

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

DICEZAR LUIZ PUTRIQUE JÚNIOR

PROJETO DE LAMINADOR DE BANCADA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

DICEZAR LUIZ PUTRIQUE JÚNIOR

PROJETO DE LAMINADOR DE BANCADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Davi Fusão

PONTA GROSSA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

PROJETO DE LAMINADOR DE BANCADA

por

DICEZAR LUIZ PUTRIQUE JÚNIOR

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 7 de dezembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Davi Fusão
Orientador

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Membro Titular

Prof. Dr. Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares

Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho

Coordenador do Curso

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

Dedico este trabalho aos meus pais,
Dicezar Luiz e Anna Maria que são as
pessoas mais importantes de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que a conclusão deste trabalho fosse possível:

Aos meus pais e a minha irmã, que sempre acreditaram em minha capacidade de alcançar meus sonhos. Por terem me proporcionado tudo o que podiam para eu alcançar essa vitória. Sem o apoio de vocês, nada disso seria possível.

A minha namorada, por ter mudado a minha vida pessoal e acadêmica. Me ensinou, motivou e me fez crescer nos estudos, junto com muito amor, carinho e paciência. Ter chegado ao fim desse curso se deve em grande parte a você.

Ao prof. Davi Fusão, pela paciência, compreensão e calma em me instruir nesse trabalho.

Aos meus verdadeiros amigos, com quem vivi uma das melhores fases da minha vida, dentro e fora da universidade.

Eu nunca perco. Ou eu ganho, ou eu aprendo. (McGREGOR, Conor, 2017)

RESUMO

PUTRIQUE JÚNIOR, Dicezar Luiz. **Projeto de laminador de bancada**. 2017. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Os processos de fabricação por conformação mecânica são essenciais para o setor industrial, pois permitem altas velocidades de produção e consequentes reduções nos custos. Desse modo o processo de fabricação por conformação se faz importante para a formação acadêmica de futuros engenheiro. Com o objetivo de suprir uma carência de equipamento na Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Ponta Grossa, este trabalho dimensionou um laminador de bancada que permite laminar corpos de prova de alumínio com 20mm de espessura fazendo uma redução de 10% por passe de laminação. Fundamentado nos conhecimentos de conformação por laminação, elementos de máquinas e resistência dos materiais, o estudo foi norteadado pelo alumínio 2024-t4 o qual possui elevada resistência a laminação em relação às outras ligas de alumínio, 414,93 MPa, gerando assim uma força de separação de 576,91 kN. Dessa forma, todos os elementos de máquinas presente no laminador e estrutura foram dimensionados de acordo com a capacidade de suportar a força de separação. Assim foi obtido o dimensionamento de um laminador de bancada capaz de laminar amostras de ligas de alumínio 2024-t4.

Palavras-chave: Laminador. Laminação. Conformação. Alumínio. Projeto.

ABSTRACT

PUTRIQUE JÚNIOR, Dicezar Luiz. **Project of stand rolling mill**. 2017. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2017.

The processes of manufacture by mechanical forming are essential for the industrial sector because they allow high production speeds and consequent reductions in costs. In this way the manufacturing process by forming becomes important for the academic training of future engineer. With the objective of supplying a shortage of equipment at the Federal Technological University of Paraná of Ponta Grossa, this work has the objective of designing a bench rolling mill that allows the rolling of 20 mm thick aluminium test specimens, making a reduction of 10% per rolling pass. The study was based on 2024-t4 aluminium, which showed high rolling resistance compared to other aluminium alloys, 414.93 MPa, thus generating a strength of separation of 576.91 kN. In this way, all the machine elements present in the mill and structure were sized according to the ability to withstand the separation force. Thus, the design of a bench rolling mill capable of laminating samples of aluminium alloys 2024-t4

Keywords: Rolling Mill. Rolling. Forming. Aluminium. Design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração do processo de laminação	19
Figura 2 - Processo de laminação a quente	20
Figura 3 - Ilustração de material em laminação.....	21
Figura 4 - Laminador Duo de retorno por cima.....	21
Figura 5 - Laminador Duo reversível	22
Figura 6 - Laminador Trio	22
Figura 7 - Laminador Quadruo	22
Figura 8 - Zona plástica e área de contato da laminação.....	23
Figura 9 - Grandezas Geométricas	23
Figura 10 - Condições de Agarre	24
Figura 11 - Redução de altura durante conformação	25
Figura 12 - Força de separação atuando	26
Figura 13 - Considerações de momento fletor e força cortante.....	28
Figura 14 - Momento torsor	30
Figura 15 - Representação de filete da rosca do parafuso de potência	38
Figura 16 - Laminador de bancada	53
Figura 17 - Laminador de bancada em vista explodida	54
Figura 18 - Fator de superfície K_a	62
Figura 19 - Fator de tamanho K_b	62
Figura 20 - Fator de carregamento K_c	63
Figura 21 - Fator de temperatura K_d	63
Figura 22 - Fator de confiabilidade K_e	64
Figura 23 - Fator de concentração de tensão para eixo cilíndrico em flexão	64
Figura 24 - Fator de concentração de tensão para eixo cilíndrico em torção	65
Figura 25 - Sensibilidade ao entalhe por flexão	65
Figura 26 - Sensibilidade ao entalhe por torção	66
Figura 27 - Categoria métrica de propriedades mecânicas para parafusos	68
Figura 28 - Especificações técnicas de cilindros de laminação	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados iniciais do laminador.....	43
Tabela 2 – Amostra de ligas de alumínio para laminação	44
Tabela 3 - Característica das ligas de alumínio.....	44
Tabela 4 - Determinação de potência e momento de laminação	45
Tabela 5 - Dados de engrenagem.....	45
Tabela 6 - Dados do rolamento	46
Tabela 7 - Dados do parafuso de potência.....	46
Tabela 8 - Parafusos de fixação	47
Tabela 9 - Dados do cilindro de laminação	49
Tabela 10 - Dados das chavetas.....	50
Tabela 11 - Dados da estrutura da gaiola	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 MATERIAL A SER LAMINADO.....	16
2.1.1 Alumínio.....	16
2.2 CONFORMAÇÃO MECÂNICA	18
2.2.1 Laminação	18
2.2.1.1 Laminadores	21
2.3 MECÂNICA DOS LAMINADORES	23
2.3.1 Relações geométricas e área de contato.....	23
2.3.2 Condições de agarre ou mordida.....	24
2.3.3 Força de separação dos cilindros	25
2.3.4 Momento e potência de laminação	27
2.4 ELEMENTOS DE MÁQUINAS	28
2.4.1 Momento fletor e força cortante	28
2.4.2 Momento torsor.....	29
2.4.3 Cilindro de laminação	31
2.4.4 Fator de projeto e segurança.....	33
2.4.5 Engrenagem cilíndrica de dentes retos.....	34
2.4.6 Mancais de rolamento.....	35
2.4.7 Parafusos de potência	35
2.4.8 Parafusos de fixação	38
2.4.9 Chaveta.....	40
2.5 ESTRUTURA DO LAMINADOR	41
3 RESULTADOS	43
3.1 CONDIÇÕES INICIAIS DE PROJETO.....	43
3.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO.....	44
3.3 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE MÁQUINAS.....	45
3.3.1 Engrenagens.....	45
3.3.2 Rolamentos.....	46
3.3.3 Determinação dos parafusos de potência.....	46
3.3.4 Parafusos de fixação	47
3.3.5 Dimensionamento do cilindro de laminação.....	48
3.3.6 Chavetas.....	50
3.4 SELEÇÃO DE MATERIAL DA ESTRUTURA DA GAIOLA	51
4 RESULTADOS	53

6. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICE A - Desenhos dos principais componentes do laminador	60
ANEXO A - Fatores modificadores do limite de resistência a fadiga	61
ANEXO B - Critérios característicos de parafusos	67
ANEXO C - Especificações técnicas de cilindro de laminação.....	69

1 INTRODUÇÃO

Schaeffer (1999) diz que os processos de fabricação por conformação possuem extrema importância para o Brasil, visto que o país detém umas das maiores reservas de minerais conhecidas. Também argumenta que existe a necessidade de um aprimoramento no desenvolvimento tecnológico que envolve processos de fabricação mecânica, o que contribuiria ao país atingir uma independência econômica. Infelizmente a realidade é que a indústria brasileira opta por adquirir o produto pronto, o que acaba gerando atrasos tecnológicos e maior custo no preço do produto final adquirido.

Conformação mecânica pode ser definida como uma intervenção aplicada a solicitações mecânicas em materiais metálicos, correspondendo com alterações permanentes em suas dimensões (HELMAN e CETLIN, 2005).

A conformação mecânica tem, portanto, diversos processos, tais como: laminação, extrusão, trefilação, forjamento, estampagem, estiramento de chapas, dobramento, calandragem e corte. Porém o estudo deste trabalho será focado no processo de laminação.

Para Bresciani et al. (1997) o processo de conformação conhecido pelo nome de laminação, fundamentalmente incide na passagem de um corpo sólido entre cilindros que giram em velocidade periférica igual porém em sentidos opostos. Assim, com o corpo da peça inicial com uma dimensão maior do que a distância entre as superfícies dos cilindros, este sofre uma deformação plástica quando passa por estes cilindros reduzindo assim a sua secção transversal e um aumento em seu comprimento e largura.

Segundo Bresciani et al. (1997), dependendo das dimensões e da estrutura do material da peça para o processamento, o processo de laminação pode ser desenvolvido a quente ou a frio.

Na indústria, o processo de produção de conformação por laminação possui uma vantagem em relação aos demais processos de fabricação, pois possibilita uma economia de material em relação a adequação das formas e na menor relação de peso e resistência. A laminação permite alta produtividade e controle dimensional no produto acabado, permitindo obtenção de chapas finas de espessura reduzidas e longos perfis que seria impossível ou muito caro por outros processos.

Considerando que os custos do equipamento e ferramental da laminação, tal como os cilindros, e produção sejam elevados, a única justificativa para possuir um laminador em atividade, seria a alta demanda de lotes para fabricação.

Tendo em vista essas condições, é possível desenvolver um laminador em escala não industrial que possa suprir as necessidades didáticas acadêmicas bem como uma ferramenta para elaboração de pesquisas científicas?

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um equipamento de laminação em escala não industrial que possa suprir as necessidades didáticas acadêmicas, bem como uma ferramenta para a elaboração de pesquisas científicas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar um equipamento de laminação laboratorial para ligas de alumínio;
- Disponibilizar a especificação dos componentes para a construção do mesmo;

1.3 JUSTIFICATIVA

Segundo Helman (2005), a conformação mecânica é de suma importância quando se refere a área de fabricação de peças metálicas, no qual diz respeito à mudança de dimensões e formas dos metais a partir da imposição de esforços mecânicos externos.

Segundo Dieter (1988) e Rizzo (2008), grande parte da importância dos materiais metálicos deve-se a facilidade com que estes podem ser trabalhados com o intuito de chegar a uma forma desejada, a propriedade controlada e custo compatível ao dever de sua concepção.

Pode-se definir que a laminação é a redução das secções de barras ou blocos, com o aumento dos comprimentos das mesmas, atribuindo melhorias as propriedades dos materiais.

Considerando esses fatores, além de que, segundo Franco (1988) o processo de laminação é o mais utilizado na área de conformação de metais, a ausência de um equipamento deste porte em uma universidade tecnológica para fins laboratoriais não deve ser aceitado, devido ao enriquecimento intelectual que pode agregar tanto de forma didática aos alunos quanto aos efeitos em desenvolvimento de pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão descritos e introduzidos os conceitos teóricos fundamentais relacionados com as aplicações que são abordadas ao longo do presente trabalho de conclusão de curso.

2.1 MATERIAL A SER LAMINADO

O processo de conformação por laminação pode trabalhar com um vasto leque de materiais disponíveis no mercado, contudo, para cada tipo de material, deve haver uma alteração na configuração do laminador, que pode ser na variação de sua pressão ou até mesmo no material do rolo laminador.

Assim, cada laminador pode trabalhar melhor com um tipo específico de material para o qual fora projetado.

2.1.1 Alumínio

Com a simbologia de abreviação “Al”, o alumínio é um elemento químico com um número atômico de valor 13, sendo treze prótons e treze elétrons e massa 27u.

Segundo ASM Metals Handbook, o alumínio se tornou uma importante ferramenta para a engenharia no final do século XIX, devido a suas características únicas.

O que chama a atenção é a versatilidade, devido a sua gama de propriedades físicas e mecânicas que podem ser desenvolvidas, possibilitando alumínios de rica pureza ou até mesmo ligas complexas.

Juvinall et al. (2008) diz que há centenas de ligas de alumínio disponíveis, sendo separadas por ligas forjadas ou fundidas. Sua diferenciação de nomenclatura é disposta por quatro dígitos para as ligas forjadas e três dígitos para as ligas obtidas por fundição. Havendo tratamentos térmico ou mecânico, apresenta-se uma designação seguida do número de identificação da liga.

Para ASM Metals Handbook, o que torna o alumínio e suas ligas mais viável e atraente para a engenharia são suas variedades de utilização, massa, densidade de

2,7 g/cm³, cerca de um terço da densidade do aço, cobre ou bronze. Sua aparência, propriedades físicas e mecânicas, excelente resistência a corrosão na maioria dos ambientes, incluindo a água, atmosfera, produtos petroquímicos e sistemas químicos. Um dos principais fatores é a sua maleabilidade.

Segundo Bray, descrito em ASM Metals Handbook, as ligas de alumínio são comumente agrupadas em uma série de designações, um sistema para cada tipo de família de alumínio através esquema a seguir:

- Série 1xxx: Alumínio puro com composição controlada. Sua pureza pode chegar a ser superior à 99%. São caracterizados por uma excelente resistência a corrosão, elevada condutividade elétrica e térmica, boa maleabilidade. Sua impurezas costumam ser compostas por ferro e silício. Aumento moderado em sua resistência, pode ser obtido através de encruamento;
- Série 2xxx: Liga de alumínio contendo o Cobre como principal elemento de liga podendo ter magnésio como uma adição secundária. Essas ligas requerem tratamento térmico para se obter uma otimização em suas propriedades, podendo até mesmo ser comparada a aços de baixo carbono. Essas ligas não possuem boa resistência a corrosão, sendo assim, costuma ser submetidas a revestimento de alumínio de aço de liga de magnésio-silício, ou serie 6xxx;
- Série 5xxx: Liga de alumínio contendo Magnésio como principal elemento secundário, resultando em um material de alta resistência. O magnésio costuma ser mais endurecedor que o manganês. Esta série possui boas características de soldabilidade, e boa resistência a corrosão em atmosfera marinha. Porém, não é muito aconselhável a trabalhos a frio;
- Série 6xxx: Essa liga contém silício e magnésio aproximadamente em proporções requeridas para a formação do silicieto de magnésio, tornando-se tratável termicamente. Costumam não ser tão forte quanto as ligas da série 2xxx e 7xxx, porém possuem boa formabilidade, soldabilidade, usinabilidade e resistência a corrosão. Atualmente esta liga de alumínio não costuma ser muito utilizada;
- Série 7xxx: Liga de alumínio contendo Zinco como principal elemento de liga. O zinco costuma variar de 1 à 8%. Costuma possuir também

elementos de cobre, magnésio, manganês, cromo ou variadas combinações entre eles. Quando combinado ao magnésio sua característica de resistência costuma ser considerada de moderada à alta. Costuma ser utilizada em fuselagem de aeronaves.

2.2 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

A conformação mecânica dos metais aplica esforços mecânicos externos gerando mudanças permanentes na configuração e nas dimensões dos materiais metálicos (HELMAN e CETLIN, 2005).

Segundo Bresciani et al. (1997), os processos de conformação podem ser divididos em duas vertentes: processos mecânicos, que utilizam a aplicação de tensões externas para gerar modificações de forma, e processos metalúrgicos, que utilizam altas temperaturas para se obter modificações de forma.

Bresciani et al. (1997) avalia que um dos métodos mais comuns de classificação dos processos mecânicos, é com relação ao tipo de esforço predominante. Os processos são qualificados em:

- Compressão direta: forjamento e laminação;
- Compressão indireta: trefilação, extrusão e estampagem;
- Tração: estiramento;
- Cisalhamento: torção de barras e corte de chapas;
- Flexão: calandragem e dobramento.

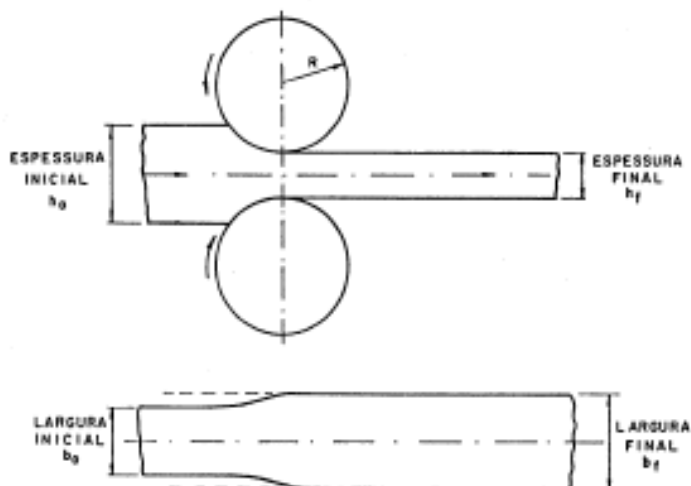
O processo de laminação mecânica será o tema primordial de estudo no desenvolvimento deste trabalho.

2.2.1 Laminação

Para Bresciani et al. (1997) o processo de conformação conhecido pelo nome de laminação, fundamentalmente incide na passagem de um corpo sólido entre cilindros que giram na mesma velocidade periférica, porém em sentidos opostos. Assim, com o corpo da peça inicial com uma dimensão maior do que a distância entre

as superfícies dos cilindros, este sofre uma deformação plástica quando passa por estes cilindros reduzindo assim a sua secção transversal resultando em um aumento em seu comprimento. Se não for possível obter as dimensões desejadas logo após o trabalho, recomenda-se submeter a peça a consecutivos passes. A figura 1 demonstra como funciona o processo de laminação.

Figura 1 - Ilustração do processo de laminação



Fonte: Bresciani et al. (1997)

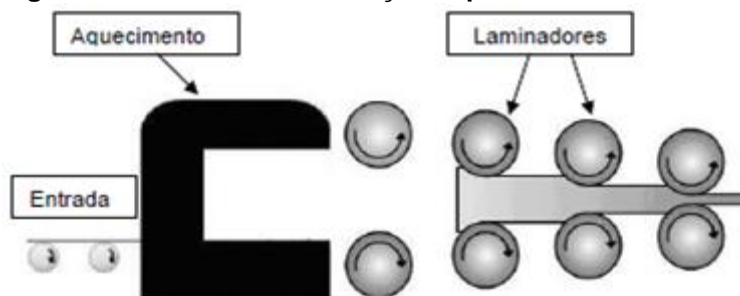
Entre a peça e o cilindro existe uma força de atrito atuando entre suas superfícies que contribui para a passagem da peça entre os cilindros. Essa força é referente ao coeficiente de atrito que existe entre peça e cilindro e à força normal a superfície de contato. A pressão exercida pelos cilindros é a força normal dividida pela área da superfície de contato, resultando na resistência à deformação plástica do material da peça em relação à temperatura e velocidade do trabalho.

A laminação pode ser subdividida em dois processos, que seriam processos de laminação a quente e processos de laminação a frio. A escolha desses processos depende da estrutura do material da peça especificada para o início e final do processamento.

- Laminação a quente: Segundo Moro et al. (2007), quando a matéria prima é lingote, a primeira operação ocorre em um laminador desbastador duo reversível que possui regulagem de distância entre os rolos, podendo ser variado durante o processo. Utilizam-se também laminadores universais para realização de desbaste, permitindo um melhor enquadramento do produto. Os produtos desta etapa são blocos de seção quadrada ou placas de seções

retangulares. As placas são laminadas até se tornarem chapas com espessura mais finas. Na laminação de chapas, costuma-se usar laminadores duos ou quádrus reversíveis. Já no caso de laminação de tiras, costuma-se utilizar laminadores duo e quádrus reversíveis para a realização de uma etapa preparatória, e em seguida é passado por um trem contínuo de laminadores quádrus. A figura 2 demonstra como funciona o processo de laminação a quente.

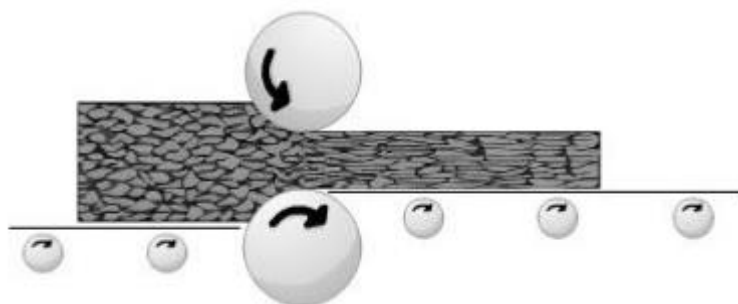
Figura 2 - Processo de laminação a quente



Adaptado de: Moro et al. (2007)

- Laminação a frio: Moro et al. (2007), diz que este processo costuma ser empregado para produzir tiras e folhas com qualidades superiores de acabamento superficial e tolerâncias em comparação a laminações a quente. Possui também maior resistência no produto final devido ao fator de encruamento proveniente da redução a frio. Os materiais utilizados para laminação de chapas de aço a frio, são provenientes dos trens contínuos de laminação que produzem bobinas a quente decapadas. Para laminação a frio de aço, alumínio e ligas de cobre, costuma-se utilizar trens laminadores quádrus de alta velocidade com três a cinco laminadores (cadeiras). A redução total atingida pode variar de 50 a 90%. Ao estabelecer um grau de redução em cada passe deseja-se uma distribuição o mais uniforme possível nos passes sem existir uma queda acentuada em relação à redução máxima em cada passe. Geralmente, a porcentagem de redução menor é realizado no último passe obtendo melhor controle de aplainamento, acabamento superficial e bitola. A figura três representa o processo de laminação a frio.

Figura 3 - Ilustração de material em laminação



Fonte: Moro et al. (2007)

2.2.1.1 Laminadores

Segundo Dieter (1988), laminadores são constituídos basicamente por mancais, uma carcaça chamada gaiola, que darão suporte para a fixação dos componentes, e um motor fornecendo potência para os rolos controlando a velocidade de rotação. Considerando que as forças envolvidas nos processos de conformação podem chegar a toneladas, é necessário a construção de estruturas rígidas e motores potentes fornecendo toda a força requerida

De acordo com Dieter (1988) e Bresciani et al. (1997), os laminadores podem ser classificados de acordo com número e arranjo de rolos presente no equipamento. Os principais laminadores encontrados são do tipo duo, trio e quádruplo.

- Laminador Duo: possui dois cilindros girando na mesma direção, o que obriga a peça laminada retornar por cima ou pelos lados para que possa ser submetida a um novo passe.

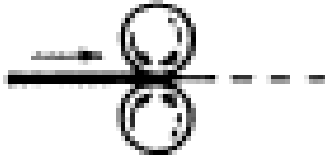
Figura 4 - Laminador Duo de retorno por cima



Fonte: Bresciani et al. (1997)

- Laminador Duo Reversível: promove a passagem da peça a ser laminada por ambos os lados. A rotação dos seus cilindros podem ser invertidos de forma que a peça possa “ir e voltar” dentro do laminador, o que permite trabalhar com peças pesadas e longas.

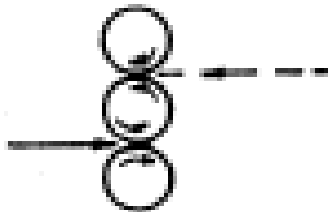
Figura 5 - Laminador Duo reversível



Fonte: Bresciani et al. (1997)

- Laminador Trio: possui o cilindro superior e inferior maior do que o cilindro intermediário. Esses dois cilindros principais são acionados por motores, já o cilindro intermediário tem o seu movimento gerado devido ao atrito e a peça a ser laminada se movimenta com a ajuda de uma mesa de elevação.

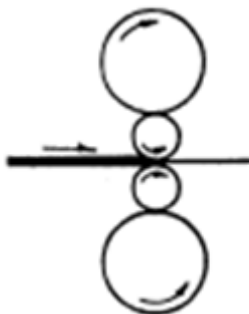
Figura 6 - Laminador Trio



Fonte: Bresciani et al. (1997)

- Laminador Quádruo: costuma ser usado em laminações a quente e a frio, trabalhando com chapas grossas e finas. Utilizam dois cilindros de encosto maiores do que os cilindros de trabalho, com a vantagem de todos poderem ser acionados por motores. Na maioria das vezes estes laminadores são usados em série, permitindo montar linhas de laminação contínua.

Figura 7 - Laminador Quádruo



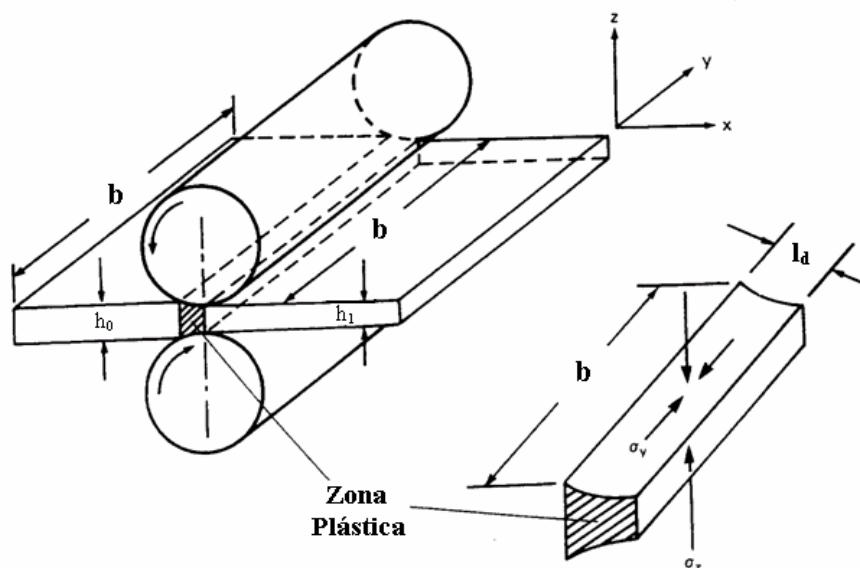
Fonte: Bresciani et al. (1997)

2.3 MECÂNICA DOS LAMINADORES

Segundo Bresciani et al. (1997), os cilindros laminadores atuam com esforço de compressão diretamente sobre a peça, dessa forma classifica-se como um processo de compressão direta. A forma inicial da peça e a intensidade da deformação da seção transversal, ditam a deformação plástica na direção da largura da peça.

2.3.1 Relações geométricas e área de contato

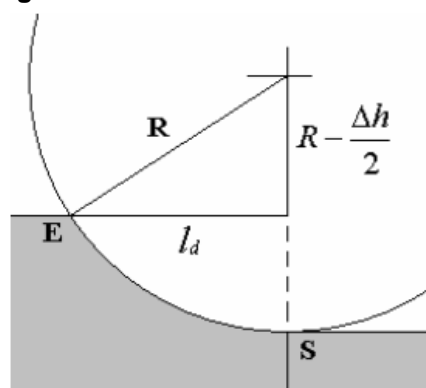
Figura 8 - Zona plástica e área de contato da laminação



Fonte: Pacheco et al. (2012)

Partindo do triângulo retângulo abaixo, pode-se deduzir que:

Figura 9 - Grandezas Geométricas



Fonte: Pacheco et al. (2012)

$$R^2 = ld^2 + \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 \text{ e assim:}$$

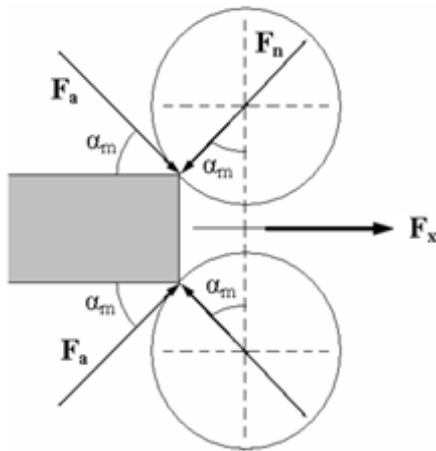
$ld = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2}$, devido a consideração de que $\left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2 \ll R \cdot (\Delta h)$, pode definir a equação como:

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

2.3.2 Condições de agarre ou mordida

A figura 10 mostra como funciona as forças que atuam na chapa, no ponto de entrada, onde se encontra a pior situação, pois a chapa pode escorregar e não ser agarrada, o que não permitiria uma laminação em condição normal.

Figura 10 - Condições de Agarre



Adaptado de: Pacheco et al. (2012)

Dessa forma, Pacheco et al. (2012) afirma que para ser garantido o agarre, a força resultante em F_x , deve ser positiva na direção de saída.

$$F_x = 2F_a \cos \alpha_m - 2F_n \sin \alpha_m = 2F_n (\mu \cos \alpha_m - \sin \alpha_m) \quad (2)$$

Assim, se $F_x > 0$, $(\mu \cos \alpha_m - \sin \alpha_m) > 0$ ou então, $\mu > \tan \alpha_m \rightarrow \tan \delta > \tan \alpha_m \rightarrow \delta > \alpha_m$, que é a condição de agarre, tudo o que for feito para aumentar o atrito ou reduzir α_m , consequentemente irá melhorar o agarre.

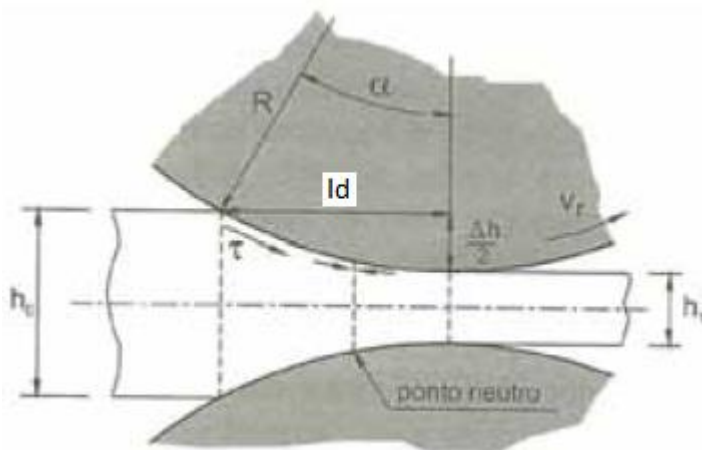
2.3.3 Força de separação dos cilindros

Ao idealizar a construção de um laminador, é necessário descobrir a robustez do equipamento que será projetado, ou seja, encontrar a força de separação do cilindro de laminação de acordo ao material utilizado.

A força de separação dos cilindros é resultado do produto da dimensão inicial da chapa, seu material, a redução por passagem, velocidade de rotação dos cilindros e o atrito entre chapa e cilindro.

A figura a seguir representa o processo de laminação, ressaltando as grandezas importantes.

Figura 11 - Redução de altura durante conformação



Adaptado de: Rodrigues et Al. (2010)

Sendo assim, define-se a redução por passagem como:

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \quad (3)$$

Schaeffer (1999) menciona que o arco de contato (ld) é descrita como a seção de contato que se tem entre a chapa e os cilindros, podendo ser calculada da seguinte forma com a equação (1).

Logo, a deformação verdadeira será:

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (4)$$

Segundo Martins et al. (2010), uma relação da tensão no interior da chapa, no momento em que esta passa entre os rolos de laminação e sofre a deformação plástica, pode ser definida na seguinte forma:

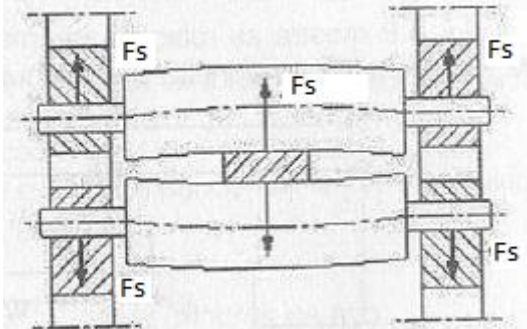
$$\sigma = \frac{K \cdot \epsilon_1^n}{e+1} \quad (5)$$

Sendo K a constante plástica de resistência, “e” o coeficiente de encruamento e ϵ_1 a deformação real.

A força de separação, pode ser expressa pela equação (6) e demonstrada na figura 12:

$$F_s = \sigma_{unf} \cdot Ld \cdot W \cdot Q_{fs} \quad (6)$$

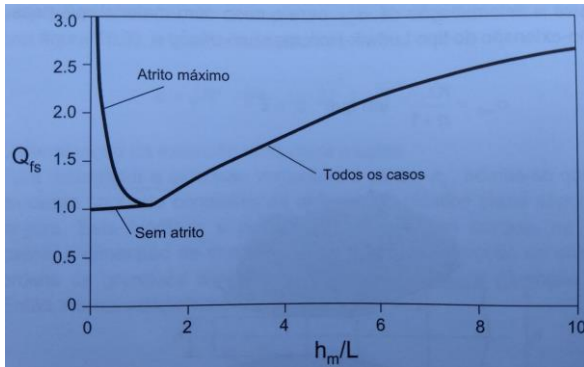
Figura 12 - Força de separação atuando



Adaptado de: Schaeffer (1999)

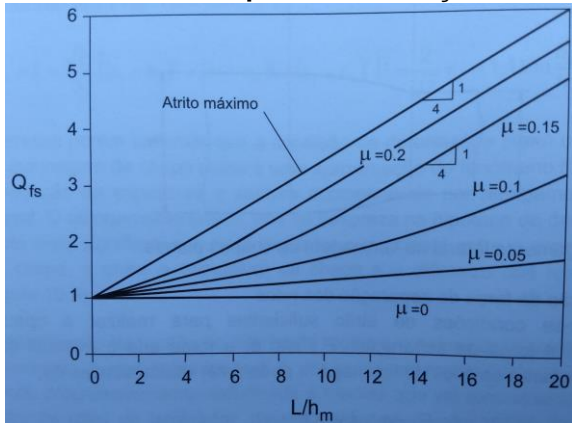
Sendo W designado como largura de chapa e Q_{fs} como coeficiente de correção que considera o fator de atrito e a relação dimensional hm/L .

Gráfico 1 - Gráfico para determinação do coeficiente de correção



Fonte: Rodrigues et Al. (2010)

Gráfico 2 - Gráfico para determinação do coeficiente de correção



Fonte: Rodrigues et Al. (2010)

Onde o gráfico 1 representa a situação de $L/h_m > 1$ e o gráfico 2 quando $L/h_m < 1$.

Definindo a espessura média de laminação, h_m como:

$$h_m = \frac{h_1 - h_0}{2} \quad (7)$$

2.3.4 Momento e potência de laminação

Segundo Schaeffer (1999), o momento total obtido pelos dois cilindros, pode ser expresso pela seguinte equação:

$$M = L \cdot F_s \quad (8)$$

Assim Schaeffer (1999), proporciona a potência de Laminação (P), considerando como ω a velocidade angular dos cilindros de laminação:

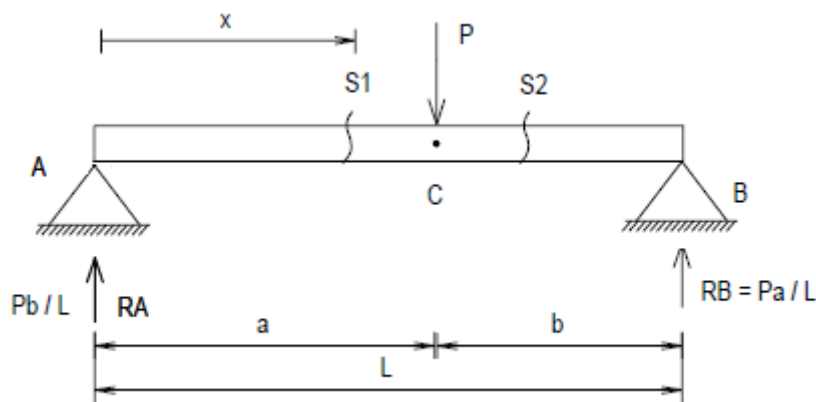
$$P = M \cdot \omega \quad (9)$$

2.4 ELEMENTOS DE MÁQUINAS

2.4.1 Momento fletor e força cortante

Segundo Hibbler (2009), elementos que possuem por finalidade de trabalho, suportar cargas perpendicularmente ao seu eixo longitudinal são denominados vigas. Para projetar essa viga, é necessário determinar o momento fletor (M) e a força cortante (V). A figura 13 demonstra como é esquematizado as considerações de cálculo de momento fletor e força cortante.

Figura 13 - Considerações de momento fletor e força cortante



Adaptado de Gaspar (2005)

Sendo definido os momentos e forças cortantes pelas seguintes equações:

$$M_1 = +RA \cdot x \quad (10)$$

$$M_2 = +RA \cdot x - P(x - a) \quad (11)$$

$$V_1 = +RA \quad (12)$$

$$V_2 = +RA - P \quad (13)$$

Sendo P a carga aplicada na viga e L o comprimento do eixo.

2.4.2 Momento torsor

Para Hibbler (2009) torque é o momento que tende a torcer o membro em torno de seu eixo longitudinal.

A deformação por cisalhamento do material aumenta linearmente de acordo com ρ (distancia radial a partir da linha de centro do eixo).

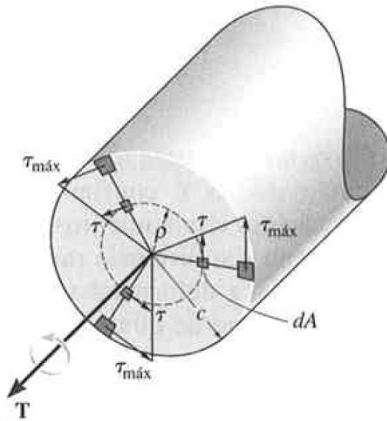
$$Y = (\rho/c)Y_{\text{máx}} \quad (14)$$

Sendo $C =$ raio do eixo

Quando um torque externo é aplicado a um eixo, cria um torque interno correspondente no interior do eixo. Se o material for linear-elástico, então a lei de Hooke $\tau = GY$ aplica-se e, conseqüentemente, uma variação linear na deformação por cisalhamento (Y) leva a uma variação linear na tensão de cisalhamento (τ) ao longo de qualquer reta radial na seção transversal. Assim, como a variação tensão-deformação, para um eixo maciço, τ varia de zero na linha de centro longitudinal do eixo a um valor máximo $\tau_{\text{máx}}$, em seu limite externo. Devido a lei de Hooke e pela equação (1) podemos escrever:

$$\tau = (\rho/c) \tau_{\text{máx}} \quad (15)$$

Figura 14 - Momento torsor



Adaptado de: Hibbler (2009)

O torque produzido pela distribuição de tensão em toda a seção transversal é equivalente ao torque interno resultante T na seção, o que manterá o eixo em equilíbrio. Especificamente, cada elemento de área dA , localizado em ρ , está submetido a uma força $dF = \tau dA$. O torque produzido por essa força é $dT = \rho (\tau dA)$.

$$\text{Temos assim: } T = \int_A \rho (\tau dA) = \int_A \rho (\rho/c) \tau_{\text{máx}} dA$$

Como $\tau_{\text{máx}}/c$ é constante, temos:

$$T = \tau_{\text{máx}}/c \int_A \rho^2 dA \tag{16}$$

A integral $(\int_A \rho^2 dA)$ depende apenas da geometria do eixo, assim, ela representa o momento de inércia polar da área da seção transversal, calculado em torno da linha de centro longitudinal do eixo. Assim, a equação (16) pode ser reescrita:

$$\tau_{\text{máx}} = Tc/J \tag{17}$$

Onde:

$\tau_{\text{máx}}$ = tensão de cisalhamento máxima no eixo, que ocorre na superfície externa;

T = torque interno resultante que atua na seção transversal. Seu valor é determinado pelo método das seções e pela equação do momento de equilíbrio aplicada em torno da linha de centro longitudinal do eixo

J = momento de inércia polar da área da seção transversal

C = raio externo do eixo

A tensão de cisalhamento é dada por: $\tau = T\rho/J$

O momento de inercia polar J em um eixo sólido é determinado usando um elemento de área sob a forma de um anel infinitesimal com espessura dp e circunferência $2\pi\rho$. Nesse anel, $dA = 2\pi\rho dp$ (com ρ de 0 a c)

$$J = \int A \rho^2 dA = \pi/2 c^4 \quad (18)$$

Eixos com seção transversal circular são frequentemente empregados para transmitir a potência gerada por máquinas. Quando usados para essa finalidade, são submetidos a torques que dependem da potência gerada pela máquina e da velocidade angular do eixo.

$$P = T \cdot \omega \quad (19)$$

Com as equações citadas acima, é possível chegar a:

$$Mt = \int \partial Mt \quad (20)$$

Ou então:

$$Mt = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P_{CI}}{n} \quad (21)$$

Sendo P_{CI} a potência no e n o número de ciclos.

2.4.3 Cilindro de laminação

O dimensionamento do cilindro, foi baseado nas equações dispostas por Budynas et al (2011).

A tensão de flexão no cilindro inferior é definida por:

$$\sigma_{xCI} = \frac{32 \cdot M_{fCI}}{\pi \cdot d^3} K_{fCI} \quad (22)$$

Sendo também a tensão cisalhante definida por:

$$\tau_{xCI} = \frac{16.M_{tCI}}{\pi.d^3} K_{fsCI} \quad (23)$$

Sendo que K_{fCI} e K_{fsCI} são fatores de concentração de fadiga, por flexão e torção, podendo ser obtido por:

$$K_{fCI} = 1 + q_{CI}(K_t - 1) \quad (24)$$

$$K_{fsCI} = 1 + q_{CI_s}(K_{ts} - 1) \quad (25)$$

Onde q_{CI} e q_{CI_s} são fatores de sensibilidade ao entalhe por flexão e torção, podendo ser obtido no anexo A. Já K_t e K_{ts} são fatores de concentração por tensão de flexão e torção.

Sendo o limite da resistência fadiga de viga rotativa:

$$S'_e = 0,504.S_{ut}C \quad (26)$$

E determinando o limite de resistência por:

$$S_e = k_a.k_b.k_c.k_d.k_e.k_f.S'_e \quad (27)$$

Onde:

S_e = Limite de resistência no local crítico de uma peça de máquina;

S'_e = Limite de resistência de espécime de teste do tipo de viga;

k_a = fator de modificação de condição de superfície;

k_b = fator de modificação de tamanho;

k_c = fator de modificação de carga;

k_d = fator de modificação de temperatura;

k_e = fator de confiabilidade;

k_f = fator de modificação por efeitos variados.

Tais fatores são discriminados no anexo A.

Utilizando o critério de falha de Gerber para fadiga:

$$S_{ac} = \frac{r'^2 c \cdot S_{utC}^2}{2 \cdot S_{ec}} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot S_{ec}}{r' c \cdot S_{utC}} \right)^2} \right] \quad (28)$$

A inclinação de linha de carga é obtida por:

$$R'_{CI} = \frac{\sigma_{ac}}{\sigma_{mc}} \quad (29)$$

Considerando a apresentação de Budynas et al. (2011) para as coordenadas das curvas de linha crítica e a curva de Gerber é dada por:

$$S_{ac} = \frac{r'^2 c \cdot S_{utC}^2}{2 \cdot S_{ec}} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot S_{ec}}{r' c \cdot S_{utC}} \right)^2} \right] \quad (30)$$

Sendo:

$$S_{mc} = \frac{S_{aCI}}{r'_{CI}} \quad (31)$$

E o fator de projeto contra fadiga:

$$f_{pc} = \frac{S_{ac}}{\sigma'_{ac}} \quad (32)$$

2.4.4 Fator de projeto e segurança

Segundo Shigley (2008), ao avaliar um coeficiente de projeto, suas adequações implicam intimamente à definir um coeficiente de segurança do projeto completo, que também possuem a mesma definição numérica, diferenciando apenas em casos de arredondamento.

Shigley (2008) levanta questionamento ao qual um engenheiro é confrontado durante um projeto. Uma dessas questões identifica o trabalho em questão, que é definida por: O produto é feito em quantidade tão reduzida que nenhum ensaio de material é realizado.

Para Juvinall et al. (2008), o coeficiente de segurança costuma-se ser um julgamento do engenheiro com base em sua experiência, levando em conta grau de

incerteza em relação a resistência do material, carregamento, em relação a análise de falhas ,consequências de falha e custo devido a critério elevados.

Porém Juvinal et al. (2008), sugere recomendações baseadas em estudos de Joseph Vidosic para coeficientes de segurança em projetos de engenharia, que será utilizado como base para este projeto.

2.4.5 Engrenagem cilíndrica de dentes retos

Segundo Norton (2013), a função de uma engrenagem é ser capaz de conduzir torque e velocidade angular para demais aplicações.

Para Shigley (2008) as engrenagens cilíndricas de dentes retos, são utilizadas para transmissão de movimentos entre eixos paralelos, sendo também as mais simples.

Com o número de dentes, Z , o módulo M , é obtido o diâmetro primitivo da engrenagem, dado pela seguinte equação:

$$dp = M \cdot Z \quad (33)$$

Considerando que será necessário a quantidade de quatro engrenagens, sendo dois pinhões e duas coroas, ambos serão gêmeos, sendo assim apresentado apenas os iniciais e replicado ao restante.

O valor do módulo é obtido com a seguinte equação:

$$M = \frac{De}{Z+2} \quad (34)$$

Shigley demonstra através de suas relações que, para se calcular o passo da engrenagem usa a seguinte formula:

$$p = M \cdot \pi \quad (36)$$

Para a altura do dente, utiliza-se:

$$H = 2 \cdot M \quad (37)$$

2.4.6 Mancais de rolamento

Para Collins (2006), ao selecionar um mancal ideal para uma dada função, é necessário ter clara as decisões do projeto referente ao tipo de mancal, alocação, tamanho, maneira ao qual será montado e demais particularidades.

Segundo Antunes et al. (1998) e Melconian (2012), para efetuar a escolha ou seu dimensionamento, deve-se considerar o tipo de solicitação em que estará submetido, sendo ela estática ou dinâmica. Guardada as devidas variáveis de rotação, tempo, cargas aplicadas e dimensões, bastam aplicá-las nas equações correspondente a situação de trabalho e encontrar o mancal ideal no catálogo dos fabricantes.

Segundo catálogo SKF, a carga dinâmica de um rolamento pode ser definida por:

$$P = Fr + Y_1 Fa \quad (38)$$

Para o desenvolvimento da carga estática, utiliza-se:

$$P_0 = Fr + Y_0 Fa \quad (39)$$

Onde Fr é a carga radial e Fa a carga axial, Y_1 e Y_0 fatores de cálculos tabelados da marca.

2.4.7 Parafusos de potência

Para Collins (2006), parafusos de potência são elementos de máquinas capazes de converter o movimento rotativo em movimento de translação.

Norton (2013) acrescenta que estes possuem a capacidade de produzir grande vantagem mecânica, podendo ainda levantar e mover grandes cargas, sendo necessário uma rosca bem rígida.

Exemplos de aplicações comuns de parafuso de potência, pode ser encontrada em morsas, fusos para torno de precisão, macacos de rosca e grampos em C.

Segundo Collins (2006), é comumente utilizar roscas em parafusos de potência na forma de: rosca quadrada, rosca quadrada modificada, rosca *acme* e rosca *dente-de-serra*.

Collins (2006) diz que os parafusos de potência de rosca quadrada são os que apresentam melhores resistência, porém é difícil de ser fabricada. A rosca quadrada modificada, possui um ângulo filete de 5° que facilita a sua fabricação. Já a rosca *acme*, com ângulo de rosca de 29° possui facilidade de fabricação.

O parafuso de potência deve ser capaz de aguentar forças axiais de compressão, sem que ocorra a deformação dos filetes roscados. Assim, deve-se encontrar um diâmetro capaz de suportar toda a carga empregada sem que sofra alteração.

A partir das equações:

$$d_m = d - \frac{p}{2} \quad (40)$$

$$d_r = d - p \quad (41)$$

Sendo:

d_m = diâmetro maior;

d_r = diâmetro menor.

Para definir o torque requerido para girar o parafuso contra a carga, utilizou-se a seguinte equação:

$$T_r = \frac{F_s d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi f d_m - f l} \right) + \frac{F_s f d_c}{2} \quad (42)$$

Onde:

d_c = diâmetro médio do colar;

f = coeficiente de atrito.

Para encontrar a tensão nominal máxima de cisalhamento na torção do corpo do parafuso, utilizou-se:

$$\tau_F = \frac{16.T_r}{\pi.d_r^3} \quad (43)$$

Para determinar os critérios de deformações de rosca, Shigley (2008) discorre que a tensão axial σ presente no corpo do parafuso, proveniente de carga F_s , pode ser expressa como

$$\sigma_{zF} = \frac{F}{A} = \frac{4.F_s}{\pi.d_r^2} \quad (44)$$

Sendo F_s a força de separação dos cilindros, distribuído para dois fusos.

Shigley (2008) também aponta que as tensões nominais de rosca em parafuso de potência pode ser relacionada ao seguinte parâmetro:

$$\sigma_{bF} = \frac{-2(0,38F)}{\pi.dm.nt.p} \quad (45)$$

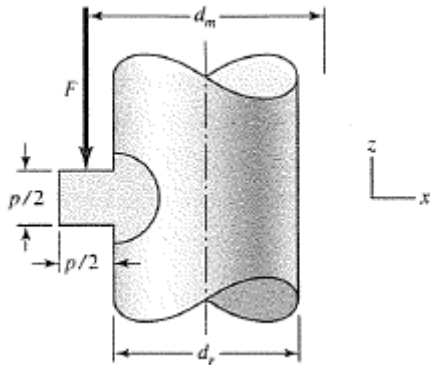
Onde nt é o número de roscas envolvidas, dm o diâmetro maior.

Por conseguinte, a tensão de flexão da raiz do dente é obtida por:

$$\sigma_{cF} = \frac{6(0,38F_s)}{\pi.dr.nt.p} \quad (46)$$

Para obter a tensão de von Mises σ'_F no topo do plano da raiz, como indicado por Shigley (2005), encontra-se a partir da identificação das tensões ortogonais, a partir do sistema de coordenadas abaixo.

Figura 15 - Representação de filete da rosca do parafuso de potência



Fonte: Shigley (2005)

Logo:

$$\sigma'_F = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \}^{1/2} \quad (47)$$

Assim, pode-se identificar a maior tensão sobre os filetes de rosca do fuso e desta forma, descobrir a dimensão mínima do parafuso de potência e o respectivo material.

2.4.8 Parafusos de fixação

Para realizar a fixação da superfície superior do suporte, foi dimensionado 10 parafusos, que serão divididos distribuídos entre as duas colunas de sustentação presente na gaiola. Dessa forma, cada parafuso de fixação suportará uma força F_g , expressa na seguinte equação:

$$F_g = \frac{F_s}{10} \quad (48)$$

Segundo Budynas et al. (2011), além da força de separação distribuída entre os dez fixadores, também deve-se determinar a porção de carga F_p absorvida pelo parafuso e a porção F_m absorvida pelos membros. Logo:

$$F_p = F_g \cdot C \quad (49)$$

$$F_m = (1 - C) \cdot F_g \quad (50)$$

Sendo C a constante de rigidez da junção, sendo determinada por:

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m} \quad (51)$$

Sendo que K_b é a constante de rigidez do parafuso, que é determinada por:

$$K_b = \frac{A_d \cdot A_t \cdot E}{A_d \cdot l_t + A_t \cdot l_d} \quad (52)$$

E K_m , que é a constante de rigidez dos mebrs, sendo determinada por:

$$K_m = \frac{0,5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{2 \ln \left(5 \cdot \frac{0,5774 \cdot l + 0,5 \cdot d}{0,5774 l + 2,5 \cdot d} \right)} \quad (53)$$

Onde:

A_d = área de maior diâmetro do parafuso;

A_t = área de tensão de tração;

E = módulo de elasticidade do material;

l_t = comprimento roscado;

l_d = comprimento não roscado;

l = comprimento do parafuso;

d = diâmetro nominal do parafuso.

Além da força F_p que o parafuso irá suporta, também haverá uma pré-carga inicial, F_i , de aperto do parafuso, que é determinada por:

$$F_i = 0,75 \cdot A_t \cdot S_p \quad (54)$$

Onde S_p é a tensão a prova do parafuso. Podendo então ser obtido a força de tração sob o parafuso, com a seguinte equação:

$$F_{pt} = F_i + F_p \quad (55)$$

Logo, pode-se determinar a tensão de tração em cada parafuso:

$$\sigma_p = \frac{F_i + F_p}{A_t} \quad (56)$$

Dessa forma, a tensão alternada sobre o parafuso é dada por:

$$\sigma_{pa} = \frac{F_{pt} + F_i}{2A_t} \quad (57)$$

Considerando o critério de Gerber para análise de falha por fadiga, expressa-se a equação:

$$S_{pa} = \frac{1}{2.S_e} [S_{ut} \sqrt{S_{ut}^2 + 4.S_e.(S_e + \sigma_i)} - S_{ut}^2 - 2.\sigma_i.S_e] \quad (58)$$

Tendo o fator de projeto expresso por:

$$f_{pg} = \frac{S_{pa}}{\sigma_{pa}} \quad (59)$$

2.4.9 Chaveta

Segundo Shigley (2005) as chavetas tem por objetivo segurar elementos rotantes, tal como engrenagem. São utilizadas para transmitir torque de um eixo para o elemento suportado, se localizando interposta numa cavidade entre o eixo e a peça. Para dimensionar a chaveta, se fez necessário o dimensionamento por cisalhamento, com a equação a seguir:

$$L_{ch} = \frac{2.M_t}{d.b} \cdot \frac{f_p}{S_{sy}} = \frac{2.M_t}{d.b} \cdot \frac{f_p}{0,577.S_y} \quad (60)$$

E por esmagamento:

$$L_{ch\ esm} = \frac{2.M_t}{d.t_1} \cdot \frac{f_p}{S_y} \quad (61)$$

No qual a base b e a altura h são tabeladas. A profundidade do rasgo é referenciado por t_1 e t_2 é a profundidade do rasgo no interior do cubo.

O valor de d é adquirido com o diâmetro do eixo, f_p é o fator de projeto estabelecido, M_t é o torque sobre a árvore. Já S_y é a tensão de escoamento a tração e S_{sy} é a tensão de escoamento por cisalhamento.

2.5 ESTRUTURA DO LAMINADOR

Shigley (2005), enfatiza que é muito difícil se obter os mesmo resultados de resistência de fadiga de uma viga testada em laboratório com ambiente controlado, do que em uma situação de real atividade. Dessa maneira, recomenda-se utilizar a equação de Marin, onde quantifica-se os efeitos de condições de superfície, tamanho, carregamento, temperatura e outros itens. Com a equação (27) já citada:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

Onde:

S_e = Limite de resistência no local crítico de uma peça de máquina;

S'_e = Limite de resistência de espécime de teste do tipo de viga;

k_a = fator de modificação de condição de superfície;

k_b = fator de modificação de tamanho;

k_c = fator de modificação de carga;

k_d = fator de modificação de temperatura;

k_e = fator de confiabilidade;

k_f = fator de modificação por efeitos variados.

Sendo que o limite de resistência a fadiga é dado pela equação (26):

$$S'_e = 0,504 \cdot S_{ut} C \quad (26)$$

A inclinação de linha de carga é obtida por:

$$R'_{CI} = \frac{\sigma_{ac}}{\sigma_{mc}} \quad (29)$$

Considerando a apresentação de Budynas et al. (2016) para as coordenadas das curvas de linha crítica e a curva de Gerber é dada por:

$$S_{ac} = \frac{r'^2 c \cdot S^2_{utC}}{2 \cdot S_{ec}} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot S_{ec}}{r'_c \cdot S_{utC}} \right)^2} \right] \quad (28)$$

Sendo:

$$S_{mc} = \frac{S_{aCl}}{r'_{Cl}} \quad (31)$$

E o fator de projeto contra fadiga:

$$f_{pc} = \frac{S_{ac}}{\sigma'_{ac}} \quad (32)$$

3 RESULTADOS

3.1 CONDIÇÕES INICIAIS DE PROJETO

Para dar início ao projeto, se fez necessário determinar dimensões de corpos de prova baseado no que é trabalhado em laboratório para então determinar tamanho de cilindro, redução de laminação, rotação, velocidade e demais variáveis.

Sendo assim a tabela 1 trará os dados que nortearam o projeto em questão:

Tabela 1 - Dados iniciais do laminador

Descrição	Valor	Notação	Unidade
Espessura inicial da chapa	20	ho	mm
Largura da chapa	100	w	mm
Redução por passagem	10	r	%
Diâmetro do cilindro	190	d	mm
Rotação do cilindro	20	n	rpm
Velocidade angular do cilindro	2,09	ω	Rad/s

Fonte: Autoria própria

Foram escolhidos os materiais dos corpos de prova, tendo como referência o que foi dito por Viana (2009), professor da UFF (Universidade Federal Fluminense), que demonstra em um gráfico, as ligas de alumínio indicadas para fundição. Visto que os corpos de prova serão proveniente de processos de fundição realizados no laboratório da UTFPR Campus Ponta Grossa.

Segundo Oliveira (2012), em sua dissertação de mestrado, apresenta dados que indicam que as ligas de alumínio contendo silício (Al-Si), correspondem de 85% à 90% de todas as ligas de alumínio para fundição. Ou seja, as pertencentes a classes 3xxx e 4xxx.

Desse modo, foi escolhido ligas pertencentes as outras classes, para seguir como referência de construção do projeto.

Tabela 2 – Amostra de ligas de alumínio para laminação

Material	Constante Plástica de Resistência (K)	Coefficiente de Encruamento (n)
Alumínio 1100-o	180	0,20
Alumínio 2024-t4	690	0,16
Alumínio 5052-o	210	0,13
Alumínio 6061-o	205	0,20
Alumínio 7075-o	400	0,17

Fonte: Autoria própria

Com base em Rodrigues e Martins (2010), a equação de Hollomon, que é utilizada para modelar formato de curva tensão-deformação no regime plástico, aparece como uma ótima opção, pois é função da deformação real ϵ , como também da constante plástica de resistência, K, e do coeficiente de encruamento, n. Com a equação da tensão média efetiva, σ , é permitido gerar os dados dos materiais a serem utilizado no processo de laminação.

Tabela 3 - Característica das ligas de alumínio

Material	Tensão Média Efetiva (MPa)
Alumínio 1100-O	95,63
Alumínio 2024-T4	414,93
Alumínio 5052-O	138,69
Alumínio 6061-O	108,90
Alumínio 7075-O	233,17

Fonte: Autoria própria

Com os dados em mãos, o material 2024-T4 demonstrou possuir maior resistência ao processo laminação, que então, torna-se como referência de base para os cálculos de determinação de potência de laminação, visto que os demais, apresentam menor resistência.

3.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO

De acordo com as equações citadas no item 2.3, elaborou-se a tabela 4, com as principais informações que o laminador deve apresentar.

Tabela 4 - Determinação de potência e momento de laminação

Descrição	Notação	Unidade	Valor
Espessura Final	h_1	mm	18
Arco de contato	ld	mm	13,22
Deformação Real	ϵ	-	0,10
Espessura média de Laminação	Δh	mm	19
Relação	$\Delta h / ld$	-	1,5
Coefficiente de Correção	Q_{fs}	-	1,1
Força de separação dos cilindros	F_s	kN	576,91
Momento de Laminação	M	kN.m	7,292
Potência de Laminação	P	kW	15,240
Condição de agarre	F_x	kN	407,19
Coefficiente de atrito	μ	-	0,707
Ângulo de contato	α	°	19,46

Fonte: Autoria própria

3.3 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE MÁQUINAS

3.3.1 Engrenagens

De acordo com as equações de dimensionamento de engrenagem na seção 2.4.5, fora compilado os dados a seguir na tabela 5:

Tabela 5 - Dados de engrenagem

Descrição	Notação	Unidade	Valor
Módulo	M	mm	6
Nº de dentes (Pinhão)	Z_p	dentes	25
Nº de dentes (Coroa)	Z_c	dentes	29
Rotação (Pinhão)	N_p	rpm	24,21
Rotação (Coroa)	N_c	rpm	20
Diâmetro primitivo (Pinhão)	D_p	mm	150
Diâmetro primitivo (Coroa)	D_c	mm	174

Fonte: Autoria própria

3.3.2 Rolamentos

Com o valor da Força de Separação, verificou-se que o rolamento SKF 22217 EK + AHX 317 atende as necessidades do estudo em questão, onde o valor da força de separação é dividida entre os 2 rolamentos gerando um valor de carga atuante de $F = 288,45$ kN a uma rotação de 20 RPM, no qual é suportada pelos rolamentos.

Tabela 6 - Dados do rolamento

Descrição	Notação	Unidade	Valor
Comprimento do rolamento	b	mm	36
Rotação do cilindro	n	rpm	4000
Carga suportada por rolamento	Pm	kN	291
Diâmetro inferior	d1	mm	80
Diâmetro exterior	d2	mm	150

Fonte: Autoria própria

3.3.3 Determinação dos parafusos de potência

Os dados referente ao fuso segue na tabela 7, desenvolvido com as equações da seção 2.4.7, onde foi definido que o material do parafuso de potência deverá ser constituído de aço SAE 4340 que possui tensão de resistência ao escoamento de 860MPa, atendendo ao fator de projeto de 1,5.

Tabela 7 - Dados do parafuso de potência (Continua)

Descrição	Notação	Unidade	Valor
Diâmetro maior da rosca	d_m	mm	45
Diâmetro menor	d_r	mm	40
Diâmetro	d	mm	50
Diâmetro do colar	d_c	mm	60
Passo	p	mm	10
Coefficiente de atrito	f	-	0,08

Tabela 7 - Dados do parafuso de potência (Conclusão)

Número de filetes	nt	-	10
Torque requerido	T_r	kN.m	20
Tensão de cisalhamento	τ_F	MPa	175
Força por fuso	F_F	kN	288,45
Tensão axial	σ_{zF}	MPa	-229,54
Tensão de flexão na raiz da rosca	σ_{cF}	MPa	523,30
Tensão de sustentação	σ_{bF}	MPa	-138,27
Tensão de Von Misses	σ'_F	MPa	532,4
Fator de projeto	f_p	-	1,5

Fonte: Autoria própria

3.3.4 Parafusos de fixação

É possível determinar a capacidade do parafuso para a função de fixação da tampa do laminador de acordo com as equações apresentadas na seção 2.4.8, como segue expresso na tabela 8. O parafuso a ser utilizado é de acordo aos dados sugerido por Shigley (2008) para parafusos em aço médio carbono temperado revenido.

Tabela 8 - Parafusos de fixação (Continua)

Descrição	Notação	Unidade	Valor
Força de separação	F_s	kN	576,91
Carga no parafuso	F_g	kN	57,69
Área de tensão de tração	A_t	m^2	$2,45E^{-4}$
Constante de rigidez da junção	C	-	0,22
Constante de rigidez do parafuso	K_b	MN/m	1,2
Constante de rigidez dos membros	K_m	MN/m	4,1
Porção de F_g absorvida pelo parafuso	F_p	kN	12,69

**Tabela 8 - Parafusos de fixação
(Conclusão)**

Porção de F_g absorvida pelos membros	F_m	kN	44,99
Pré-carga	F_i	kN	110,25
Força absorvida pelo parafuso	F_{pt}	kN	122,94
Tensão a prova do parafuso	S_p	MPa	600
Tensão de tração no parafuso	σ_p	MPa	501
Tensão alternada	σ_{pa}	MPa	25,89
Resistência alternada	S_{pa}	MPa	243,65
Fator de projeto	f_{pg}	-	9,41

Fonte: Autoria própria

3.3.5 Dimensionamento do cilindro de laminação

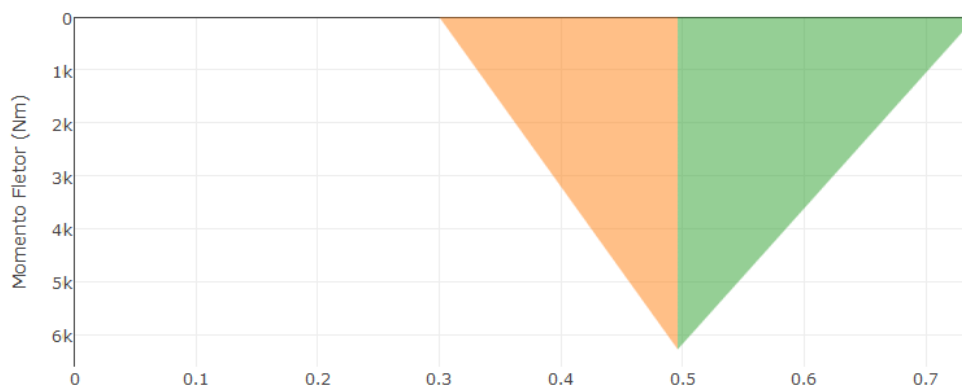
O dimensionamento do cilindro, foi baseado nas dimensões dos corpos de prova que serão utilizados no laminador. A única diferença entre os dois cilindros, se dá pelo prolongamento do cilindro inferior. Extensão esta que será utilizada para o acoplamento da engrenagem de transmissão de movimento de motor para eixo.

Sabendo que a potência do motor deverá ser de no mínimo 21cv, é gerado no cilindro inferior uma potência de 15,240 kW com uma rotação de 20 rpm.

O material do cilindro, deverá ter a capacidade de superar uma força de separação F_s de 576,91 kN.

A força obtida para o cálculo é proveniente da equação (6) referente a força de separação.

Desse modo, com as equações presentes nas seções 2.4.1 E 2.4.2, referente a momento fletor e tursor respectivamente, obtemos os dados dispostos na tabela 10. O gráfico 1 demonstra o momento fletor do cilindro inferior com relação a força de separação gerada pelo corpo de prova.

Gráfico 3 - Momento fletor

Fonte: Autoria própria

Com base nos cálculos, foi possível determinar o material sendo em Aço VC10 composto por 5% de Cromo sendo capaz de resistir as dimensões pré determinadas do cilindro, sendo o diâmetro menor de 80mm e o diâmetro maior de 190mm. Os dados das especificações técnicas do material do cilindro de laminação está presente no Anexo C.

Os demais dados referente ao dimensionamento do cilindro, seguem na tabela 9.

Tabela 9 - Dados do cilindro de laminação (Continua)

Descrição	Notação	Unidade	Valor
Tensão de escoamento	S_{ycl}	MPa	900
Tensão de ruptura	S_{utC}	MPa	1000
Momento fletor	M_{fcl}	N.m	6179
Momento torçor	M_{tcl}	N.m	7292
Fator de concentração de tensão por flexão	K_{fcl}	-	1,5
Fator de concentração de tensão por torção	K_{fsc}	-	1,3
Sensibilidade ao entalhe por flexão	q_{cl}	-	0,9
Sensibilidade ao entalhe por torção	q_{cls}	-	0,9
Tensão alternada	σ_{ac}	MPa	243
Tensão média	σ_{mc}	MPa	97,215
Fator de concentração de fadiga por flexão	K_f	-	1,45
Fator de concentração de fadiga por torção	K_{fs}	-	1,3

Tabela 9 - Dados do cilindro de laminação (Conclusão)

Limite de resistência a fadiga de viga	S'_e	MPa	504
Limite de resistência	S_e	MPa	250
Inclinação de linha de carga	r'_c	-	2,5
Resistência alternada	S_{ac}	MPa	245,15
Resistência média	S_{mc}	MPa	98,13
Fator de projeto de fadiga	F_{pc}	-	1

Fonte: Autoria própria

O fator de projeto ficou dentro do limite aceitável, sendo capaz de suportar o trabalho de laminação.

Segundo a Gerdau, que forneceu os dados do material, o tempo de vida de um cilindro de laminação pode ser dado pela sua “distância percorrida”. O usado nesse projeto, encontra-se num grupo intermediário.

3.3.6 Chavetas

O valores obtidos para a elaboração das chavetas de acordo com os cálculos, e um fator de segurança igual a 2, foram de 47mm par ao eixo 1 e de 41mm para o eixo 2, porém para facilitar sua elaboração, foram arredondados para os valores que seguem na tabela 10.

Tabela 10 - Dados das chavetas

Descrição	Base (mm)	Altura (mm)	Comprimento de chaveta (mm)
Eixo árvore 1	22	14	50mm

Fonte: Autoria própria

3.4 SELEÇÃO DE MATERIAL DA ESTRUTURA DA GAIOLA

A estrutura terá que suportar os esforços de tração que serão gerados pela força de separação F_s . O projeto apresenta duas colunas, que poderá receber a F_s distribuída entre as mesmas.

Dessa forma, as duas áreas resistentes por coluna, pode ser obtida por:

$$\sigma_{ac} = \sigma_{mc} = \frac{F_m}{A_{tc}} \quad (62)$$

Onde F_a representa a força alternada e F_m a força média.

Logo, utilizando as fórmulas descritas na seção 2.5 para seleção de material, obteve-se os seguintes dados:

Tabela 11 - Dados da estrutura da gaiola

Descrição	Notação	Unidade	Valor
Força de separação	F_s	kN	576,91
Força média por coluna	F_{mc}	kN	288,45
Força alternada por coluna	F_{ac}	kN	288,45
Tensão média por coluna	σ_{mc}	MPa	7,21
Tensão alternada por coluna	σ_{ac}	MPa	7,21
Limite de resistência a fadiga de viga	S'_e	MPa	211,68
Limite de resistência	S_e	MPa	135,44
Área total de resistência	A_{tc}	m^2	$40 \cdot 10^{-3}$
Inclinação de linha de carga	r'_c	-	1
Resistência alternada	S_{ac}	MPa	91,9
Resistência média	S_{mc}	MPa	91,9
Fator de projeto de fadiga	F_{pc}	-	12,74

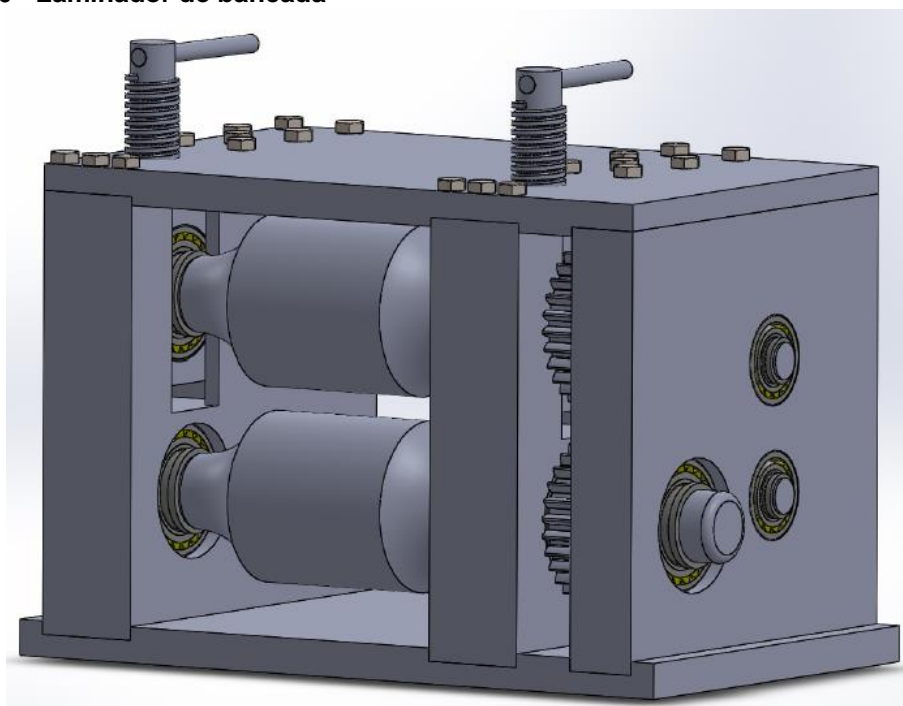
Fonte: Autoria própria

Desta forma, uma estrutura de gaiola em aço SAE1020, com tensão de escoamento de 210 MPa e ruptura de 380 MPa, nas dimensões calculadas, suporta as necessidades do projeto perfeitamente.

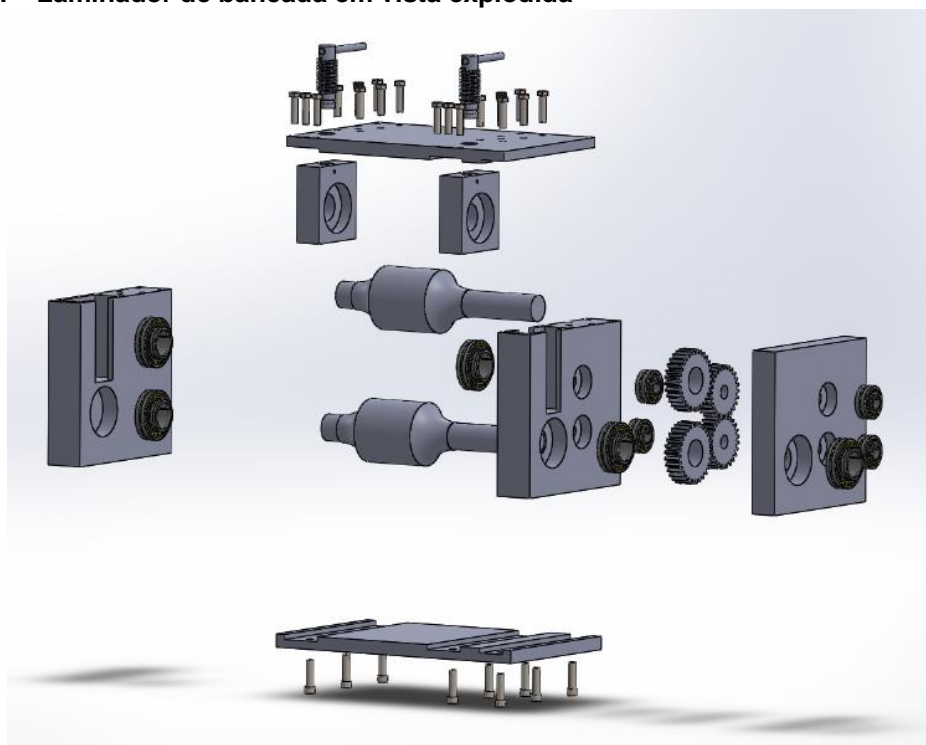
4 RESULTADOS

Conforme os dados apresentados no item 3, foi elaborado o escopo do laminador de forma que suas dimensões atendessem os requisitos do projeto. Abaixo, seguem duas ilustrações que demonstram o laminador em sua forma final e em vista explodida, respectivamente.

Figura 16 - Laminador de bancada



Fonte: Autoria própria

Figura 17 - Laminador de bancada em vista explodida

Fonte: Autoria própria

Os cilindros de laminação, cujo material é o VC10 com 5% de cromo, possuem uma largura de superfície de trabalho na casa de 200mm, chegando a uma abertura de trabalho de 30mm, permitindo assim a utilização de corpos de prova maiores do que o especificado, determinado em 20mm de espessura. Com esta abertura, as engrenagens, que possuem módulo de número 6, continuam com engrenamento suficiente para a transmissão de movimento durante o processo. A movimentação de abertura desses cilindros, é realizado por dois parafusos de potência, ao qual resistem a força de separação de 576,91 kN. Esses parafusos de potência possuem um diâmetro de 50mm com 10mm de passo.

Os mancais SKF, apresentam capacidade superior de resistência a força de separação gerado durante o processo de laminação do corpo de prova.

O detalhamento dos componentes pode ser consultado no apêndice A.

6. CONCLUSÃO

Ao iniciar o dimensionamento de um laminador, deve ser considerado fatores tais como o método de fabricação de seus componentes, materiais a serem utilizados, previsão de esforços durante o funcionamento e erros de utilização do equipamento de maneira que o mesmo seja dimensionado da maneira mais segura possível.

O ponto de partida para o início do dimensionamento do laminador foi a determinação das dimensões dos corpos de prova e sua composição. Considerando que no laboratório da universidade se funde corpos de prova em alumínio, foi considerado como foco do laminador a capacidade de trabalhar com a maior quantidade de ligas de alumínio, desde as mais moles até as mais duras. Desse modo, os esforços de laminação foram dimensionados a partir dos dados da liga de alumínio mais resistente encontrada, com dimensão estabelecida em 20mm de espessura e 100mm de largura.

As dificuldades começaram durante o início do dimensionamento dos elementos de máquinas, pois o valor teórico de força de separação gerada pela liga de alumínio escolhida, 2024-T4, se demonstrou muito elevada. Dessa forma, encontrar materiais com boas propriedades de trabalho de fabricação mecânica começaram a se tornar dispendiosas.

Nas considerações de estabelecimento de fatores de projeto, no qual tem como objetivo prever possíveis erros e falhas do projeto, houve grande dificuldade para que todos os componentes estivessem dentro de uma margem de segurança, pois o material do corpo de prova demonstrava disposto a superar todos os limites impostos pelo projeto. Desse modo, a robustez do laminador só aumentou para que enfim fosse capaz de suprir todas as necessidades.

Com o estabelecimento do material do cilindro de laminação não foi diferente, as dificuldades se demonstraram presentes novamente. Utilizar materiais já existentes na universidade se demonstrou complexo, fato este demonstrado no trabalho, no qual nem mesmo a liga de aço sugestionada, com 5% de cromo obteve um fator de projeto elevado.

A idealização do laminador se fez por fim nos desenhos, no qual demonstra como pode ser a concepção do projeto. O desenvolvimento dos desenhos foi de grande utilidade pois com eles sempre foi possível enxergar as dificuldades dos processos de fabricação que poderiam ser enfrentados devido a geometria do projeto.

Assim, todo o projeto foi concebido de forma que o mesmo permita um método mais fácil de fabricação.

Desse modo, considera-se que o método adotado para a realização deste trabalho mostrou-se adequado para se atingir os objetivos propostos.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, Izildo; FREIRE, Marcos A. C.. **Elementos de máquinas**. São Paulo: Érica, 1998. 296p.

BRESCIANI FILHO, E; et al. **Conformação plástica dos metais**. 4. ed. Campinas, SP: UNICAMP- Universidade Estadual de Campinas, c1991. 385p. (Série manuais) ISBN 8526801880 (broch.)

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2011. 1084 p. ISBN 9788563308207.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. Ed. São Paulo, SP: ABM, 1996. 599 p. ISBN 8586778486.

CILINDROS DE TRABALHO PARA LAMINAÇÃO DE TIRAS A FRIO. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/gerdausummit/pt/produtos/cilindros-de-trabalho-para-laminacao-de-tiras-a-frio#ad-image-0>>. Acesso em: 11 nov.2017.

COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de elementos de máquinas: uma perspectiva de prevenção da falha**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2006. 740 p. ISBN 8521614756.

DIETER, George Ellwood. **Mechanical metallurgy**. SI Metric Edition. London, GB: McGraw-Hill, 1988. xxi, 751 p. (Materials science and engineering). ISBN 0071004068.

GOMES FERREIRA, M. G. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 4th ed. New York: J. Wiley, c2010. xii, 1012 p. ISBN 9780470467008.

HELMAN, H; CETLIN, P. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005. 260 p. ISBN 8588098288.

JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. 500 p. ISBN 9788521615781

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de máquinas**. 10. ed. São Paulo, SP: Érica, 2012. 376 p. ISBN 9788571947030.

MORO, Norberto. **Processos de fabricação: Conformação mecânica I – generalidades, laminação e forjamento**. 2007. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.

NIEMANN, Gustav. **Elementos de máquinas**. São Paulo: E. Blücher, 1971. 3 v. ISBN 9788521200338 (v.1).

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013. xxx, 1028 p. + 1 CD-ROM ISBN 9788582600221

PAHL, G. **Projeto na engenharia: Fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. São Paulo: E. Blücher, 2005. 412 p. ISBN 8521203632.

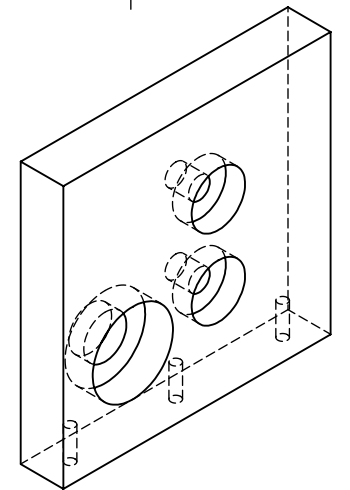
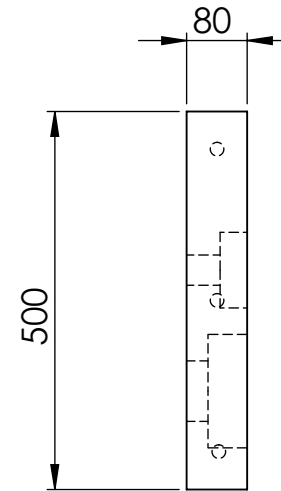
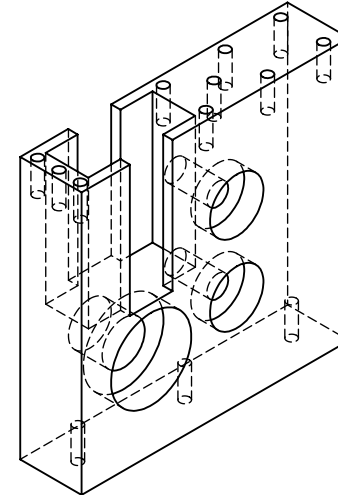
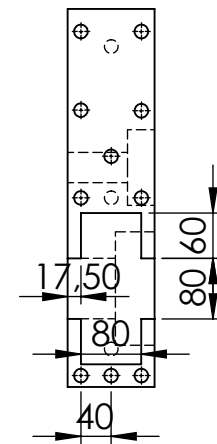
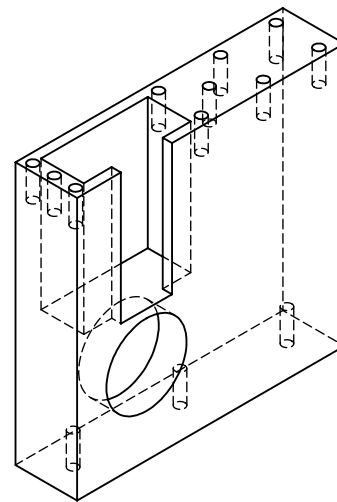
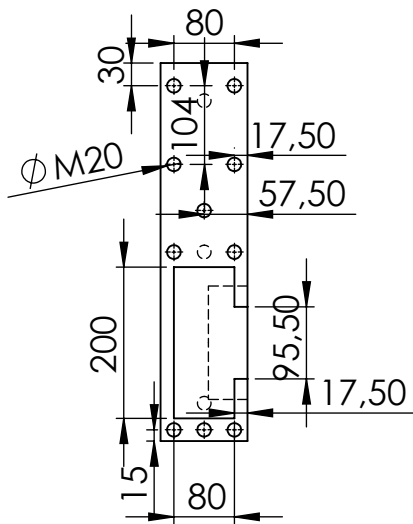
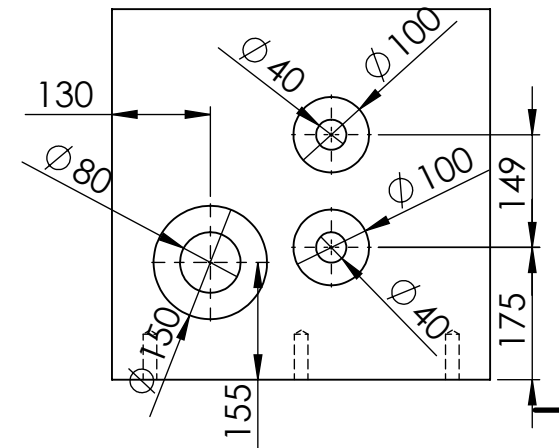
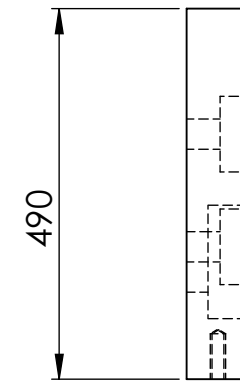
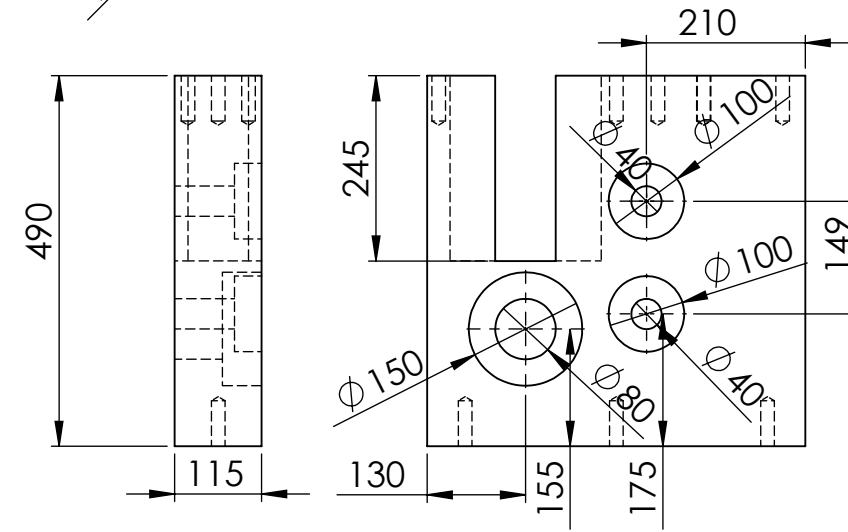
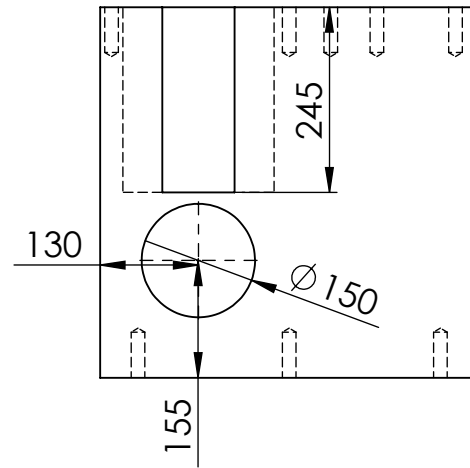
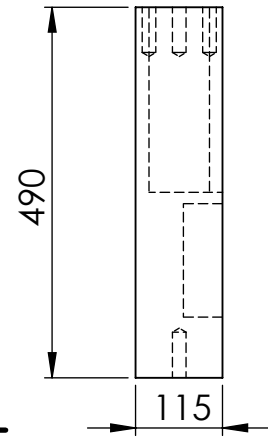
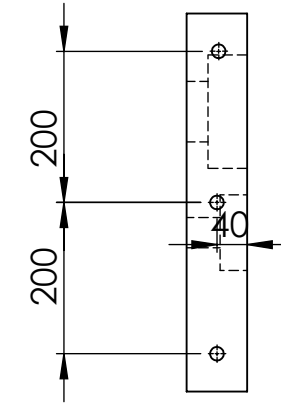
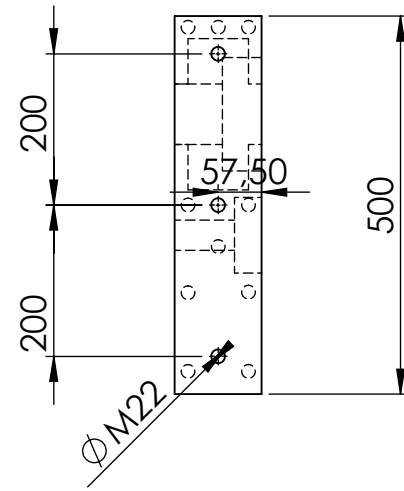
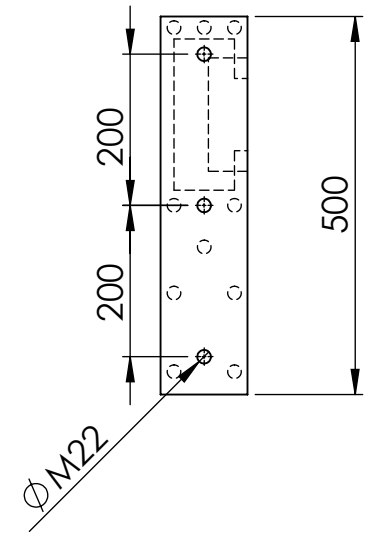
RODRIGUES, Jorge et al. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica**. 2. ed. Lisboa: Escolar Editora, 2010. 743p.

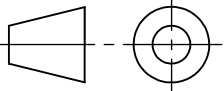
SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 193 p. ISBN 8598236802

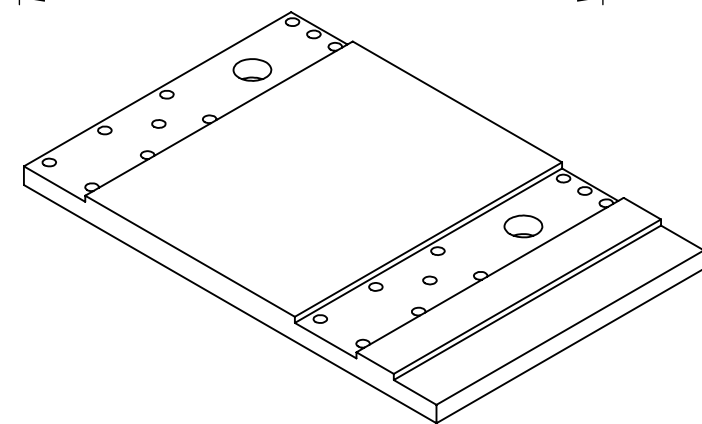
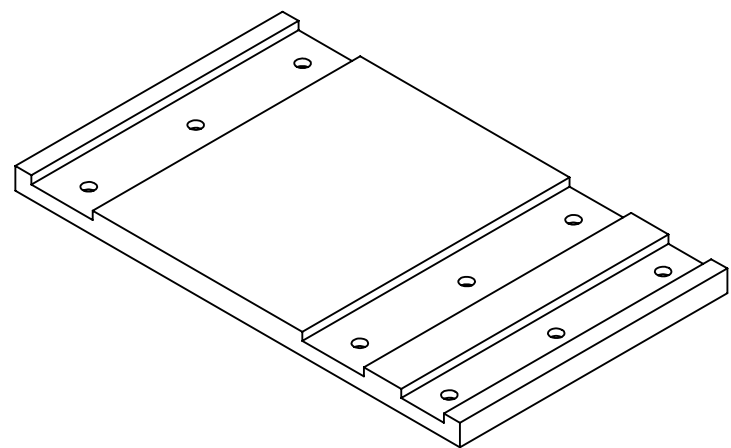
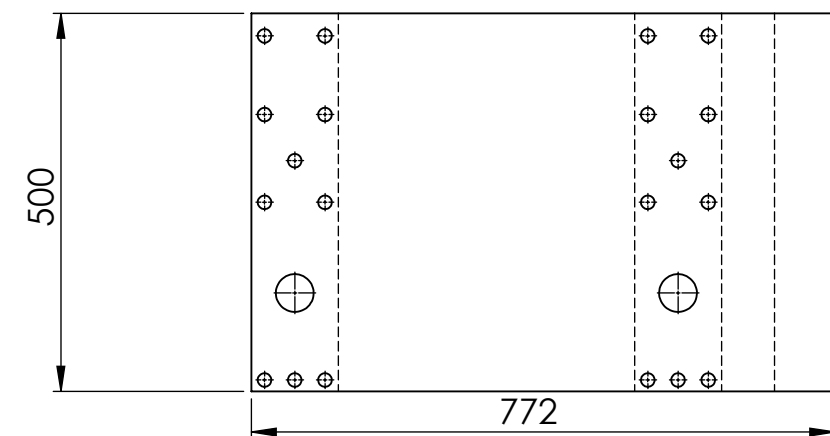
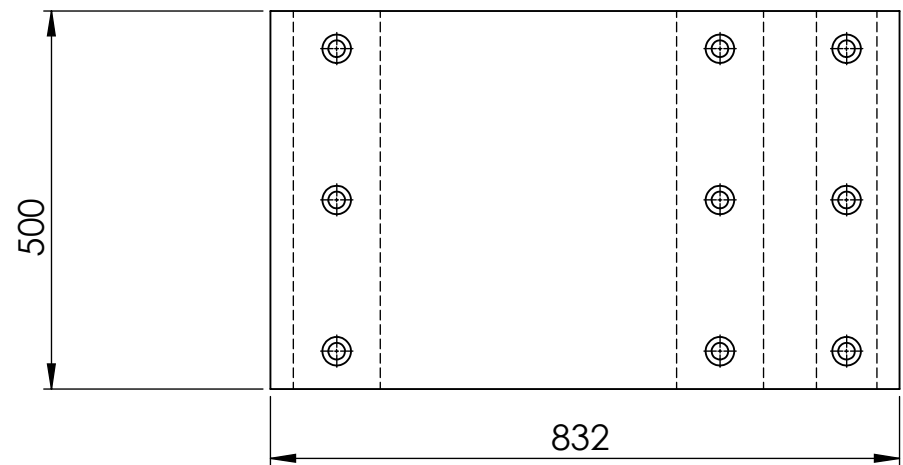
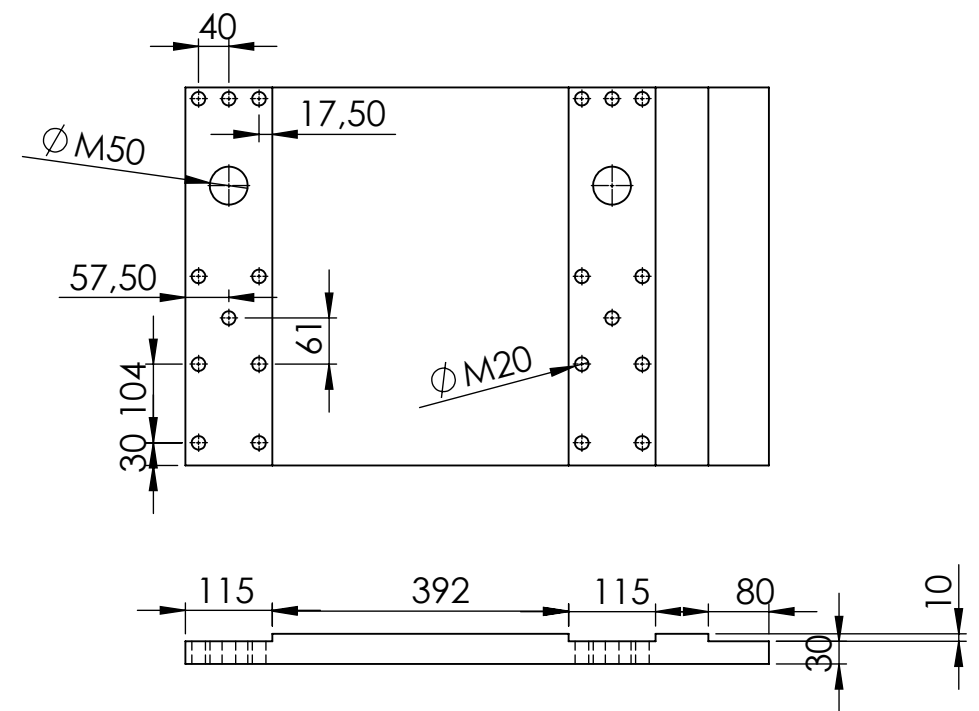
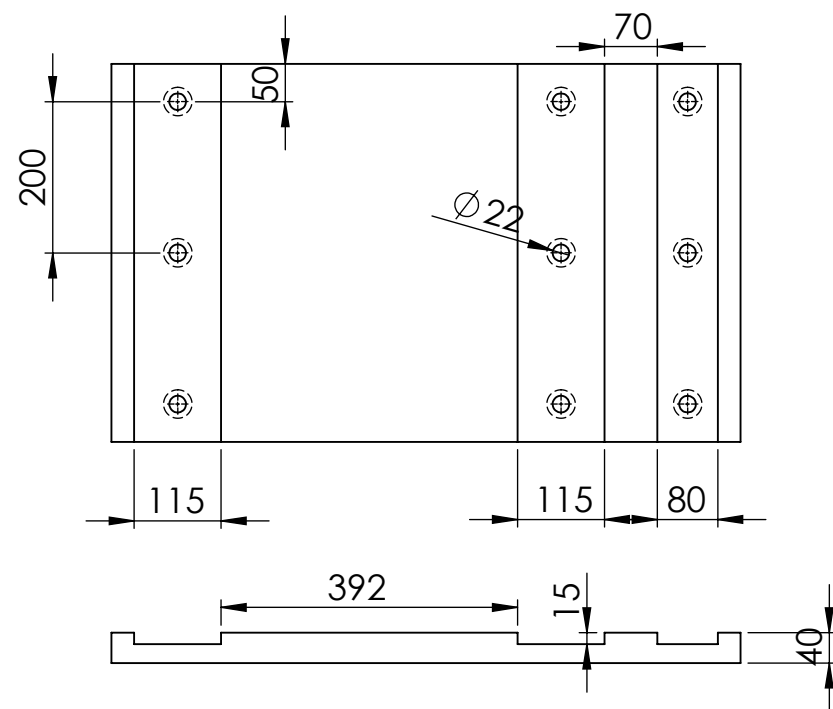
SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. 167 p. ISBN 8586647136

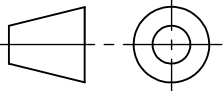
SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p. ISBN 85-363-0562-2.

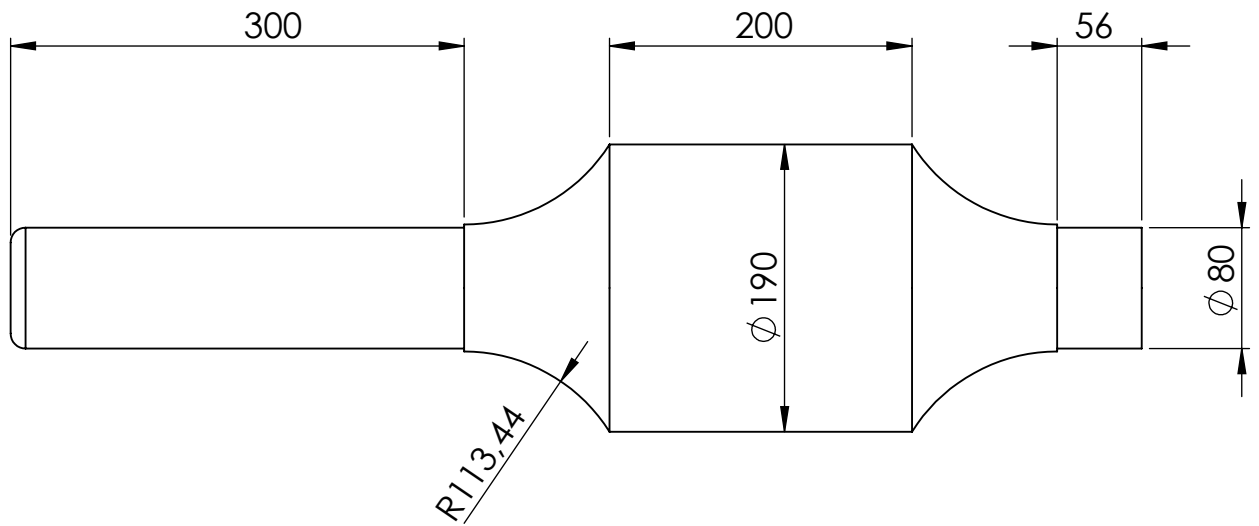
APÊNDICE A - Desenhos dos principais componentes do laminador



	Nome	Assinatura	Data	<h1 style="text-align: center;">UTFPR</h1> <p style="text-align: center;">Campus Ponta Grossa</p>			
Des.	Vigas da gaiola		09/12/2017			Título: Vigas da gaiola em detalhes N° de série:	
Revis.							
Aprov.							
Manuf.							
Qual.							
 Desenho n°: 1		Projeto n°: _____					
Data: 13/12/2017		Escala: 1:10		Revisão: _____			
				Folha: A3			
				Pág. 1 de 1			



	Nome	Assinatura	Data	<p style="text-align: center;">UTFPR Campus Ponta Grossa</p> <p>Título: Base inferior e tampa em detalhes</p> <p>Nº de série:</p>	
Des.	Base inf. e tampa		09/12/2017		
Revis.					
Aprov.					
Manuf.					
Qual.					
		Desenho nº:	Projeto nº:		
		2			
Data: 13/12/2017	Escala: 1:10	Revisão:	Folha: A3	Pág. 1 de 1	

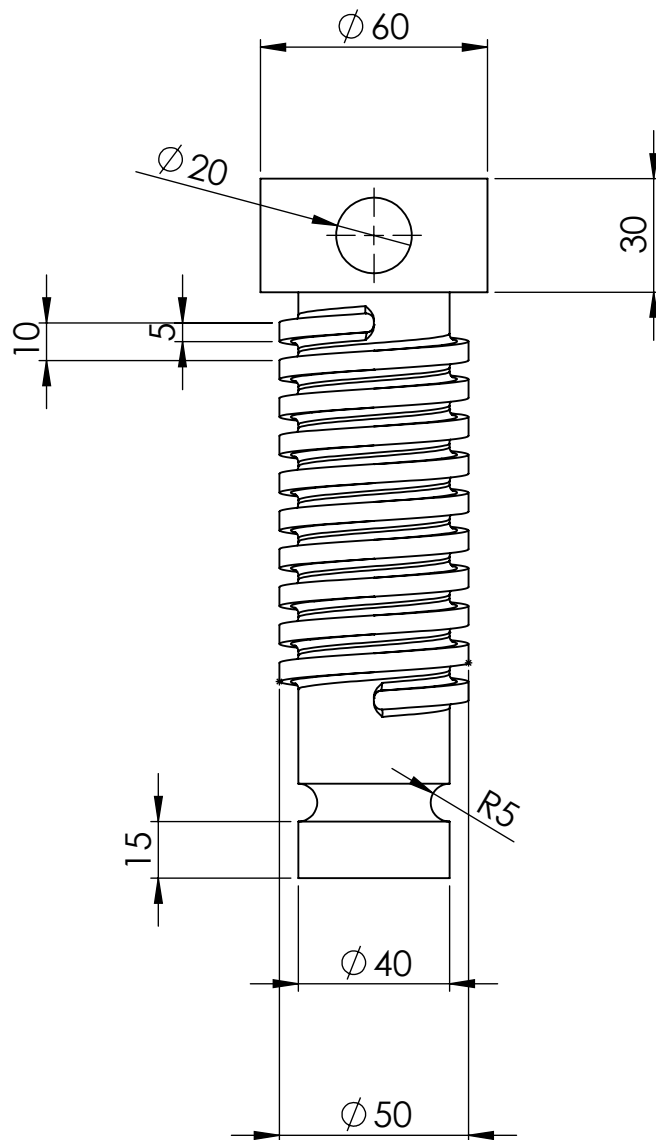


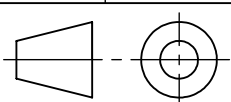
	Nome	Assinatura	Data
Des.	Cilindro		09/12/2017
Revis.			
Aprov.			
Manuf.			
Qual.			

UTFPR
Campus Ponta Grossa

Título:
Cilindro de laminação

	Desenho n°: 3	Projeto n°:
--	-------------------------	-------------



	Nome	Assinatura	Data	<p style="text-align: center;">UTFPR Campus Ponta Grossa</p> <p>Título: Parafuso de potência em detalhes</p>	
Des.	Parafuso de potência		09/12/2017		
Revis.					
Aprov.					
Manuf.					
Qual.					
		Desenho nº: 4	Projeto nº:		
Data: 09/12/2017		Escala: 1:5	Revisão:	Folha: A4	Pág. 1 de 1

ANEXO A - Fatores modificadores do limite de resistência a fadiga

Figura 18 - Fator de superfície Ka

Acabamento superficial	Fator a S_{utr} MPa	Expoente b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Fonte: Budynas et al (2011).

Figura 19 - Fator de tamanho Kb

$$k_b = \begin{cases} (d/7,62)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51d^{-0,157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Para carregamento axial não há efeito de tamanho, assim

$$k_b = 1$$

Fonte: Budynas et al (2011).

Figura 20 - Fator de carregamento K_c

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexão} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torção} \end{cases}$$

Fonte: Budynas et al (2011).

Figura 21 - Fator de temperatura K_d

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549

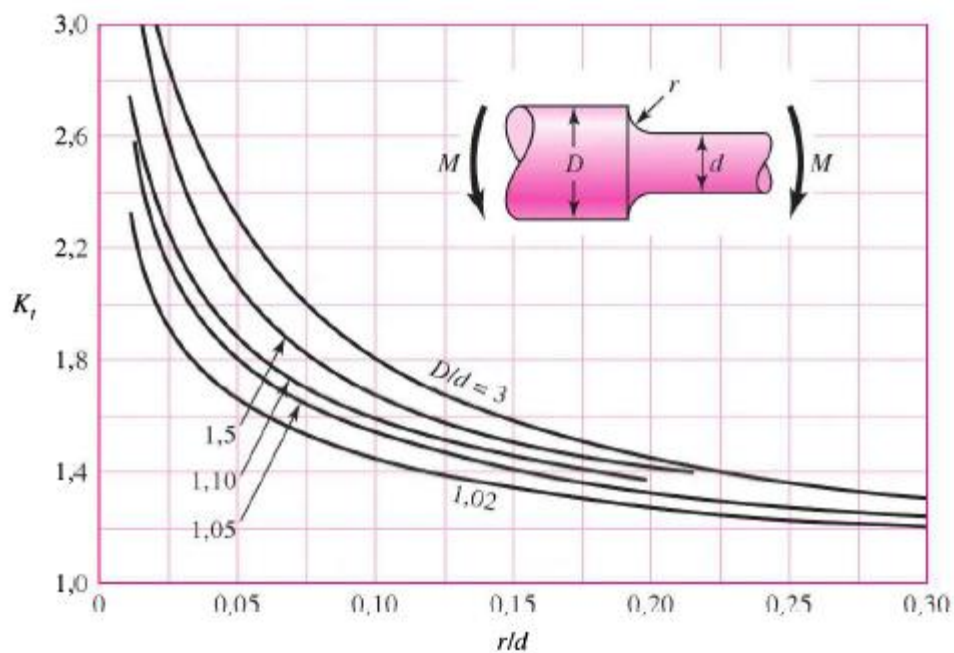
Fonte: Budynas et al (2011).

Figura 22 - Fator de confiabilidade K_e

Confiabilidade, %	Variante de transformação z_a	Fator de confiabilidade k_e
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

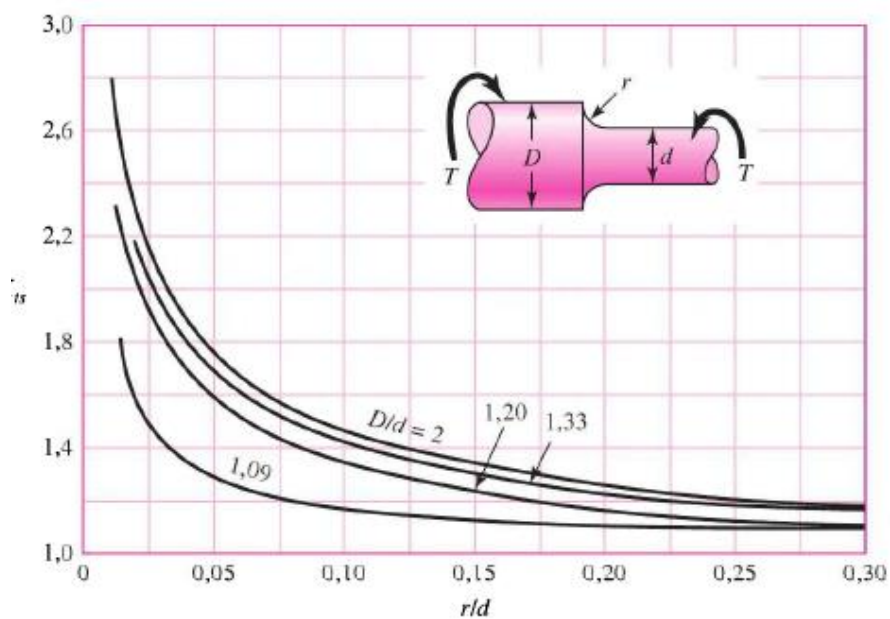
Fonte: Budynas et al (2011).

Figura 23 - Fator de concentração de tensão para eixo cilíndrico em flexão



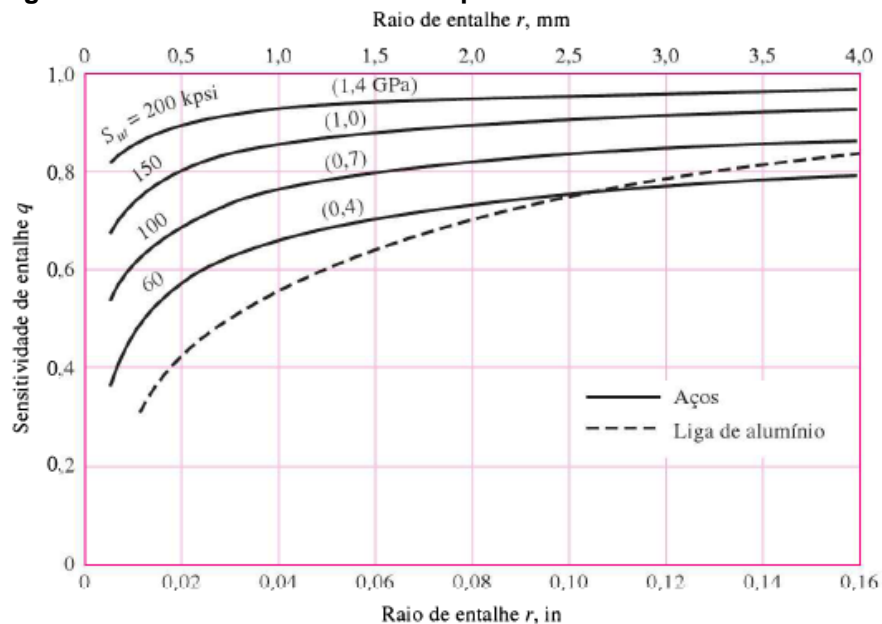
Fonte: Budynas et al (2011).

Figura 24 - Fator de concentração de tensão para eixo cilíndrico em torsão

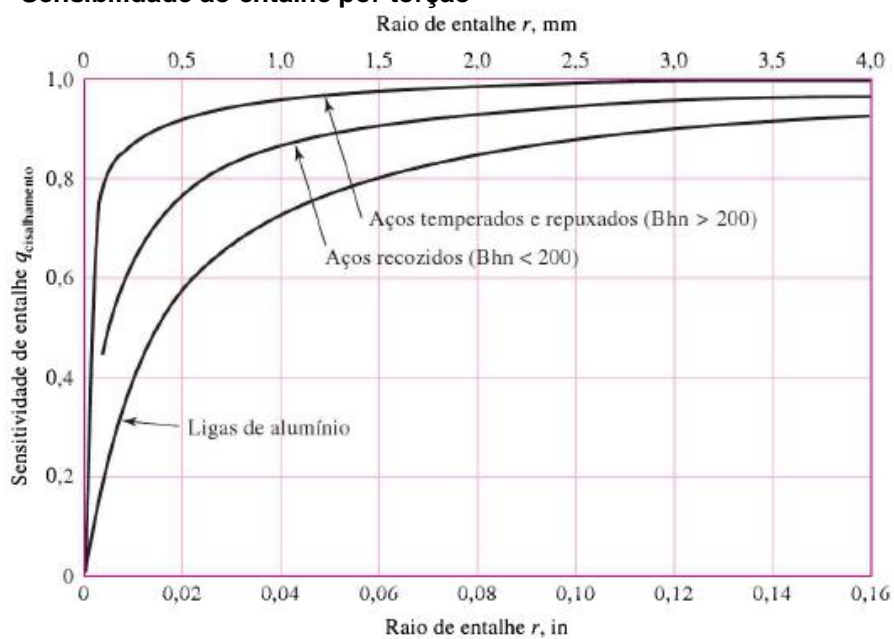


Fonte: Budynas et al (2011).

Figura 25 - Sensibilidade ao entalhe por flexão










Fonte: Budynas et al (2011).

Figura 26 - Sensibilidade ao entalhe por torção

Fonte: Budynas et al (2011).

ANEXO B - Critérios característicos de parafusos

Figura 27 - Categoria métrica de propriedades mecânicas para parafusos

Categoria de propriedade	Intervalo de tamanho inclusivo	Resistência mínima de prova,[†] MPa	Resistência mínima de tração,[†] MPa	Resistência mínima de escoamento,[†] MPa	Material	Marcação de cabeça
4,6	M5-M36	225	400	240	Baixo e médio carbono	
4,8	M1,6-M16	310	420	340	Baixo e médio carbono	
5,8	M5-M24	380	520	420	Baixo e médio carbono	
8,8	M16-M36	600	830	660	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	
9,8	M1,6-M16	650	900	720	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	
10,9	M5-M36	830	1040	940	Baixo carbono, martensita, Q&T (temperado e revenido)	
12,9	M1,6-M36	970	1220	1100	Liga, Q&T (temperado e revenido)	

Fonte: Budynas et al (2011).

ANEXO C - Especificações técnicas de cilindro de laminação

Figura 28 - Especificações técnicas de cilindros de laminação

Composição Química			C	Si	Mn	Cr	Mo	V
3% Cr	VC9 (Grupo I)	Min.	0,71	0,10	-	2,2	0,20	0,04
		Máx.	0,94	0,70	0,70	3,8	0,53	0,15
5% Cr	VC10 (Grupo II)	Min.	0,76	0,10	0,50	4,0	0,18	0,04
		Máx.	1,05	0,70	0,80	5,0	0,50	0,15
5% Cr camada profunda	VDH (Grupo III)	Min.	0,80	0,18	0,20	4,2	0,20	0,04
		Máx.	1,00	0,70	0,80	6,0	0,65	0,15

Fonte: Gerdau (2017)