de Thévenin do motor de indução.....	41
Figura 14. Circuito equivalente aproximado a vazio do motor de indução.....	46
Figura 15. Circuito equivalente do motor de indução com rotor bloqueado.....	47
Figura 16. Fluxograma das etapas do projeto.....	51
Figura 17. Circuito de validação do modelo do motor.....	56
Figura 18. Simulação do circuito do motor em vazio.....	57
Figura 19. Curvas de torque do motor e da carga linear em função da velocidade.....	58
Figura 20. Curvas de torque e carga em função da velocidade entre 540 rpm e 660 rpm.....	59
Figura 21. Resultados da simulação do motor com carga nominal.....	60
Figura 22. Modelo de validação do redutor de velocidade.....	61
Figura 23. Resultado da simulação para teste do redutor.....	62
Figura 24. Representação no <i>PSim</i> do circuito do motor da gaiola trio antes dos cilindros para validação do modelo.....	65
Figura 25. Sinais adquiridos durante a operação da gaiola trio.....	66
Figura 26. Analisador de qualidade de energia instalado para medição.....	67
Figura 27. Vista lateral da gaiola trio.....	68
Figura 28. Vista lateral do redutor de velocidade.....	69
Figura 29. Corrente eficaz do motor medida em vazio.....	70
Figura 30. Representação no <i>PSim</i> do circuito completo do motor da gaiola trio em vazio.....	72
Figura 31. Modelo completo da gaiola trio.....	75
Figura 32. Representação gráfica da carga imposta ao longo do tempo.....	75
Figura 33. Comparação entre a corrente simulada e as correntes reais.....	76
Figura 34. Correntes do primeiro passe.....	79
Figura 35. Correntes do segundo passe.....	79
Figura 36. Correntes do terceiro passe.....	80
Figura 37. Correntes do quarto passe.....	80
Figura 38. Correntes do quinto passe.....	81
Figura 39. Representação gráfica da carga imposta com sobreposição ao longo do tempo.....	82
Figura 40. Comparação entre as correntes elétricas simuladas e medidas com sobreposição de carga no quinto e no primeiro passe.....	82
Figura 41. Circuito de verificação de potência mecânica no eixo do motor.....	84

Figura 42. Curvas de potência mecânica no eixo do motor.	86
Figura 43. Determinação dos retângulos equivalentes e das alturas médias dos canais	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores para o coeficiente c .	30
Tabela 2. Dados de placa das máquinas real e similar.	54
Tabela 3. Parâmetros da máquina similar.	55
Tabela 4. Parâmetros para mensurar a resistência elétrica dos cabos de alimentação.	64
Tabela 5. Dimensões dos cilindros de laminação.	70
Tabela 6. Parâmetros utilizados em <i>ModeloCilindros</i> .	72
Tabela 7. Composição química do aço SAE 1015.	73
Tabela 8. Dados geométricos de cada passe.	73
Tabela 9. Torques de laminação calculados.	74
Tabela 10. Intervalos utilizados para o cálculo de valores médios de corrente eficaz por passe.	77
Tabela 11. Diferença entre correntes elétricas simuladas e medidas.	78
Tabela 12. Diferença entre correntes simulada e real da sobreposição de carga.	83
Tabela 13. Valores de potência instantânea e intervalos de tempo utilizados para o cálculo da potência equivalente.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

L1	Laminação 1
R	Raio do cilindro [mm]
l_d	Arco de contato [mm]
v_0	Velocidade inicial da barra [mm/s]
v_1	Velocidade final da barra [mm/s]
h_0	Altura inicial da barra [mm]
h_1	Altura final da barra [mm]
R_1, R_2, R_3, R_4	Raios internos do desenho do canal [mm]
G	Luz do canal [mm]
h	Altura do canal [mm]
b	Largura do canal [mm]
β	Ângulo interno do canal [$^\circ$]
μ	Coefficiente de atrito
Δh	Varição de altura da barra no passe [mm]
φ_h	Deformação de altura
φ_b	Deformação de largura
b_0	Largura inicial da barra [mm]
b_1	Largura final da barra [mm]
φ	Deformação
$\dot{\varphi}$	Velocidade de deformação [s^{-1}]
v_r	Velocidade tangencial do cilindro [mm/s]
ω_r	Velocidade angular do cilindro [rad/s]
F_l	Força de laminação [N]
A_d	Área deformada [mm^2]
k_w	Resistência à deformação [N/mm^2]
b_m	Largura média [mm]
k_e	Fator geométrico
k_f	Tensão de escoamento [N/mm^2]
h_{0m}	Altura média inicial da barra [mm]
h_{1m}	Altura média final da barra [mm]

σ	Resistência ao escoamento [N/mm^2]
η	Coefficiente de plasticidade [N/mm^2]
T_l	Temperatura de laminação [$^{\circ}C$]
$C\%$	Percentual de Carbono
$Mn\%$	Percentual de Manganês
$Cr\%$	Percentual de Cromo
C_v	Fator de correção do modelo de Ekelund
v_t	Velocidade periférica no fundo do canal [mm/s]
h_m	Valor médio de altura [mm]
$h_{m\acute{a}x}$	Altura máxima no fundo do canal [mm]
c	Coefficiente para cálculo de altura média
M_d	Torque de deformação [Nm]
P_l	Potência de laminação [W]
n	Velocidade angular do cilindro [rpm]
Φ	Fluxo magnético [Wb]
\hat{V}_1	Tensão de fase no estator [V]
\hat{E}_2	Força eletromotriz gerada no rotor [V]
\hat{I}_1	Corrente no estator [A]
R_1	Resistência do estator [Ω]
X_1	Reatância de dispersão do estator [Ω]
\hat{I}_ϕ	Corrente de excitação [A]
R_c	Resistência por perdas no núcleo [Ω]
X_m	Reatância de magnetização [Ω]
X_2	Reatância do rotor referida ao estator [Ω]
\hat{I}_2	Corrente no rotor [A]
R_2	Resistência do rotor referida ao estator [Ω]
s	Escorregamento
Z_2	Impedância equivalente do rotor [Ω]
f_r	Frequência do rotor [Hz]
f_e	Frequência do estator [Hz]
I_2	Módulo da corrente do rotor [A]
n_{fases}	Número de fases

P_{rotor}	Perdas no rotor [W]
P_{mec}	Potência eletromagnética desenvolvida pelo motor [W]
$\hat{V}_{1,eq}$	Tensão da fonte equivalente [V]
$R_{1,eq}$	Resistência equivalente do estator [Ω]
$X_{1,eq}$	Reatância equivalente do estator [Ω]
$Z_{1,eq}$	Impedância equivalente do estator [Ω]
M_{motor}	Torque do motor [Nm]
ω_s	Velocidade angular síncrona [rad/s]
V_{cc}	Tensão contínua [V]
I_{cc}	Corrente contínua [A]
P_{rot}	Perdas rotacionais [W]
P_{vz}	Potência elétrica em vazio [W]
$V_{1,vz}$	Módulo da tensão de fase em vazio [V]
$I_{1,vz}$	Módulo da corrente de linha em vazio [A]
J_2	Momento de inércia do rotor [kgm^2]
ω_m	Velocidade angular mecânica [rad/s]
t	Tempo [s]
M_{rot}	Torque de rotação [Nm]
$P_{núcleo}$	Perdas no núcleo em vazio [W]
s_{vz}	Escorregamento em vazio
X_{vz}	Reatância do estator em vazio [Ω]
X_{11}	Reatância própria do estator [Ω]
$\hat{V}_{1,bl}$	Tensão de fase no ensaio de rotor bloqueado [V]
$\hat{I}_{1,bl}$	Corrente de linha no ensaio de rotor bloqueado [A]
X_{bl}	Reatância com rotor bloqueado [Ω]
f_d	Frequência da condição desejada no ensaio de rotor bloqueado [Hz]
f_{bl}	Frequência no ensaio de rotor bloqueado [Hz]
Q_{bl}	Potência reativa com rotor bloqueado [var]
S_{bl}	Potência aparente com rotor bloqueado [VA]
P_{bl}	Potência elétrica total no ensaio de rotor bloqueado [W]
$V_{1,bl}$	Módulo da tensão de fase no ensaio de rotor bloqueado [V]

$I_{1,bl}$	Módulo da corrente no ensaio de rotor bloqueado [A]
R_{bl}	Resistência com rotor bloqueado [Ω]
Z_{bl}	Impedância de entrada com rotor bloqueado [Ω]
MIT	Motor de indução trifásico
L_1	Indutância do estator [H]
L_2	Indutância do rotor [H]
L_m	Indutância de magnetização [H]
$I_{1,vz_{RMS}}$	Módulo da corrente eficaz do estator em vazio [A]
r_t	Relação de transmissão do redutor de velocidade
$I_{b_{RMS}}$	Corrente eficaz da fase b [A]
M_{ind}	Torque induzido [Nm]
M_{carga}	Torque da carga [Nm]
M_m	Torque nominal [Nm]
ω	Velocidade angular [rad/s]
V_{base}	Tensão base do sistema por unidade [V]
Z_{base}	Impedância base do sistema por unidade [Ω]
S_{base}	Potência aparente base do sistema por unidade [VA]
R_t	Resistência total do transformador [Ω]
R_1	Resistência do enrolamento primário [Ω]
R'_2	Resistência do enrolamento secundário referida ao primário [Ω]
R_{pu}	Resistência total por unidade do transformador
X_t	Reatância total do transformador [Ω]
X_1	Reatância do enrolamento primário [Ω]
X'_2	Reatância do enrolamento secundário referida ao primário [Ω]
X_{pu}	Reatância total por unidade do transformador
L_t	Indutância do transformador [H]
f_t	Frequência do transformador [Hz]
R_{fase}	Resistência por fase dos cabos [Ω]
$R_{condutor}$	Resistência do condutor [Ω]
$n_{condutores/fase}$	Número de condutores por fase
ρ_{Cu}	Resistividade do cobre [Ωm]
$l_{condutor}$	Comprimento dos cabos [m]

$A_{condutor}$	Área da seção transversal dos cabos [m^2]
J_r	Momento de inércia do cilindro [kgm^2]
J_{carga}	Momento de inércia da carga [kgm^2]
m	Massa do cilindro [kg]
\emptyset	Diâmetro do cilindro [m]
l	Comprimento do cilindro [m]
M'_{motor}	Torque do motor referido ao lado da carga [Nm]
J_{motor}	Momento de inércia do motor [kgm^2]
a'	Coefficiente de atrito viscoso referente ao lado da carga
a	Coefficiente de atrito viscoso
k_1	Componente de torque linear
k_2	Componente de torque quadrático
k_3	Componente de torque cúbico
$I_b \text{ simulado}$	Corrente eficaz simulada [A]
$I_b \text{ medido } 13h26$	Corrente eficaz medida na laminação da peça das 13h26 [A]
$I_b \text{ medido } 13h35$	Corrente eficaz medida na laminação da peça das 13h35 [A]
$I_b \text{ medido } 14h48$	Corrente eficaz medida na laminação da peça das 14h48 [A]
$I_b \text{ medido } 15h40$	Corrente eficaz medida na laminação da peça das 15h40 [A]
$I_b \text{ medido } 13h13$	Corrente eficaz medida na laminação das peças sobrepostas das 13h13 [A]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	LAMINAÇÃO	21
2.1.1	Encharque	21
2.1.2	Conformação mecânica	22
2.1.3	Formatos de groove	23
2.1.4	Força de laminação	24
2.1.4.1	Arco de contato.....	25
2.1.4.2	Deformação	26
2.1.4.3	Velocidade de deformação	26
2.1.4.4	Alargamento	27
2.1.4.5	Força de laminação	27
2.1.5	Torque de laminação	30
2.1.6	Laminador trio	31
2.2	REDUTOR DE VELOCIDADE	33
2.3	VOLANTES DE INÉRCIA	34
2.4	MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO	34
2.4.1	Modelo do motor de indução em regime permanente	38
2.4.1.1	Equivalentes de Thèvenin	41
2.4.1.2	Determinação de parâmetros a partir de ensaios	43
2.4.1.2.1	<i>Ensaio com corrente contínua</i>	43
2.4.1.2.2	<i>Ensaio a vazio</i>	44

2.4.1.2.3	<i>Ensaio de rotor bloqueado</i>	46
3	METODOLOGIA	50
4	O MODELO	53
4.1	DETERMINAÇÃO DO CIRCUITO DO MOTOR.....	53
4.1.1	Circuito equivalente do motor	54
4.1.1.1	Motor em vazio	56
4.1.1.2	Motor com carga nominal	57
4.1.2	Redutor de velocidade	61
4.1.3	Circuito de alimentação	62
5	MODELAGEM DE CARGA	66
5.1	MOMENTO DE INÉRCIA DOS CILINDROS DE LAMINAÇÃO	68
5.2	ATRITO VISCOSO	70
5.3	FORÇA DE LAMINAÇÃO	73
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	76
6.1	RESULTADOS ESPERADOS	76
6.2	RESULTADOS OBTIDOS	76
6.2.1	Sobreposição de carga	81
6.2.2	Potência mecânica equivalente no eixo do motor	83
7	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	88
	ANEXO A – Curvas de escoamento	91
	APÊNDICE A – Método dos retângulos equivalentes	93
	APÊNDICE B – Memorial de cálculo de força de laminação	95

1 INTRODUÇÃO

A descoberta do ferro foi um dos grandes avanços da humanidade. Através deste material se tornou possível a fabricação de ferramentas resistentes de formatos diversos. Tal produto permitiu o desenvolvimento da agricultura em escala, a produção de instrumentos para expansão e proteção de território e o surgimento da indústria. Em 1856, o homem descobriu como fabricar o aço, o que ocasionou mudanças enormes que têm impacto até hoje (KOLLING, 2013).

O aço é uma liga ferro-carbono em que o teor de carbono varia de 0,008% a 2,11% (Chiaverini, 1996). A ela são adicionados elementos residuais decorrentes do processo de fabricação do material e elementos propositalmente inseridos para melhorar suas características físicas e mecânicas. O carbono aumenta a resistência do aço (PFEIFEL & PFEIFEL, 2021), tornando as ferramentas, antes de ferro, mais sofisticadas e resistentes.

De acordo com Kolling (2013), não há no mundo atual uma indústria que não dependa direta ou indiretamente da utilização do aço, pois ele é utilizado em uma variedade de produtos: maquinário, automóveis, próteses médicas, itens para construção civil, eletrodomésticos, entre outros. Ainda de acordo com a autora, este material, devido à sua amplitude, é considerado um insumo de cunho estratégico. Segundo dados da World Steel Association (WSA, 2023), a produção de aço no mundo em 2022 foi em torno de 1885 milhões de toneladas, sendo o Brasil o nono país com maior produção, com 34,1 milhões de toneladas.

A produção de aço pode ser considerada um indicador do grau de desenvolvimento econômico de um país (OLIVEIRA, 2012). Um exemplo disso é o consumo de aço *per capita* sendo utilizado como indicador de avaliação do grau de industrialização de uma nação (DE OLIVEIRA & SOLLERO, 2014). Percebe-se que, das 10 maiores economias do mundo em 2021 listadas pela CNN Brasil (2022), 6 estavam entre os 10 maiores produtores de aço, segundo dados da WSA (2022).

A Figura 1 ilustra o fluxo do processo siderúrgico: em usinas semi integradas – as *mini mills* – sucata ferrosa e ferro gusa são derretidos na aciaria para a produção de tarugos, que são blocos de aço. Esses blocos são conformados – laminados – para se obter produtos longos, como vergalhões e perfis, e fardos de fio máquina e

vergalhão, formatados em rolos. O fio máquina é um produto intermediário, servindo como matéria prima para demais produtos acabados, como arames, telas, treliças e pregos.

Figura 1. Fluxo simplificado do processo siderúrgico.



Fonte: Silva, 2015.

Uma usina siderúrgica utiliza do processo de laminação a quente para transformar, no laminador do setor Laminação 1 (L1), tarugos de aço – blocos de 6 m de comprimento e aproximadamente 520 kg –, cuja seção transversal é quadrada de dimensões 120 × 120 mm, em fio máquina e vergalhão, de seção redonda com bitolas que variam de 5,50 mm a 14 mm de diâmetro.

O processo de conformação do aço através da laminação demanda muita energia. Em um dia de produção na L1 são consumidos em torno de 70 MW de energia elétrica. O processo, por exigir a conformação de um material resistente, causa variações bruscas de corrente sobre os motores das gaiolas de laminação, uma vez que a carga imposta varia conforme cada barra passa entre os cilindros de laminação.

Esforços de sobrecarga sobre o motor do laminador trio, causados pela conformação mecânica do material, podem ocasionar eventualmente danos severos à máquina. Por se tratar de um motor robusto – trifásico, de indução, com rotor bobinado e 1450 cv de potência –, a compra de um novo é feita sob encomenda; logo, o prazo de entrega pode variar de pelo menos dois a três meses.

Tal espera gera um prejuízo grande para a empresa, uma vez que a Laminação 1 produz em média 600 t de material por dia, alimentando outras células da usina para a fabricação de produtos acabados. Levando-se em conta ganhos internos da L1 baseados em custo fixo, uma parada da área produtiva de três meses custaria para a empresa em torno de 2,88 milhões de reais.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho visa modelar matematicamente e simular o comportamento do processo de laminação na gaiola trio e é dividido entre geral e específico.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é a modelagem do comportamento do motor da gaiola trio em operação.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- a) Calcular o esforço de laminação de uma peça de aço SAE 1015 nos cinco passes do laminador trio;
- b) Gerar o circuito equivalente do motor e da subestação do desbaste;
- c) Simular através do *software PowerSim* o desempenho do motor;
- d) Modelar o sistema com sobreposição de carga;
- e) Verificar se há sobrecarga e se a capacidade do motor é adequada ao processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a compreensão adequada do problema e da metodologia aplicada, são apresentadas diversas seções para especificação de termos e processos relevantes.

2.1 LAMINAÇÃO

Laminação é o processo de conformação do aço no qual a espessura do metal é reduzida por esforços compressivos exercidos por meio de dois cilindros (GROOVER, 2014). Assim, o material tem sua área de seção transversal diminuída e, conseqüentemente, o seu comprimento alongado.

Há dois tipos de laminação: a quente e a frio, ou trefilação. De acordo com Smith & Hashemi (2012), é possível conseguir maiores reduções de espessura quando o metal está quente. Além disso, a laminação a quente confere ao material uma melhoria em suas propriedades, tais como ductilidade, resistência mecânica e estrutura superficial (SCHAEFFER, 2016). O estudo em questão se atém ao processo de laminação a quente.

2.1.1 Encharque

A laminação inicia no reaquecimento dos tarugos, pois é necessário garantir uma temperatura específica e homogênea ao longo de toda a peça para conformá-la (DAROIT, 2012). Os tarugos são produzidos na Aciaria e, ao chegar na Laminação, são colocados no forno de reaquecimento, o qual realiza o encharque, ou aquecimento, das peças.

Segundo Pinedo (2021), o tratamento térmico de reaquecimento tem por objetivo chegar a uma condição microestrutural do aço de menor resistência mecânica e maior ductilidade. Dessa forma, o material pode ser conformado em um maior grau de deformação sem que haja o rompimento da sua estrutura.

De acordo com Groover (2014), o tarugo permanece no forno por horas até alcançar temperatura uniforme em todo seu corpo; assim, o metal escoará de forma

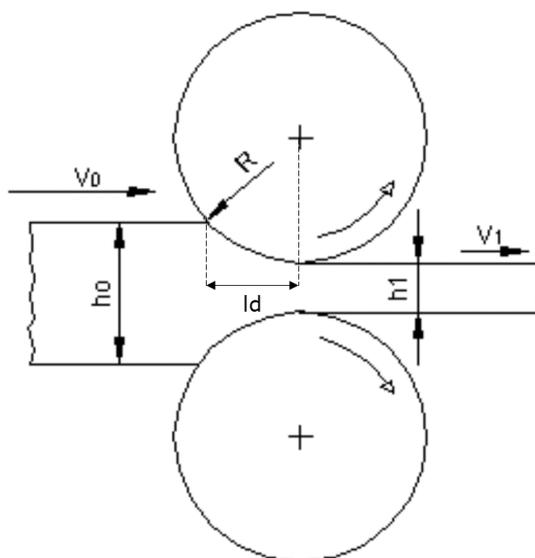
consistente durante a laminação. Ainda segundo o autor, a temperatura desejada para o processo é em torno de 1200 °C.

2.1.2 Conformação mecânica

A laminação consiste na passagem de uma peça de aço entre dois cilindros, sendo a área entre ambos menor que a seção transversal do material laminado (NUNES, 2009). Ainda segundo o autor, agem sobre a peça tensões compressivas, resultantes da prensagem entre os dois cilindros, e cisalhantes superficiais, causadas pelo atrito com a superfície dos cilindros. A Figura 2 ilustra o processo de laminação, em que se pode verificar que a altura inicial h_0 do material reduz para h_1 ao passar entre os cilindros.

A deformação na peça causada pela passagem entre os cilindros de laminação é denominada redução. De acordo com Milanez (2006), existe um limite de redução devido às características de resistência mecânica do conjunto, do cilindro, da potência do motor e das condições de agarre do material nos cilindros de laminação.

Figura 2. Conformação mecânica realizada pelos cilindros de laminação.



Fonte: Milanez, 2006 (adaptado pela autora).

Em que

R = raio do cilindro [mm]

l_d = arco de contato [mm]

v_0 = velocidade de entrada da barra [mm/s]

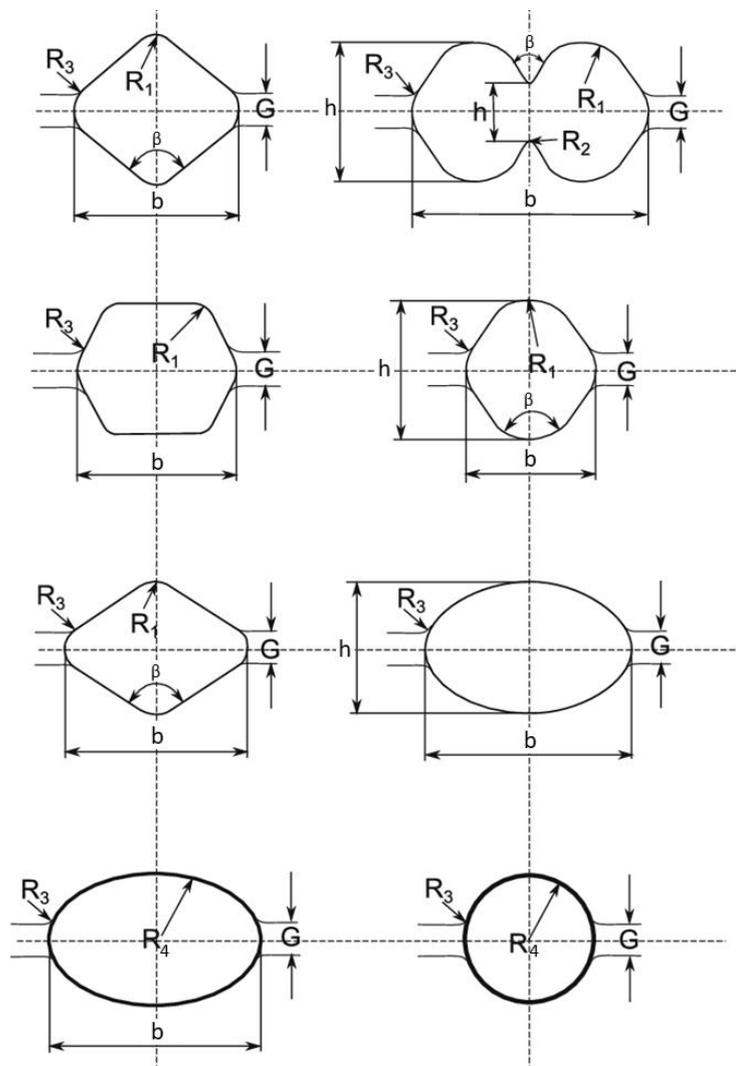
v_1 = velocidade de saída da barra [mm/s]

h_0 = altura inicial da barra [mm]

h_1 = altura final da barra [mm]

2.1.3 Formatos de groove

Figura 3. Formatos de canais.



Fonte: Lambiase, 2013 (adaptado pela autora).

Em que

R_1, R_2, R_3, R_4 = raios internos dos canais [mm]

G = luz entre cilindros [mm]

h = altura total do canal [mm]

b = largura total do canal [mm]

β = ângulo interno do canal [°]

Há dois tipos de cilindro de laminação: mesa lisa e de canais. O primeiro tipo conforma peças em barras chatas ou chapas, já o segundo possui canais usinados, forçando o material a passar por essas vias e, conseqüentemente, fazendo-o adquirir o formato do canal. Existem diversos formatos de canais, ou *grooves*, como ilustra a Figura 3.

Para transformar um tarugo, por exemplo, em fio máquina, se deve ter um conjunto de canais sucessivos para garantir que o produto tenha as dimensões geométricas desejadas. De acordo com Schaeffer (2016), os canais servem para beneficiar o alongamento da peça e a redução da área da seção transversal, pois, caso os cilindros fossem lisos (sem canais), seria necessário um número muito maior de passes para obter o formato final.

A área de calibração dentro da laminação projeta uma sequência de canais e envolve prever como o material preencherá cada canal. Assim, a sequência escolhida deve obter a melhor distribuição de reduções intermediárias, de modo a se ter um processo com menores perdas econômicas por troca de peças e equipamentos por desgaste e menor número de passes no trem de laminação.

2.1.4 Força de laminação

A força de laminação é uma variável que está diretamente relacionada aos esforços da carga sobre os cilindros (GOUVÊA *et al.*, 2022). Assim, pode-se dizer que é o esforço necessário para que ocorra a conformação mecânica dinâmica do material entre os cilindros. Uma vez que o volume da peça se mantém constante, a força de laminação altera o formato da peça através da redução de sua seção transversal e do alongamento do seu comprimento.

Este conceito, de acordo com Garcia e Lisboa (1996), depende de diversos fatores, tais como os listados a seguir:

- Valor de redução do passe: quanto maior a redução, maior o esforço de laminação;
- Composição química do aço: aços mais resistentes, como por exemplo com alto carbono, apresentam maior dificuldade de conformação;
- Área de contato entre o material e os cilindros: quanto maior a área de contato, maior o esforço de laminação;
- Temperatura de processo: baixas temperaturas implicam aumento do esforço;
- Refrigeração dos cilindros: o aumento do volume de água implica queda de temperatura do processo, aumentando a força de laminação;
- Velocidade de deformação: maiores velocidades causam aumento de taxa de deformação, que ampliam a resistência à tração, exigindo maiores esforços de laminação.

2.1.4.1 Arco de contato

O arco de contato l_d , região de contato entre a barra de aço e os cilindros, segundo Milanez (2006), é onde ocorre a conformação do material. Schaeffer (2016) afirma que pode ser calculado conforme a expressão (1). Essa é válida para fins práticos com erros de cálculo menores que 1%, desde que a condição (2) seja atendida. As grandezas são expressas no esboço da Figura 2.

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} \quad (1)$$

$$\Delta h = 0,08R \quad (2)$$

Em que

Δh = diferença entre alturas de entrada e saída da peça [mm]

2.1.4.2 Deformação

O trabalho dos cilindros de laminação sobre a peça, segundo Milanez (2006), causa a deformação que o laminador realiza sobre a barra. A redução em altura ou largura da peça na gaiola de laminação pode ser obtida através da expressão (3).

$$\begin{cases} \varphi_h = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) \\ \varphi_b = \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) \end{cases} \quad (3)$$

Em que

φ_h = deformação na altura da peça

φ_b = deformação na largura da peça

b_0 = largura final da peça [mm]

b_1 = largura inicial da peça [mm]

2.1.4.3 Velocidade de deformação

A velocidade de deformação $\dot{\varphi}$ consiste na quantidade de material deformado por certa quantidade de tempo. Esta variável é representada pela expressão (4).

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \frac{v_r \varphi}{l_d} \\ v_r = R\omega_r \end{cases} \quad (4)$$

Em que

$\dot{\varphi}$ = velocidade de deformação [s^{-1}]

v_r = velocidade tangencial do cilindro [mm/s]

φ = deformação

ω_r = velocidade angular do cilindro [rad/s]

No início do processo, há um aumento da velocidade de deformação, e, conforme a peça passa pelo arco de contato, a velocidade diminui até atingir valor nulo ao final do arco. O ponto em que a velocidade periférica do cilindro e a velocidade da barra se igualam se denomina ponto neutro, e depende do coeficiente de atrito entre a barra e o cilindro e do ângulo do arco de contato.

Assim, de acordo com Milanez (2006), antes do ponto neutro, há restrição ao movimento da peça, causando um aumento da velocidade para compensar tal restrição. Após este ponto, a barra corre de maneira livre, diminuindo a velocidade por conta do movimento avante do material.

2.1.4.4 Alargamento

Quando a barra sofre uma deformação através dos cilindros de laminação, parte do material escoar para as laterais, de modo que a largura final se torna maior que a inicial. A este fenômeno se dá o nome de alargamento.

Em cilindros com canais usinados, o alargamento pode ser contido, pois o próprio canal restringe o movimento do material para o aumento da largura. Milanez (2006) afirma que, mesmo que pequeno, o alargamento a cada passe não pode ser desprezado quando se projeta a sequência de passes, pois se pode prever de forma errada a seção transversal intermediária da barra laminada, prejudicando a calibração das conformações subsequentes.

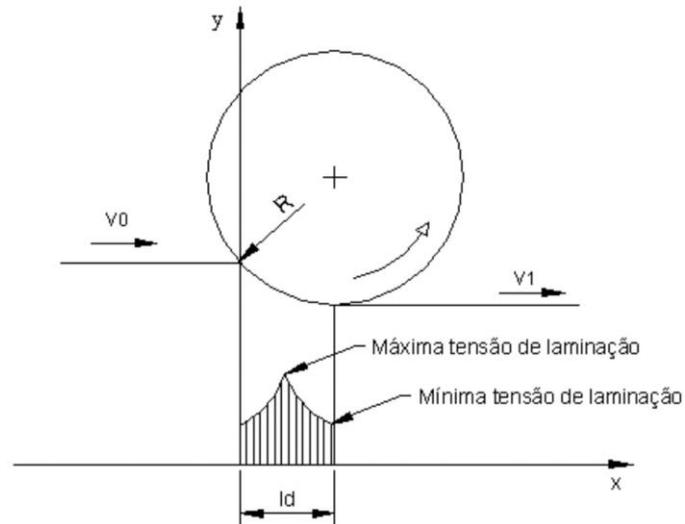
2.1.4.5 Força de laminação

O esforço necessário para conformar o material entre os cilindros de laminação é a força de laminação. A Figura 4 ilustra a distribuição de tensões na laminação. Percebe-se que as tensões menores estão nas extremidades do arco de contato. O pico de força está aplicado no ponto neutro, em que não existe movimento relativo entre a barra e o cilindro; logo, a força aplicada é totalmente utilizada para reduzir a altura da peça.

Um dos primeiros cálculos de força de laminação difundidos no mundo foi o de Ekelund (WUSATOWSKI, 1969). Sua formulação considera a redução absoluta, a

velocidade, a composição química do material, a temperatura, os fatores geométricos do canal, o diâmetro dos cilindros e a área de contato.

Figura 4. Distribuição de tensões na laminação.



Fonte: Milanez, 2006 (adaptado pela autora).

A equação (5) define a força de laminação F_l como o produto da seção deformada A_d , descrita por (6), e a tensão de compressão média, ou resistência à conformação, k_w .

$$F_l = A_d k_w \quad (5)$$

$$\begin{cases} A_d = l_d b_m \\ b_m = \frac{b_0 + b_1}{2} \end{cases} \quad (6)$$

Em que

F_l = força de laminação [N]

A_d = área de contato ou seção deformada [mm^2]

k_w = resistência à conformação ou tensão de compressão média [N/mm^2]

b_m = largura média da peça [mm]

A resistência à deformação k_w , pelo modelo de cálculo de força de laminação de Ekelund, pode ser obtida através das expressões (7) e (8). Para o cálculo do coeficiente de atrito μ se utiliza a equação (9) para cilindros de aço. A resistência ao escoamento σ é obtida através da expressão (10), e o coeficiente de plasticidade do material laminado η é descrito por (11) e (12).

$$k_w = k_e k_f \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_e = 1 + \frac{1,6\mu\sqrt{R(h_1 - h_0)} - 1,2(h_0 - h_1)}{h_{0m} + h_{1m}} \\ k_f = \sigma + \eta\dot{\phi} \end{array} \right. \quad (8)$$

Em que

k_e = coeficiente de influência da geometria e do atrito

k_f = tensão de escoamento $[N/mm^2]$

μ = coeficiente de atrito

h_{0m} = altura média da seção de entrada $[mm]$

h_{1m} = altura média da seção de saída $[mm]$

σ = resistência ao escoamento $[N/mm^2]$

η = coeficiente de plasticidade do material $[Ns/mm^2]$

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005T_l) \quad (9)$$

Em que

T_l = temperatura de laminação $[^\circ C]$

$$\sigma = (14 - 0,01T_l)(1,4 + C\% + Mn\% + 0,3Cr\%) \quad (10)$$

Em que

$C\%$ = percentual de carbono contido no material da peça

$Mn\%$ = percentual de manganês contido no material da peça

$Cr\%$ = percentual de cromo contido no material da peça

$$\eta = 0,01(14 - 0,01T_l)C_v \quad (11)$$

$$\begin{cases} C_v = 1,094e^{-0,03v_r} \\ v_r > 3000 \text{ mm/s} \end{cases} \quad (12)$$

Em que

C_v = fator de correção do modelo de Ekelund

A expressão (13) representa o cálculo da velocidade de deformação $\dot{\phi}$. Valores médios de altura h_{0m} e h_{1m} são utilizados para o cálculo de seções não retangulares. A equação (14) expressa como obter esses valores. O coeficiente c é tabelado conforme o tipo de calibre da seção, como se pode perceber na Tabela 1.

$$\dot{\phi} = \frac{2v_t \sqrt{\frac{h_0 - h_1}{R}}}{h_{0m} + h_{1m}} \quad (13)$$

Em que

v_t = velocidade periférica no fundo do canal [mm/s]

$$h_m = ch_{max} \quad (14)$$

Tabela 1. Valores para o coeficiente c .

Tipo de passe	Coeficiente c
Calibre redondo	0,79
Calibre oval	0,67-0,85

Fonte: Milanez, 2006.

2.1.5 Torque de laminação

O conceito de torque vem da relação de uma força sendo aplicada a um elemento girante a uma distância do eixo. O torque total de deformação M_d para se dar um passe de laminação, considerando o acionamento dos dois cilindros, é descrito por (15). A potência de laminação é descrita por (16).

$$M_d = F_l l_d \quad (15)$$

Em que

M_d = torque de deformação [Nm]

$$P_l = M_d \omega_r \quad (16)$$

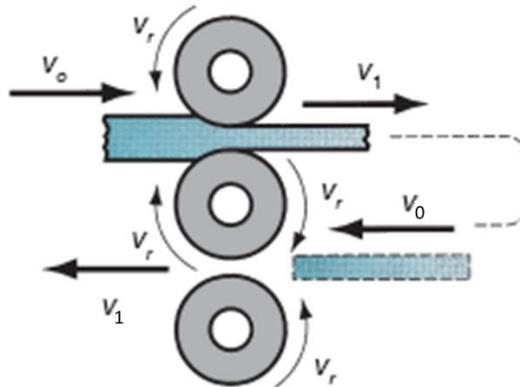
Em que

P_l = potência de laminação [W]

ω_r = velocidade angular dos cilindros [rad/s]

2.1.6 Laminador trio

Figura 5. Esquemático de um laminador trio visto de lado.



Fonte: GROOVER, 2010 (adaptado pela autora).

O laminador trio é composto por uma coluna vertical de três cilindros, como ilustrado na Figura 5, e seu mecanismo envolve uma mesa elevatória para movimentar a peça (GROOVER, 2014). É comum possuir vários passes, ou seja, a peça passar entre os cilindros de laminação diversas vezes, porém em canais diferentes.

A quantidade de passes depende do número de canais disponíveis no cilindro. A cada passe, a mesa basculante é acionada para direcionar a peça para o próximo canal no nível oposto. Dessa forma, um passe ocorre em um sentido, e o passe

seguinte, em outro, e a cabeça da barra de um passe se torna a cauda do passe seguinte.

Na Laminação 1, a gaiola trio é o primeiro contato que o tarugo recém desenformado tem com qualquer conformação mecânica. No caso deste projeto, o cilindro possui cinco canais, ou seja, cinco passes da barra por entre os cilindros. Ao final do quinto passe, a seção transversal da peça está consideravelmente mais próxima do formato arredondado, e a barra segue para o restante do trem de laminação.

A Figura 6 é uma fotografia do cilindro da gaiola trio. Percebe-se que os canais do cilindro são inicialmente de formato mais retangular (canais à esquerda na imagem) e, conforme se passa para os passes posteriores (à direita), os canais têm feições mais arredondadas.

Figura 6. Cilindro de laminação do laminador trio da L1.



Fonte: a autora, 2022.

A Figura 7 é uma fotografia do laminador trio em operação durante a saída do segundo passe. Pode-se observar o sistema das calhas onde a barra está: no momento da foto, a mesa basculante estava na posição mais baixa para que a peça se movimentasse entre os cilindros central e inferior na saída do segundo passe. Após isso, a mesa basculante sobe para que a peça siga para o terceiro passe entre os cilindros superior e central.

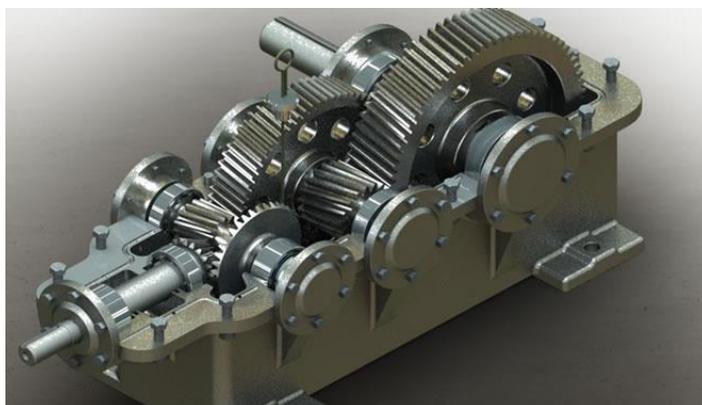
Figura 7. Gaiola trio operando na saída do segundo passe.



Fonte: a autora, 2023.

2.2 REDUTOR DE VELOCIDADE

Figura 8. Redutor de velocidade.



Fonte: Redação Indústria Hoje, 2013. Acesso em 25/04/2022.

Elementos de transmissão são utilizados para transferir a potência e o movimento angular entre um elemento motriz e o restante de um sistema movido (SANTOS, 2015). Tais elementos, segundo Shigley *et al.* (2005), são correias, engrenagens, parafusos sem fim, correntes e eixos fixados por acoplamentos.

Engrenagens e conjuntos redutores são uma solução simples para a necessidade de adequar a velocidade e o torque de um motor às exigências de um

processo específico (CORDEIRO, 2012). De acordo com Silva (2019), redutores de velocidade são capazes de reduzir uma alta rotação gerada por um motor acoplado a seu eixo de entrada ao aumentar o torque no eixo de saída.

De modo geral, o redutor de velocidade possui um conjunto de engrenagens de tamanhos variados, como se pode observar na Figura 8, que transmitem entre si o movimento e retornam no eixo de saída uma velocidade reduzida e um torque amplificado. O processo de laminação possui cargas de força e torque elevados, de modo que o redutor de velocidade se faz necessário entre o motor e a carga para que esses valores não sejam aplicados integralmente no eixo da máquina rotativa. Assim, o esforço sobre o motor é menor, permitindo que a potência da máquina também seja menor.

2.3 VOLANTES DE INÉRCIA

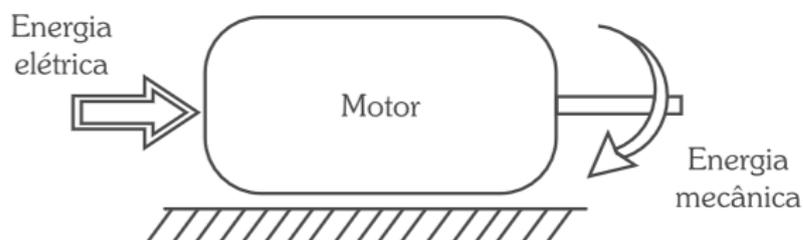
De acordo com Brown & Chvala (2005), volantes de inércia são uma forma simples de armazenamento de energia cinética: a energia é armazenada através de discos de grande massa que são forçados a girar em torno do próprio eixo. Ainda segundo os autores, essa energia é proporcional à massa do volante de inércia – mais especificamente do momento de inércia do objeto – e ao quadrado da velocidade angular.

Assim, para armazenar energia dessa forma é necessário fazer um disco rotacionar de um ponto a outro. Grandes quantidades de energia são armazenadas mesmo em baixas velocidades com o emprego de volantes de inércia (BIM, 2018).

2.4 MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO

O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica, como ilustra a Figura 9. Estima-se que mais de 40% da energia elétrica consumida no Brasil seja destinada ao acionamento de motores elétricos em geral, e um pouco mais da metade da energia elétrica do setor industrial é consumida por motores (FILHO, 2013).

Figura 9. Esquemático de um motor.



Fonte: FILHO, 2013.

Há duas grandes partes que compõem um motor: estator e rotor, ambos em sua maioria feitos, segundo Fitzgerald *et al.* (2006), de aço elétrico de alta permeabilidade, de modo a maximizar o acoplamento entre bobinas e aumentar a densidade de energia magnética associada. O estator é a parte estática, e o rotor, a parte girante (FITZGERALD, 2006).

De acordo com Filho (2013), o conjunto estator-rotor constitui um circuito que possibilita ao fluxo magnético um caminho fechado de baixa relutância. Fluxo este que faz o rotor girar. Entre ambas as partes há o entreferro, vão livre necessário para que haja a rotação (FILHO, 2013).

De acordo com Chapman (2013), máquinas de corrente elétrica alternada têm como princípio fundamental o seguinte:

se correntes trifásicas de mesma intensidade e defasadas de 120° entre si estiverem fluindo em um enrolamento trifásico, um campo magnético girante de intensidade constante será produzido.

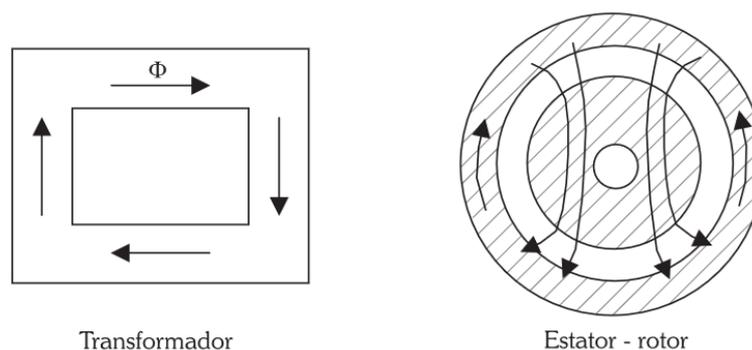
O enrolamento trifásico mencionado consiste em três enrolamentos espaçados de 120° elétricos entre si ao redor da superfície da máquina. Assim, máquinas de corrente alternada – síncronas ou assíncronas –, possuem dois campos magnéticos: o do estator, síncrono, e o do rotor. O campo do rotor tende a se alinhar com o campo do estator (CHAPMAN, 2013).

Motores de indução são o carro chefe da indústria de potência elétrica (Krause *et al.*, 2013). Segundo Filho (2013), máquinas assíncronas são responsáveis por aproximadamente 75% do total de potência instalada no universo de todos os motores.

Suas grandes vantagens são robustez – a qual garante longa vida útil – baixo custo e alta facilidade de instalação e manutenção.

Em máquinas assíncronas, as correntes elétricas são induzidas nos enrolamentos do rotor, tal qual ocorre em um transformador (FILHO, 2013). A Figura 10 ilustra um esquemático dos núcleos do transformador e do motor para fins de comparação. Percebe-se que possuem estrutura e comportamento similares.

Figura 10. Circuito magnético do transformador e do motor de dois polos.



Fonte: Filho, 2013.

Em que

Φ = fluxo magnético [Wb]

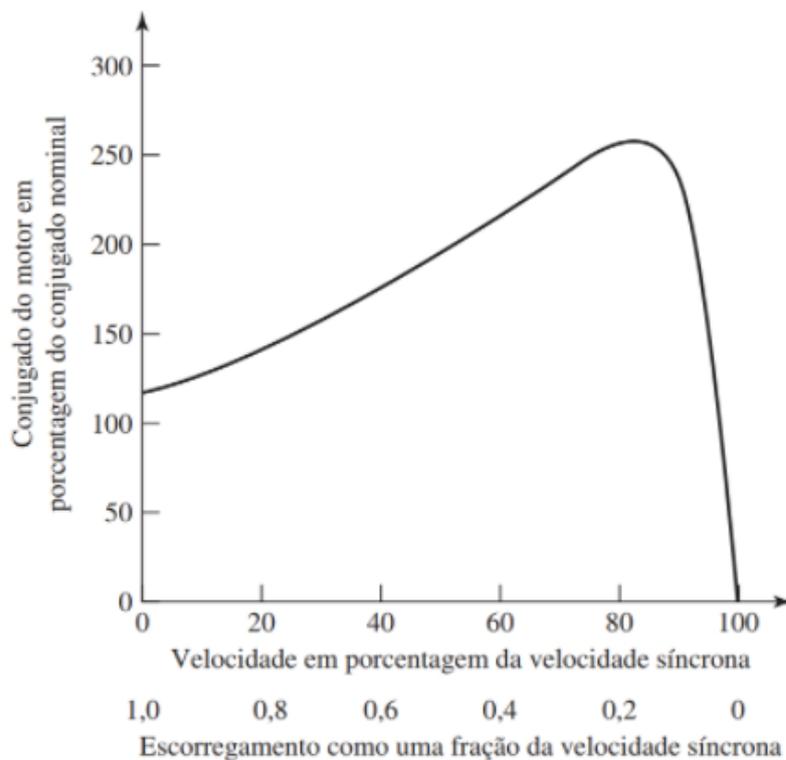
A indução das correntes elétricas ocorre através da combinação de dois fatores, de acordo com Fitzgerald *et al.* (2006): variação das correntes do estator no tempo e movimento do rotor em relação ao estator. Em máquinas de indução não há tensão externa aplicada ao rotor (PETRUZELLA, 2013), e seu diferencial em relação a outros tipos de motores é que não é necessária corrente contínua de campo (CHAPMAN, 2013).

Segundo Fitzgerald *et al.* (2006), o fluxo eletromagnético de armadura do motor se adianta em relação ao do rotor e produz conjugado. Essas máquinas têm velocidades diferentes para rotor e campo girante, ou seja, há um escorregamento, o qual é definido como a diferença entre a velocidade síncrona do campo do estator e a velocidade do rotor.

As velocidades de rotor e estator não podem se igualar, pois os condutores do rotor estariam estacionários em relação ao campo do estator. Tal fenômeno inibiria a indução de corrente neles, impedindo a geração de conjugado (UMANS, 2014).

A Figura 11 ilustra a curva de conjugado em função da velocidade de uma máquina assíncrona. Observa-se que o conjugado máximo é obtido sem exigir a velocidade máxima, e, como esperado, na velocidade síncrona o conjugado é zero.

Figura 11. Curva de conjugado em função da velocidade de uma máquina assíncrona.



Fonte: Umans, 2014.

Há dois tipos de motor de indução: gaiola de esquilo e rotor bobinado, ou anel. Motores do tipo gaiola possuem rotores com barras condutoras curto-circuitadas em ambas extremidades por anéis de curto-circuito (CHAPMAN, 2013). Em motores com rotor bobinado, os terminais do rotor são conectados a anéis de cobre solidários ao eixo que, em contato com escovas fixas de grafite, permitem acesso pelo exterior (FILHO, 2013).

Segundo Bim (2018), os terminais do enrolamento do rotor bobinado são conectados a cabos externos, permitindo inserir resistências elétricas ou fontes de

alimentação controladas ao circuito. A vantagem de se ter uma resistência externa é poder variá-la conforme for necessário: por exemplo, na partida se há resistência externa máxima, e gradualmente ela é reduzida a zero, resultando em um torque de partida elevado com uma corrente elétrica de partida relativamente baixa. Com resistência externa nula, o motor de rotor bobinado possui comportamento semelhante ao de gaiola de esquilo (PETRUZELLA, 2013).

Assim, para atuar sobre altas cargas inerciais, a resistência externa proporciona curvas de torque ótimas que suportam a carga e não causam danos ao rotor durante a partida devido à potência dissipada por ele, segundo Petruzella (2013). Ainda de acordo com o autor,

colocar em movimento uma carga de alta inércia com um motor de gaiola padrão exigiria entre 400 e 550% de corrente de partida até 60 segundos. A partida da mesma máquina com um motor de rotor bobinado (motor de anéis coletores) exigiria cerca de 200% de corrente por cerca de 20 segundos.

2.4.1 Modelo do motor de indução em regime permanente

O circuito equivalente por fase de um motor de indução em regime permanente é representado pelo esquemático da Figura 12. Observa-se que o fluxo de entreferro resultante é criado pelas forças magnetomotrizes combinadas das correntes elétricas do estator e do rotor (FITZGERALD *et al.*, 2006). A equação geral que descreve o modelo está contida na expressão (17).

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (17)$$

Em que

\hat{V}_1 = tensão de fase nos terminais do estator [V]

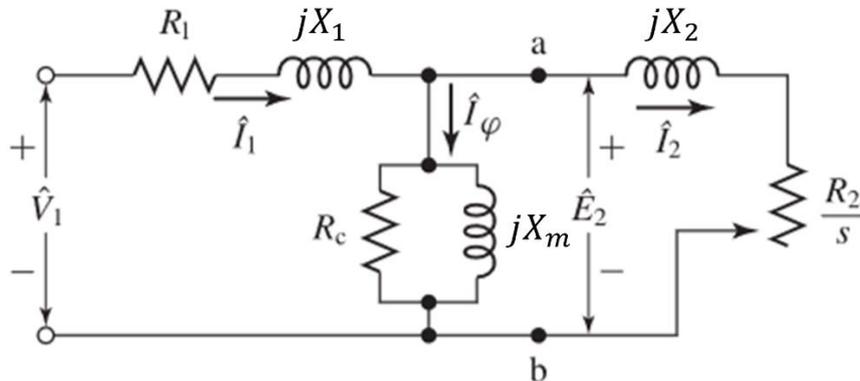
\hat{E}_2 = força eletromotriz gerada pelo fluxo de entreferro resultante [V]

\hat{I}_1 = corrente elétrica do estator [A]

R_1 = resistência efetiva do estator [Ω]

X_1 = reatância de dispersão do estator [Ω]

Figura 12. Circuito equivalente do estator de um motor de indução polifásico.



Fonte: Umans, 2014 (adaptado pela autora).

Em que

\hat{I}_φ = corrente elétrica de excitação [A]

R_c = resistência de perdas no núcleo [Ω]

X_m = reatância de magnetização [Ω]

X_2 = reatância de dispersão do rotor referida ao estator [Ω]

\hat{I}_2 = corrente elétrica do rotor [A]

R_2 = resistência do rotor referida ao estator [Ω]

s = escorregamento

A corrente elétrica do estator é a soma de duas componentes: uma de carga e outra de excitação. A componente de carga \hat{I}_2 é a componente associada à conversão eletromecânica de energia. A componente de excitação \hat{I}_φ é a corrente de estator necessária para criar fluxo no entreferro, depende da força eletromotriz \hat{E}_2 e é composta por uma corrente de perdas no núcleo \hat{I}_c , em fase com \hat{E}_2 , e uma corrente de magnetização \hat{I}_m , atrasada em 90° elétricos em relação a \hat{E}_2 .

Como se pode observar na Figura 12, a corrente elétrica de excitação é descrita por um ramo de derivação formado por uma resistência de perdas no núcleo R_c em paralelo com uma reatância de magnetização X_m . R_c e X_m são determinadas para a frequência nominal do estator em condições em que E_2 – magnitude do fasor de força eletromotriz gerada pelo fluxo de entreferro – é próximo do valor de operação,

e se assume que tais valores se mantenham constantes para pequenas variações de E_2 .

A impedância equivalente do rotor Z_2 é descrita na expressão (18). R_2/s representa o efeito combinado da resistência do rotor e da carga mecânica no eixo como uma função do escorregamento, referida ao estator e na frequência do estator. X_2 é a reatância de dispersão do rotor referido na frequência de escorregamento. Ambas as variáveis consideram o movimento relativo entre rotor e estator, substituindo o rotor real por um equivalente estacionário com tensões e correntes elétricas na frequência do estator. O escorregamento surge da mudança de frequência, uma vez que a relação entre frequências do estator e do rotor são descritas em (19).

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = R_2/s + jX_2 \quad (18)$$

$$f_r = sf_e \quad (19)$$

Em que

Z_2 = impedância equivalente do rotor [Ω]

f_r = frequência de operação do rotor [Hz]

f_e = frequência de operação do estator [Hz]

Assim, é gerado o circuito equivalente monofásico da Figura 12. Os efeitos da carga no eixo e da resistência do rotor são representados através de R_2/s , pois é uma função do escorregamento, logo dependente da carga mecânica. De acordo com Fitzgerald *et al.* (2006), todos os fenômenos elétricos do rotor referidos ao estator possuem frequência do estator, pois o enrolamento do estator enxerga as ondas de força magnetomotriz e de fluxo eletromagnético se deslocando na velocidade síncrona.

A potência total P_g transferida através do entreferro é descrita em (20). As perdas do rotor P_{rotor} são calculadas a partir das perdas na resistência dele como em

(21). A partir de (22) se percebe que se pode determinar a potência eletromagnética convertida para mecânica.

$$P_g = n_{fases} I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \quad (20)$$

$$P_{rotor} = n_{fases} I_2^2 R_2 \quad (21)$$

$$P_{mec} = P_g - P_{rotor} = n_{fases} I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) = (1-s)P_g \quad (22)$$

Em que

P_g = potência total transferida através do entreferro [W]

n_{fases} = número de fases do estator

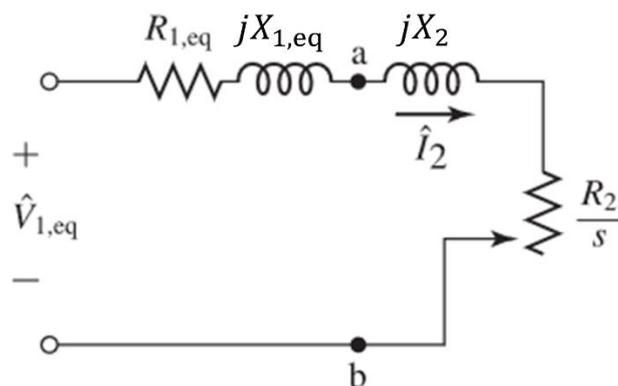
I_2 = módulo da corrente elétrica do rotor [A]

P_{rotor} = perdas no rotor [W]

P_{mec} = potência eletromagnética desenvolvida pelo motor [W]

2.4.1.1 Equivalentes de Thévenin

Figura 13. Circuito equivalente de Thévenin do motor de indução.



Fonte: Umans, 2014 (adaptado pela autora).

Em que

$\hat{V}_{1,eq}$ = tensão de fase equivalente nos terminais do estator [V]

$R_{1,eq}$ = resistência equivalente do estator [Ω]

$X_{1,eq}$ = reatância equivalente do estator [Ω]

De acordo com Arnold (2009), o teorema de Thèvenin é um poderoso método de análise de circuitos elétricos e eletrônicos. Qualquer circuito com dois terminais de saída pode ser substituído por um equivalente com mesma saída, porém constituído por uma fonte de tensão em série com uma impedância.

$$\hat{V}_{1eq} = \hat{V}_1 \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (23)$$

$$Z_{1eq} = (R_1 + jX_1) // jX_m = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (24)$$

Em que

Z_{1eq} = impedância equivalente do estator [Ω]

Ainda segundo o autor, se a intenção é a de investigar apenas o comportamento elétrico em dispositivos ligados aos terminais de saída, o procedimento é suficiente e possui solução simplificada. Ao se obter a impedância de saída, é possível calcular qual valor da carga em que ocorre a máxima transferência de potência.

Pelo teorema, a tensão elétrica da fonte equivalente \hat{V}_{1eq} é aplicada nos terminais ab quando o circuito do rotor é removido. Assim, ao observar a Figura 12, se percebe que \hat{V}_{1eq} é obtido através de um divisor de tensão, descrito em (23). A impedância entre os terminais é obtida aplicando um curto-circuito na fonte de tensão, resultando na impedância do estator em paralelo com a reatância de magnetização, como explicitado em (24). Nesta abordagem a resistência R_c mostrada na Figura 12 é desprezada, uma vez que a impedância equivalente do paralelo de R_c e X_m possui valor muito próximo de X_m .

A partir do circuito equivalente representado na Figura 13, se desenvolve a equação da corrente do rotor refletida para o estator em (25). Do mesmo modo, o conjugado é obtido através da expressão (26).

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_{1,eq}}{Z_{1,eq} + jX_2 + R_2/s} \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{motor} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{fases} V_{1,eq}^2 (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + (R_2/s) \right)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} \right] \\ \omega_s = \frac{4\pi f_e}{\text{número de polos}} \end{array} \right. \quad (26)$$

Em que

M_{motor} = torque desenvolvido pelo motor [Nm]

ω_s = velocidade mecânica angular síncrona [rad/s]

2.4.1.2 Determinação de parâmetros a partir de ensaios

É possível obter os parâmetros de circuito equivalente a partir de testes (FITZGERALD *et. al*, 2006). São eles: ensaios com corrente contínua, em vazio e de rotor bloqueado.

2.4.1.2.1 Ensaio com corrente contínua

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{V_{cc}}{2I_{cc}} \text{ (estator em Y)} \\ R_1 = \frac{3V_{cc}}{2I_{cc}} \text{ (estator em } \Delta) \end{array} \right. \quad (27)$$

Em que

V_{cc} = tensão contínua aplicada [V]

I_{cc} = corrente contínua aplicada [A]

De acordo com Bim (2018), em bobinas estacionárias excitadas por corrente contínua não há variação de fluxo magnético; portanto, elas não induzem tensão. Dessa forma, a reatância dessas bobinas é nula. Aplicando tensão contínua nos

terminais do estator, a impedância é resumida à resistência estatórica. As expressões em (27) representam o cálculo de R_1 para as duas possibilidades de ligação do estator.

2.4.1.2.2 Ensaio a vazio

Geralmente executado em frequência nominal e com tensões polifásicas equilibradas aplicadas aos terminais estatóricos, o ensaio a vazio fornece informações em relação à corrente elétrica de excitação e às perdas sem carga imposta (FITZGERALD *et al*, 2006). Ao aplicar tensões em frequência nominal aos terminais do estator, são medidas a tensão de fase $V_{1,vz}$, a corrente de linha $I_{1,vz}$ e a potência elétrica ativa de entrada P_{vz} .

A corrente do rotor a vazio é a mínima necessária para suprir as perdas rotacionais e as perdas elétricas no estator. As perdas rotacionais, de acordo com Fitzgerald *et al* (2006) são consideradas constantes e iguais ao seu valor em vazio e podem ser calculadas conforme a expressão (28). Deve-se, porém, atentar-se à temperatura do enrolamento do estator, pois esta varia a resistência estatórica.

$$P_{rot} = P_{vz} - n_{fases} I_{1,vz}^2 R_1 \quad (28)$$

Em que

P_{rot} = perdas rotacionais [W]

P_{vz} = potência em vazio [W]

$I_{1,vz}$ = módulo de corrente no estator em vazio [A]

Segundo Fitzgerald *et al* (2006), para se obter as perdas no núcleo a vazio $P_{núcleo}$ – correspondentes à tensão do ensaio a vazio – e a respectiva resistência a elas associada R_c , assume-se que,

se o motor for operado a vazio na velocidade nominal e então for desligado repentinamente da fonte, o decaimento da velocidade do motor será determinado pelas perdas rotacionais.

Tal comportamento é descrito nas equações (29) - (31).

$$J_2 \frac{d\omega_m}{dt} = -M_{rot} = -\frac{P_{rot}}{\omega_m} \quad (29)$$

$$P_{rot}(\omega_m) = -\omega_m J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (30)$$

$$P_{núcleo} = P_{vz} - P_{rot} - n_{fases} I_{1,vz}^2 R_1 \quad (31)$$

Em que

J_2 = momento de inércia do rotor [kgm^2]

ω_m = velocidade angular mecânica [rad/s]

t = tempo [s]

M_{rot} = torque de perdas rotacionais [Nm]

$P_{núcleo}$ = perdas no núcleo [W]

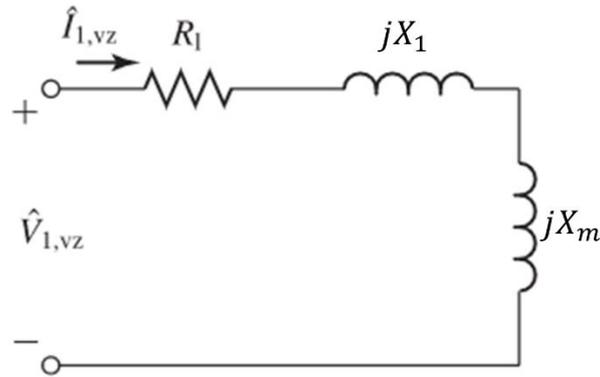
A partir das perdas no núcleo, se define a resistência associada: a vazio, a corrente do estator é baixa; logo as quedas de tensão na resistência do estator e na reatância de dispersão são desprezíveis. Assim, a tensão sobre a resistência de perdas do núcleo é praticamente a tensão de fase a vazio, como em (32).

$$R_c = \frac{n_{fases} V_{1,vz}^2}{P_{núcleo}} \quad (32)$$

A resistência de rotor com carga imposta nula refletida R_2/s_{vz} é muito elevada, pois o escorregamento em vazio é mínimo. Observando a Figura 12, o primeiro passo para simplificar o circuito é calcular a impedância equivalente do paralelo dos ramos de magnetização e do rotor (que possui uma alta resistência em série), o qual é aproximadamente o valor da reatância de magnetização (33).

É possível perceber na Figura 14, que ilustra um esquemático do motor de indução sob condições a vazio, que a reatância a vazio X_{vz} é a reatância do estator em série com a de magnetização, como em (34). Logo, a reatância própria do estator X_{11} pode ser determinada a partir das medidas a vazio.

Figura 14. Circuito equivalente aproximado a vazio do motor de indução.



Fonte: Umans, 2014 (adaptado pela autora).

$$X_m // \left(X_2 + \frac{R_2}{s_{vz}} \right) \approx X_m \quad (33)$$

$$X_{vz} = X_{11} = X_1 + X_m \approx \frac{V_{1,vz}}{I_{1,vz}} \quad (34)$$

Em que

s_{vz} = escorregamento em vazio

X_{vz} = reatância em vazio [Ω]

X_{11} = reatância própria do estator [Ω]

2.4.1.2.3 Ensaio de rotor bloqueado

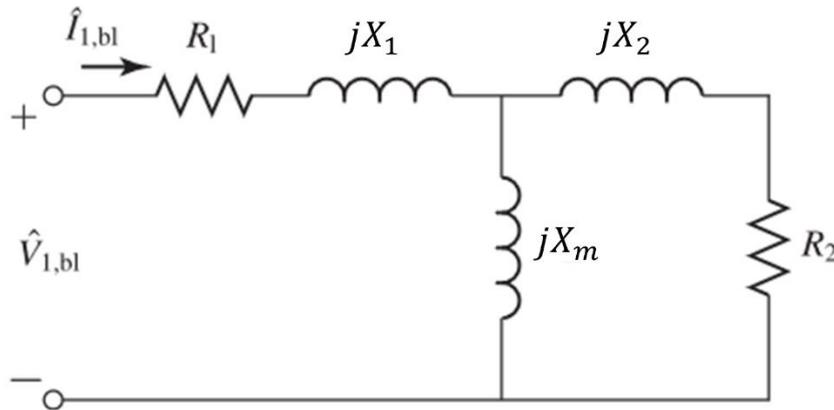
O ensaio de rotor bloqueado fornece informações sobre impedâncias de dispersão. Nele, o rotor é impossibilitado de girar, tornando unitário o escorregamento, e são aplicadas aos terminais do estator tensões polifásicas equilibradas. As medições feitas são geralmente a tensão de fase $V_{1,bl}$, a corrente de linha $I_{1,bl}$, a potência elétrica polifásica total de entrada P_{bl} e a frequência do ensaio f_{bl} .

A Figura 15 ilustra o circuito equivalente em condições do teste. É possível observar que, como o escorregamento é igual a 1, a resistência de rotor e da carga imposta é apenas R_2 .

O objetivo é realizar o ensaio de rotor bloqueado sob as condições de corrente e frequência do rotor aproximadamente iguais às para as quais se deseja calcular o

desempenho. De acordo com Fitzgerald *et al.* (2006), se o interesse for nas características nominais de funcionamento, o teste deverá ser executado com uma tensão reduzida da qual resulta aproximadamente a corrente nominal.

Figura 15. Circuito equivalente do motor de indução com rotor bloqueado.



Fonte: Umans, 2014 (adaptado pela autora).

Em que

$\hat{V}_{1,bl}$ = tensão elétrica de fase no estator com rotor bloqueado [V]

$\hat{I}_{1,bl}$ = corrente elétrica no estator com rotor bloqueado [A]

A impedância de dispersão é afetada pela saturação magnética dos caminhos de fluxo de dispersão e pela frequência do rotor. Por isso, se deve manter as correntes de ensaio o mais próximas possível de seus valores de análise. Para motores acima de 25 hp, a norma IEEE 112 (TRANDAFILOV, 2004) sugere o uso da frequência de ensaio de 25% da frequência nominal, e o cálculo da reatância de dispersão total em frequência nominal é obtido partindo do princípio de que a reatância é proporcional à frequência.

A reatância de rotor bloqueado X_{bl} corrigida para a frequência nominal pode ser calculada através de (35). As resistências são desenvolvidas em (36) e (37).

A partir da Figura 15, a impedância de entrada Z_{bl} é calculada conforme a expressão (38), supondo que a resistência do rotor é tão maior que a reatância de magnetização que a última se torna desprezível. A reatância de dispersão do rotor X_2 e a resistência R_2 são obtidas em (39) e (40), respectivamente. Para ter melhor

representatividade do modelo em relação à condição de operação prática, a resistência do estator R_1 deve ser corrigida em função do valor correspondente à temperatura do teste.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{bl} = \frac{f_d}{f_{bl}} \frac{Q_{bl}}{n_{fases} I_{1,bl}^2} \\ Q_{bl} = \sqrt{S_{bl}^2 - P_{bl}^2} = \sqrt{(n_{fases} V_{1,bl} I_{1,bl})^2 - P_{bl}^2} \end{array} \right. \quad (35)$$

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{n_{fases} I_{1,bl}^2} \quad (36)$$

$$R_2 = R_{bl} - R_1 \quad (37)$$

Em que

X_{bl} = reatância de rotor bloqueado [Ω]

f_d = frequência na condição desejada [Hz]

f_{bl} = frequência do ensaio de rotor bloqueado [Hz]

Q_{bl} = potência reativa de rotor bloqueado [var]

$I_{1,bl}$ = módulo da corrente elétrica no estator de rotor bloqueado [A]

S_{bl} = potência aparente de rotor bloqueado [VA]

P_{bl} = potência ativa de rotor bloqueado [W]

$V_{1,bl}$ = módulo da tensão de fase de rotor bloqueado [V]

R_{bl} = resistência de rotor bloqueado [Ω]

$$\begin{aligned} Z_{bl} &= R_1 + jX_1 + (R_2 + jX_2) // jX_m \\ &= R_1 + R_2 \left(\frac{X_m^2}{R_2^2 + (X_m + X_2)^2} \right) \\ &\quad + j \left(X_1 + \frac{X_m(R_2^2 + X_2(X_m + X_2))}{R_2^2 + (X_m + X_2)^2} \right) \quad (38) \\ &= R_1 + R_2 \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right)^2 + j \left(X_1 + X_2 \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right) \right) \end{aligned}$$

$$X_2 = (X_{bl} - X_1) \left(\frac{X_m}{X_m + X_1 - X_{bl}} \right) = (X_{bl} - X_1) \left(\frac{X_{vz} - X_1}{X_{vz} - X_{bl}} \right) \quad (39)$$

$$R_2 = (R_{bl} - R_1) \left(\frac{X_2 + X_m}{X_m} \right)^2 \quad (40)$$

$$X_1 \approx X_2 \quad (41)$$

Em que

Z_{bl} = impedância de rotor bloqueado [Ω]

Geralmente se assume que as reatâncias rotórica e estatórica possuem mesmo valor, como na equação (41). Segundo Fitzgerald (2006), o desempenho do motor é relativamente pouco afetado pelo modo de distribuição de reatância total do motor entre ambas.

3 METODOLOGIA

O presente estudo é dividido em etapas, como ilustrado pela Figura 16: revisão bibliográfica, levantamento de dados do circuito do motor, simulação do circuito do motor, coleta de dados dos sensores, modelagem da carga, simulação e análise de resultados.

O primeiro passo consiste em um estudo de conceitos do processo de laminação para o cálculo da força de laminação, características de motores de indução, redutores de velocidade e volantes de inércia, além da análise do comportamento de motores em regimes permanente. Nessa etapa se cria a base teórica para dar início ao projeto.

Obtém-se o circuito equivalente do motor e se calcula também o equivalente de Thèvenin da rede de alimentação. Com tais dados, ocorre a simulação para validação do modelo do motor. Nesta fase também se escolhe o aço para o qual será modelada a carga.

O *software PowerSim* foi o selecionado para a representação computacional. Com o modelo do motor validado, são inseridos um a um os demais elementos do circuito, como equivalente de Thèvenin da alimentação, redutor de velocidade e momento de inércia dos cilindros.

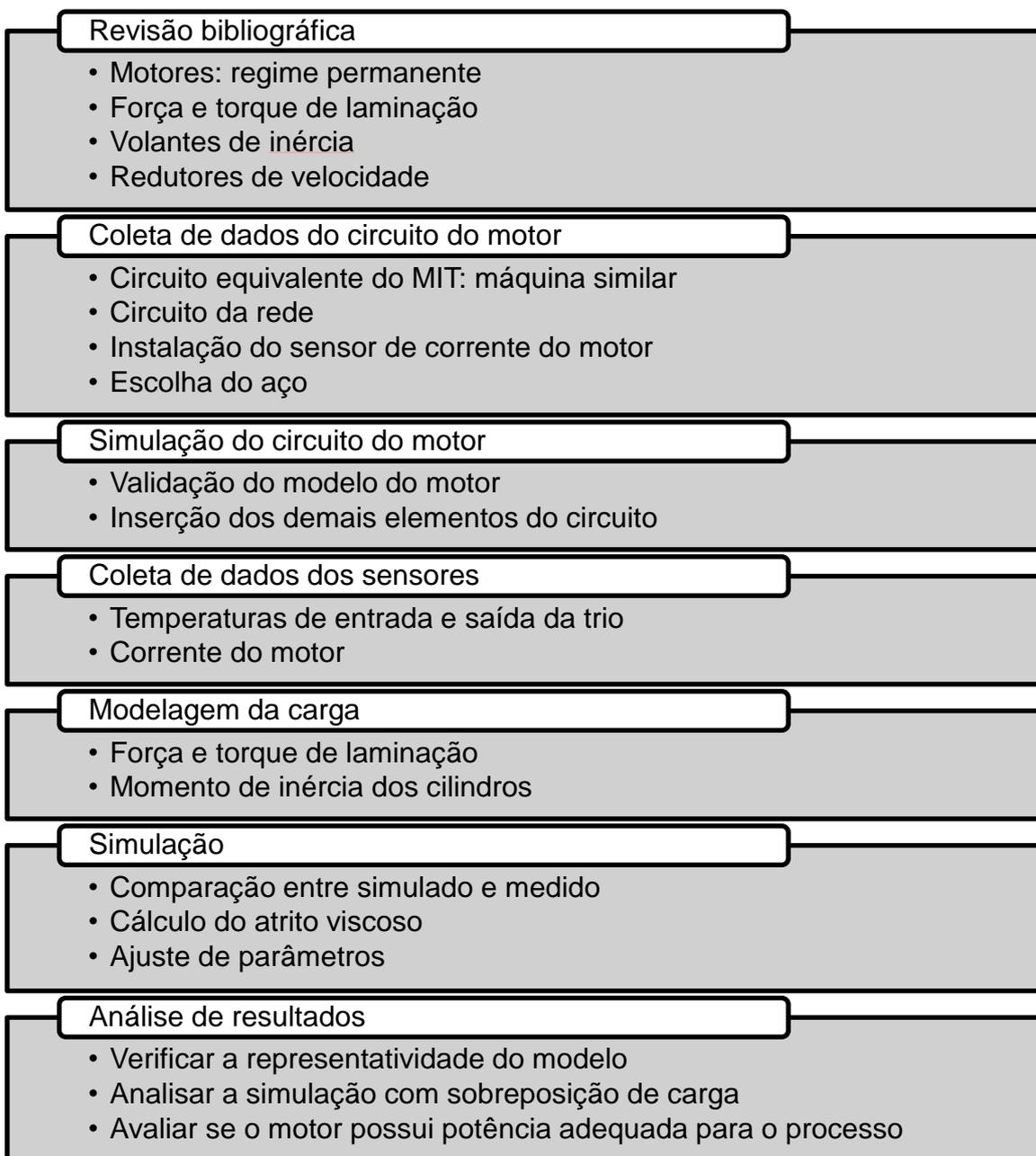
O laminador da L1 da empresa possui diversos sensores distribuídos ao longo da linha de laminação, desde o enforamento de tarugos até a saída de rolos. Alguns dados coletados pelos sensores são variáveis que podem ser utilizadas para a análise do comportamento do motor durante o processo.

No laminador trio, os sinais disponíveis que serão úteis no estudo são temperatura do pirômetro de desenforamento – o qual se localiza entre a porta de saída do forno de reaquecimento e o primeiro passe da trio – e temperatura do pirômetro da saída do quinto passe – posicionado ao final do processo da gaiola. O sinal que servirá como base para validação do modelo é a corrente elétrica de alimentação do motor, obtida através de sensores instalados ao longo do projeto.

A partir de então, o foco é a modelagem matemática da carga, que é a barra sendo laminada. Inserem-se os dados do material escolhido e os sinais coletados no

equacionamento teórico de força de laminação para a modelagem da carga de cada passe.

Figura 16. Fluxograma das etapas do projeto.



Fonte: a autora, 2022.

Então, se inicia a simulação computacional, comparando os comportamentos simulado e medido. Alguns ajustes são necessários para que ambas máquinas partam

do mesmo ponto para realizar as comparações. É o caso do cálculo do atrito viscoso, o qual é feito quando não há barra passando pela gaiola trio.

Considera-se como aceitável uma diferença média entre real e simulado menor que 20% para peças laminadas em momentos distintos, considerando que há incertezas em relação a alguns parâmetros do modelo desenvolvido. Outro ponto importante a destacar é que por vezes as cargas do primeiro e do quinto passe são sobrepostas. Caso o modelo represente de maneira admissível o sistema real com apenas uma peça sendo laminada no ciclo da gaiola trio, se analisa a situação de sobreposição de carga imposta.

Por fim, se verifica a potência mecânica sobre o eixo do motor simulado. Considera-se a situação de sobreposição de carga, que seria o pior cenário para sobrecarga da máquina. A potência equivalente simulada durante um ciclo é analisada frente à potência fornecida nos dados de placa do motor real. Diante da comparação, é verificado se o motor possui capacidade suficiente para suportar os esforços impostos pelo processo de laminação na gaiola trio.

4 O MODELO

O cenário da gaiola trio possui um conjunto de elementos: na subestação do desbaste da L1, o transformador realiza o rebaixamento da tensão de 23 *kV* do barramento da usina para 2,3 *kV*. A ele está conectado o motor, e, antes de se chegar nos cilindros da trio, há o redutor de velocidade acoplado ao eixo da máquina, o qual aumenta o torque transmitido à medida em que diminui a velocidade de rotação dos cilindros.

A representação do circuito no *software* foi realizada da seguinte forma: primeiramente, foi determinado o modelo do motor, e, a partir disso, foram inseridos os demais elementos um a um, conforme descrito a seguir.

As máquinas envolvidas têm as seguintes características:

- Motor de indução trifásico do tipo rotor bobinado: modelo *WAF560* do fabricante *WEG S.A.*, potência de 1450 *cv* (1067,2 *kW*), 6 polos, frequência de 60 *Hz*, velocidade de rotação de 1190 *rpm*, ligação *Y*. O reostato ligado ao estator é acionado apenas na partida da máquina. Após a estabilização do motor, seus terminais são conectados em curto-circuito.
- Redutor de velocidade: modelo *B 75/KT 55 So* do fabricante *Renk Zanini* com potência de 2,08 *MW* e relação de transmissão r_t de 15,32.
- Transformador trifásico a seco: modelo *TDHS2500-00715* do fabricante *ABB* com potência de 2,5 *MVA*, relação de transformação de 23 : 2,3 *kV*, ligações *Dyn1* (delta-estrela aterrado) e impedância percentual de 5,75%.

4.1 DETERMINAÇÃO DO CIRCUITO DO MOTOR

Em um primeiro momento, as análises no simulador são voltadas para o circuito do motor. Para isso, um modelo da máquina é selecionado e alimentado por uma fonte trifásica equilibrada e acoplado a um modelo de carga. Após a validação do modelo do motor, os demais elementos são inseridos um a um.

4.1.1 Circuito equivalente do motor

Por se tratar de um motor da década de 1990 para o qual não se tem os dados de circuito equivalente e considerando que não há máquina reserva, se torna pouco atrativa para a empresa a realização de ensaios para obtenção do circuito equivalente para a simulação. Dessa forma, optou-se por considerar uma máquina similar para realizar o estudo.

Tabela 2. Dados de placa das máquinas real e similar.

Dados de placa	Máquina real	Máquina similar
Tipo de máquina	MIT rotor bobinado	MIT gaiola de esquilo
Modelo	<i>WAF560</i>	<i>MGF</i>
Fabricante	<i>WEG S.A.</i>	<i>WEG S.A.</i>
Potência	1067,2 <i>kW</i>	1070 <i>kW</i>
Número de polos	6	6
Tensão de alimentação	2,3 <i>kV</i>	2,3 <i>kV</i>
Corrente de alimentação	318,7 <i>A</i>	325,6 <i>A</i>
Frequência	60 <i>Hz</i>	60 <i>Hz</i>
Velocidade de rotação	1190 <i>rpm</i>	1195,24 <i>rpm</i>
Tipo de ligação	<i>Y</i>	-
Torque nominal	8563 <i>Nm</i>	8519,8 <i>Nm</i>
Momento de inércia	102,6 <i>kgm²</i>	61,892 <i>kgm²</i>

Fonte: a autora, 2023.

Em que

MIT = motor de indução trifásico

Tendo em vista que o reostato é utilizado apenas durante o acionamento da máquina, e os terminais do rotor ficam em curto-circuito após a estabilização da partida, se pode considerar que, durante a laminação, o motor de anéis tem o mesmo comportamento de uma máquina gaiola de esquilo. Como o projeto visa a

representação durante a operação da gaiola trio sem abordar a partida, é possível assumir uma máquina similar desse tipo para representação na simulação.

A máquina similar se trata de um motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo do mesmo fabricante da original. A Tabela 2 exibe os dados de placa dos dois motores. Percebe-se que a diferença entre os dados de máquina de ambas é pequena; portanto, se assume que a simulação terá resultados próximos o suficiente para o estudo ser efetivo.

Os parâmetros da máquina estão contidos na Tabela 3. Nota-se que se optou por utilizar o valor do momento de inércia do motor como o da máquina real, uma vez que há efeito direto no seu comportamento frente à mudança de carga imposta.

Tabela 3. Parâmetros da máquina similar.

Parâmetro	Valor
Resistência estatórica R_1	0,0190056 Ω
Indutância estatórica L_1	$\frac{0,352699}{2\pi 60}$ H
Resistência rotórica referida ao estator R_2	0,0174804 Ω
Indutância rotórica referida ao estator L_2	$\frac{0,314341}{2\pi 60}$ H
Indutância de magnetização L_m	$\frac{9,79936}{2\pi 60}$ H
Resistência de perdas no núcleo R_c	362,569 Ω
Número de polos	6
Momento de inércia (J_{motor})	102,6 kgm^2

Fonte: a autora, 2023.

Em que

L_1 = indutância do estator [H]

L_2 = indutância do rotor [H]

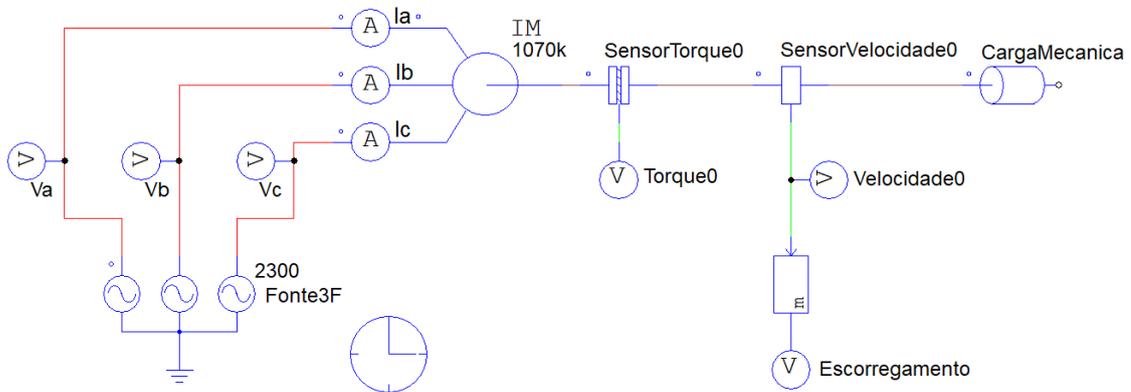
L_m = indutância de magnetização [H]

J_{motor} = momento de inércia do motor [kgm^2]

Para validar o modelo de motor obtido em *software*, se realiza a simulação de dois cenários: motor em vazio, ou seja, sem carga acoplada, e motor com carga nominal. O modelo da máquina escolhido foi o de motor trifásico simétrico do tipo gaiola de esquilo.

O circuito utilizado para a validação inicial dos elementos foi o representado pela Figura 17, o qual contém a fonte trifásica de 2,3 kV, medidores de corrente e sensores de torque e velocidade, além da carga acoplada. Todos os elementos de medição foram inseridos para verificar se os dados obtidos eram coerentes com os valores esperados e calculados.

Figura 17. Circuito de validação do modelo do motor.



Fonte: a autora, 2023.

4.1.1.1 Motor em vazio

$$I_{1,vzRMS} = \frac{V_{1,vz}}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = 130,8 A \quad (42)$$

Em que

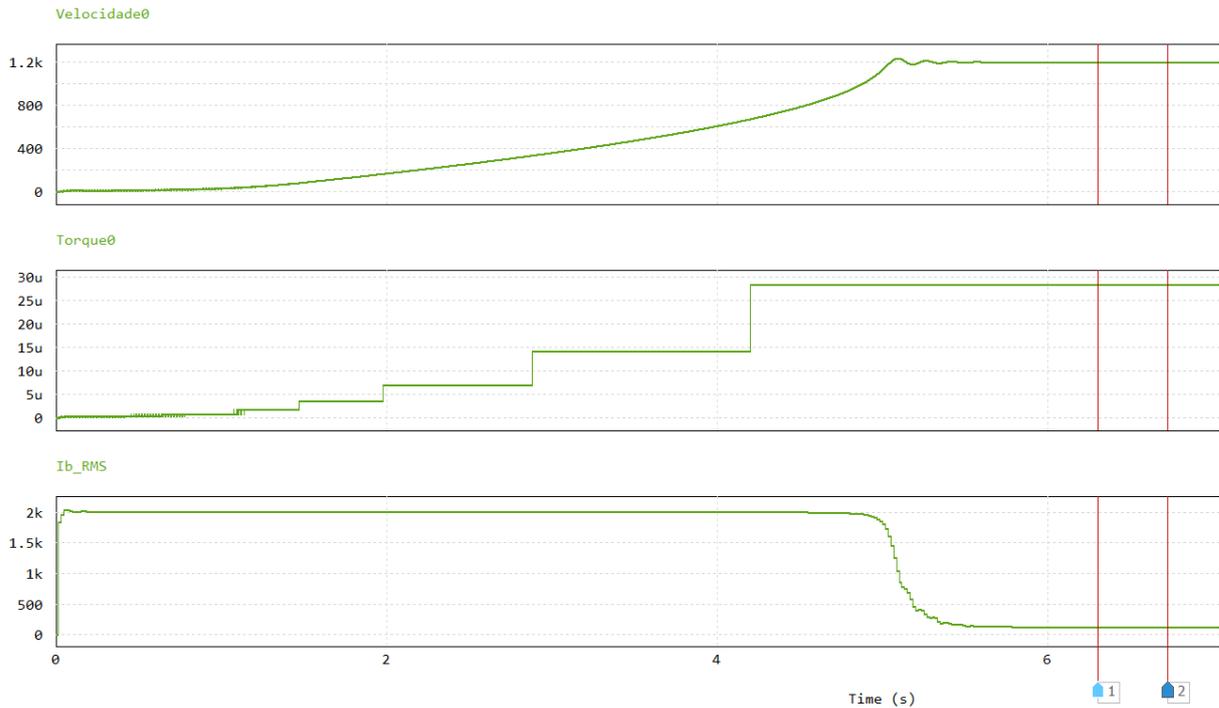
$$I_{1,vzRMS} = \text{corrente eficaz em vazio [A]}$$

O resultado obtido em uma simulação a vazio (com *CargaMecanica* igual a zero na simulação) deve ser de torque nulo – ou muito próximo de zero –, uma vez que não há carga para movimentar no eixo, e velocidade de rotação síncrona. A partir

da Figura 14, se obtém a expressão (42) de corrente em vazio, a qual deve ser obtida em valor eficaz na simulação.

A Figura 18 contém o resultado da simulação do motor em vazio. Os valores de velocidade, torque e corrente do estator são satisfatórios e próximos do esperado.

Figura 18. Simulação do circuito do motor em vazio.



⋮		X1	X2	Δ	RMS
Time	6.29926e+00	6.72187e+00	4.22616e-01		
Velocidade0	1.20003e+03	1.19999e+03	-3.63806e-02		1.20001e+03
Torque0	2.84217e-05	2.84217e-05	0.00000e+00		2.84217e-05
Ib	1.30635e+02	1.30674e+02	3.98994e-02		1.30695e+02

Fonte: a autora, 2023.

4.1.1.2 Motor com carga nominal

Para uma simulação com carga, é preferível traçar a curva de torque em função da velocidade de rotação do motor, e verificar qual curva de carga melhor se adequa para um modelo em regime permanente. As expressões (43) e (44) descrevem o comportamento do torque de uma máquina de indução em função da sua velocidade.

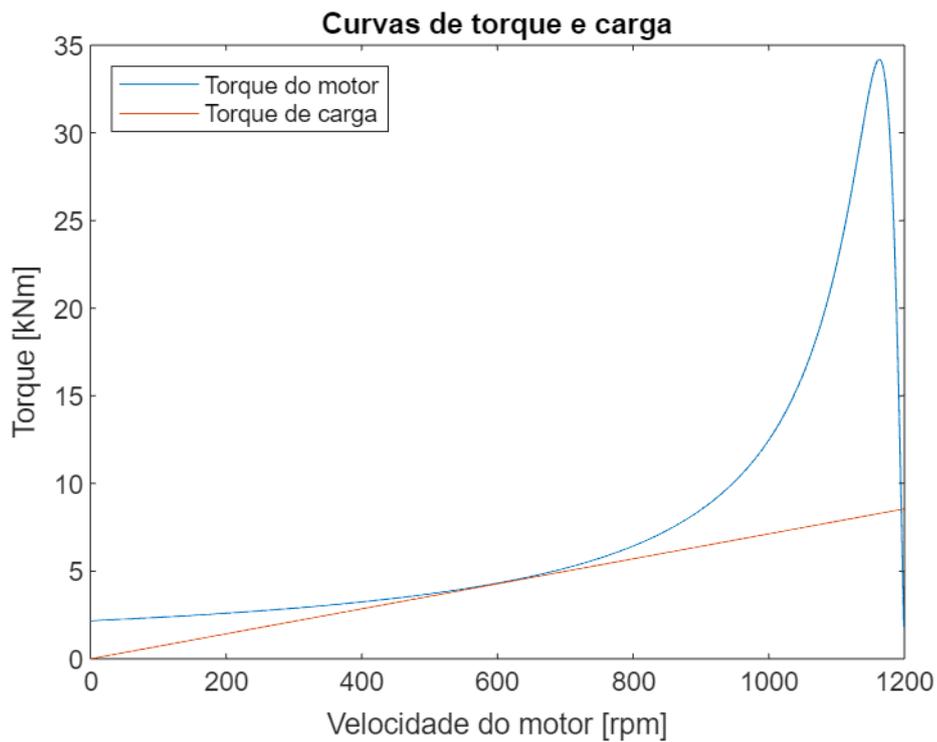
$$M_{motor} = \frac{n_{fases} V_{1,eq}^2 R_2/s}{\omega_s \left[(R_{1,eq} + R_2/s)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2 \right]} \quad (43)$$

$$\begin{cases} V_{1,eq} = \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} V_1 \\ R_{1,eq} \approx R_1 \frac{X_m^2}{(X_1 + X_m)^2} \\ X_{1,eq} \approx X_1 \end{cases} \quad (44)$$

Em que

M_{motor} = torque do motor [Nm]

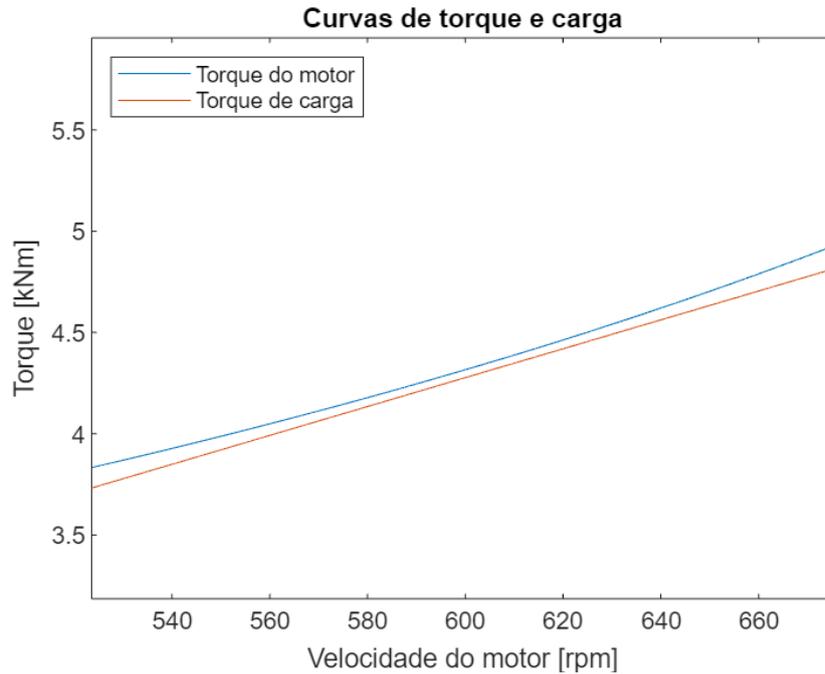
Figura 19. Curvas de torque do motor e da carga linear em função da velocidade.



Fonte: a autora, 2023.

Traçando as curvas de torque e carga no *software MatLab* com limites de velocidade de 0 *rpm* a 1200 *rpm*, se obtém a Figura 19. O ponto do gráfico em que as curvas do motor e da carga se cruzam indica o torque e a velocidade de rotação da máquina em regime permanente do sistema.

Figura 20. Curvas de torque e carga em função da velocidade entre 540 rpm e 660 rpm.



Fonte: a autora, 2023.

Observando a curva do motor, a função de carga mais simples para alcançar o ponto de valores nominais é linear, pois, apesar de ambas as curvas se aproximarem entre 540 rpm e 660 rpm, elas não se cruzam, conforme se pode verificar na Figura 20. Logo, opta-se por traçar uma curva de carga conforme a expressão (45).

$$M_{carga} = \frac{M_m}{\omega_m} \omega = \frac{8519,8}{1195,24\pi/30} \omega \quad (45)$$

Em que

M_{carga} = torque da carga imposta [Nm]

M_m = torque nominal do motor [Nm]

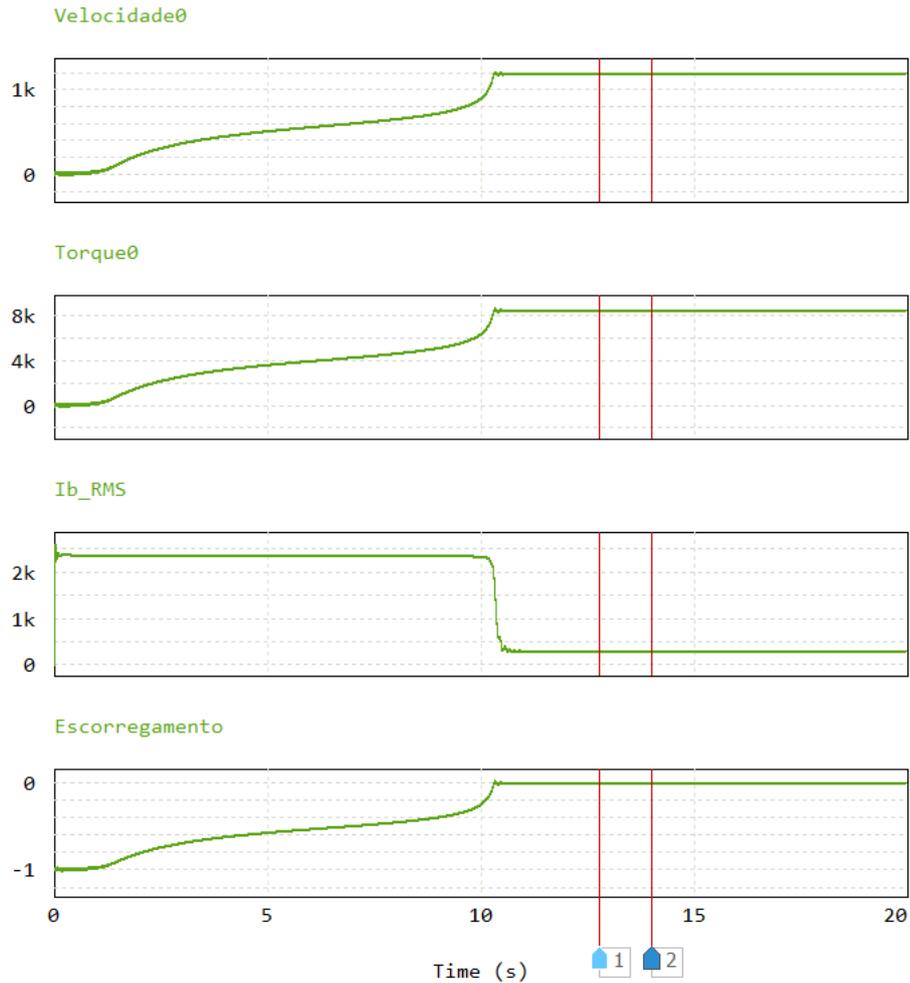
ω_m = velocidade angular nominal do motor [rad/s]

ω = velocidade angular do motor [rad/s]

Os resultados da simulação do motor com carga nominal estão representados na Figura 21. Novamente, os valores de velocidade de rotação da máquina, corrente

elétrica no estator, torque e escorregamento obtidos são satisfatórios e próximos dos valores nominais de placa. Tendo o modelo do motor sido validado a partir dessas duas análises, se inicia a introdução dos outros elementos que compõem o sistema de laminação.

Figura 21. Resultados da simulação do motor com carga nominal.



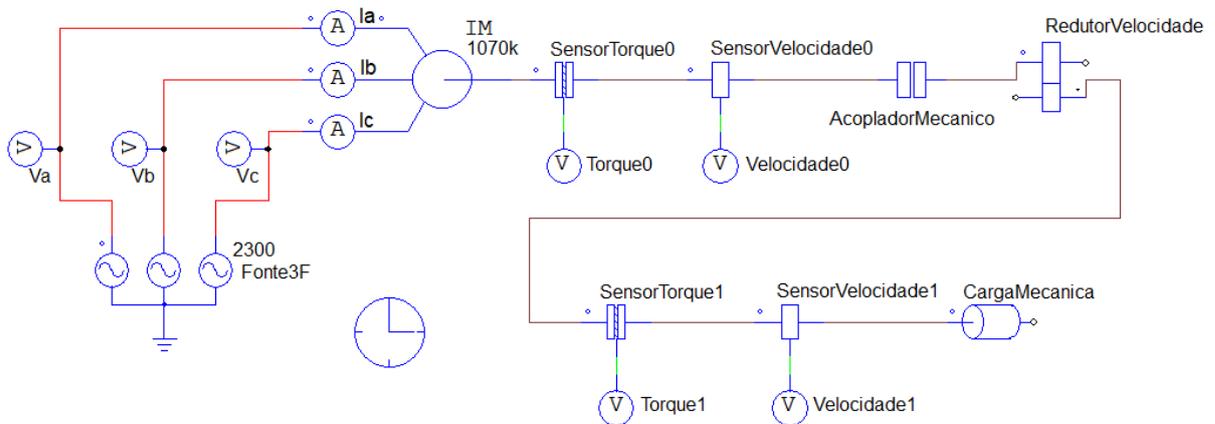
⋮		X1	X2	Δ	RMS
	Time	1.33817e+01	1.61684e+01	2.78665e+00	
	Velocidade θ	1.19528e+03	1.19528e+03	-2.48026e-08	1.19528e+03
	Torque θ	8.52007e+03	8.52007e+03	0.00000e+00	8.52007e+03
	Ib	3.16924e+01	-4.03896e+02	-4.35589e+02	3.09233e+02
	Escorregamento	3.93529e-03	3.93529e-03	2.06689e-11	3.93529e-03

Fonte: a autora, 2023.

4.1.2 Redutor de velocidade

A Figura 22 ilustra o modelo para validação do redutor de velocidade. Foram adicionados ao circuito de validação do motor os sensores de torque e velocidade de rotação depois do redutor para conferência de dados. Dessa forma, é possível verificar se as transformações do redutor ocorrem conforme esperado.

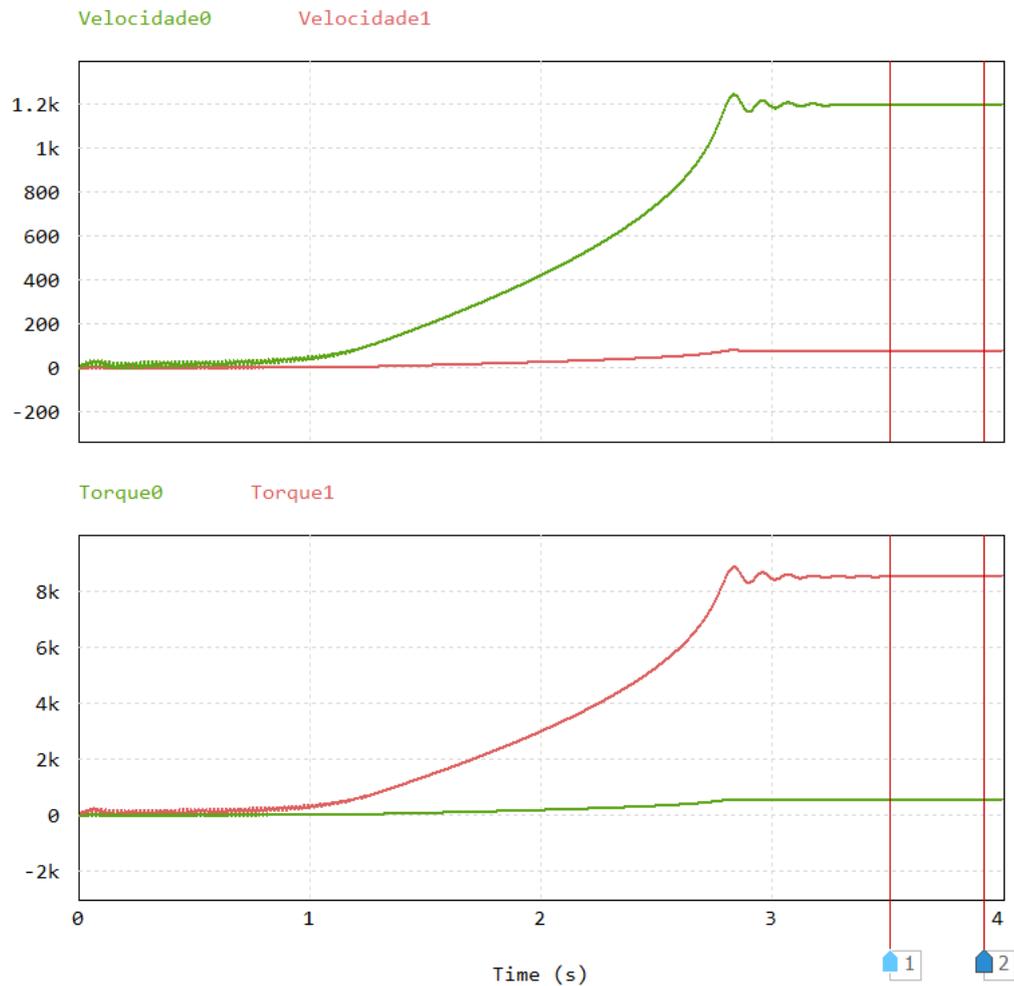
Figura 22. Modelo de validação do redutor de velocidade.



Fonte: a autora, 2023.

Simula-se a situação esperada para uma carga de torque nominal com velocidade nominal. Dessa forma, a curva de carga é a curva utilizada para a simulação de validação com carga nominal multiplicada pela relação de transmissão do redutor. A velocidade deve diminuir em aproximadamente 15 vezes, ao passo que o torque deve aumentar na mesma proporção. A Figura 23 contém os resultados da simulação, os quais são satisfatórios.

Figura 23. Resultado da simulação para teste do redutor.



	X1	X2	Δ	RMS
Time	3.50653e+00	3.91292e+00	4.06386e-01	
Velocidade0	1.20040e+03	1.19974e+03	-6.65990e-01	1.19969e+03
Velocidade1	7.83264e+01	7.82828e+01	-4.35130e-02	7.82795e+01
Torque0	5.58112e+02	5.57802e+02	-3.10049e-01	5.57779e+02
Torque1	8.55344e+03	8.54869e+03	-4.75174e+00	8.54833e+03

Fonte: a autora, 2023.

4.1.3 Circuito de alimentação

De acordo com Filho (2017), em grande parte das aplicações, a impedância do sistema de suprimento é desprezível em relação ao valor da impedância da rede industrial. Dessa forma, se assume a impedância do transformador da subestação do

desbaste da Laminação 1 e a resistência dos cabos que ligam o transformador ao motor como impedâncias do sistema.

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}/\sqrt{3}} = 366,5 \Omega \\ R_t = R_1 + R_2' = R_{pu} \cdot Z_{base} = 0,78\% \cdot 366,5 = 2,86 \Omega \\ X_t = X_1 + X_2' = X_{pu} \cdot Z_{base} = 5,55\% \cdot 366,5 = 20,34 \Omega \end{array} \right. \quad (46)$$

$$L_t = \frac{X_t}{2\pi f_t} = \frac{20,34}{2\pi 60} = 53,96mH \quad (47)$$

Em que

Z_t = impedância do transformador [Ω]

Z_{base} = impedância de base do sistema por unidade [Ω]

S_{base} = potência aparente de base do sistema por unidade [V]

R_t = resistência total do transformador [Ω]

R_1 = resistência do enrolamento primário [Ω]

R_2' = resistência do enrolamento secundário referida ao primário [Ω]

R_{pu} = resistência total por unidade do transformador

X_t = reatância total do transformador [Ω]

X_1 = reatância do enrolamento primário [Ω]

X_2' = reatância do enrolamento secundário referida ao primário [Ω]

X_{pu} = reatância total por unidade do transformador

L_t = indutância total do transformador [H]

f_t = frequência de operação do transformador [Hz]

O transformador é representado por um modelo trifásico do tipo *DYn* (delta - estrela aterrado). Para o cálculo do seu circuito equivalente, foram utilizados dados de ensaios de inspeção da máquina, os quais indicam que a resistência e a reatância dos enrolamentos corresponde a 0,78% e 5,55%, respectivamente.

Assumindo indutâncias e resistências do enrolamento secundário do transformador nulas, calculou-se a indutância e a resistência do primário como a total da máquina, como descrito nas expressões (46) e (47).

Tabela 4. Parâmetros para mensurar a resistência elétrica dos cabos de alimentação.

Parâmetro	Valor
Resistividade do cobre (ρ_{Cu})	$1,73 \cdot 10^{-8} \Omega m$
Comprimento do condutor ($l_{condutor}$)	65 m
Seção nominal do condutor ($A_{condutor}$)	120 mm^2
Número de condutores por fase ($n_{condutores/fase}$)	2

Fonte: a autora, 2023.

A resistência dos cabos é obtida através de (48) com os dados contidos na Tabela 4. A resistividade do cobre, segundo Fitzgerald *et al.* (2006), equivale ao valor representado na Tabela 4.

$$R_{fase} = \frac{R_{condutor}}{n_{condutores/fase}} = \frac{\rho_{Cu} \frac{l_{condutor}}{A_{condutor}}}{n_{condutores/fase}} = \frac{1,73 \cdot 10^{-8} \frac{65}{1,2 \cdot 10^{-4}}}{2} \quad (48)$$

$$= 4,685 \text{ m}\Omega$$

Em que

R_{fase} = resistência por fase dos cabos [Ω]

$R_{condutor}$ = resistência do condutor [Ω]

$n_{condutores/fase}$ = número de condutores por fase

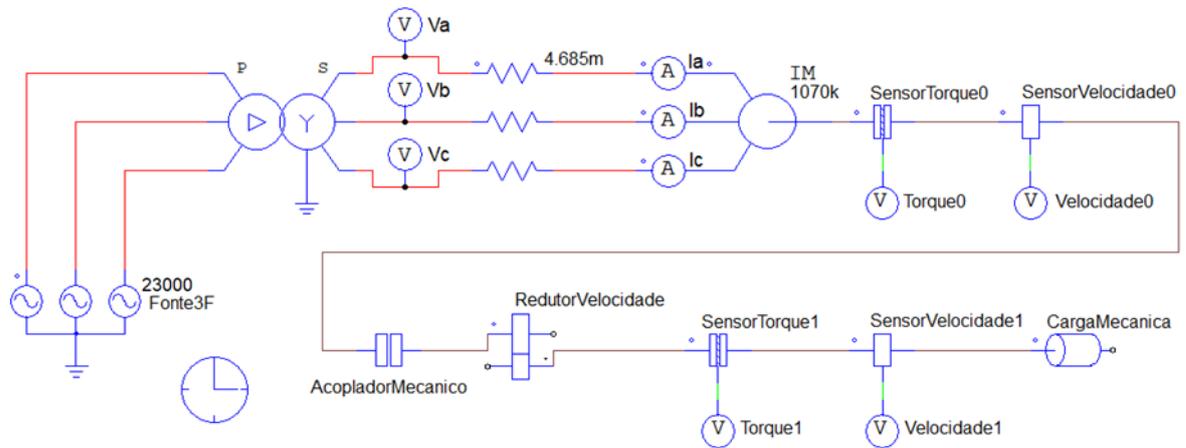
ρ_{Cu} = resistividade do cobre [Ωm]

$l_{condutor}$ = comprimento dos cabos [m]

$A_{condutor}$ = área da seção transversal dos cabos [m^2]

Assim, se conclui a representação de todos os elementos significativos antes dos cilindros de laminação. A Figura 24 ilustra tal modelo.

Figura 24. Representação no *PSim* do circuito do motor da gaiola trio antes dos cilindros para validação do modelo.



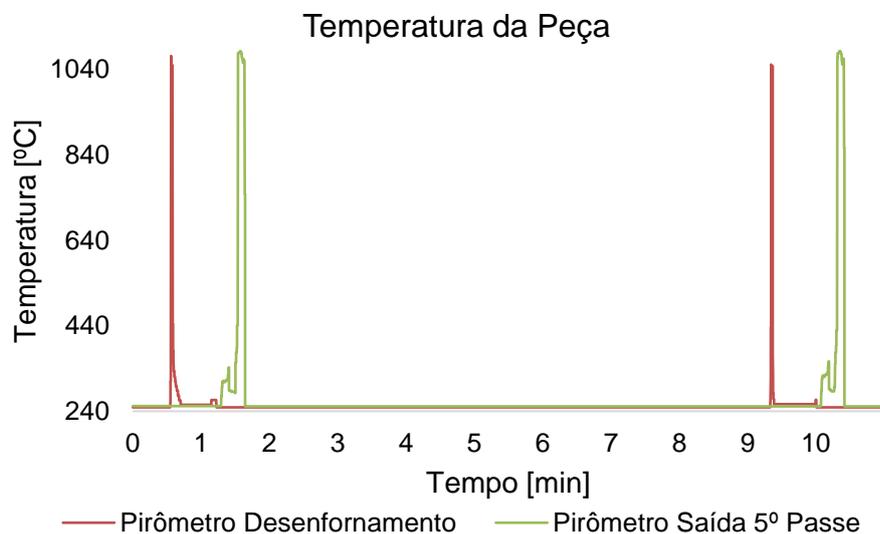
Fonte: a autora, 2023.

5 MODELAGEM DE CARGA

A dinâmica dos sensores do processo ocorre da seguinte maneira: há um pirômetro entre o forno e a entrada da gaiola trio que realiza a leitura de temperatura do tarugo recém desenfundado, que sinaliza para a gaiola trio a passagem de barra. Na saída do quinto passe há outro pirômetro, o qual aciona o sistema de impulsionadores para que a barra siga para as próximas gaiolas do trem laminador.

A Figura 25 ilustra as curvas dos dois pirômetros durante a partida do laminador. Cada sinal do pirômetro de desenfundamento corresponde a uma barra chegando no laminador trio, e o acionamento do pirômetro da saída do quinto passe indica que a barra saiu da gaiola. O tempo entre uma peça e outra é elevado, pois as primeiras cinco peças são laminadas uma por vez ao longo de todo o trem laminador. Assim que a primeira peça sai da última gaiola, a peça seguinte é liberada para ser desenfundada.

Figura 25. Sinais adquiridos durante a operação da gaiola trio.



Fonte: a autora, 2023.

A validação do modelo do motor com carga é realizada com base na corrente da máquina. Para tanto, é utilizado um analisador de qualidade de energia conectado a bobinas de Rogowski para as medições.

Bobinas de Rogowski são compostas por toroides não magnéticos que são colocados ao redor de condutores. Ao passar corrente alternada pelo condutor, ela gera um campo magnético, induzindo tensão nos terminais do dispositivo. Sua maior vantagem em relação a transformadores de corrente, segundo Mai *et. al* (2017), é que utilizam núcleos de ar; logo, a bobina não satura em situações de altas correntes, e possui boa resposta em frequências altas, de modo que torna a medição de transitórios viável.

Foi instalado um analisador de qualidade de energia do fabricante *Fluke*, modelo *438 series II*, que, através de bobinas de Rogowski, mede a corrente eficaz elétrica que passa pela fiação, a registrando. A Figura 26 é uma foto do layout da medição. Os equipamentos foram instalados dentro da sala elétrica dos transformadores de corrente de medição, os quais não foram utilizados pois ainda estão inativos.

Figura 26. Analisador de qualidade de energia instalado para medição.



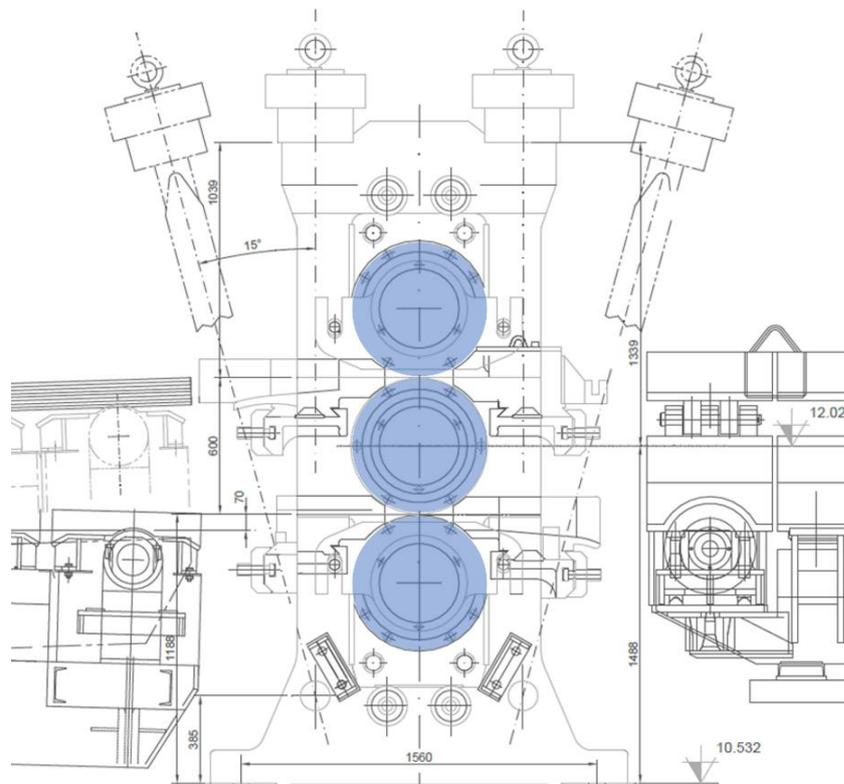
Fonte: a autora, 2023.

Uma vez que a medição é de corrente elétrica eficaz, para uma melhor comparação das curvas medidas e simuladas, os amperímetros de sinal no domínio do tempo foram substituídos por leitores de corrente eficaz na simulação.

5.1 MOMENTO DE INÉRCIA DOS CILINDROS DE LAMINAÇÃO

Apesar da grande força necessária para laminar uma peça, a velocidade angular dos cilindros deve permanecer praticamente inalterada. Isso ocorre devido aos volantes de inércia, que neste caso são os cilindros de laminação, os quais têm grande inércia e giram livremente em torno de seu eixo de sustentação. Tais volantes de inércia funcionam como armazenadores de energia cinética, ou seja, grande parte da energia que seria transferida para o eixo do motor por conta do choque da barra contra os cilindros é absorvida por eles.

Figura 27. Vista lateral da gaiola trio.

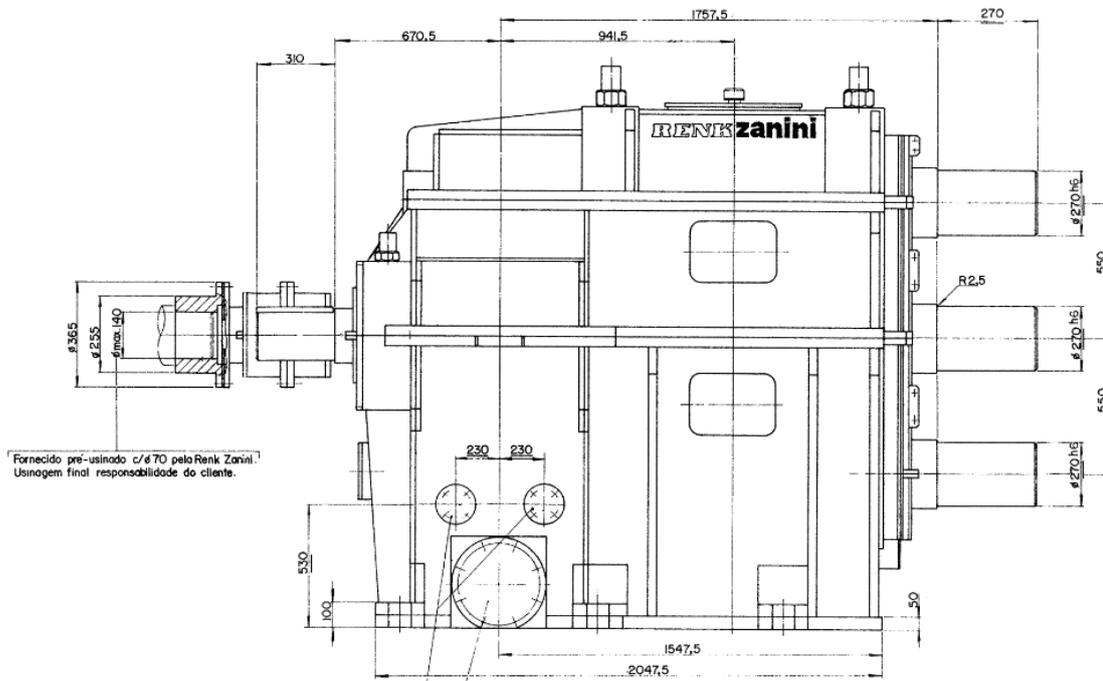


Fonte: a autora, 2023.

A gaiola trio possui o seguinte layout: três cilindros alinhados acoplados em paralelo ao eixo do redutor de velocidade, o qual possui três saídas alinhadas com o eixo de cada cilindro. A Figura 27 ilustra a vista lateral da gaiola trio, com destaque em azul para os cilindros de laminação.

Como se pode observar na Figura 28, o redutor de velocidade possui uma única entrada, acoplada ao eixo do motor, e três saídas: uma para cada cilindro. Dessa forma, se considera que, como os três cilindros estão acoplados à mesma caixa de redução e são idênticos, o momento de inércia resultante do conjunto é a soma do momento de inércia dos três componentes.

Figura 28. Vista lateral do redutor de velocidade.



Fonte: a autora, 2023.

$$J_{carga} = 3J_r = 3 \frac{m \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{2} = 3 \frac{3870 \left(0,585/2\right)^2}{2} = 496,65 \text{ kgm}^2 \quad (49)$$

Em que

J_{carga} = momento de inércia do conjunto dos cilindros [kgm^2]

J_r = momento de inércia de cada cilindro [kgm^2]

As medidas dos cilindros de laminação estão contidas na Tabela 5. O cálculo do momento de inércia J_{carga} do circuito da carga é feito conforme a expressão (49).

Tabela 5. Dimensões dos cilindros de laminação.

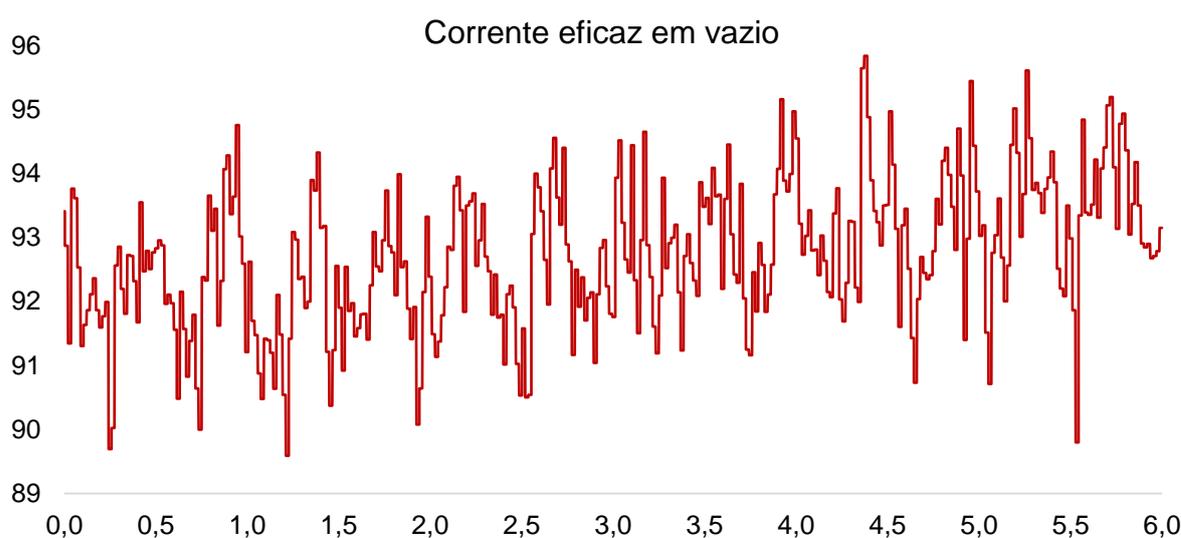
Dimensões	Medidas de cada cilindro
Massa m	3870 kg
Diâmetro ϕ	585 mm
Comprimento l	1500 mm

Fonte: a autora, 2023.

5.2 ATRITO VISCOSO

Antes de inserir a carga imposta pela laminação da peça de aço, realiza-se uma última simulação com o sistema completo, como se a gaiola trio estivesse acionada; porém, sem nenhuma barra passando por entre seus cilindros, ou seja, a máquina opera em vazio. Esse teste tem por objetivo observar se há efeito expressivo do atrito viscoso dos mancais, representando o acumulado de todas as perdas do sistema, e, caso ele exista, representá-lo para ter maior assertividade do modelo.

Figura 29. Corrente eficaz do motor medida em vazio.



Fonte: a autora, 2023.

A Figura 29 representa a medição de corrente elétrica eficaz quando o conjunto opera em vazio. O valor médio durante esse período é de 92,7 A. Assumindo-se que a máquina real possui os mesmos parâmetros que a similar, se comparam as correntes em vazio medida e simulada.

Uma vez que a corrente em vazio da máquina equivale aproximadamente à corrente de excitação, a qual possui valores muito próximos da corrente de magnetização, se pode afirmar que o parâmetro que altera a corrente em vazio sem mudanças significativas no comportamento da máquina nos demais momentos com carga é a reatância de magnetização. A corrente em vazio da máquina equivalente é maior que a medida na máquina instalada, devido ao baixo valor de reatância de magnetização. Por este motivo, para diminuir a corrente em vazio da máquina similar, aumentou-se este parâmetro de 9,8 Ω para 14 Ω .

$$\left\{ \begin{array}{l} R_c // jX_m \approx jX_m = j14 \Omega \\ I_2 = I_1 \frac{R_c // jX_m}{(R_c // jX_m) + (R_2/s + jX_2)} = \\ \quad \frac{92,7 \cdot j14}{j14 + (0,0174804/5 \cdot 10^{-5} + j0,314341)} = 3,7A \quad (50) \\ M_{motor} = \frac{n_{fases} I_2^2 R_2/s}{\omega_m} = \frac{3 \cdot 3,7^2 \cdot 0,0174804/5 \cdot 10^{-5}}{1999,94 \pi/30} = 114,7Nm \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} M'_{motor} &= M_{motor} r_t = J_{carga} \frac{d\omega_c}{dt} + M_{carga} + a' \omega / r_t \\ 114,7 \cdot 15,32 &= 0 + 0 + a' \frac{1999,94 \pi/30}{15,32} \quad (51) \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a' = 214,2 \\ a = a' / r_t = 214,2 / 15,32 = 14 \end{array} \right.$$

Em que

M'_{motor} = torque do motor referido ao lado da carga [Nm]

r_t = relação de transformação do redutor de velocidade

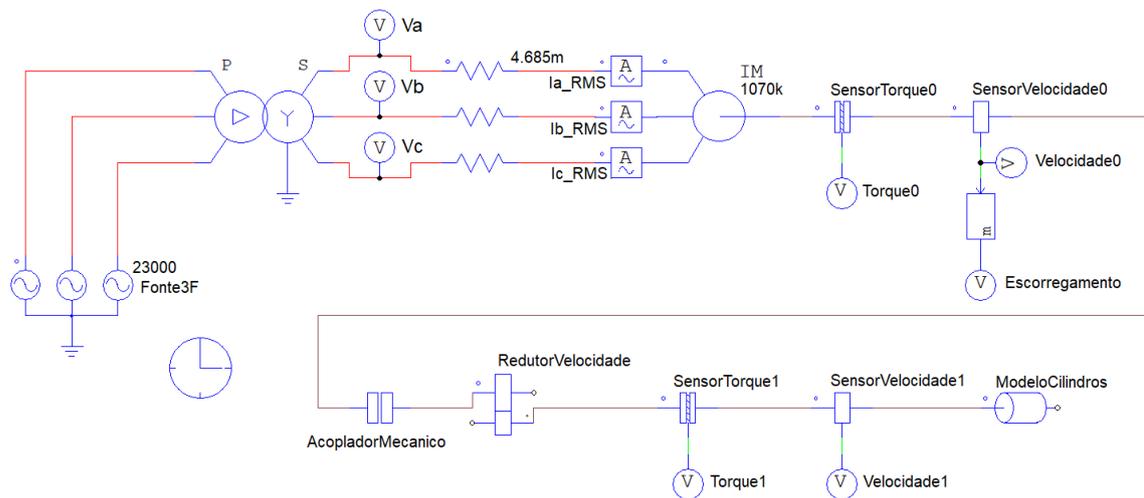
a' = coeficiente de atrito viscoso referido ao lado da carga

a = coeficiente de atrito viscoso referido ao lado do motor

Tomando como base o circuito da Figura 12, o cálculo de torque do motor é realizado através da expressão (50). Para calcular o efeito do atrito viscoso, são utilizados os equacionamentos em (51).

A Figura 30 representa o circuito em vazio. O elemento *ModeloCilindros* representa o momento de inércia dos cilindros e o atrito viscoso. O *software* permite a inserção de parâmetros de torques constante, linear, quadrático e cúbico, além do momento de inércia dessa carga. Os parâmetros inseridos são o momento de inércia total dos cilindros e a componente de torque linear para representar o atrito viscoso, conforme observado na Tabela 6.

Figura 30. Representação no *PSim* do circuito completo do motor da gaiola trio em vazio.



Fonte: a autora, 2023.

Tabela 6. Parâmetros utilizados em *ModeloCilindros*.

Parâmetros de <i>ModeloCilindros</i>	Valor
Torque constante	0 Nm
Componente de torque linear ($k_1\omega_m$)	$k_1 = a = 214,2$
Componente de torque quadrática ($k_2\omega_m^2$)	0
Componente de torque cúbica ($k_3\omega_m^3$)	0
Momento de inércia	496,65 kgm ²

Fonte: a autora, 2023.

5.3 FORÇA DE LAMINAÇÃO

Ao simular o comportamento do motor enquanto ocorre conformação mecânica da peça, é importante se atentar ao tipo de aço que está sendo laminado, pois este influencia diretamente o esforço imposto sobre o motor. Para validação, escolheu-se dias de produção com aço do tipo SAE 1015, utilizado para fabricação de fio máquina, por ser um aço laminado com frequência no setor.

Tabela 7. Composição química do aço SAE 1015.

Elemento	Faixa de composição química (%)
Carbono	0,13% – 0,18%
Manganês	0,30% – 0,18%
Fósforo	0,04%
Enxofre	0,05%

Fonte: a autora, 2023.

O aço SAE 1015 possui resistência mecânica relativamente baixa, devido ao baixo carbono na sua composição, e boas propriedades de conformabilidade e soldabilidade. Esse material é utilizado em peças forjadas e trefiladas. Na usina, são utilizados para fabricação de arames recozidos e pregos. As faixas de composição química estão representadas na Tabela 7.

Tabela 8. Dados geométricos de cada passe.

Passe	Formato do canal	h_0 [mm]	h_1 [mm]	b_0 [mm]	b_1 [mm]	G [mm]	Área [mm ²]	Fator de redução (%)
1	Chato	120	93,3	120	130,2	7,5	11.357	21
2	Quadrado	130,2	94,4	93,3	95,3	7,1	9.036	20
3	Oval	94,4	66,3	95,3	118,5	7,2	6.017	33
4	Redondo	118,5	79,3	66,3	79,3	7,3	4.870	19
5	Oval	79,3	47	79,3	95	6,6	3.523	28

Fonte: a autora, 2023.

Os dados geométricos de cada passe estão contidos na Tabela 8. O raio do cilindro medido foi de 585 *mm*. Também são necessárias informações do momento da laminação, como a temperatura da peça. Para fins de cálculo e simulação, se estima que a temperatura da peça decai uniformemente entre o primeiro e o quinto passe.

Tabela 9. Torques de laminação calculados.

Passe	Torque de laminação
1	119,1 <i>kNm</i>
2	96,7 <i>kNm</i>
3	162,4 <i>kNm</i>
4	76,5 <i>kNm</i>
5	89,9 <i>kNm</i>

Fonte: a autora, 2023.

O Anexo A conta com curvas de escoamento k_f a quente em função da velocidade de deformação de um aço com 0,15% de carbono a diferentes temperaturas. Tais valores são obtidos experimentalmente através de ensaios de tração. k_f representa o valor da tensão de escoamento limite para que o material comece a sofrer deformações plásticas, não reversíveis.

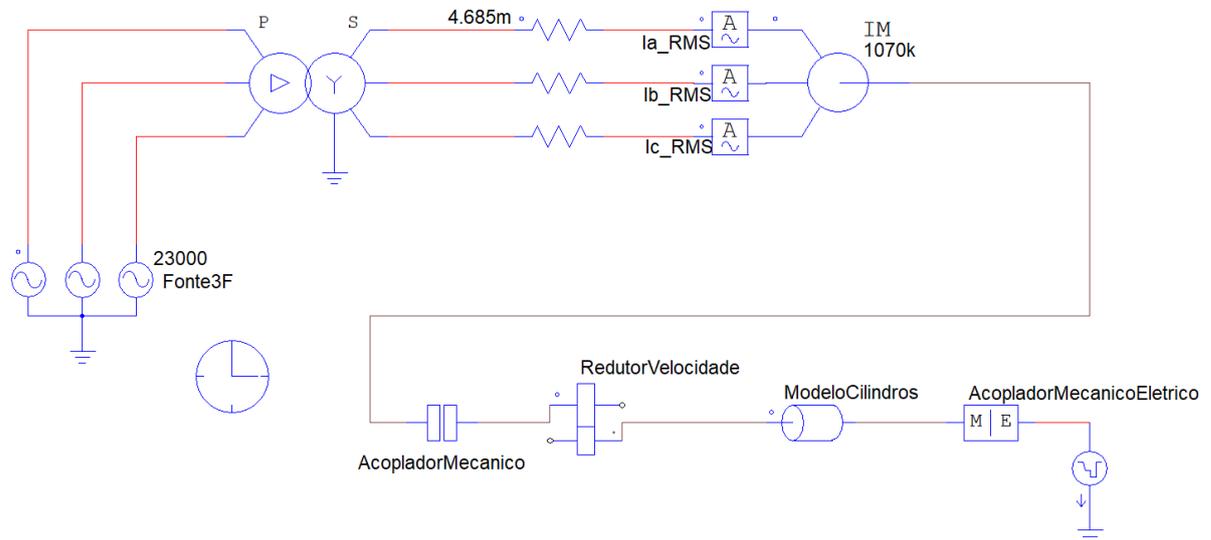
Para o cálculo da força de laminação, os valores de k_f das curvas do Anexo A foram utilizados, uma vez que o aço analisado na simulação corresponde à especificação do ensaiado para o levantamento delas. Também foi utilizado para a determinação da força de laminação para cada passe o método dos retângulos equivalentes descrito no Apêndice A, além das equações demonstradas na revisão bibliográfica. Os torques de laminação impostos pela carga estão na Tabela 9.

A representação completa do modelo desenvolvido, incluindo a carga imposta, é representado na Figura 31. O acoplador mecânico-elétrico e a função de trecho linear *CargaImposta* representam a carga causada pela laminação das peças.

A carga imposta de laminação é composta por uma aproximação de forças constantes ao longo da barra. Assim, quando não passa barra, a carga imposta é nula; porém, quando a peça entra no canal, há um degrau da magnitude do torque médio

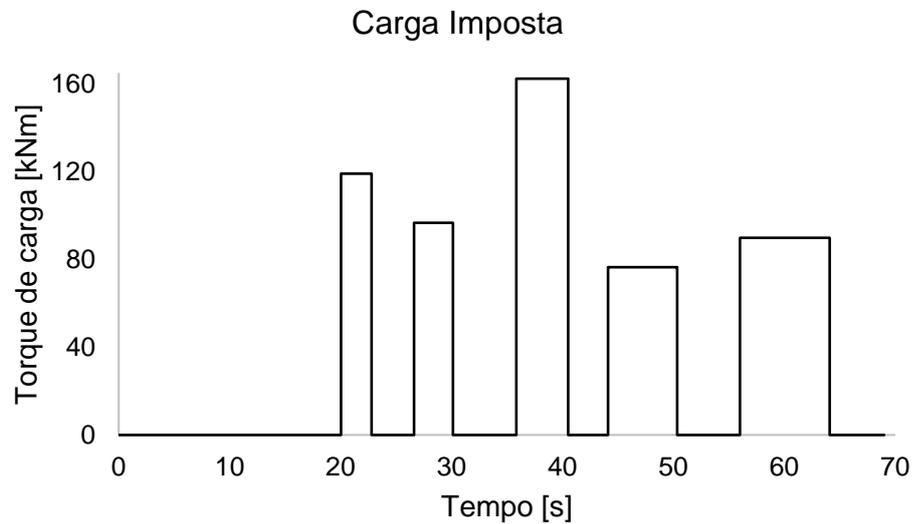
calculado, que se mantém constante até que a barra saia da gaiola. A representação gráfica dos trechos lineares da carga imposta no *software* está na Figura 32.

Figura 31. Modelo completo da gaiola trio.



Fonte: a autora, 2023.

Figura 32. Representação gráfica da carga imposta ao longo do tempo.



Fonte: a autora, 2023.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

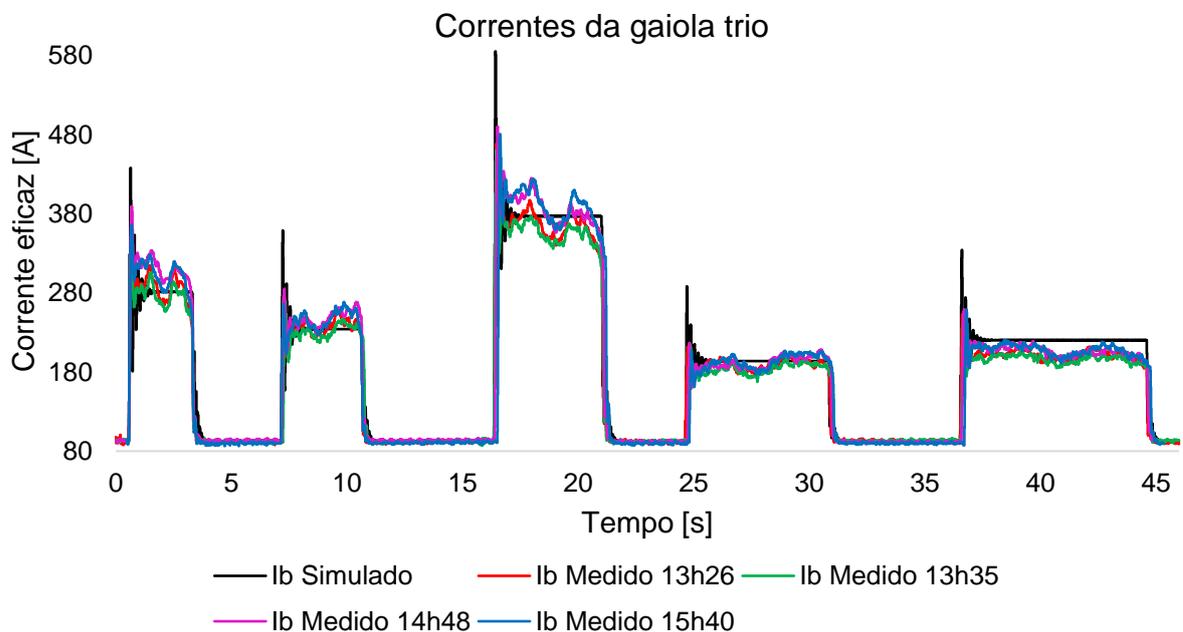
Realizados os itens descritos na metodologia, se avaliam os resultados.

6.1 RESULTADOS ESPERADOS

A expectativa é realizar quatro simulações com o aço SAE 1015 para avaliar o comportamento do motor da gaiola trio e observar as divergências entre valores obtidos experimentalmente e teoricamente. Coletou-se a medição de corrente elétrica eficaz em quatro horários distintos: 13h26, 13h35, 14h48 e 15h40. Espera-se observar uma aproximação nos valores médios das curvas medidas durante o período de regime permanente da carga simulada.

6.2 RESULTADOS OBTIDOS

Figura 33. Comparação entre a corrente simulada e as correntes reais.



Fonte: a autora, 2023.

Em que

$$I_{b \text{ simulado}} = \text{corrente eficaz simulada no } P\text{Sim [A]}$$

$I_{b \text{ medido } 13h26}$ = corrente elétrica eficaz medida às 13h26 [A]

$I_{b \text{ medido } 13h35}$ = corrente elétrica eficaz medida às 13h35 [A]

$I_{b \text{ medido } 14h48}$ = corrente elétrica eficaz medida às 14h48 [A]

$I_{b \text{ medido } 15h40}$ = corrente elétrica eficaz medida às 15h40 [A]

A Figura 33 consiste na sobreposição das curvas de corrente elétrica eficaz medida dos cinco passes da gaiola trio nos quatro horários escolhidos e da curva simulada. Os tempos de carga imposta foram alinhados aos tempos observados na medição das 13h26.

Nota-se que os valores de corrente variam entre os horários coletados. Um dos prováveis motivos é o encharque do material: o laminador ficou parado em torno de uma hora antes do período da coleta; logo as primeiras duas medições foram realizadas em materiais mais encharcados. Após a retomada da produção às 13h08, não ocorreram mais paradas significativas, ou seja, os materiais laminados mais tarde ao longo do dia tiveram menos tempo de reaquecimento dentro do forno, tornando-se menos maleáveis que as peças das primeiras medições pela menor homogeneidade térmica do tarugo.

À primeira vista, os valores de corrente elétrica eficaz para os torques de laminação calculados parecem estar próximos dos valores médios das correntes medidas. Para uma comparação mais assertiva, optou-se por calcular o valor médio da corrente elétrica eficaz de cada horário durante o regime permanente da carga simulada.

Tabela 10. Intervalos utilizados para o cálculo de valores médios de corrente eficaz por passe.

Passe	Intervalo para o cálculo de média
1	1,5 – 3 s
2	8,5 – 10,5 s
3	17,5 – 20,5 s
4	26 – 30,5 s
5	38 – 44 s

Fonte: a autora, 2023.

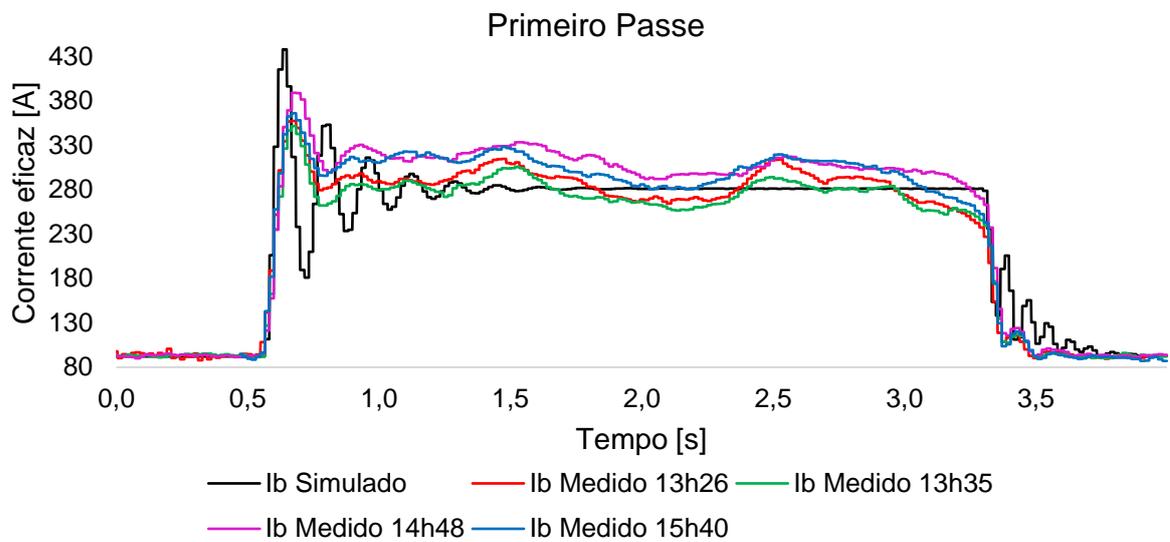
Tabela 11. Diferença entre correntes elétricas simuladas e medidas.

Passe	Horário	Corrente elétrica eficaz média	Diferença entre simulado e medido
1	Simulado	281,18 A	–
	13h26	286,49 A	–1,85%
	13h35	276,93 A	1,54%
	14h48	308,11 A	–8,74%
	15h40	301,35 A	–6,69%
2	Simulado	234,22 A	–
	13h26	238,83 A	–1,93%
	13h35	232,55 A	0,72%
	14h48	250,58 A	–6,53%
	15h40	248,69 A	–5,82%
3	Simulado	376,92 A	–
	13h26	367,5 A	2,56%
	13h35	356,71 A	5,67%
	14h48	385,07 A	–2,12%
	15h40	388,74 A	–3,04%
4	Simulado	193,76 A	–
	13h26	189,87 A	2,05%
	13h35	185,02 A	4,72%
	14h48	192,68 A	0,56%
	15h40	195,16 A	–0,72%
5	Simulado	220,36 A	–
	13h26	201,12 A	9,57%
	13h35	197,08 A	11,81%
	14h48	206,63 A	6,65%
	15h40	207,76 A	6,06%

Fonte: a autora, 2023.

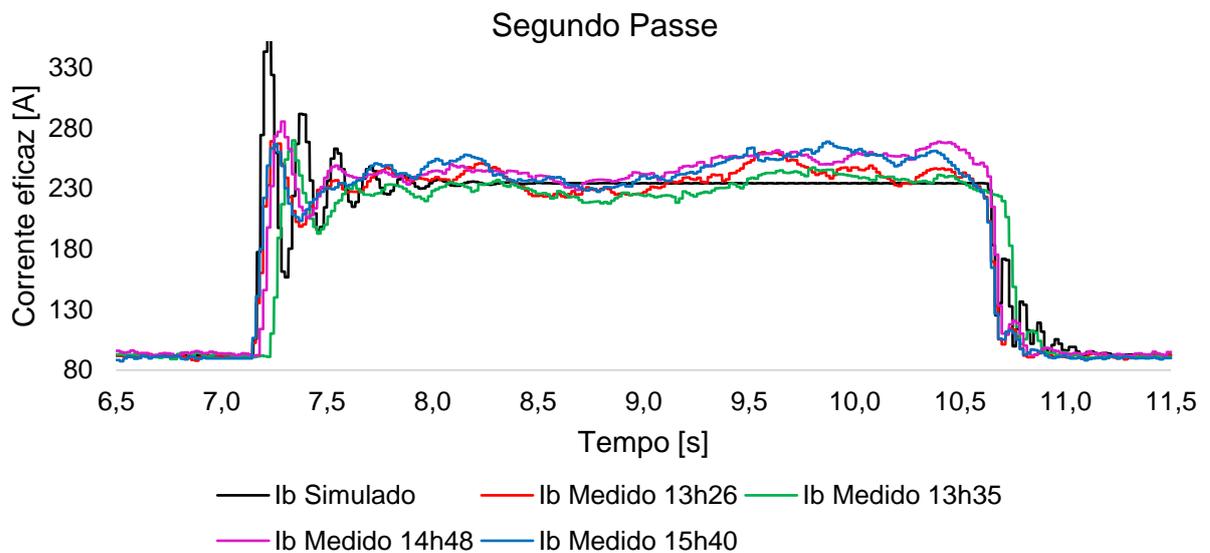
Da Figura 34 à Figura 38 ilustram as curvas do primeiro ao quinto passe, respectivamente. Os valores médios foram calculados nos intervalos da Tabela 10, em que o início sinaliza o momento em que a corrente elétrica simulada estabiliza e o fim, quando as correntes elétricas medidas decaem gradativamente, indicando que a peça está saindo do canal.

Figura 34. Correntes do primeiro passe.



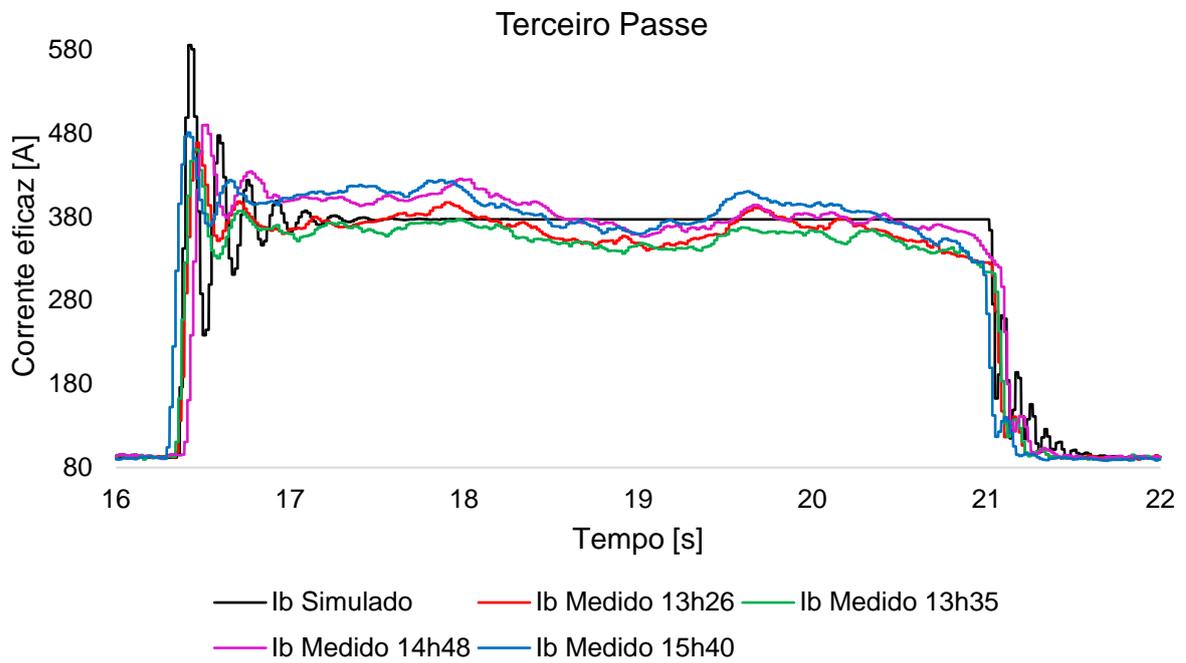
Fonte: a autora, 2023.

Figura 35. Correntes do segundo passe.



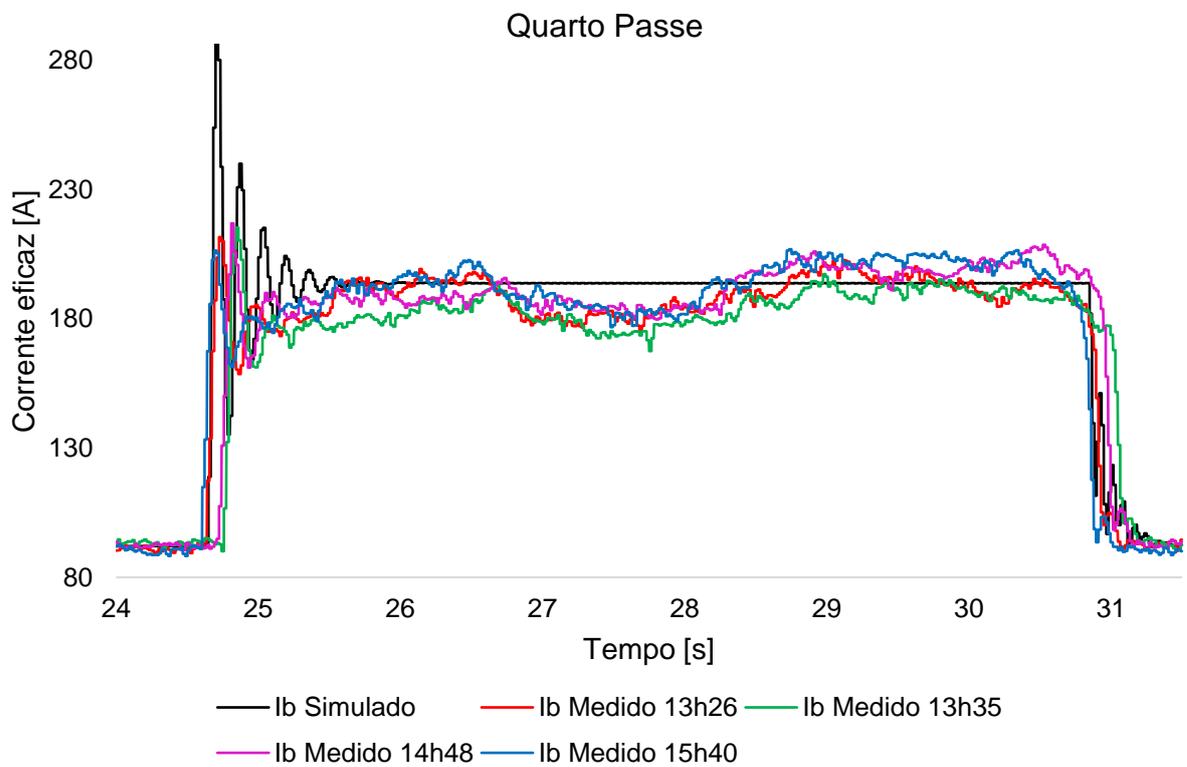
Fonte: a autora, 2023.

Figura 36. Correntes do terceiro passe.



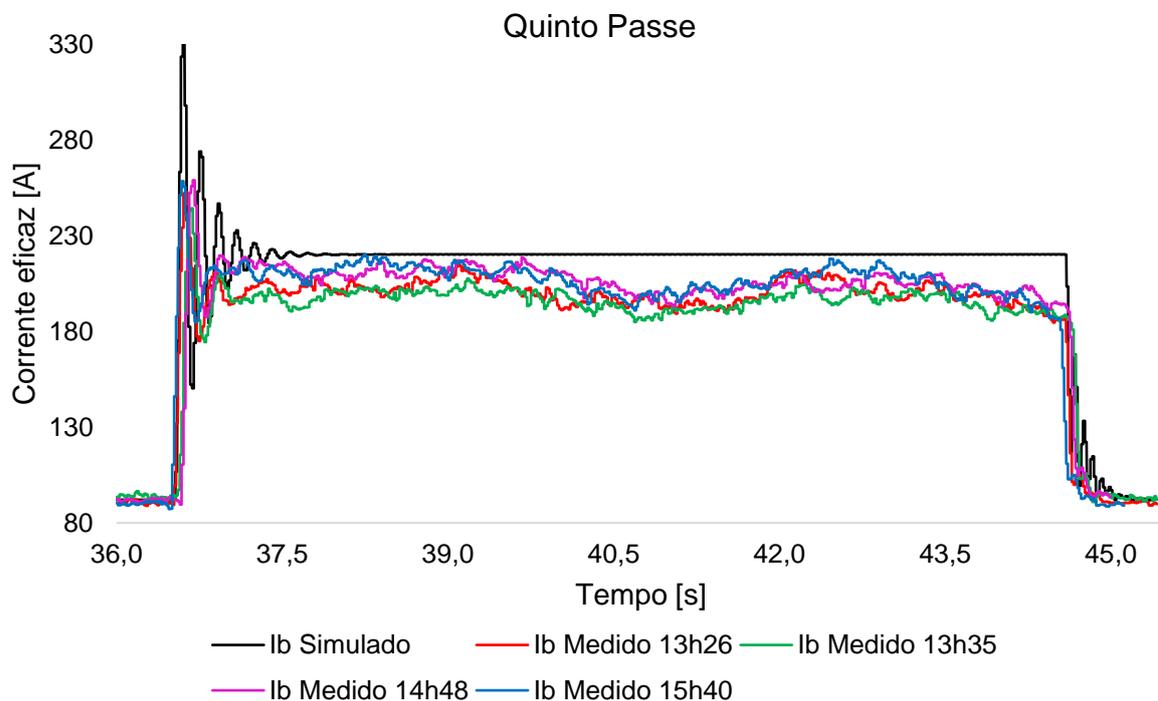
Fonte: a autora, 2023.

Figura 37. Correntes do quarto passe.



Fonte: a autora, 2023.

Figura 38. Correntes do quinto passe.



Fonte: a autora, 2023.

A Tabela 11 contém os valores médios calculados. Percebe-se que a diferença entre a média das curvas simuladas e medidas oscila entre valores menores que 1% até cerca de 11%. Com tais resultados, se pode afirmar que o modelo é válido para a representação da laminação do aço SAE 1015 na gaiola trio.

6.2.1 Sobreposição de carga

Em ritmo normal de produção, a gaiola trio lamina mais de uma peça por vez: quando a primeira barra sai do quarto passe, o próximo tarugo é desenformado. Dessa forma, é comum ocorrer a laminação do primeiro e do quinto passe de duas barras diferentes de forma concomitante. Assim, foi analisada a corrente eficaz às 13h13, quando ocorreu sobreposição de carga. A função de trechos lineares utilizada para a carga imposta está representada graficamente na Figura 39.

Figura 39. Representação gráfica da carga imposta com sobreposição ao longo do tempo.

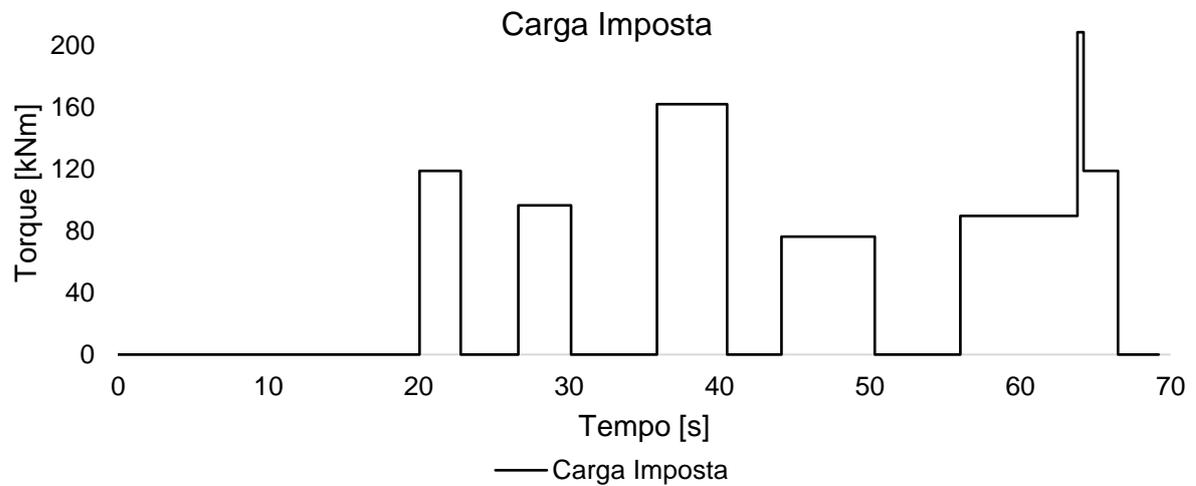
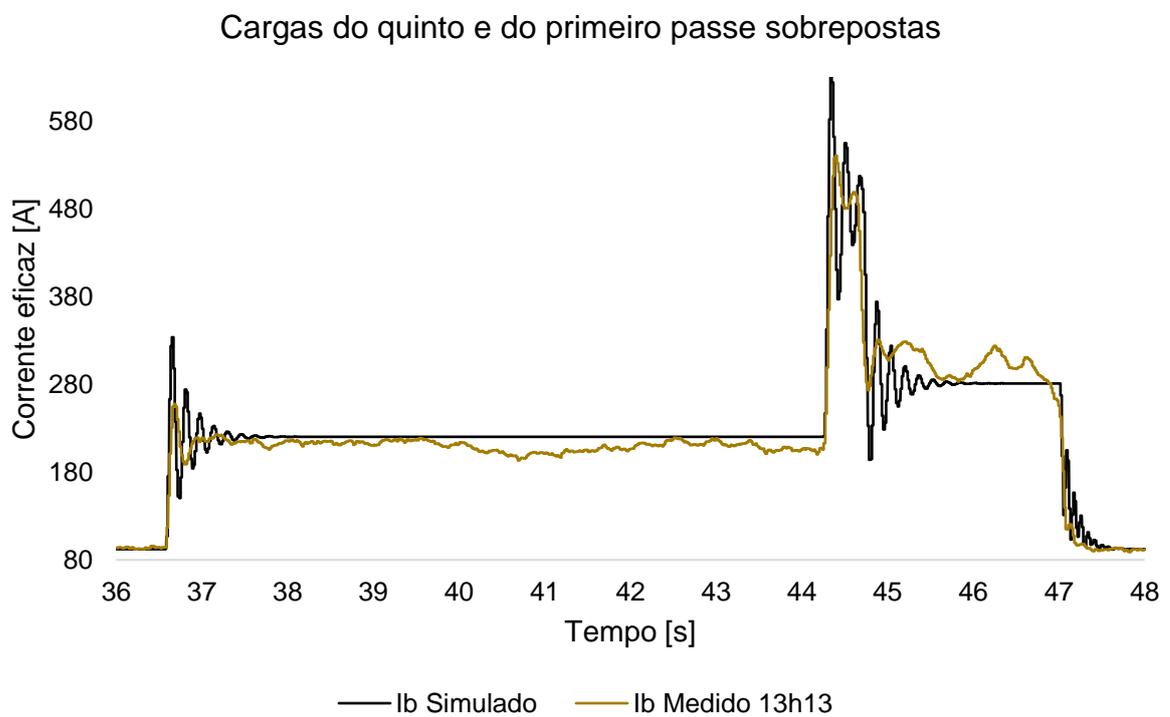


Figura 40. Comparação entre as correntes elétricas simuladas e medidas com sobreposição de carga no quinto e no primeiro passe.



Em que

$$I_{b \text{ medido } 13h13} = \text{corrente eficaz medida às 13h13 [A]}$$

A Figura 40 representa as curvas de corrente elétrica eficaz simulada e medida para as peças laminadas no quinto e no primeiro passe às 13h13. Percebe-se que a corrente com sobreposição de cargas simulada possui valores semelhantes da corrente medida. A Tabela 12 ilustra as diferenças de corrente elétrica eficaz média durante o comportamento de regime permanente da simulação, as quais variam de aproximadamente 5% a 6,5%.

Tabela 12. Diferença entre correntes simulada e real da sobreposição de carga.

Passe	13h13	Corrente eficaz média
5	Simulado	220,36 A
	Medido	209,64 A
	Diferença	5,11%
1	Simulado	281,24 A
	Medido	299,88 A
	Diferença	-6,22%

Fonte: a autora, 2023.

6.2.2 Potência mecânica equivalente no eixo do motor

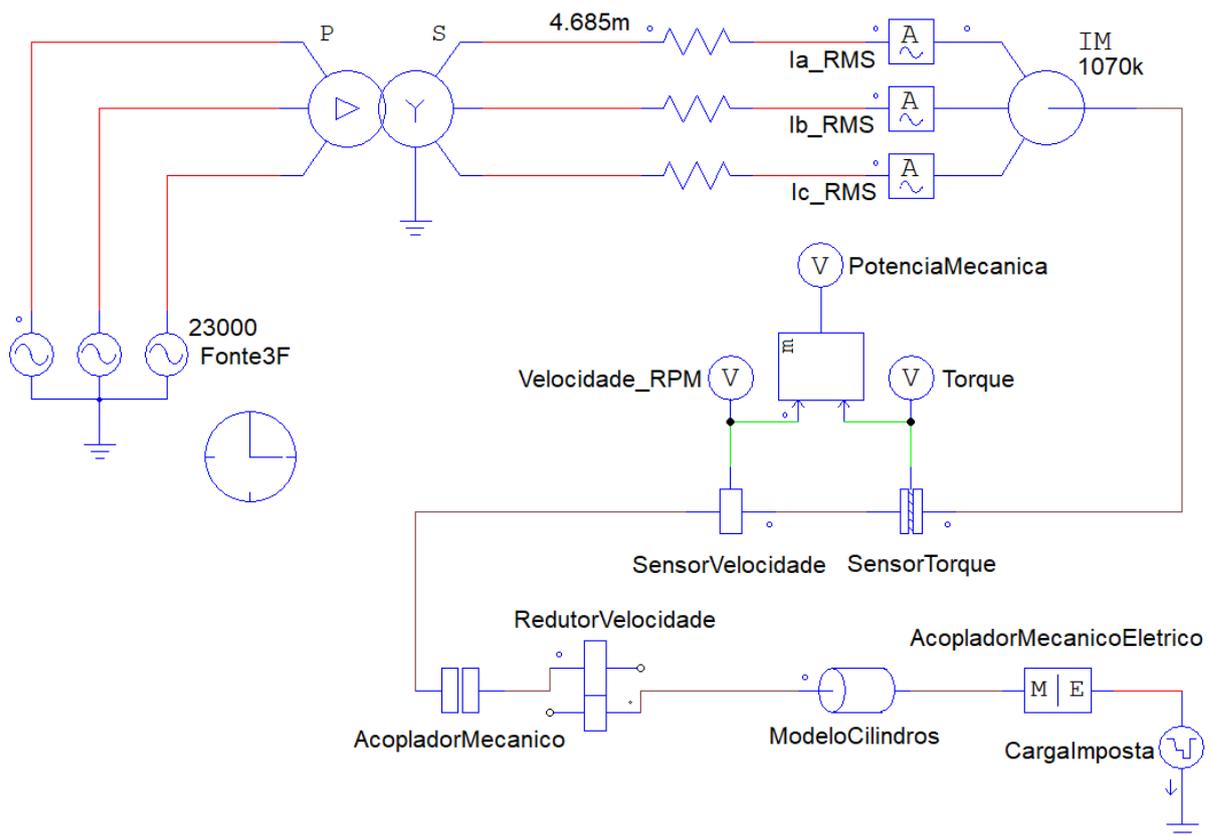
A partir da validação do modelo, é possível realizar diversas análises. Optou-se por exemplo verificar se o motor possui capacidade adequada frente à carga imposta, ou sofre com sobrecarga. Percebe-se que a corrente elétrica eficaz ultrapassa o valor nominal de placa da máquina em alguns momentos: durante o terceiro passe e quando há sobreposição de carga. Para tanto, conforme ilustra a Figura 41, foram inseridos sensores de velocidade e torque no eixo do motor simulado, opção pouco atrativa financeiramente para ser executada experimentalmente.

À saída de ambos os sensores foi instalado um bloco de função matemática para obter a potência mecânica aplicada ao eixo do motor. Ele calcula o valor a partir da equação (52).

A partir dos dados instantâneos, a potência mecânica equivalente desenvolvida pelo motor para suportar um ciclo completo da peça laminada pelos cinco passes da gaiola trio é calculada conforme a expressão (53), segundo o guia

de especificação de motores elétricos do fabricante WEG S.A. Os valores de potência instantânea e os intervalos de tempo utilizados para o cálculo da potência equivalente estão na Tabela 13.

Figura 41. Circuito de verificação de potência mecânica no eixo do motor.



Fonte: a autora, 2023.

A Figura 42 contém três curvas de potência em um ciclo de laminação: a potência instantânea da simulação, a potência equivalente desse ciclo e a potência dos dados de placa do motor instalado no desgaste da Laminação 1. Uma vez que o fator de serviço nas placas das máquinas é 1, se pode considerar a potência equivalente da simulação como uma potência média do ciclo e compará-la com a potência do motor informada pelo fabricante.

$$P_{mec} = M_{motor}\omega \quad (52)$$

$$P_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{i=1} (P_i^2 t_i)}{\sum_{n=1}^{i=1} t_i}} \quad (53)$$

Em que

P_{eq} = potência equivalente solicitada ao motor [W]

P_i = potência instantânea do ciclo solicitada ao motor [W]

t_i = período em que a potência instantânea é solicitada ao motor [s]

Tabela 13. Valores de potência instantânea e intervalos de tempo utilizados para o cálculo da potência equivalente.

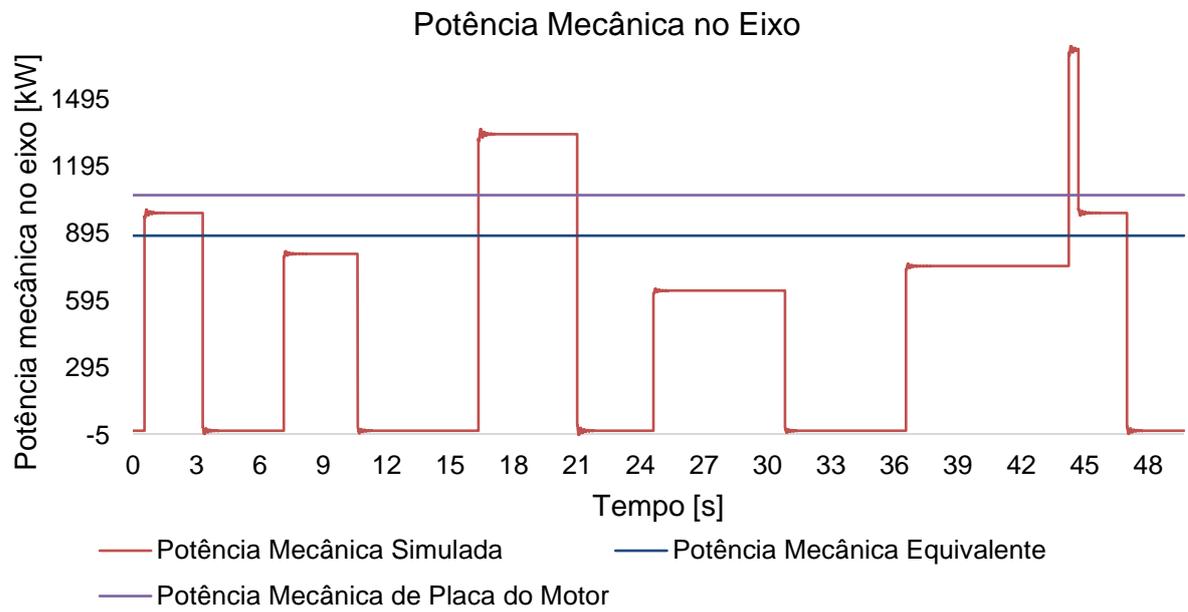
Potência instantânea	Intervalo de tempo
987,36 kW	2,75 s
804,92 kW	3,50 s
1339,20 kW	4,67 s
640,17 kW	6,22 s
749,48 kW	7,80 s
1716,74 kW	0,39 s
987,35 kW	2,30 s

Fonte: a autora, 2023.

Apesar de ter um valor significativo, a potência equivalente desenvolvida na simulação corresponde a 83% da potência informada nos dados de placa do motor instalado. Assim, apesar de sofrer com sobrecarga no terceiro passe e na sobreposição do primeiro e do último passe, no restante do ciclo a carga é adequada, assim como a potência média desenvolvida durante o ciclo.

A partir do gráfico é possível concluir que o estresse térmico causado nas peças da máquina ocorre durante aproximadamente 5,12 s, tempo que corresponde a cerca de 11% do período total. Finalmente, se conclui que, por causa do tempo pouco significativo de sobrecarga, a máquina é adequada para o processo.

Figura 42. Curvas de potência mecânica no eixo do motor.



Fonte: a autora, 2023.

7 CONCLUSÃO

Laminação é um processo industrial complexo cuja modelagem envolve muitas variáveis dinâmicas. O presente estudo abordou a modelagem de força média de laminação para representar o sistema do laminador trio em operação.

A simulação desenvolvida obteve o comportamento esperado para o cálculo de força média de laminação aplicada ao motor acoplado à gaiola trio. As aproximações do circuito de alimentação, dos parâmetros da máquina e das variáveis utilizadas para o cálculo da força de laminação geraram pouco impacto no resultado; portanto, foram adequadas.

A média da corrente simulada durante o regime permanente da carga teve uma diferença em relação às médias das correntes medidas no mesmo espaço de tempo de menos de 12%. O cálculo de força de laminação, apesar de ter sido feito com o uso de variáveis aproximadas – como a temperatura da barra, por exemplo –, obteve resultados satisfatórios.

Foi possível representar o comportamento do motor da gaiola trio com a máquina similar, e, baseado nos resultados de corrente, os ajustes feitos em seu circuito equivalente foram adequados. Com isso, foi possível avaliar se a sobrecarga do motor durante o terceiro passe e ao laminar duas peças ao mesmo tempo é significativa para causar preocupações acerca de possíveis danos à máquina, com a conclusão de que a máquina possui potência adequada para suprir a carga imposta total do ciclo da gaiola trio.

O momento atual é de baixa demanda para a Laminação 1; logo, cuidados com custos se tornam ainda mais necessários para manter a competitividade do setor frente outras usinas do grupo e da companhia frente outras empresas.

Para trabalhos futuros, se sugere avaliar curvas de disjuntores para os momentos em que a máquina opera com sobrecarga, bem como estudar a laminação de tipos de aço diferentes da gama já contida na programação da área, possibilitando um aumento da quantidade de produtos que o laminador oferece. Outra recomendação é avaliar a possibilidade de desenformar os tarugos com uma temperatura mais baixa, reduzindo o consumo de gás natural no forno, representando uma economia significativa no custo da L1.

REFERÊNCIAS

- ARNOLD, F. **Análise unidimensional de transdutores piezelétricos baseada no teorema de Thévenin**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 4, p. 4305-4314, 2009.
- BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. Rio de Janeiro, Brasil: Grupo GEN, 2018. Disponível em <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595154629/>>. Acesso em 07 fev. 2022.
- CABLE NEWS NETWORK BRASIL. **Em 13º entre maiores economias, PIB do Brasil fica abaixo de média global**. Publicado em 04/03/2022. Disponível em <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/em-13o-entre-maiores-economias-pib-do-brasil-fica-abaixo-de-media-global/>>. Acessado em 09/05/2022.
- CHAPMAN, S. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre, Brasil: AMGH Editora Ltda, 2013.
- CHIAVERINI, V. **Aço e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1996.
- CORDEIRO, V. **Projeto de conjunto redutor de velocidade utilizando engrenagem sem-fim**. Guaratinguetá, Brasil: Universidade Estadual Paulista, 2012.
- DAROIT, M. **Estudo de aço microligado ao Vanádio para a produção de barra nervurada para concreto armado com característica de soldabilidade segundo norma ABNT NBR 8965:1985**. Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- DE OLIVEIRA, F.; SOLLERO, L. **Consumo de Aço no Brasil: um modelo baseado na técnica da intensidade do uso**. Brasília, Brasil: 2014.
- FILHO, G. F. **Motor de Indução**, 2. ed. São Paulo, Brasil: Érica, 2013.
- FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**, 9. ed. LTC, 2017.
- GARCIA, F.; LISBOA, R. **Nova metodologia de cálculo da força de laminação e sua aplicação na determinação dos esforços admissíveis nos cilindros**, 1996.
- GOUVÊA, M.; DE OLIVEIRA, D.; CAMINHAS, W.; BRAGA, A.; DE MENEZES, B. **Aplicação de inteligência computacional na determinação da força de laminação**, 2022.
- GROOVER, M. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Rio de Janeiro, Brasil: Grupo GEN, 2014. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2640-4/>>. Acesso em 07 fev. 2022.

- GROOVER, M. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. Rio de Janeiro, Brasil: John Wiley & Sons, 2010.
- INDÚSTRIA HOJE. **O que é um redutor de velocidade?** Disponível em <<https://industria hoje.com.br/redutor-velocidade>>. Acesso em 25 abr. 2022.
- TRANDAFILOV, V. **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. IEEE Std 112-2004 (Revision of IEEE Std 112-1996), 2004.
- KOLLING, S. **Restrições do mercado brasileiro às importações de aço**. Florianópolis, Brasil: Universidade do Sul de Santa Catarina, 2013.
- LAMBIASE, F. **Optimization of shape rolling sequences by integrated artificial intelligent techniques**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013.
- LEE, Y. **Calculating model of mean strain in rod rolling process**. ISIJ International, 1999.
- MAI, L.; WALKER, G.; SCHWERTNER, A.; CAMPOS, M.; SAUSEN, P. **Aquisição de correntes utilizando bobinas de Rogowski**. Ijuí, Brasil: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2017.
- MILANEZ, A. **Estudo da cailbração de barras chata laminadas a quente em um laminador trio**. Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- NUNES, L. **Desenvolvimento de aço microligado para a produção de vergalhão nervurado**. Rio de Janeiro, Brasil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.
- OLIVEIRA, E. **Estudo da otimização de Manganês em aço SAE 1541 modificado e da sua influência nas propriedades mecânicas de vergalhões**. Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- PETRUZELLA, F. **Motores Elétricos e Acionamentos**. Porto Alegre, Brasil: AMGHE Editora Ltda, 2013.
- PINEDO, C. **Tratamentos térmicos superficiais de aços**. São Paulo, Brasil: Editora Blucher, 2021.
- SANTOS, V. **Elementos de máquinas: elementos de transmissão de potência e movimento**. Belém, Brasil: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, 2015.

- SCHAEFFER, L. **Manufatura por conformação mecânica**. 1. Ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016.
- SCHAEFFER, L. **Método de medição de força em laminação - analogia entre a força medida e a calculada na laminação a quente de perfis de aço**. Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1976.
- SHIGLEY, J.; MISCHKE, C.; BUDYNAS, R. **Projetos de engenharia mecânica**. 7. Ed, Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2005.
- SILVA, A. **Redutor de velocidades com solução *anti-backlash***. Florianópolis, Brasil: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2019.
- SILVA, F. **Otimização da Qualidade no Lingotamento Contínuo de Tarugos Através da Utilização de Modelos Matemáticos**. Recife, Brasil: Universidade Federal de Pernambuco, 2015.
- SMITH, W.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Porto Alegre, Brasil: Grupo A, 2012. Disponível em <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551150/>>. Acesso em 07 fev. 2022.
- UMANS, S. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**, 7. Ed, Porto Alegre, Brasil: AMGH Editora Ltda, 2014.
- WEG S.A. **Guia de especificação – motores elétricos**. Disponível em <<https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em 14 set. 2023.
- WORLD STEEL ASSOCIATION, **Total production of crude steel**, 2023. Disponível em <<https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/>>. Acesso em 31 ago. 2023.
- WUSATOWSKI, Z. **Fundamentals of rolling**. Oxford, Reino Unido: Pergamon Press, 1969.

ANEXO A – Curvas de escoamento

Curvas de escoamento a quente de aço com 0,15% de Carbono, retirada de Schaeffer (1976).

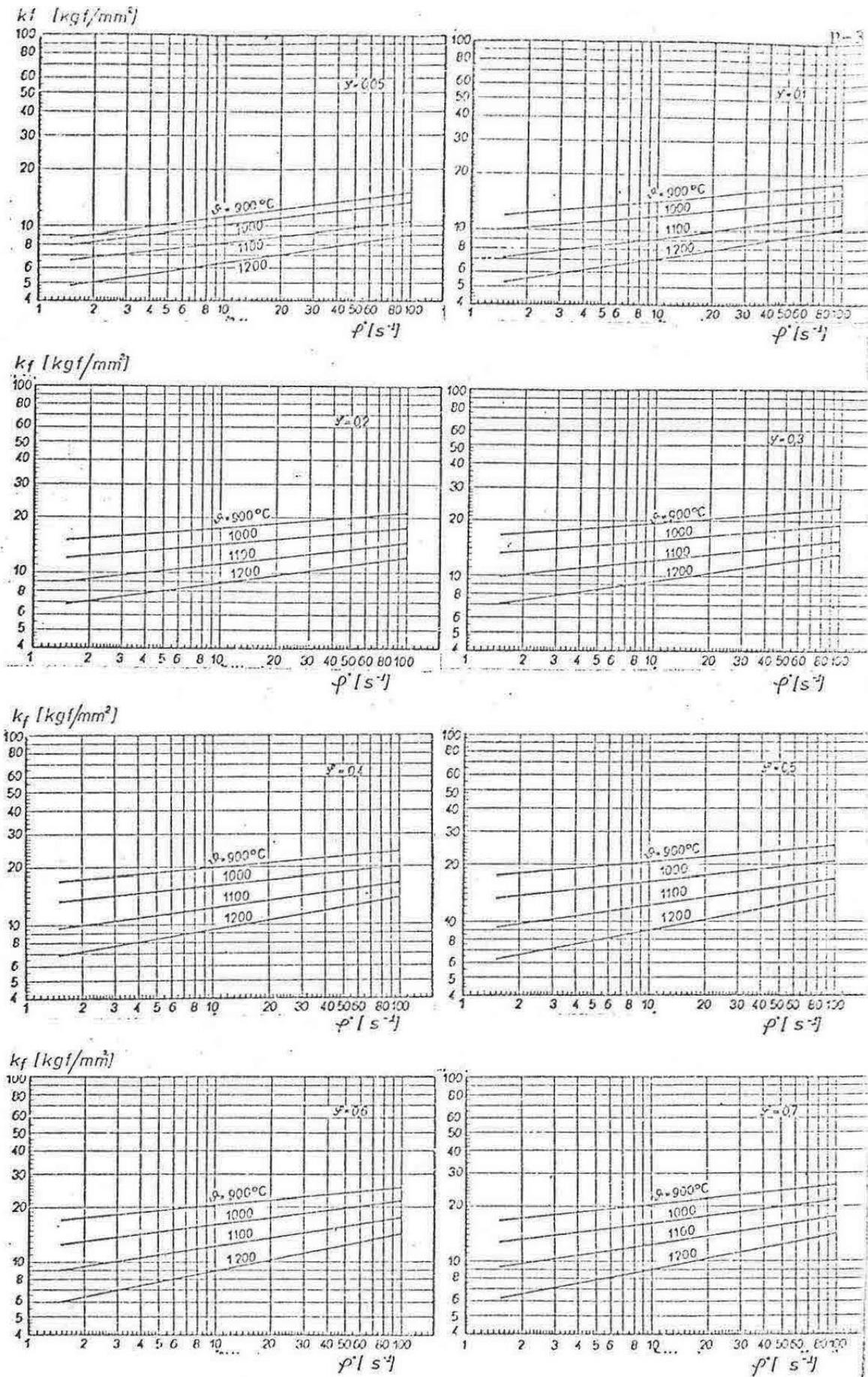


Fig.B.1 — Curvas de escoamento a quente de um aço com 0,15 % C.

APÊNDICE A – Método dos retângulos equivalentes

A determinação da área de contato de produtos de seção transversal não retangulares é complexa. Dessa forma, se faz uso de um artifício para obtenção de uma área equivalente: o método dos retângulos equivalentes.

A partir desse método, segundo Lee (1999), se determina um retângulo equivalente à seção transversal real com base na largura máxima, como se pode observar na Figura 43. A expressão (54) demonstra tal cálculo.

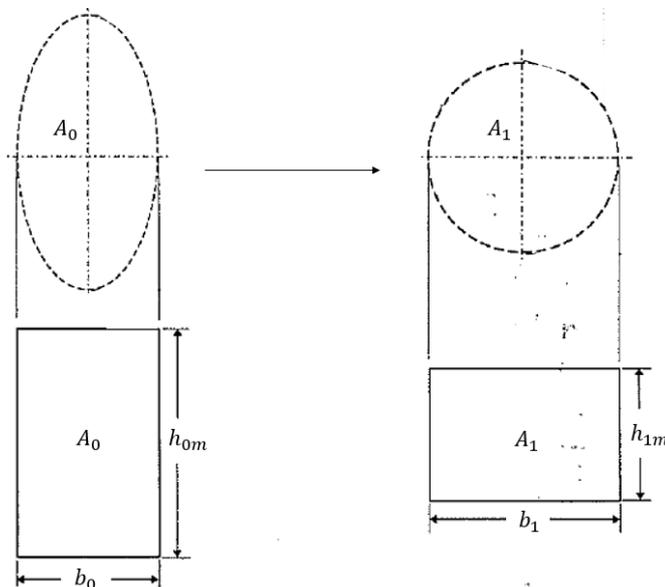


Figura 43. Determinação dos retângulos equivalentes e das alturas médias dos canais

Fonte: Lee, 1999 (adaptado pela autora).

$$\begin{cases} A_0 = b_0 h_{0m} \therefore h_{0m} = \frac{A_0}{b_0} \\ A_1 = b_1 h_{1m} \therefore h_{1m} = \frac{A_1}{b_1} \end{cases} \quad (54)$$

Em que

A_0 = área inicial da peça [mm^2]

A_1 = área final da peça [mm^2]

Segundo Schaeffer (1976), a partir do retângulo equivalente, se calcula o arco de contato l_d para esse novo canal, com base em um raio equivalente R_m , como em (55).

$$\begin{cases} l_d = \sqrt{R_m(h_{0_m} - h_{1_m})} \\ R_m = R - \frac{h_{1_m}}{2} - \frac{G}{2} \end{cases} \quad (55)$$

APÊNDICE B – Memorial de cálculo de força de laminação

Os cálculos de força realizados são divididos entre os que não utilizam o método dos retângulos equivalentes (primeiro e segundo passe) e os que o utilizam (demais passes). Segue abaixo o memorial de cálculo de força e torque de laminação para cada um dos passes do laminador trio.

Primeiro passe: chato (quadrado – retângulo)

Dados geométricos:

$$R = \frac{585}{2} = 292,5 \text{ mm}$$

$$h_0 = 120 \text{ mm}$$

$$h_1 = 93,3 \text{ mm}$$

$$b_0 = 120 \text{ mm}$$

$$b_1 = 130,2 \text{ mm}$$

$$G = 7,5 \text{ mm}$$

$$A_0 = 120^2 = 14400 \text{ mm}^2$$

$$A_1 = 11087 \text{ mm}^2$$

Cálculo do arco de contato e da área deformada:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 120 - 93,3 = 26,7 \text{ mm}$$

$$R_m = R = 292,5 \text{ mm}$$

$$l_d = \sqrt{R_m \Delta h} = \sqrt{292,5 \cdot 26,7} = 88,37 \text{ mm}$$

$$b_m = \frac{b_0 + b_1}{2} = \frac{120 + 130,2}{2} = 125,1 \text{ mm}$$

$$A_d = l_d b_m = 88,37 \cdot 125,1 = 1055 \text{ mm}^2$$

Cálculo da influência de geometria e atrito:

$$T_l = 1082 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005T) = 0,8(1,05 - 0,0005 \cdot 1082) = 0,407$$

$$k_e = 1 + \frac{1,6\mu \cdot l_d - 1,2\Delta h}{h_0 + h_1} = 1 + \frac{1,6 \cdot 0,407 \cdot 88,37 - 1,2 \cdot 26,7}{120 + 93,3} = 1,12$$

$$A_d k_e = 1055 \cdot 1,12 = 12379 \text{ mm}^2$$

Cálculo da deformação e da velocidade de deformação:

$$\varphi = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) = \ln\left(\frac{93,3}{120}\right) = -0,25 \approx -0,2$$

Para velocidade de rotação do motor de 1200 rpm,

$$n_r = \frac{n_{motor}}{r_t} = \frac{1200}{15,32} = 78,33 \text{ rpm}$$

$$v_r = R \frac{2\pi}{60} n_r = 292,5 \frac{2\pi}{60} 78,33 = 2399,26 \text{ mm/s}$$

$$\dot{\varphi} = 2v_r \frac{\sqrt{\Delta h/R}}{h_0 + h_1} = 2 \cdot 2399,26 \frac{\sqrt{26,7/292,5}}{120 + 93,3} = 6,8 \text{ s}^{-1}$$

Valor da tensão de escoamento:

Para $|\varphi| = 0,2$, $T_l = 1082 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\dot{\varphi} = 6,8 \text{ s}^{-1}$, $k_f = 11,1 \text{ kgf/mm}^2$. Logo,

$$F_l = A_d k_e k_f \frac{9,80665}{1000} = 12379 \cdot 11,1 \frac{9,80665}{1000} = 1348 \text{ kN}$$

$$M_d = F_l \frac{l_d}{1000} = 1348 \text{ k} \frac{88,37}{1000} = 119,1 \text{ kNm}$$

Segundo passe: quadrado (retângulo – quadrado)

Dados geométricos:

$$R = \frac{585}{2} = 292,5 \text{ mm}$$

$$h_0 = 130,2 \text{ mm}$$

$$h_1 = 94,4 \text{ mm}$$

$$b_0 = 93,3 \text{ mm}$$

$$b_1 = 95,3 \text{ mm}$$

$$G = 7,1 \text{ mm}$$

$$A_0 = 11357 \text{ mm}^2$$

$$A_1 = 9036 \text{ mm}^2$$

Cálculo do arco de contato e da área deformada:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 130,2 - 94,4 = 35,8 \text{ mm}$$

$$R_m = R - \frac{h_1}{2} - \frac{luz}{2} = 292,5 - \frac{94,4}{2} - \frac{7,1}{2} = 223,85 \text{ mm}$$

$$l_d = \sqrt{R_m \Delta h} = \sqrt{223,85 \cdot 35,8} = 89,52 \text{ mm}$$

$$b_m = \frac{b_0 + b_1}{2} = \frac{93,3 + 95,3}{2} = 94,3 \text{ mm}$$

$$A_d = l_d b_m = 89,52 \cdot 94,3 = 8442 \text{ mm}^2$$

Cálculo da influência de geometria e atrito:

$$T_l = 1076,75 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005T) = 0,8(1,05 - 0,0005 \cdot 1076,75) = 0,409$$

$$k_e = 1 + \frac{1,6\mu \cdot l_d - 1,2\Delta h}{h_0 + h_1} = 1 + \frac{1,6 \cdot 0,409 \cdot 89,52 - 1,2 \cdot 35,8}{130,2 + 94,4} = 1,07$$

$$A_d k_e = 8442 \cdot 1,07 = 9031 \text{ mm}^2$$

Cálculo da deformação e da velocidade de deformação:

$$\varphi = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) = \ln\left(\frac{130,2}{94,4}\right) = -0,32 \approx -0,3$$

Para velocidade de rotação do motor de 1200 rpm,

$$n_r = \frac{n_{motor}}{r_t} = \frac{1200}{15,32} = 78,33 \text{ rpm}$$

$$v_r = R \frac{2\pi}{60} n_r = 292,5 \frac{2\pi}{60} 78,33 = 2399,26 \text{ mm/s}$$

$$\dot{\varphi} = 2v_r \frac{\sqrt{\Delta h / R_m}}{h_0 + h_1} = 2 \cdot 2399,26 \frac{\sqrt{35,8 / 223,85}}{130,2 + 94,4} = 8,54 \text{ s}^{-1}$$

Valor da tensão de escoamento:

Para $|\varphi| = 0,3$, $T_l = 1076,5 \text{ °C}$ e $\dot{\varphi} = 8,54 \text{ s}^{-1}$, $k_f = 12,2 \text{ kgf/mm}^2$. Logo,

$$F_l = A_d k_e k_f \frac{9,80665}{1000} = 9031 \cdot 12,2 \frac{9,80665}{1000} = 1080 \text{ kN}$$

$$M_d = F_l \frac{l_d}{1000} = 1080 \text{ k} \frac{89,52}{1000} = 96,7 \text{ kNm}$$

Terceiro passe: oval (quadrado – oval)

Dados geométricos:

$$R = \frac{585}{2} = 292,5 \text{ mm}$$

$$h_0 = 94,4 \text{ mm}$$

$$h_1 = 66,3 \text{ mm}$$

$$b_0 = 95,3 \text{ mm}$$

$$b_1 = 118,5 \text{ mm}$$

$$G = 7,2 \text{ mm}$$

$$A_0 = 9036 \text{ mm}^2$$

$$A_1 = 6017 \text{ mm}^2$$

Cálculo das alturas através de retângulos equivalentes:

$$h_{0m} = \frac{A_0}{b_0} = \frac{9036}{95,33} = 94,82 \text{ mm}$$

$$h_{1m} = \frac{A_1}{b_1} = \frac{6017}{118,5} = 50,78 \text{ mm}$$

Cálculo do arco de contato e da área deformada:

$$\Delta h_m = h_{0m} - h_{1m} = 94,82 - 50,78 = 44,04 \text{ mm}$$

$$R_m = R - \frac{h_{1m}}{2} - \frac{luz}{2} = 292,5 - \frac{50,78}{2} - \frac{7,2}{2} = 241,49 \text{ mm}$$

$$l_d = \sqrt{R_m \Delta h_m} = \sqrt{241,49 \cdot 44,04} = 103,13 \text{ mm}$$

$$b_m = \frac{b_0 + b_1}{2} = \frac{95,3 + 118,5}{2} = 106,9 \text{ mm}$$

$$A_d = l_d b_m = 103,13 \cdot 106,9 = 11024 \text{ mm}^2$$

Cálculo da influência de geometria e atrito:

$$T_l = 1071,5 \text{ °C}$$

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005T) = 0,8(1,05 - 0,0005 \cdot 1071,5) = 0,411$$

$$k_e = 1 + \frac{1,6\mu \cdot l_d - 1,2\Delta h_m}{h_{0m} + h_{1m}} = 1 + \frac{1,6 \cdot 0,411 \cdot 103,13 - 1,2 \cdot 44,04}{94,82 + 50,78} = 1,10$$

$$A_d k_e = 11024 \cdot 1,10 = 12163 \text{ mm}^2$$

Cálculo da deformação e da velocidade de deformação:

$$\varphi = \ln\left(\frac{h_{0m}}{h_{1m}}\right) = \ln\left(\frac{94,82}{50,78}\right) = -0,62 \approx -0,6$$

Para velocidade de rotação do motor de 1.200 rpm,

$$n_r = \frac{n_{motor}}{r_t} = \frac{1200}{15,32} = 78,33 \text{ rpm}$$

$$v_r = R \frac{2\pi}{60} n_r = 292,5 \frac{2\pi}{60} 78,33 = 2399,26 \text{ mm/s}$$

$$\dot{\varphi} = 2v_r \frac{\sqrt{\Delta h_m / R_m}}{h_{0m} + h_{1m}} = 2 \cdot 2399,26 \frac{\sqrt{44,04 / 241,49}}{94,82 + 50,78} = 14,07 \text{ s}^{-1}$$

Valor da tensão de escoamento:

Para $|\varphi| = 0,6$, $T_l = 1071,5 \text{ °C}$ e $\dot{\varphi} = 14,07 \text{ s}^{-1}$, $k_f = 13,2 \text{ kgf/mm}^2$. Logo,

$$F_l = A_d k_e k_f \frac{9,80665}{1000} = 12163 \cdot 13,2 \frac{9,80665}{1000} = 1574 \text{ kN}$$

$$M_d = F_l \frac{l_d}{1000} = 1574 \text{ k} \frac{103,13}{1000} = 162,4 \text{ kNm}$$

Quarto passe: redondo (oval – redondo)

Dados geométricos:

$$R = \frac{585}{2} = 292,5 \text{ mm}$$

$$h_0 = 118,5 \text{ mm}$$

$$h_1 = 79,3 \text{ mm}$$

$$b_0 = 66,3 \text{ mm}$$

$$b_1 = 79,3 \text{ mm}$$

$$G = 7,3 \text{ mm}$$

$$A_0 = 6017 \text{ mm}^2$$

$$A_1 = 4870 \text{ mm}^2$$

Cálculo das alturas através de retângulos equivalentes:

$$h_{0m} = \frac{A_0}{b_0} = \frac{6017}{66,3} = 90,75 \text{ mm}$$

$$h_{1m} = \frac{A_1}{b_1} = \frac{4870}{79,3} = 61,41 \text{ mm}$$

Cálculo do arco de contato e da área deformada:

$$\Delta h_m = h_{0m} - h_{1m} = 90,75 - 61,41 = 29,34 \text{ mm}$$

$$R_m = R - \frac{h_{1m}}{2} - \frac{luz}{2} = 292,5 - \frac{61,41}{2} - \frac{7,3}{2} = 243,47 \text{ mm}$$

$$l_d = \sqrt{R_m \Delta h_m} = \sqrt{243,47 \cdot 29,34} = 84,52 \text{ mm}$$

$$b_m = \frac{b_0 + b_1}{2} = \frac{66,3 + 79,3}{2} = 72,8 \text{ mm}$$

$$A_d = l_d b_m = 84,52 \cdot 72,8 = 6153 \text{ mm}^2$$

Cálculo da influência de geometria e atrito:

$$T_l = 1066,25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005T) = 0,8(1,05 - 0,0005 \cdot 1066,25) = 0,414$$

$$k_e = 1 + \frac{1,6\mu \cdot l_d - 1,2\Delta h_m}{h_{0m} + h_{1m}} = 1 + \frac{1,6 \cdot 0,414 \cdot 84,52 - 1,2 \cdot 29,34}{90,75 + 61,41} = 1,14$$

$$A_d k_e = 6153 \cdot 1,14 = 6991 \text{ mm}^2$$

Cálculo da deformação e da velocidade de deformação:

$$\varphi = \ln\left(\frac{h_{0m}}{h_{1m}}\right) = \ln\left(\frac{90,75}{61,41}\right) = -0,39 \approx -0,4$$

Para velocidade de rotação do motor de 1.200 rpm,

$$n_r = \frac{n_{motor}}{r_t} = \frac{1200}{15,32} = 78,33 \text{ rpm}$$

$$v_r = R \frac{2\pi}{60} n_r = 292,5 \frac{2\pi}{60} 78,33 = 2399,26 \text{ mm/s}$$

$$\dot{\varphi} = 2v_r \frac{\sqrt{\Delta h_m / R_m}}{h_{0m} + h_{1m}} = 2 \cdot 2399,26 \frac{\sqrt{29,34 / 243,47}}{90,75 + 61,41} = 10,95 \text{ s}^{-1}$$

Valor da tensão de escoamento:

Para $|\varphi| = 0,4$, $T_l = 1066,25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\dot{\varphi} = 10,95 \text{ s}^{-1}$, $k_f = 13,2 \text{ kgf/mm}^2$. Logo,

$$F_l = A_d k_e k_f \frac{9,80665}{1000} = 6991 \cdot 13,2 \frac{9,80665}{1000} = 905 \text{ kN}$$

$$M_d = F_l \frac{l_d}{1000} = 905 \text{ k} \frac{84,52}{1000} = 76,5 \text{ kNm}$$

Quinto passe: oval (redondo – oval)

Dados geométricos:

$$R = \frac{585}{2} = 292,5 \text{ mm}$$

$$h_0 = 79,3 \text{ mm}$$

$$h_1 = 47 \text{ mm}$$

$$b_0 = 79,3 \text{ mm}$$

$$b_1 = 95 \text{ mm}$$

$$G = 6,6 \text{ mm}$$

$$A_0 = 4870 \text{ mm}^2$$

$$A_1 = 3523 \text{ mm}^2$$

Cálculo das alturas através de retângulos equivalentes:

$$h_{0m} = \frac{A_0}{b_0} = \frac{4870}{79,3} = 61,41 \text{ mm}$$

$$h_{1m} = \frac{A_1}{b_1} = \frac{3523}{95} = 37,08 \text{ mm}$$

Cálculo do arco de contato e da área deformada:

$$\Delta h_m = h_{0m} - h_{1m} = 61,41 - 37,08 = 24,33 \text{ mm}$$

$$R_m = R - \frac{h_{1m}}{2} - \frac{luz}{2} = 292,5 - \frac{37,08}{2} - \frac{6,6}{2} = 258,49 \text{ mm}$$

$$l_d = \sqrt{R_m \Delta h_m} = \sqrt{258,49 \cdot 24,33} = 79,3 \text{ mm}$$

$$b_m = \frac{b_0 + b_1}{2} = \frac{79,3 + 95}{2} = 87,15 \text{ mm}$$

$$A_d = l_d b_m = 79,3 \cdot 87,15 = 6911 \text{ mm}^2$$

Cálculo da influência de geometria e atrito:

$$T_l = 1061 \text{ °C}$$

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005T) = 0,8(1,05 - 0,0005 \cdot 1061) = 0,416$$

$$k_e = 1 + \frac{1,6\mu \cdot l_d - 1,2\Delta h_m}{h_{0m} + h_{1m}} = 1 + \frac{1,6 \cdot 0,416 \cdot 79,3 - 1,2 \cdot 24,33}{61,41 + 37,08} = 1,24$$

$$A_d k_e = 6911 \cdot 1,24 = 8563 \text{ mm}^2$$

Cálculo da deformação e da velocidade de deformação:

$$\varphi = \ln\left(\frac{h_{0m}}{h_{1m}}\right) = \ln\left(\frac{61,41}{37,08}\right) = -0,5$$

Para velocidade de rotação do motor de 1200 rpm,

$$n_r = \frac{n_{motor}}{r_t} = \frac{1200}{15,32} = 78,33 \text{ rpm}$$

$$v_r = R \frac{2\pi}{60} n_r = 292,5 \frac{2\pi}{60} 78,33 = 2399,26 \text{ mm/s}$$

$$\dot{\varphi} = 2v_r \frac{\sqrt{\Delta h_m / R_m}}{h_{0m} + h_{1m}} = 2 \cdot 2399,26 \frac{\sqrt{24,33 / 258,49}}{61,41 + 37,08} = 14,95 \text{ s}^{-1}$$

Valor da tensão de escoamento:

Para $|\varphi| = 0,5$, $T_l = 1061 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\dot{\varphi} = 14,95 \text{ s}^{-1}$, $k_f = 13,5 \text{ kgf/mm}^2$. Logo,

$$F_l = A_d k_e k_f \frac{9,80665}{1000} = 8.563 \cdot 13,5 \frac{9,80665}{1000} = 1134 \text{ kN}$$

$$M_d = F_l \frac{l_d}{1000} = 1134 \text{ k} \frac{79,3}{1000} = 89,9 \text{ kNm}$$