

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA – UNIFOA

Artur Moura Guimarães

Matheus de Carvalho Rodrigues Albertini

Wellington Leme da Silva

Willker Figueirêdo da Luz Júnior

**DIMENSIONAMENTO TRANSMISSÃO DO TIPO CARDAN: ESTUDO DE CASO
PARA 5ª CADEIRA DE UM LAMINADOR HORIZONTAL DE TIRAS A FRIO**

Volta Redonda – RJ

2019

ARTUR MOURA GUIMARÃES
MATHEUS DE CARVALHO RODRIGUES ALBERTINI
WELLINGTON LEME DA SILVA
WILLKER FIGUEIRÊDO DA LUZ JÚNIOR

**DIMENSIONAMENTO TRANSMISSÃO DO TIPO CARDAN: ESTUDO DE CASO
PARA 5ª CADEIRA DE UM LAMINADOR HORIZONTAL DE TIRAS A FRIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Centro Universitário de Volta Redonda –
UniFOA como requisito parcial para a
obtenção do título de engenheiro mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Volta Redonda – RJ

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Artur Moura Guimarães

Matheus de Carvalho Rodrigues Albertini

Wellington Leme da Silva

Willker Figueirêdo da Luz Júnior

DIMENSIONAMENTO TRANSMISSÃO DO TIPO CARDAN: ESTUDO DE CASO PARA 5ª CADEIRA DE UM LAMINADOR HORIZONTAL DE TIRAS A FRIO

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. MSc. Diniz Félix

DEDICATÓRIA

Dedicamos nosso projeto a todos os envolvidos, familiares, amigos e professores, que nos apoiaram que nos ajudaram durante toda essa jornada, que com esse apoio se tornou possível a elaboração deste projeto mesmo com muitas dificuldades envolvidas neste período muito corrido.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus pela oportunidade de estar vivo e com saúde para realizar nosso projeto, agradecemos também aos nossos familiares que nos apoiaram nos momentos difíceis e aos professores que nos proporcionaram sabedoria em todo nosso curso na UNIFOA.

EPIGRAFE

“Seu trabalho vai preencher uma parte grande da sua vida, e a única maneira de ficar realmente satisfeito é fazer o que você acredita ser um ótimo trabalho. E a única maneira de fazer um excelente trabalho é amar o que você faz.” Steve Jobs.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo realizar o dimensionamento de uma transmissão do tipo cardan para a 5ª cadeira de um laminador horizontal de tiras a frio.

As forças provenientes do processo de laminação atingem valores altíssimos, com milhares de toneladas.

A abordagem da revisão bibliográfica está voltada primeiramente para a laminação, descrevendo todo o seu processo e suas variações; posteriormente são abordados os laminadores e seus tipos e por fim o eixo cardan e seus componentes.

Devido a essa particularidade, já que demanda elevados valores de potência e força exigidos pelos motores do laminador e pelo processo, a utilização do eixo cardan para a transmissão da energia gerada pelos motores até os cilindros torna-se pertinente.

A metodologia deste trabalho compreendeu em elaborar um estudo de caso descrevendo a situação existente em uma indústria do ramo metalúrgico nacional para o dimensionamento do cardan para transmitir a força do motor elétrico para a 5ª cadeira de um laminador horizontal de tiras a frio. Para o dimensionamento foram utilizados os catálogos disponibilizados pelos principais fabricantes deste segmento no mercado nacional.

O eixo cardan atua conectando o cilindro de laminação a saída de uma caixa multiplicadora, utiliza um motor elétrico com potência de 4500kW e velocidade variando entre 240 e 480 rpm, trabalhando em um ângulo de 8°, Torque Máximo de 68,6 kN.m e flange com 400mm de diâmetro. Utilizando os catálogos dos fabricantes Voith e Tector para realizar o dimensionamento do eixo e os fatores de segurança de fator de choque, vida útil e fator angular, chega-se a um eixo que necessita suportar 159 kN.m. A Série R da Voith é recomendada para um intervalo de torque entre 32 e 1.000 kN.m e flange variando entre 225 a 500 mm de diâmetro, sendo o eixo escolhido.

Portanto, junto aos catálogos dos principais fornecedores da transmissão cardan no mercado, foi verificada a existência de diversas soluções e métodos de dimensionamento fornecidos pelo fabricante, cada qual com sua capacidade específica.

Palavras chave: Eixo Cardan Laminador Dimensionamento.

ABSTRACT

This project aims to perform the sizing of a cardan transmission for the 5th chair of a horizontal cold strip mill.

The forces from the rolling process reach very high values, with thousands of tons.

The approach of the literature review is primarily focused on lamination, describing its entire process and its variations; Later, the rolling mills and their types are discussed, and finally the cardan shaft and its components.

Due to this particularity, as it demands high power and force values required by the rolling mill motors and the process, the use of the cardan shaft for the transmission of the energy generated by the motors to the cylinders becomes pertinent.

The methodology of this project comprised a case study describing the situation in a national metallurgical industry for the sizing of the cardan to transmit the electric motor force to the 5th chair of a horizontal cold strip mill. For the dimensioning, the catalogs made available by the main manufacturers of this segment in the national market were used.

The cardan shaft acts by connecting the lamination cylinder to the output of a multiplier box, uses an electric motor with a power of 4500kW and speed ranging between 240 and 480 rpm, working at an angle of 8° , Maximum Torque 68.6 kN.me 400mm diameter flange. Using the Voith and Tector manufacturers' catalogs to perform axle sizing and shock factor, life and angular factor safety factors, you arrive at an axle that needs to support 159 kN.m. Voith R-Series is recommended for a torque range between 32 and 1,000 kN.m and flange ranging from 225 to 500 mm in diameter, with the shaft being chosen.

Therefore, together with the catalogs of the main gimbal suppliers in the market, it was verified the existence of several sizing solutions and methods provided by the manufacturer, each one with its specific capacity.

Keywords: Cardan Shaft, Rolling mill, Sizing.

Lista de Figuras

Figura 1: Desenho esquemático do processo de laminação.	17
Figura 2: Cadeiras de laminação.	18
Figura 3: Gráfico da curva tensão x deformação.....	18
Figura 4: Desenho esquemático do processo de laminação à quente.....	19
Figura 5: Desenho esquemático do processo de laminação à frio.....	21
Figura 6: Desenho esquemático de um laminador e seus componentes.....	22
Figura 7: Laminador Duo.	23
Figura 8: Laminador Duo Reversível.	23
Figura 9: Laminador Trio.	24
Figura 10: Laminador Quadruo.	24
Figura 11: Laminador Sendzimir.....	25
Figura 12: Carro de transferência de bobinas.....	26
Figura 13: Esteira transportadora de bobinas.	26
Figura 14: Componentes da esteira.	27
Figura 15: Vista Lateral carro de transferência.	28
Figura 16: Mandril de uma desenroladeira.....	28
Figura 17: Desenroladeiras sem bobina.	29
Figura 18: Componentes completos de entrada do laminador.	29
Figura 19: Eixo cardan.	30
Figura 20: Componentes do eixo cardan.	31
Figura 21: Componentes da cruzeta.	32
Figura 22: Detalhes fixação.....	32
Figura 23: Junta deslizante.	33
Figura 24: Luveira e pantuva.....	33
Figura 25: Ponteira fixa.	34
Figura 26: Terminal do eixo cardan.	34
Figura 27: Garfo.	35
Figura 28: Flange.....	35
Figura 29: Flange de acoplamento.....	36
Figura 30: Forjamento em matriz aberta.	37
Figura 31: Forjamento em matriz fechada.....	38
Figura 32: Processo de fundição por centrifugação.....	38

Figura 33: Usinagem de uma cruzeta em aço SAE 8620.	39
Figura 34: Furo de mancal fechado.	40
Figura 35: Furo de mancal bipartido.	40
Figura 36: Eixo cardan com tubo compensatório.	45
Figura 37: Eixo cardan com tubo e sem curso.	45
Figura 38: Sem tubo e com curso compensatório (extra curto).	46
Figura 39: Sem tubo e sem curso.	46
Figura 40: Graus de qualidade de balanceamento para diferentes tipos de rotores.	56
Figura 41 - Tubo retorcido.	57
Figura 42 - Solda rompida.	58
Figura 43 - Cruzeta da junta universal queimada.	58
Figura 44 - Junta universal fraturada.	59
Figura 45 - Escoriação das extremidades.	59
Figura 46 - Marcas superficiais	60
Figura 47 – Descamação.	60
Figura 48 - Garfo curvado	61
Figura 49 - Garfo fraturado	61
Figura 50 - Espiga da forquilha quebrada	62
Figura 51 - Fratura nas ranhuras de deslizamento.	62

Lista de Quadros

Quadro 1: Fator K.....	50
Quadro 2: Fator K1.....	51
Quadro 3: Fator K2.....	51
Quadro 4: Fator K3.....	52
Quadro 5: Graus de qualidade de balanceamento para diferentes tipos de rotores.	55

Lista de abreviaturas e siglas

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

ISO – *International Organization for Standardization*

EP – Extrema pressão

NLGI – *National Lubricating Grease Institute*

Lista de símbolos

RPM – Rotação por minuto

Nm – Newton metro

mm – milímetro

ω – velocidade angular

e_{adm} – Desbalanceamento residual permissível específico

Tn – Torque Nominal

K – Fator de serviço

Tm – Torque máximo

K1 – Fator de Choque

K2 – Fator Vida Útil

K3 – Fator Angular

Tk – Torque de Carga

Tc – Torque Contínuo

P – Potência do motor (cv)

n – Velocidade do motor (RPM)

cv – Cavalo Vapor

kW - Quilowatt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA.....	16
2.2	LAMINAÇÃO.....	16
2.3	LAMINAÇÃO À QUENTE.....	19
2.4	LAMINAÇÃO À FRIO.....	20
2.5	LAMINADORES.....	21
2.5.1	Tipos de laminadores.....	22
2.5.2	Componentes essenciais de entrada num laminador à frio.....	25
2.6	EIXO CARDAN.....	29
2.7	COMPONENTES DO EIXO CARDAN.....	30
2.7.1	Cruzeta.....	31
2.7.2	Junta deslizante.....	32
2.7.3	Luveira e pontuva.....	33
2.7.4	Ponteira fixa.....	33
2.7.5	Terminal do eixo cardan.....	34
2.7.6	Garfo.....	34
2.7.7	Flange.....	35
2.7.8	Flange de acoplamento.....	35
2.8	PRINCIPAIS APLICAÇÕES.....	36
2.9	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO EIXO CARDAN.....	37
2.10	FABRICANTES.....	39
2.10.1	GWB.....	39
2.10.2	Voith GmbH&Co. KGaA.....	43
2.10.3	EPR.....	43
2.10.4	TecTor.....	45

3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
3.1	ESTUDO DE CASO.....	48
3.1.1	Características do eixo cardan já utilizado dentro desta indústria.....	48
3.2	DIMENSIONAMENTO.....	49
3.2.1	Fator k1.....	51
3.2.2	Fator k2.....	51
3.2.3	Fator k3.....	52
3.3	ESPECIFICAÇÃO DO EIXO.....	52
3.4	INSTALAÇÃO DO EIXO.....	54
3.5	MANUTENÇÃO DO EIXO CARDAN.....	56
3.5.1	Inspeção.....	56
3.5.2	Falhas e possíveis causas.....	57
3.5.3	Lubrificação.....	62
4	CONCLUSÃO.....	64
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
	ANEXO I.....	66

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão tem o objetivo de transformar o torque e a rotação oferecidos pelo motor.

Em meados do século XVI, estudiosos da época perguntavam a si mesmos como conseguir de maneira efetiva, transmitir a força pelo motor gerada, até as rodas traseiras dos automoveis. Assim, depois de anos de pesquisa e estudo, Geronimo cardano, conseguiu criar um dispositivo capaz de realizar tal feito, dando origem ao eixo cardan, como é conhecido nos dias de atuais.

O eixo cardan possui como principal virtude, a capacidade de transmissão da energia que o motor gera, até o eixo diferencial, que por sua vez, irá transmitir a mesma energia para as rodas ou qualquer outro componente mecânico de transmissão.

O eixo cardan consiste em dois eixos tubulares, sendo um denominado primário, o qual é conectado à fonte motriz, e outro denominado secundário, o qual é conectado ao eixo de tração. Nas extremidades dos tubos existem conexões denominadas cruzetas que conferem a este componente a possibilidade de transmissão em diferentes ângulos. (ZAUPACARDANS, 2019). Possuem também a vantagem de serem silenciosos, . Diversas aplicações nos setores automotivos (transmissões para carros, motocicletas, ônibus e caminhões), agrícola (transmissões para tratores de diversos portes), naval (em motores de navegação e também em equipamentos extratores de pedra, areia e outros derivados) e industriais para compensação do desalinhamento entre eixos (ZAUPACARDANS, 2019).

Os componentes de uma transmissão cardan estão sujeitos a cargas torcionais, axiais e de flexão (MOREIRA et al, 2002). Em algumas aplicações como por exemplo na transmissão industrial para laminadores podem ocorrer sobrecargas devido a alta inercia envolvida, bem como travamentos, embuchamentos entre outras causas, sendo adequado realizar uma análise de falhas do sistema.

Devido ao alto custo de teste experimentais a simulação numérica vem sendo utilizada como alternativa para estudo do desempenho dinâmico de componentes para o estudo da confiabilidade (TORESAN JUNIOR, 2001).

Alguns laminadores utilizam tal eixo em seu processo de produção, os laminadores são equipamentos industriais de utilização no processo de Laminação, processo considerado de conformação mecânica de materiais, que tem como objetivo conseguir reduzir através da passagem do material por entre dois rolos ou cilindros, a seção transversal do mesmo, diminuindo assim a sua espessura inicial.

Esses equipamentos basicamente consistem por mancais, cilindros (ou rolos), e uma carcaça exterior denominada quadro ou gaiola onde esses componentes são fixados. Além disso, é equipado por um motor capaz de fornecer aos cilindros a potência gerada por ele, e por fim conseguir ter o controle da velocidade de rotação.

Quando se remete à Laminação, as forças provenientes do seu processo conseguem atingir altíssimos valores, como milhares de toneladas, por exemplo, por este motivo uma construção extremamente rígida se torna necessária, além é claro de motores cuja potência gerada seja compatível com sua demanda exigida, para tornar apto o processo a ser realizado.

E devido a essa particularidade, já que demanda elevados valores de potência e força exigidos pelos motores do Laminador e pelo processo, a utilização do eixo cardan para a transmissão da energia gerada pelos motores até os cilindros torna-se pertinente e pode ser considerada como opção.

Neste sentido o objetivo geral deste trabalho é realizar o dimensionamento de uma transmissão do tipo cardan através do estudo de caso para acionamento de um laminador.

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica acerca dos eixos cardan disponíveis no mercado, bem como suas características;
- Dimensionar o eixo necessário para atender o laminador apresentado, conforme estudo de caso;
- Elaborar análise de falhas do sistema adotado;
- Apresentar estudo comparativo entre opções oferecidas pelos fabricantes;
- Emitir parecer técnico conclusivo acerca da opção selecionada, esclarecendo os aspectos fundamentais para sua aplicabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Pode-se definir como processos de conformação mecânica aqueles cuja finalidade é alterar a geometria de um material (forma), por efeito da deformação plástica sofrida por ele, pelo intermédio de forças exercidas através de ferramentas adequadas, que variam muito de cilindros de grande porte até mesmo matrizes de menor proporção.

As vantagens obtidas pelo uso desses processos são inúmeras: dinamismo na execução, melhor aproveitamento da matéria, uma possibilidade maior de se obter precisão melhor e tolerância dimensional, além de um controle maior das propriedades mecânicas do material a ser trabalhado. Entretanto, é importante salientar ainda que os custos desses processos são extremamente elevados devido aos equipamentos e ferramental, desta maneira apenas uma produção bastante elevada pode justificar economicamente sua preferência para utilização.

Atualmente, têm-se conhecimento da existência de centenas de processos de conformação mecânica, para diversas aplicações específicas. E podemos os classificar de acordo com alguns critérios, tais como: quanto ao tipo de esforço exercido, em relação à deformação sofrida pelo material, pela variação de espessura que ocorre na peça, quanto ao propósito da deformação e quanto ao regime da operação de conformação. Podem se dividir basicamente em:

- Laminação;
- Forjamento;
- Trefilação;
- Extrusão;
- Conformação de chapas (corte, dobramento e estampagem).

2.2 LAMINAÇÃO

O processo de conformação mecânica denominado laminação, tem por finalidade mudar a seção transversal do material a ser trabalhado, passando o mesmo por entre dois cilindros girando em sentidos opostos um ao outro. Deste processo pode-se obter como resultado produtos planos (chapas) ou produtos não planos (perfis de maior ou menor complexidade).

No processo, o material acaba sofrendo a ação de elevadíssimas tensões

compressivas provenientes da ação e influência dos rolos e sua prensagem, e também sofre a influência de tensões cisalhantes presentes em sua superfície, oriundas do atrito entre o material e os rolos. O ato de arrastar o metal para entre os rolos é de responsabilidade das forças de atrito ali atuantes.

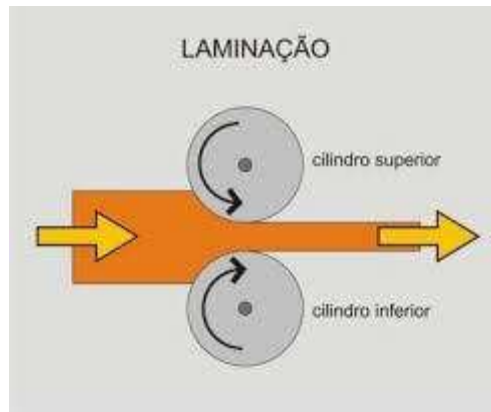


Figura 1: Desenho esquemático do processo de laminação.

Fonte: METALTHAGA, 2017.

Este processo de conformação mecânica é o mais utilizado em fabricações de perfis e chapas, já que possui alta produtividade e um controle dimensional bem preciso do produto final, além de uma vasta gama de produtos.

O processo pode ser de duas maneiras: à quente ou à frio. O que as diferencia são os efeitos causados graças ao amolecimento térmico e endurecimento e as espessuras dos laminados. É importante salientar a diferença nos valores dos coeficientes de atrito externo entre o metal laminado à quente e o laminado à frio, que será maior no primeiro e que assim teria influência no torque e na força de laminação.

A primeira operação feita é o desbaste ou redução dos lingotes (produtos oriundos da fundição) e resulta em tarugos, blocos ou placas, e é normalmente realizada por laminação à quente. Logo após essa etapa, inicia-se uma nova fase de laminação à quente que irá transformar em chapas grossas, tiras à quente, barras, tubos, vergalhões entre coisas mais, o produto final.

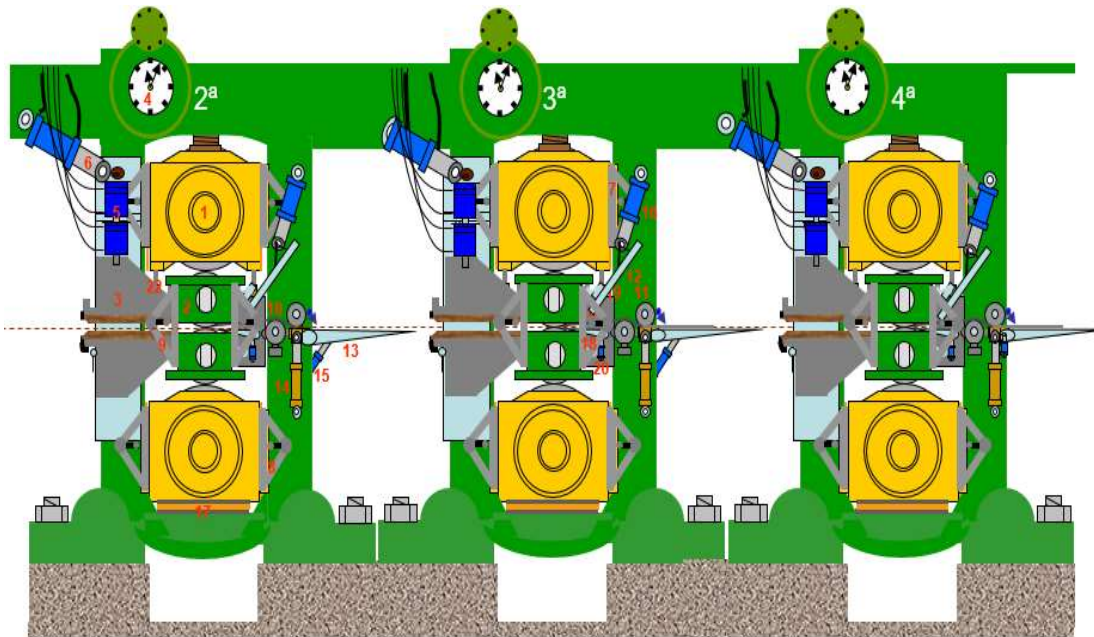


Figura 2: Cadeiras de laminação.

Fonte: CSN, 2018.

Abaixo mostraremos um gráfico, exemplificando os limites admissíveis para uma laminação do aço. Para que se trabalhe sempre dentro das recomendações do material obedecendo a curva tensão x deformação.

Onde o ponto de trabalho se situa entre os pontos A e B, dentro da região de OA não ocorre deformação. Na região BC pode ocorrer a ruptura do material.

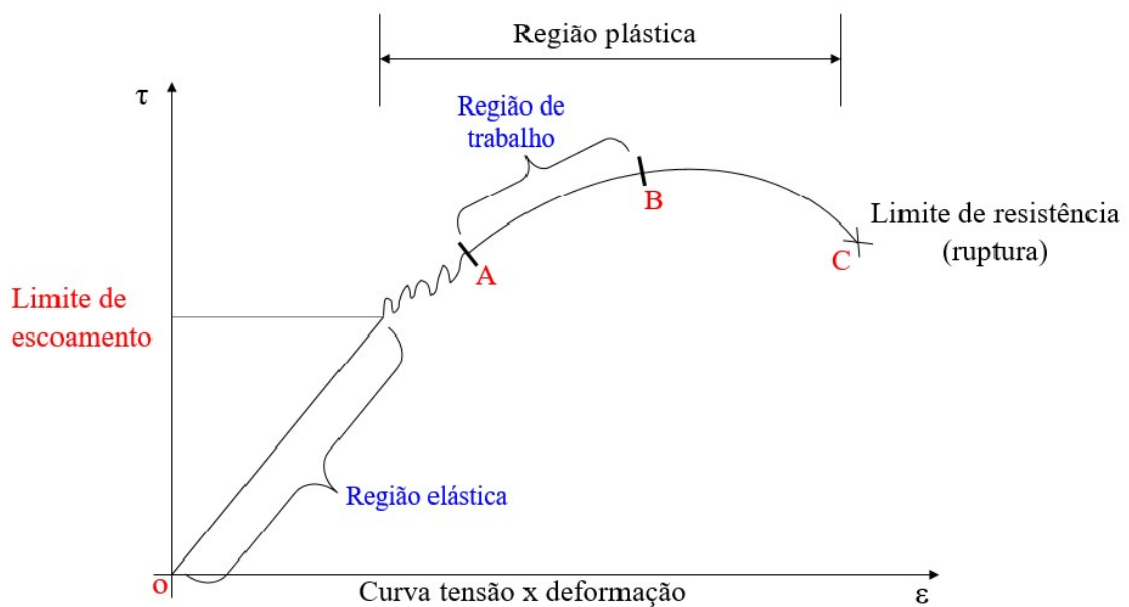


Figura 3: Gráfico da curva tensão x deformação.

Fonte: SOARES et al, 2011.

Após esta explicação simplificada do processo de laminação de chapas, observamos que é importante conhecer o comportamento do aço que está submetido a laminação, dando importância para as condições de processo, tais como:

- Velocidade de laminação
- Tensões aplicadas de estiramento
- Temperaturas de processo
- Reduções aplicadas
- Condições de atrito

Estes pontos são fundamentais para uma boa laminação e para que você tenha uma melhor qualidade do produto acabado sem muitos problemas com desperdício de material e prejuízos futuros.

2.3 LAMINAÇÃO À QUENTE

O processo de laminação à quente é realizado a partir de temperaturas consideradas bem altas, onde o material consegue ser trabalhado, normalmente na faixa entre 1000°C e 1200°C, onde pode-se notar nessa faixa de temperatura a recristalização do aço ocorrida durante a deformação do metal. Essa recristalização se torna necessária para que se evite um fenômeno denominado encruamento, que é encontrado com frequência quando há grandes reduções em um determinado material.

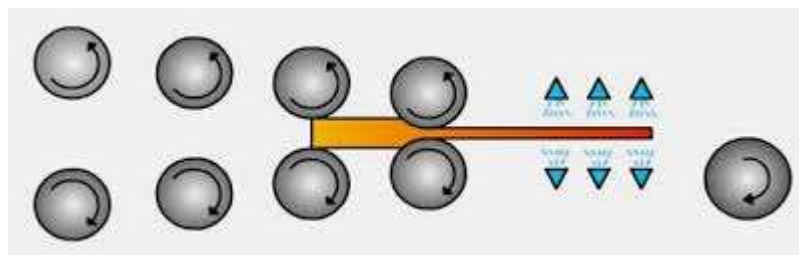


Figura 4: Desenho esquemático do processo de laminação à quente.

Fonte: PROEMINENTE, 2019.

A laminação em elevadas temperaturas, evita o encruamento do material e também consegue permitir uma redução de carga acentuada e de maneira drástica, já que o trabalho dentro dessa faixa de temperatura, diminui a resistência mecânica do aço, e refina a estrutura do mesmo, eliminando assimporosidades existentes além de conseguir obter uma deformação bem maior se comparado à deformação do processo de laminação à frio.

Entretanto, quando há uma redução de material com temperaturas altas, faz com que alguns certos tipos de características no processo sejam exigidas. Materiais conformados

mecanicamente nessas condições de temperatura requerem uma certa resistência à temperatura maior para que consigam resistir sem prejudicar o processo, em contrapartida possuem uma resistência mecânica menor devido às elevadas temperaturas de operação que afetam a sua microestrutura.

Ainda que existam certos materiais que tenham a característica de resistir à altas temperaturas, se faz necessária a utilização de sistemas de resfriamento, isso faz com que o material sofra choques térmicos e o contato junto a fluidos refrigerantes, normalmente a água, o que evidencia uma característica marcante nesses componentes: a resistência à oxidação e à corrosão.

2.4 LAMINAÇÃO À FRIO

O processo de laminação à frio é utilizado para a produção de tiras e folhas com tolerâncias dimensionais e acabamento superficial superiores se comparados com os mesmos produzidos pelo processo de laminação à quente. Além disso, pode-se obter uma maior resistência mecânica do produto final devido ao fato do efeito do encruamento surgir, resultante do processo de redução à frio.

Os principais materiais que dão origem à produção das tiras de aço laminadas à frio são normalmente as bobinas quentes decapadas. Já em relação aos metais não ferrosos, a laminação à frio consegue ser realizada a partir das tiras à quente, ou ainda usando diretamente peças fundidas, como as que já são utilizadas em certas ligas de cobre existentes atualmente.

Consegue-se atingir com a laminação à frio, uma redução total que pode variar 50% a 90%. Quando o grau de redução é estabelecido em cada passe ou cadeia de laminação, uma distribuição uniforme se torna desejável nos passes que virão a acontecer, sem que haja uma queda brusca e notável quando relacionada à redução máxima em cada passe. Usualmente, no último passe é feita a redução da porcentagem menor para que se permita assim um controle de apalinhamento satisfatório, da bitola e acabamento superficial ambos melhores.



Figura 5: Desenho esquemático do processo de laminação à frio.

Fonte: SOLUÇÕES INDUSTRIAIS, 2019.

Segue abaixo a descrição das operações que ocorrem no processo de conformação mecânica por laminação à frio:

- Decapagem – processo que visa remover os óxidos presentes na superfície das chapas, por intermédio da imersão da mesma em banho ácido inorgânico ou até mesmo por ação mecânica.
- Laminação à frio – consiste do processo já descrito anteriormente, da redução da seção transversal do material trabalhado pela ação da deformação plástica submetida a esse material.
- Recozimento – etapa com o objetivo de recuperar a ductibilidade da chapa e também remover as tensões internas após a etapa anterior.
- Laminador de encruamento – etapa na qual o objetivo é fornecer ao material trabalhado melhores propriedades mecânicas através de um processo de laminação com tensões menores.
- Linha de estanhamento eletrolítico – etapa na qual o material sofre um banho, recebendo uma pequena camada de estanho caso o material seja estanhado ou até mesmo cromo caso seja cromado.

2.5 LAMINADORES

Laminador é o equipamento responsável por executar o processo de laminação. Como no processo todo existem forças capazes de atingir a ordem de milhares de toneladas, se faz necessário que toda a estrutura do laminador seja bastante resistente e forte para que aguente os elevados esforços, além de motores bem potentes capazes de transmitir a potência necessária no processo.

Um laminador basicamente é formado pelos seguintes componentes:

- Cilindros de trabalho;
- mancais;
- gaiola ou quadro;
- prensas e aventais;
- motor responsável pelo fornecimento da potência gerada por ele aos cilindros de laminação e também pelo controle da velocidade de rotação.

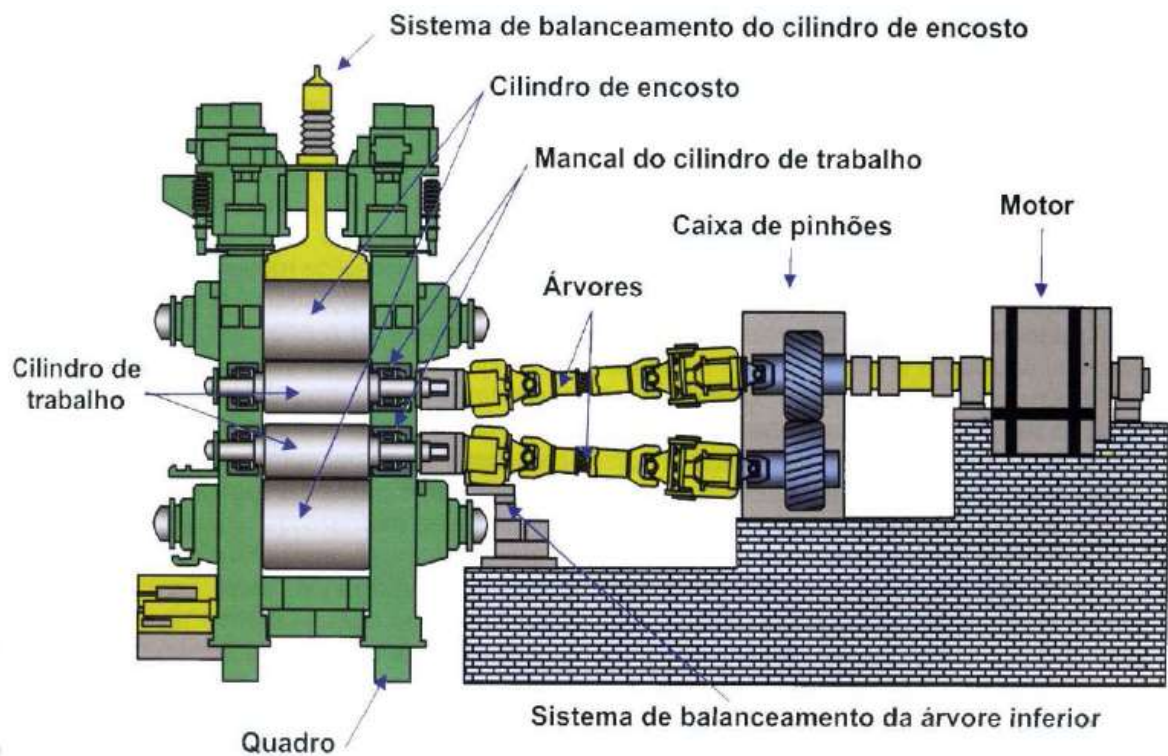


Figura 6: Desenho esquemático de um laminador e seus componentes.

Fonte: SOARES et al, 2011.

2.5.1 Tipos de laminadores

2.5.1.1 Laminador duo

Neste caso o cilindro superior é móvel e pode se movimentar durante a operação, já o cilindro inferior é fixo. O sentido da rotação dos cilindros não pode ser mudado e o material é laminado em apenas um sentido.

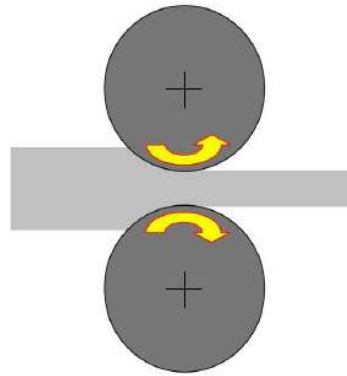


Figura 7: Laminador Duo.

Fonte: SOARES et al, 2011.

2.5.1.2 Laminador duo reversível

Consegue-se uma laminação do material nos dois sentidos apenas mudando o sentido de rotação dos cilindros.

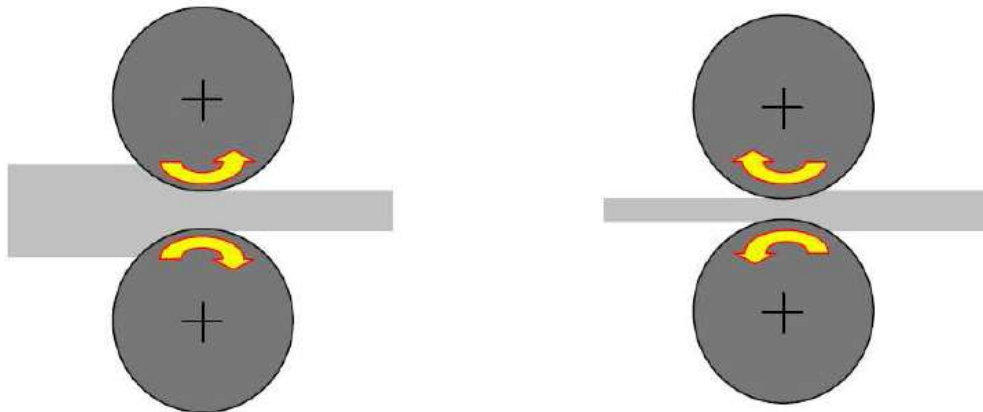


Figura 8: Laminador Duo Reversível.

Fonte: SOARES et al, 2011.

2.5.1.3 Laminador trio

Os cilindros giram apenas no mesmo sentido giratório. Mas consegue-se laminar o material nos dois sentidos alternando a passagem do material nos cilindros superior, intermediário e inferior.

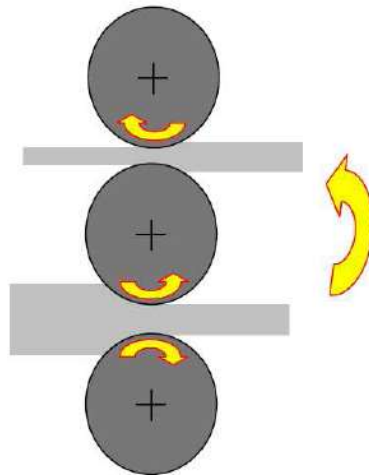


Figura 9: Laminador Trio.

Fonte: SOARES et al, 2011.

2.5.1.4 Laminador quadro

Seu uso é voltado para a laminação de materiais mais finos, assim se utiliza cilindros de diâmetro menores e são apoiados a cilindros de encosto para minimizar os efeitos da flexão. Pode ser reversível ou não reversível.

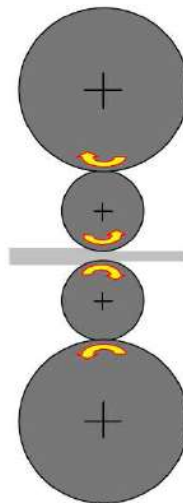


Figura 10: Laminador Quadro.

Fonte: SOARES et al, 2011.

2.5.1.5 LAMINADOR SENDZIMIR

Neste caso os cilindros de trabalho são mais finos se comparados aos demais

laminadores, capazes então de fletir nas orientações vertical e horizontal, e podem ser apoiados em ambas as orientações.

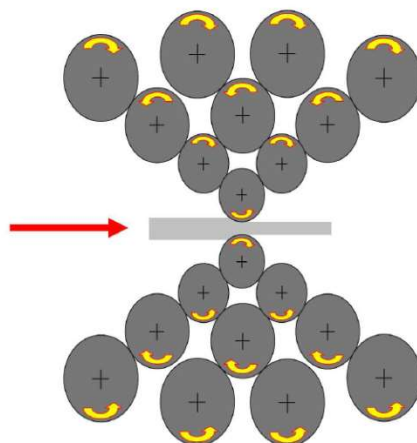


Figura 11: Laminador Sendzimir.

Fonte: SOARES et al, 2011.

2.5.2 Componentes essenciais de entrada num laminador à frio

2.5.2.1 Carro de transferência de bobinas

Utilizado para o transporte de bobina para a esteira de entrada, possui um berço onde a bobina que estaria localizada na área de estocagem é trazida para ele através de uma ponte rolante por exemplo. Este berço é constituído de aço. O carro então pega a bobina no berço e transfere para a esteira, o acionamento do carro é feito através de motor hidráulico com movimentos transversais sobre trilhos.

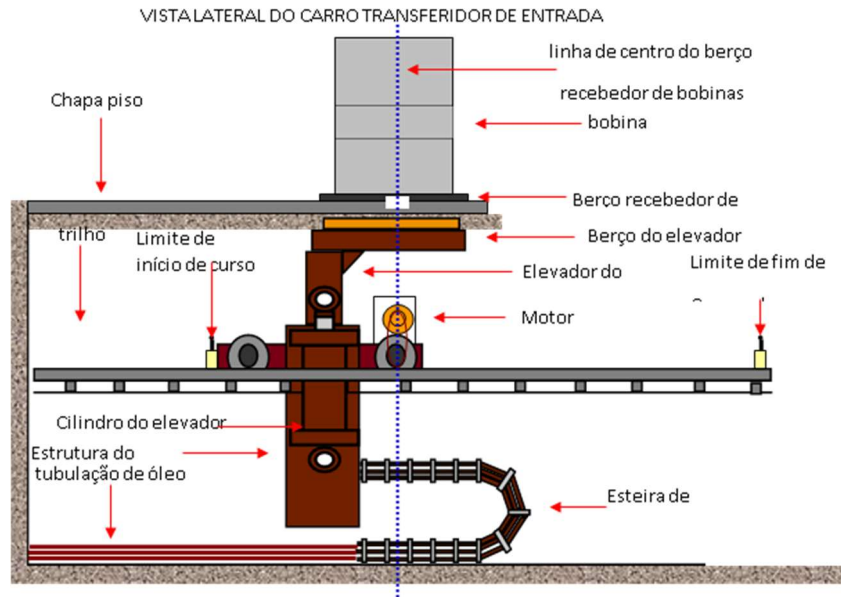


Figura 12: Carro de transferência de bobinas.

Fonte: CSN, 2018.

2.5.2.2 Esteira de entrada

É utilizada para receber bobinas do carro de entrada e transportá-las para o carro transferidor das desenroladeiras do laminador.

A esteira tem a capacidade de transportar 7 bobinas, com sua carga máxima de 132 toneladas, a velocidade máxima atingida pela esteira é de 10 rpm. Seu acionamento é feito na engrenagem, que fica localizada no final da esteira, através de uma caixa redutora acoplada a um motor, que pode ser acionado tanto manualmente como pode ser automatizado. Segue abaixo o desenho esquemático da esteira e dos componentes de acionamento dela.

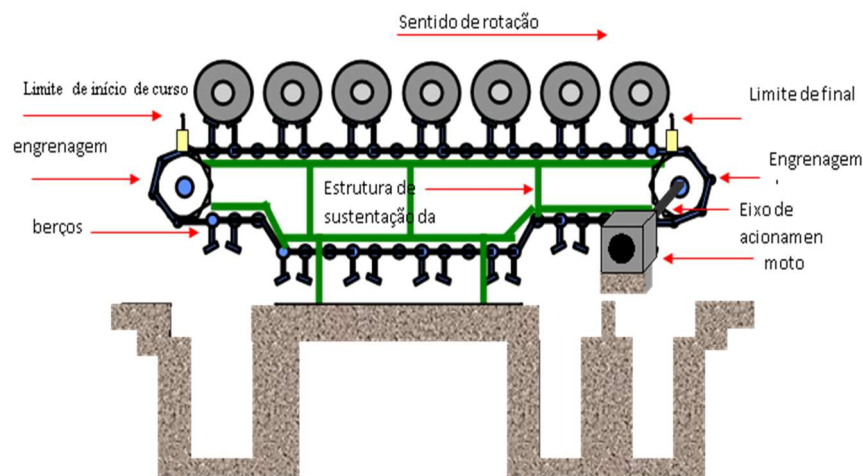


Figura 13: Esteira transportadora de bobinas.

Fonte: CSN, 2018.

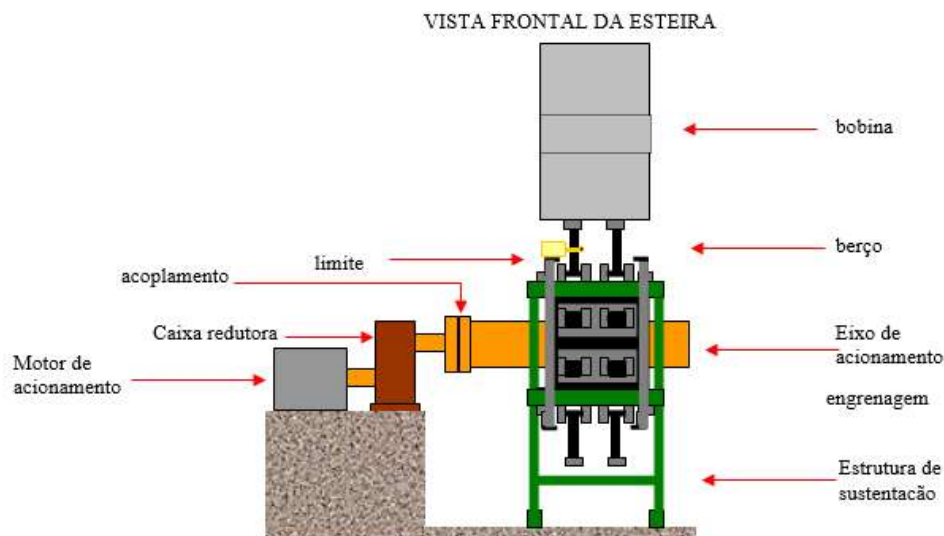


Figura 14: Componentes da esteira.

Fonte: CSN, 2018.

Algumas recomendações são importantes, só acionar a esteira quando:

- não estiver faltando rodas;
- as bobinas estiverem centradas na mesa;
- não houver pessoas ao redor da esteira;
- os limites de início e fim de curso estiverem funcionando corretamente;
- as bobinas estiverem em perfeitas condições para uma laminação.

2.5.2.3 Carro de transferência da desenroladeira 1 e 2

Utilizado para transportar a bobina da esteira de entrada para a desenroladeira. Seu acionamento é feito através de motor hidráulico.

VISTA LATERAL DO CARRO TRANF. DA DESENROLADEIRA 1 E 2

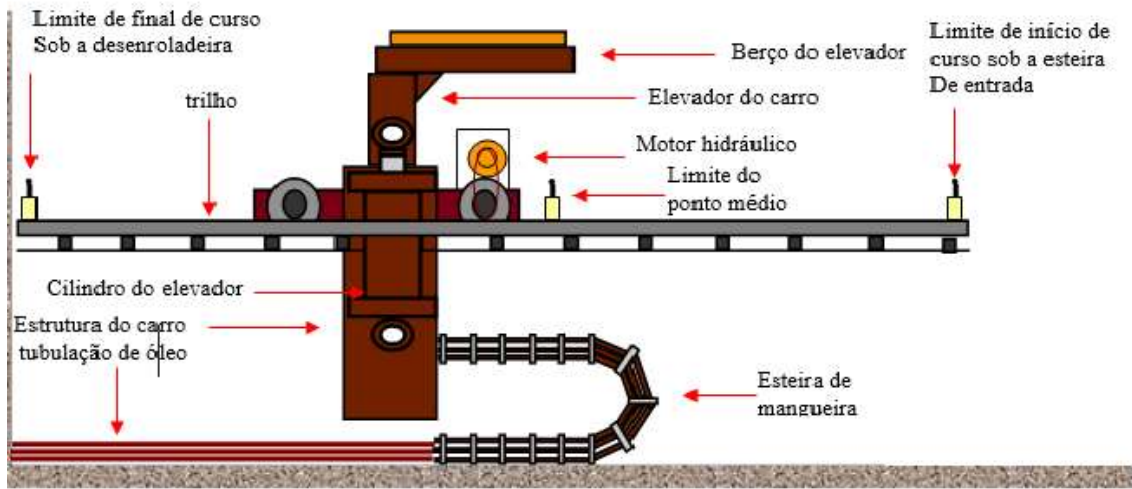


Figura 15: Vista Lateral carro de transferência.

Fonte: CSN, 2018.

2.5.2.4 Desenroladeiras

Possui 2 desenroladeiras com a finalidade de desenrolar a bobina, mantendo a chapa tensionada durante a operação. Seu acionamento é feito por motores de corrente contínua e possui um mandril que se desloca para ambos os lados sobre uma base com estrutura de aço seu acionamento é feito hidraulicamente. A seguir mostraremos uma imagem exemplificando o mandril e seus componentes, juntamente com a imagem das desenroladeiras.

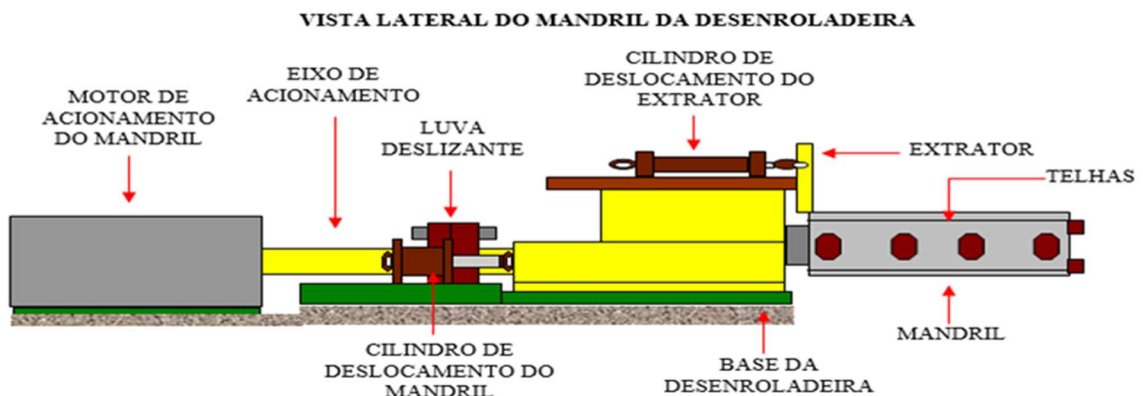


Figura 16: Mandril de uma desenroladeira.

Fonte: CSN, 2018.

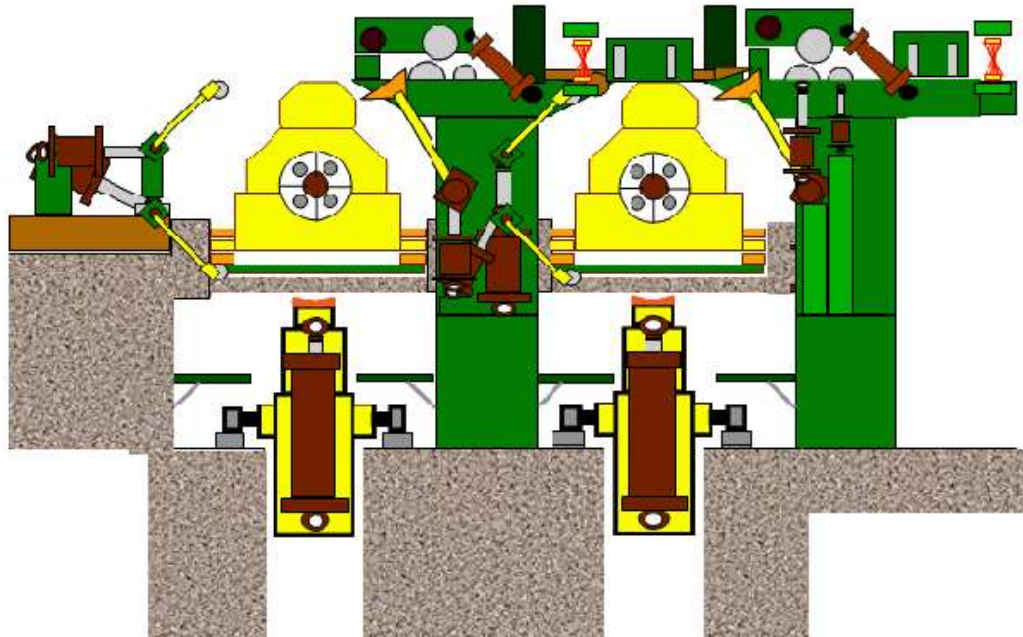


Figura 17: Desenroladeiras sem bobina.

Fonte: CSN, 2018.

Com isso o desenho esquemático do sistema de entrada do laminador ficará composto desta maneira, como mostra a imagem a seguir, desde a esteira transportadora de bobina até a primeira cadeira de laminação onde ocorrerá a diminuição da seção transversal.

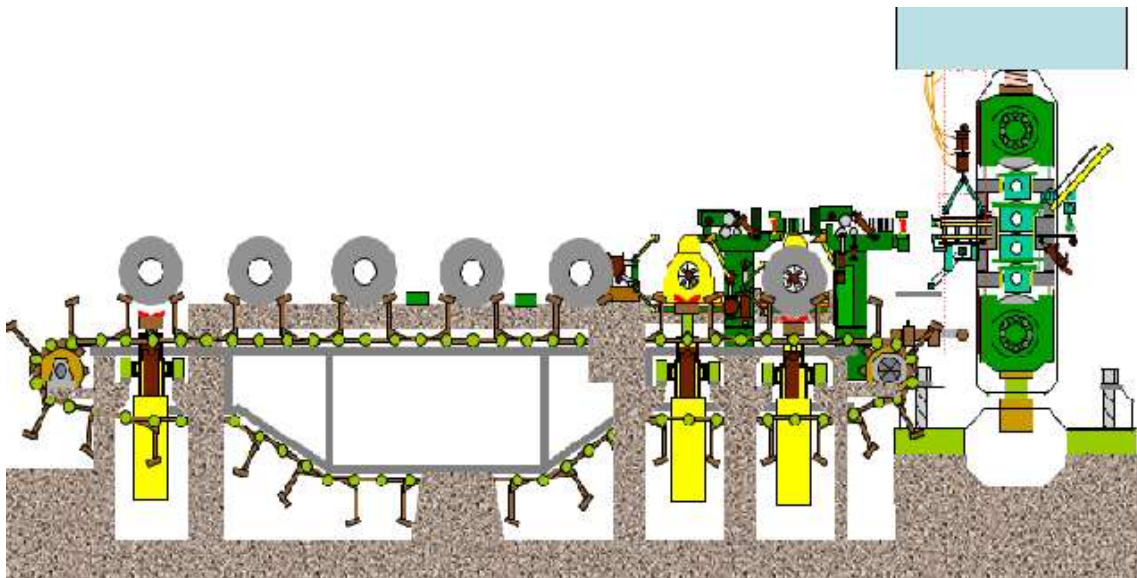


Figura 18: Componentes completos de entrada do laminador.

Fonte: CSN, 2018.

2.6 EIXO CARDAN

O eixo cardan é um componente de transmissão, e tem como principal função

fornecer às forças motrizes, independência. Assim, transmite a energia que o motor gera até o eixo diferencial, e posteriormente o mesmo canalizará essa energia até o equipamento a ser movido.

O cardan pode ter a sua composição formada por dois eixos tubulares: aquele ligado junto à fonte motriz é denominado primário, já o que é ligado ao eixo de tração se chama secundário.

Junto às extremidades dos tubos, há a presença de conexões denominadas juntas universais nas quais pode-se encontrar as cruzetas. Esse componente é responsável por fornecer aos eixos a capacidade de canalizar a força oriunda do motor em ângulos diferentes. Já em respeito à sua fixação, pode ser feita por anéis-trava ou abraçadeiras, a depender é claro da aplicação e seu tipo. A união das cruzetas junto ao cardan é graças ao garfos, terminais ou flanges. E o nome dado ao conjunto formado por esses componentes citados acrescentado com a cruzeta é junta universal.

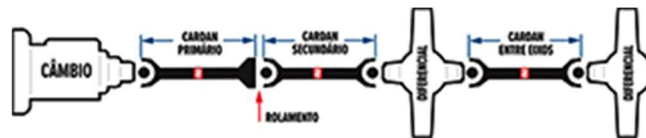


Figura 19: Eixo cardan.

Fonte: ZAUPACARDANS, 2019.

2.7 COMPONENTES DO EIXO CARDAN

O eixo cardan, considerando sua estrutura principal, tem sua configuração geralmente formada por: cruzeta, flange, ponteira, luva, garfo e tubo.

Alguns casos pontuais, a depender do motor gerador da força motriz juntamente com o eixo diferencial e a distância existente entre eles, fazem com que apenas um único eixo cardan não garanta o total funcionamento correto sem que alguma vibração não seja transmitida também. Desta maneira, nesses casos, pode-se utilizar um sistema onde hajam dois eixos cardan de menor tamanho junto a um mancal central, utilizado para servir de apoio aos dois eixos menores citados.

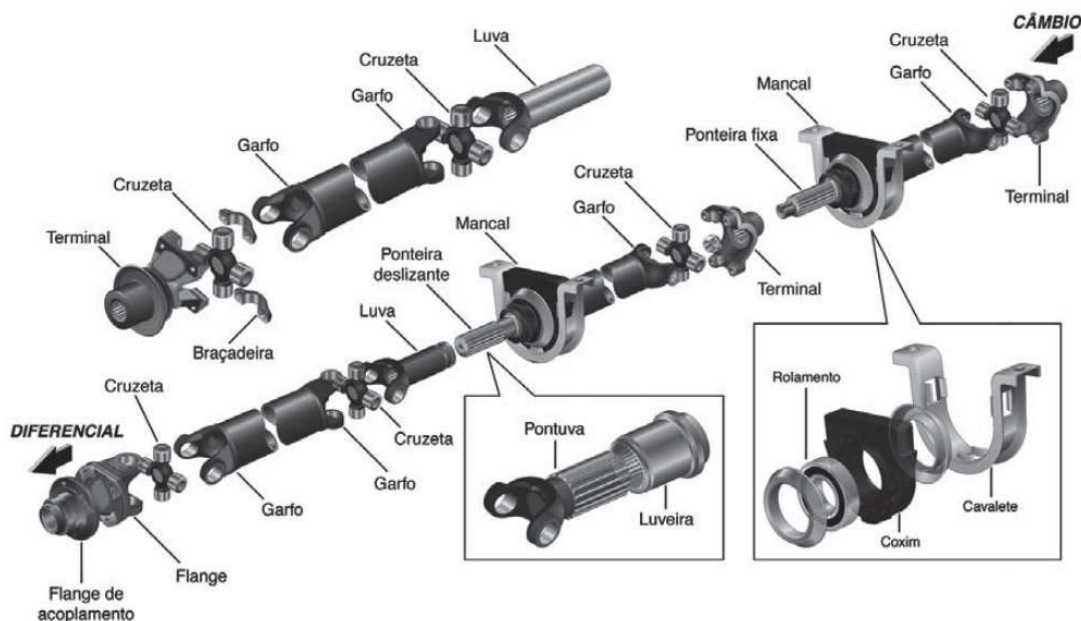


Figura 20: Componentes do eixo cardan.

Fonte: SPICER, 2017.

2.7.1 Cruzeta

Sua principal função é transmitir em ângulos, a força entre dois eixos. Como a fonte da força motriz nesses casos situa-se em um nível diferente ao nível do eixo diferencial, as cruzetas são os componentes que permitem a transmissão de sua força para o eixo diferencial.

Sua estrutura principal é em formato de cruz, por entre dois eixos que se cruzam. Nas extremidades das cruzetas, encontram-se as espigas (ou munhões) e junto a elas, ao seu redor, existem componentes denominados castanhas, que basicamente são definidos por roletes envoltos por uma capa.

A transmissão da força motriz ao eixo diferencial se dá graças à ação deste conjunto castanha-rolete.

No eixo cardan, as cruzetas são unidas por intermédio e pela ação de outros componentes como garfos e flanges ou garfos e terminais, formando assim a junta universal, que seria a junção desses componentes com as cruzetas.

Já os anéis-trava ou braçadeiras, funcionam como os componentes responsáveis pela fixação das cruzetas, com seu uso dependente apenas do seu tipo de aplicação.

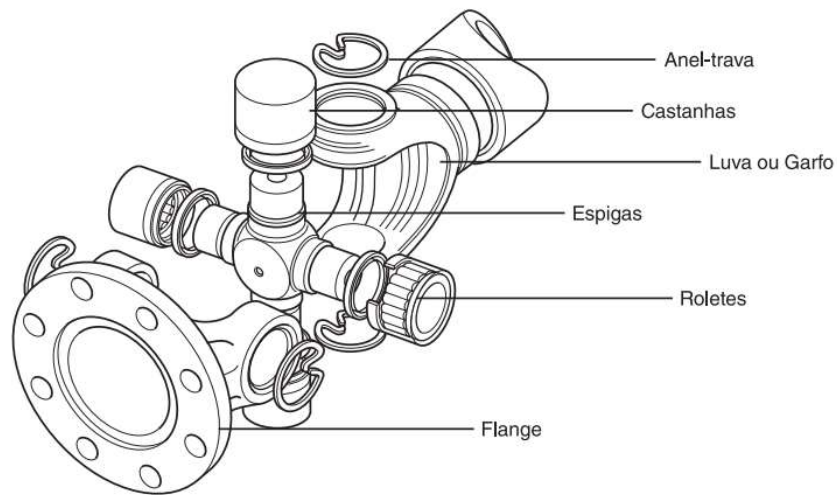


Figura 21: Componentes da cruzeta.

Fonte: SPICER, 2017.

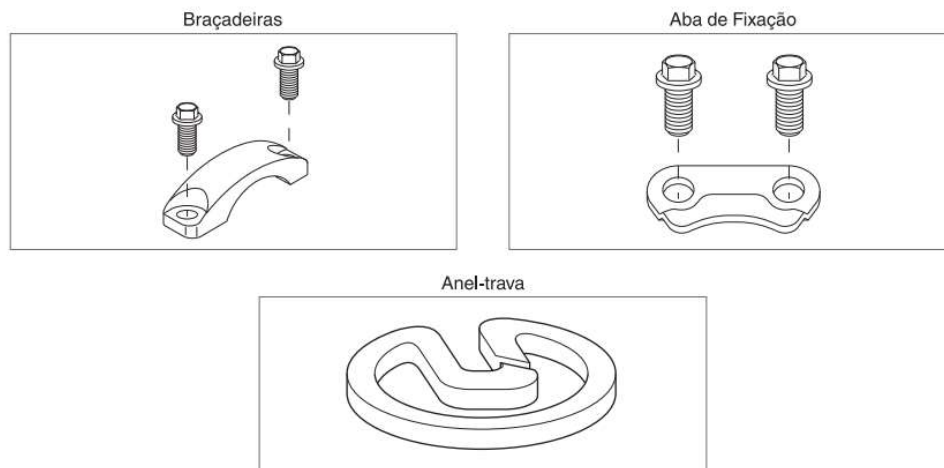


Figura 22: Detalhes fixação.

Fonte: SPICER, 2017.

2.7.2 Junta deslizante

A ponteira deslizante e a luva são encaixadas entre si e deslizam uma dentro da outra, permitindo ao eixo cardan que consiga variar o seu comprimento sem que o seu movimento seja afetado.



Figura 23: Junta deslizante.

Fonte: SPICER, 2017.

2.7.3 Luveira e pontuva

Luveira pode ser definida como uma luva que possui o seu entalhado deslizante semelhante ao da ponteira. Já a pontuva caracteriza-se por ser uma ponteira que possui o seu entalhado deslizante semelhante ao da luva. Desta maneira, é a luveira responsável por deslizar dentro da pontuva, e não ao contrário.

Ambos tem a função idêntica ao conjunto luva e ponteira, mas seu uso dependerá do projeto do eixo cardan.



Figura 24: Luveira e pantuva.

Fonte: SPICER, 2017.

2.7.4 Ponteira fixa

Tem como função realizar o acoplamento do terminal do eixo cardan. Seu uso é recomendado quando o veículo necessitar de mais do que apenas um eixo cardan.

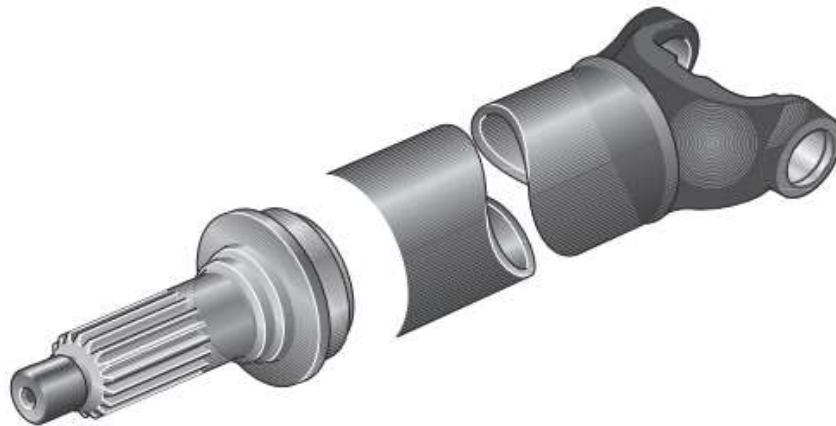


Figura 25: Ponteira fixa.

Fonte: SPICER, 2017.

2.7.5 Terminal do eixo cardan

Serve de ligação entre eixos cardan, quando há a presença de mais de um. Também pode ser utilizado na saída do diferencial.



Figura 26: Terminal do eixo cardan.

Fonte: SPICER, 2017.

2.7.6 Garfo

Sua função é realizar o acoplamento do tudo do eixo cardan com a cruzeta.



Figura 27: Garfo.

Fonte: SPICER, 2017.

2.7.7 Flange

Responsável por acoplar a cruzeta junto ao o flange de acoplamento. Recebe também o nome de flange de orelha.



Figura 28: Flange.

Fonte: SPICER, 2017.

2.7.8 Flange de acoplamento

Comumente utilizado na saída do diferencial e do motor gerador da força motriz. Pode ser utilizado também junto com o flange.



Figura 29: Flange de acoplamento.

Fonte: SPICER, 2017.

2.8 PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Utilizados muitas vezes em equipamentos onde ocorre um desalinhamento entre a origem do movimento (torque/rotação) e o destino dele, com isso o eixo cardan trabalhará com alguns graus de desalinhamento entre eles, sem a perda do torque ou da velocidade. Para que este desalinhamento não afeta o desempenho do cardan, as cruzetas têm um papel importante neste caso, pois são elas que dão o ângulo necessário para o correto funcionamento e desempenho do cardan.

Carros e motocicletas: muito utilizados em veículos com motor na parte dianteira e a tração na parte traseira ou até carros 4 x 4 como meio de transmissão do motor para as rodas, já em motocicletas ele substitui a corrente de transmissão, tornando todo conjunto mais silencioso além de quase não precisar de uma manutenção periodicamente.

Caminhões e ônibus: utiliza-se na transmissão ao eixo traseiro, podendo seu motor está localizado na parte dianteira quanto na parte traseira, quando se possui motor traseiro utiliza-se somente um cardan, já veículos que possui motor dianteiro utiliza-se vários cardans.

Industrial: É muito utilizado em equipamentos industriais para compensar o deslocamento provocado entre motores e equipamentos. Pode possuir um ângulo baixo e uma alta velocidade ou vice-versa.

Agrícola: muito utilizado em tratores de pequeno, médio e grande porte.

Naval: muito aplicado em motores de embarcações como também em equipamentos de extração de pedra, areia, e outros derivados em meio aquático.

2.9 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO EIXO CARDAN

Para fabricarmos um eixo cardan, utilizaremos os processos de forjamento, fundição ou usinagem, dentre os materiais utilizados para fabrica-los, temos: compósitos de engenharia, polímeros, metais (aços e ligas de titânio) e cerâmicos de engenharia. Para aplicação industrial e maquinário de grande porte, utiliza-se o aço, por possuir boas propriedades mecânicas (dureza, resistência à tração, ductilidade, entre outros) e por ser possível adicionar elementos de liga, podendo deixa-lo com as propriedades exigidas em projeto. Os aços mais utilizados são: alto carbono (baixa tenacidade e fragilidade), baixa liga (baixa resistência a abrasão), inoxidáveis (custo elevado) e médio carbono (tenacidade, resistência mecânica e ductilidade). O eixo cardan geralmente é composto de Cruzetas, Luvas, Ponteiras dianteiras e traseiras, Rolamentos, Mancais e Suportes, Flanges de cruzetas, Flanges de acoplamento e Terminais yoke.

Para os eixos obtidos através de forjamento, o lingote é obtido na aciaria e transformados em placas ou tarugos, sendo forjados utilizando prensas e martelos, entretanto, para obter bom acabamento superficial é preciso leva-lo para usinagem. O processo de forjamento pode ser classificado em dois tipos: forjamento em matriz aberta ou livre e forjamento em matriz fechada.



Figura 30: Forjamento em matriz aberta.

Fonte: CHAVES, 2015.

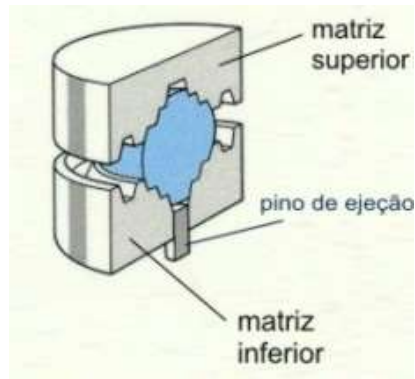


Figura 31: Forjamento em matriz fechada.

Fonte: CHAVES, 2015.

No processo de fundição, podemos conseguir as peças desejadas através do derramamento de metal líquido dentro um molde com medidas e formato próximos ao da peça final a ser fabricada, é um processo versátil pela possibilidade de obter peças com formatos e tamanhos variados, de maneira econômica e de peças com geometria complexa. Existem diversos processos de fundição: fundição por gravidade, por centrifugação, sob pressão e de precisão, tudo depende da qualidade, custo e tempo exigido para a peça a ser fabricada.



Figura 32: Processo de fundição por centrifugação.

Fonte: METSA INDUSTRIAL, 2012.

O processo de usinagem é um processo de fabricação que consiste na remoção de material sob a forma de cavaco, ou seja, a partir de uma peça bruta, obtemos uma peça com dimensões, formatos e acabamento superficial desejado. Neste processo, temos uma

ferramenta com dureza maior que a do material a ser usinado, onde o mesmo, por atrito, retira material (cavaco) da peça de acordo com o movimento de avanço e movimento de corte.



Figura 33: Usinagem de uma cruzeta em aço SAE 8620.

Fonte: SOLUÇÕES EM CAD/CAM, 2011.

2.10 FABRICANTES

O eixo cardan tem diversas aplicações e com isso, inúmeros fabricantes, entretanto, quando pensamos em aplicações para indústria pesada, como por exemplo, utilização do eixo cardan para laminadores, os números de fabricantes são limitados, principalmente, pelo porte e características necessárias para realizar tal tipo de trabalho.

Entre os maiores fabricantes, temos:

2.10.1 GWB

Empresa de origem alemã, inaugurada em 1946, oferecem eixos cardans do tipo furo de mancal fechado (projetado para utilização em veículos comerciais e aplicações da engenharia mecânica de forma geral) e de furo de mancal bipartido (utiliza-se para trabalhos pesados e super pesado). A GWB oferece eixos cardans variando de 2.400 a 16.300.000 Nm de torque, um dos maiores eixos cardans disponíveis no mercado.

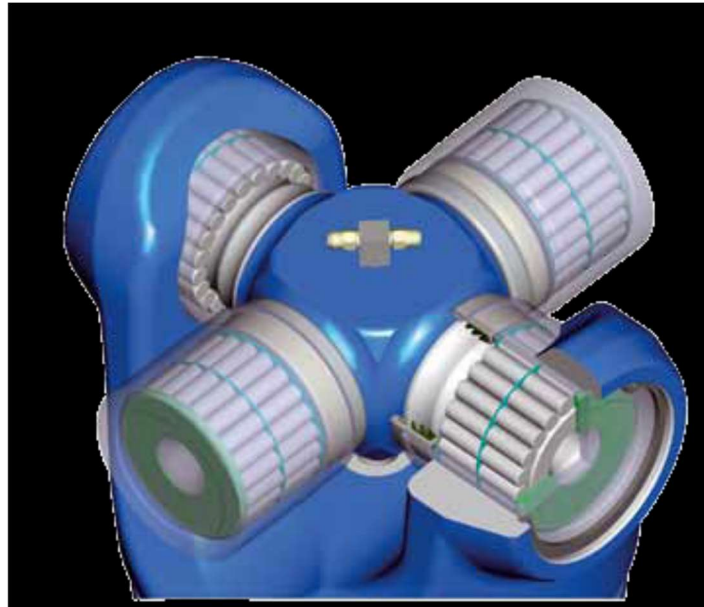


Figura 34: Furo de mancal fechado.

Fonte: GWB, 2015.

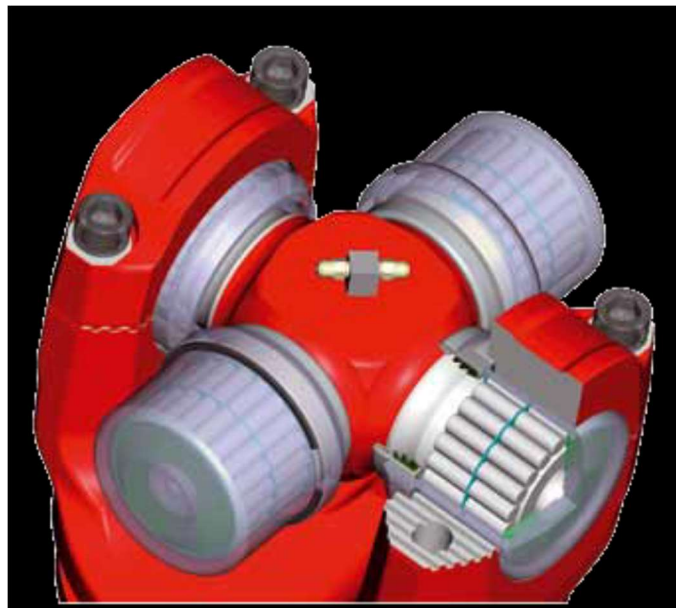


Figura 35: Furo de mancal bipartido.

Fonte: GWB, 2015.

Em meados dos anos 2000 foi incorporada pelo grupo Dana Corporation. A Dana Corporation foi iniciada em 1904 por Clarence Spicer em Nova Jersey, EUA, primeiramente conhecida como Spicer Manufacturing Corporation, apenas em 1946 é renomeada como Dana Corporation. Ao longo dos anos a Dana vem incorporando outras empresas do ramo, como por exemplo: Victor Gasket Manufacturing Company, Reinz Company, Plumley Rubber

Company de Paris, Clark-Hurth Components da Ingersoll-Rand, Long Manufacturing e GWB.

Séries:

- 687/688
 - 35.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 100 a 225 mm
 - Aplicações: veículos ferroviários, usinas de laminação, acionamentos marítimos e fábricas de construção de máquinas em geral.

- 587
 - 57.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 225 a 285 mm
 - Aplicações: veículos ferroviários, usinas de laminação, acionamentos marítimos e fábricas de construção de máquinas em geral.

- 390
 - 255.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 285 a 435 mm
 - Aplicações: veículos ferroviários, acionamentos marítimos, sistemas de guindastes, máquinas para papel e fábricas de construção de máquinas em geral.

- 392/393
 - 1.150.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 225 a 550 mm

- Aplicações: usinas de laminação, acionamento de calandras, fábricas de construção de máquinas pesadas em geral.
- 492
 - 1.300.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 285 a 550 mm
 - Aplicações: usinas de laminação, acionamento de calandras, fábricas de construção de máquinas em geral, extremamente carregadas.
- 498
 - 15.000.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 600 a 1.200 mm
 - Aplicações: unidades de transmissão de laminadores de grande porte e fábricas de construção de máquinas pesadas.
- 587/190/390
 - 130.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 275 a 405 mm
 - Aplicações: veículos ferroviários, usinas de laminação, acionamentos marítimos, acionamento de calandras, máquinas para papel e fábricas de construção de máquinas em geral.

392/393

- 1.053.000 Nm de Torque
- Diâmetro do flange: 225/315 a 550/710 mm
- Aplicações: usinas de laminação.

2.10.2 Voith GmbH&Co. KGaA

A Voith GmbH & Co. KGaA foi fundada em 1867 na Alemanha, no Brasil começou a atuar em 1905, entregando turbinas para hidrelétricas. A Voith atua em diversos segmentos, como: automotivo, siderúrgico, alimentício, hidrelétrico, entre diversos outros. No segmento de eixos cardans, este fornecedor oferece basicamente 4 séries:

- S
 - 250 a 35.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 58 a 225 mm

- R
 - 32.000 a 1.000.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 225 a 550 mm

- CH
 - 26.000 a 19.440.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 350 a 1.460 mm

- E
 - 1.6000.000 a 14.000.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 590 a 1.220 mm

2.10.3 EPR

Empresa italiana, fundada em 1976 com atuação em diversos segmentos do mercado, assim como: energético, petroquímico, entre outros. Possuem 7 séries de eixos cardans:

- XA
 - 180 a 27.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 58 a 250 mm

- XB
 - 18.000 a 1.250.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 160 a 620 mm

- XC
 - 1.640.000 a 12.000.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 680 a 1.200 mm

- XL
 - 18.000 a 320.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 160 a 390 mm

- XM
 - 18.000 a 3.200.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 160 a 700 mm

- XF
 - 56.000 a 1.250.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 225 a 620 mm

- XS
 - 56.000 a 1.250.000 Nm de Torque
 - Diâmetro do flange: 160 a 620 mm

2.10.4 TecTor

Empresa brasileira fundada em 1986, atua na produção de catracas, eixos cardan, contra recuos, freios industriais, grampos de ancoragem, rodas livres e limitadores de torque.

Possuem eixos cadan com olhal fechado, indicado para torques mais baixos e olhal bi-partido, indicado para serviços exigem alto torque. Oferecem também 4 modelos distintos de eixos cardan.

- Tipo 1: Eixo cardan com tubo compensatório.

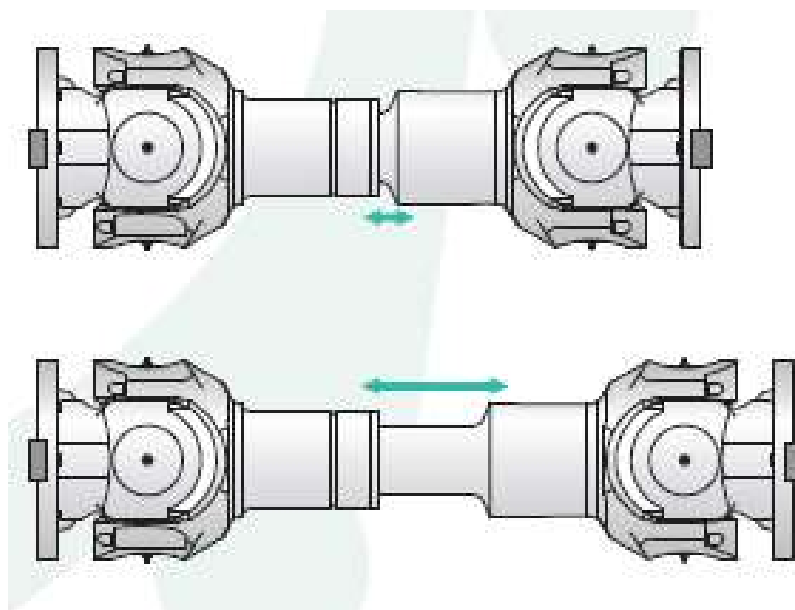


Figura 36: Eixo cardan com tubo compensatório.

Fonte: TECTOR, 2014.

- Tipo 2: Eixo cardan com tubo e sem curso.



Figura 37: Eixo cardan com tubo e sem curso.

Fonte: TECTOR, 2014.

- Tipo 3: sem tubo e com curso compensatório (extra curto).

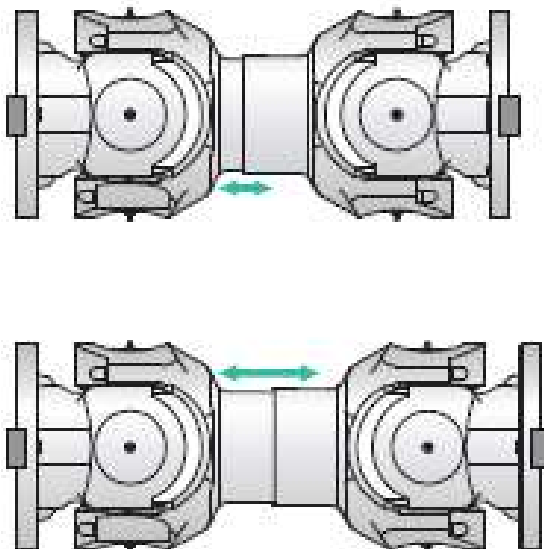


Figura 38: Sem tubo e com curso compensatório (extra curto).

Fonte: TECTOR, 2014.

- Tipo 4: sem tubo e sem curso

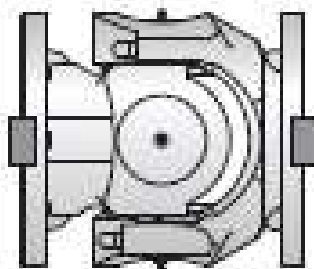


Figura 39: Sem tubo e sem curso.

Fonte: TECTOR, 2014.

Possuem as seguintes linhas de eixos:

- Linha Bi-partido
 - Tipo 1: Com tubo de curso compensatório
 - 23.500 a 479.000 Nm de Torque

- Diâmetro do flange: 225 a 480 mm
 - Tipo 2: Com tubo sem curso compensatório
 - 23.500 a 479.000 Nmde Torque
 - Diâmetro do flange: 225 a 480 mm
 - Tipo 3: Sem tubo com curso compensatório, extra curto
 - 23.500 a 479.000 Nmde Torque
 - Diâmetro do flange: 225 a 480 mm
 - Tipo 4: Sem tubo e sem curso compensatório
 - 23.500 a 479.000 Nmde Torque
 - Diâmetro do flange: 23.500 a 479.000 Nm
- Linha Olhal Fechado Linha Leve e Pesado
- Tipo 1: Com tubo de curso compensatório
 - 750 a 109.000 Nmde Torque
 - Diâmetro do flange: 100 a 390 mm
 - Tipo 2: Com tubo sem curso compensatório
 - 750 a 109.000 Nmde Torque
 - Diâmetro do flange: 100 a 390 mm
 - Tipo 3: Sem tubo com curso compensatório, extra curto
 - 750 a 109.000 Nmde Torque
 - Diâmetro do flange: 100 a 390 mm

- Tipo 4: Sem tubo e sem curso compensatório
 - 750 a 109.000 Nmde Torque
 - Diâmetro do flange: 100 a 390 mm

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ESTUDO DE CASO

Uma indústria da região utiliza um eixo cardan em seus componentes para efetuar a laminação, onde este eixo é acoplado a uma caixa redutora de um lado e acoplado as um dos cilindros de trabalho que servem para a laminação da chapa, lembrando que em cada cadeira de laminação possui 2 eixos cardan, um superior e outro inferior.

Para a segurança dos equipamentos envolvidos este eixo conta com um pino fusível assim denominado, com a finalidade de proteger tanto a caixa redutora quando o próprio eixo de quebra , sendo assim quando o processo sofre uma sobrecarga acentuada este pino vem a se partir liberando o eixo do acoplamento com a caixa redutora, com isso protege os equipamentos, mas não evita uma parada de produção.

Abaixo vamos falar algumas características deste processo para um melhor entendimento com as limitações dimensionais.

- Largura de entrada e saída (mm): no mínimo 610 e no máximo 1015
- Espessura de entrada (mm): no mínimo 2,00 e no máximo 2,40
- Espessura de saída (mm): no mínimo 0,17 e no máximo 0,55

3.1.1 Características do eixo cardan já utilizado dentro desta indústria

É um eixo produzido pelo fabricante KOYO onde é composto pelos seguintes componentes:

- 1 eixo
- 16 parafusos M 39 x 3
- 2 juntas
- 1 acoplamento

- 4 chavetas
- 8 parafusos cabeça cilíndrica com sextavado interno M18 x 70mm, passo 2,50mm, rosca parcial, em aço de resistência 12.9 grau A
- 4 parafusos cabeça cilíndrica com sextavado interno M18 x 50mm, passo 2,50mm, rosca total, em aço de resistência 12.9 grau A
- 1 anel de encosto
- 8 arruelas de pressão simples, extremidades retas, forma B, Diâmetro nominal 16mm, em aço
- 8 parafusos cabeça sextavada, M16 x 50mm, passo 2mm, rosca parcial, em aço de resistência 12.9, Grau B

O eixo cardan dimensionado será utilizado na Cadeira nº 5 de um laminador, onde um par de eixos cardan atuam conectando o cilindro de laminação a saída de uma caixa multiplicadora, com razão 2,694/1, que está acoplada a um motor elétrico com potência de 4500kW (6118,3 cv) e velocidade variando entre 240 e 480 rpm. O eixo em questão trabalha em um ângulo de 8° e Torque Máximo de 700.000 Kgf.cm (68.646,55 Nm), possuindo flange com 400mm de diâmetro (número de furos na flange – 10) e 1950mm de comprimento.

Nesta mesma indústria também possui uma linha de laminação que utiliza outro tipo de eixo no caso com acoplamento parecido com uma engrenagem, neste caso a deformação plástica do material atrelada com a redução da seção transversal é inferior à do laminador que utiliza o eixo cardan.

3.2 DIMENSIONAMENTO

Este tipo de projeto deverá minimizar ou até mesmo excluir qualquer possibilidade de danos materiais ou riscos a pessoas envolvidas, deverá contar com cálculos precisos e testes realizados antes de se produzir em larga escala.

O projeto se apoiará nos métodos de seleção para eixos cardan dos catálogos dos fabricantes GWB, Voith e Tector.

As principais informações necessárias para a seleção e dimensionamento do eixo cardan são:

Torque Máximo;

Torque Calculado;

Vida útil estimada;

Ângulo Máximo de trabalho;

Rotação de trabalho;

Comprimento de trabalho do Eixo Cardan;

Comprimento fechado do Eixo Cardan.

A escolha do tipo de cardan a ser utilizado é influenciado através do torque nominal (T_n) do sistema e o fator de serviço (K). O torque contínuo do sistema (T_c), considerando o fator de segurança pode ser calculado pelas seguintes expressões:

$$\tau = 97400 \frac{Pot}{\omega}$$

Equação 1.

Onde,

τ – torque kgf.cm;

Pot – Potência em kW;

ω – rotação em rpm;

$$T_c = T_n \times K$$

Equação 2.

Onde:

T_m = Torque máximo

T_n = Torque nominal do sistema

K = Fator de serviço

Quadro 1: Fator K

Condições de carga	Fator K
Carga contínua	1,2 a 1,5
Choques leves	1,5 a 2,0
Choques médios	2,5
Choques pesados	3,0
Choques extremos e reversos	4,0 a 6,0

Nestas condições é realizado o dimensionamento com fator de segurança considerando uma vida útil de 5000 h. É possível realizar um cálculo mais aprimorado, caso as informações estejam disponíveis através da equação 3:

Cálculo do Torque Contínuo (T_c):

$$T_c = T_n \times K_1 \times K_2 \times K_3$$

Equação 3.

3.2.1 Fator k_1

O fator K_1 especifica o Fator de Choque, relacionado ao tipo de motor que irá acionar o eixo cardan.

Quadro 2: Fator K_1 .

Acionamento Fator K_1	Com elemento elástico	Sem elemento elástico
Motor elétrico	1,00	1,00
Gasolina 4 ou + cilindradas	1,25	1,75
Gasolina 1 a 3 cilindradas	1,50	2,00
Diesel 4 ou + cilindradas	1,50	2,00
Diesel 1 a 3 cilindradas	2,00	2,50

3.2.2 Fator k_2

Fator K_2 aborda o Fator Vida Útil estimada, superior a 5000 horas.

Quadro 3: Fator K_2 .

Vida (x10 ³ horas)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Fator K_2	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,9

3.2.3 Fator k3

Este fator especifica o Fator Angular, ou seja, o ângulo que o eixo cardan irá trabalhar.

Quadro 4: Fator K3.

Ângulo de Trabalho	≤ 3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
Fator K2	1	1,15	1,3	1,4	1,5	1,65	1,8	1,9	2	2,1	2,3	2,4	2,5

3.3 ESPECIFICAÇÃO DO EIXO

Dimensionamento baseado em projeto de laminador de empresa multinacional referência no mercado metalúrgico.

Dados de projeto:

Potência do motor 4500 kW;

Rotação do motor 240/480 rpm;

Caixa multiplicadora: 2,694/1

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Equação 4.

Onde,

i – relação de transmissão;

ω_1 – rotação de entrada em rpm;

ω_2 – rotação de saída em rpm;

$$\frac{1}{2,694} = \frac{240}{\omega_{min}}$$

$$\omega_{min} = 646,56 \text{ rpm}$$

$$\frac{1}{2,694} = \frac{480}{\omega_{max}}$$

$$\omega_{\max} = 1293,12 \text{ rpm}$$

$$\tau_{\max} = 97400 \frac{4500}{646,56}$$

$$\tau_{\max} = 678000 \text{ kgf.cm}$$

$$\tau_{\min} = 97400 \frac{4500}{1293,12}$$

$$\tau_{\min} = 339000 \text{ kgf.cm}$$

Considerando que caso um dos eixos do par venha a falhar todo o torque fornecido pelo motor será aplicado a um unico eixo, será adotado o valor do torque máximo como torque nominal (T_n) para projeto. É de conhecimento que durante o acionamento e outras situações extraordinárias o motor pode extrapolar o valor de torque máximo previsto, entretanto considerando a situação de segurança adotada para o torque nominal este efeito será desconsiderado.

Cálculo do Torque Contínuo (T_c):

$$T_c = T_n \times K_1 \times K_2 \times K_3$$

Adotando:

$K_1 = 1,0$ (motor elétrico);

$K_2 = 1,7$ (vida útil de 30000 horas);

$K_3 = 1,4$ (ângulo de trabalho de 8°).

$$T_c = 678000 \times 1,0 \times 1,7 \times 1,4$$

$$\mathbf{T_c = 1613640 \text{ kgf.cm ou } 159 \text{ kN.m}}$$

Portanto, devemos selecionar um eixo cardan que suporte um torque máximo de 159 kN.m.

Dentre os catálogos dos fabricantes, o mais indicado para as condições de projeto foi o modelo Série R da Voith.

Esta série é recomendada para um intervalo de torque entre 32 e 1.000 kN.m e flange variando entre 225 a 500 mm de diâmetro.

Dentro da Série R temos vários tamanhos, sendo escolhido o tamanho 390,8, pois o mesmo suporta até 160 kN.m, tendo comprimento mínimo de 1.410 mm e valor de k (flange) variando de 390 a 435 mm.

3.4 INSTALAÇÃO DO EIXO

Ao realizar a instalação de um eixo cardan, devemos nos preocupar em qual ambiente o mesmo será montado, pois devemos protegê-los de qualquer tipo de intempéries, para que não entre qualquer contaminante no interior do conjunto deslizante.

Outro ponto importante ao instalar o eixo cardan é o balanceamento do mesmo, observando a posição das contra-flanges. O balanceamento correto evita vibrações, aumentando a vida útil do eixo e resulta em uma operação mais suave. Para um balanceamento correto, podemos utilizar a norma DIN ISO 1940-1 (“Vibração Mecânica – Requisitos de Qualidade em Termos de Equilíbrio para Rotores em um estado (rígido) constante – Parte 1: Especificação e verificação das tolerâncias de equilíbrio”).

Quadro 5: Graus de qualidade de balanceamento para diferentes tipos de rotores.

Grau de balanceamento	$e_{adm} \omega$ (mm/s)	Tipos de rotores - exemplos
G4 000	4 000	virabrequim/acionamento ¹⁾ de motores diesel marítimos lentos ²⁾ com montagem rígida com número impar de cilindros;
G1 600	1 600	virabrequim/acionamento de grandes motores de dois tempos com montagem rígida;
G630	630	virabrequim/acionamento de grandes motores de quatro tempos com montagem rígida;
G250	250	virabrequim/acionamento de motores diesel marítimos com montagem flexível;
G100	100	virabrequim/acionamento de motores de quatro cilindros velozes ²⁾ com montagem rígida;
G40	40	virabrequim/acionamento de motores diesel rápidos ²⁾ com seis ou mais cilindros; motores completos (gasolina e diesel) para automóveis, caminhões e locomotivas ³⁾ ;
G16	16	rodas de automóveis, aros de rodas, assentos de rodas, eixos de acionamento; virabrequim/acionamento de motores de quatro tempos rápidos (gasolina ou diesel) com seis ou mais cilindros; virabrequim/acionamento de motores de automóveis, caminhões e locomotivas; eixos de acionamento (eixos de propulsores, eixos cardan) com requisitos especiais; partes de máquinas de prensagem; partes de maquinário agrícola; componentes individuais de motores (gasolina e diesel) de automóveis, caminhões e locomotivas; virabrequim/acionamento de motores com seis ou mais cilindros com requisitos especiais;
G6,3	6,3	partes de máquinas de processo de plantas; engrenagens principais de turbinas marítimas (marinha mercante); tambores centrífugos; cilindros de máquinas de papel; cilindros de impressão; ventiladores; rotores de turbinas aeronáuticas à gás compostas; volantes de inércia; impelidores de bombas hidráulicas; ferramenta e partes de máquinas em geral; armaduras grandes e médias de motores elétricos (motores elétricos com pelo menos 80 mm de altura do eixo) sem requisitos especiais; armaduras pequenas de motores elétricos, em geral de produção seriada, em aplicações tolerantes à vibração e/ou com isolamento de vibração; componentes individuais de motores com requisitos especiais;
G2,5	2,5	turbinas à gás e à vapor, incluindo turbinas principais marítimas (marinha mercante); rotores de turbo-geradores rígidos; tambores e discos de memória de computadores; turbo-compressores; acionamento de máquinas de ferramenta; armaduras grandes e médias de motores elétricos com requisitos especiais; armaduras elétricas pequenas não enquadradas em uma das duas categorias da classe de balanceamento G6,3; bombas acionadas por turbinas;
G1	1	acionamento de gravadores de fita e fonógrafo (gramofones); acionamento de retíficas; armaduras elétricas pequenas com requisitos especiais;
G0,4	0,4	fusos, discos, e armaduras de retíficas de precisão; giroscópios.

Fonte: DIN ISO 1940-1, 2003.

Onde e_{adm} é o desbalanceamento residual permissível específico em g.mm/kg, e ω é a velocidade angular em rad/s.

O valor de e_{adm} pode ser encontrado na tabela abaixo, onde o eixo horizontal representa a velocidade máxima de operação em RPM e o eixo vertical representa o desbalanceamento residual permissível em g.mm/kg de massa do rotor:

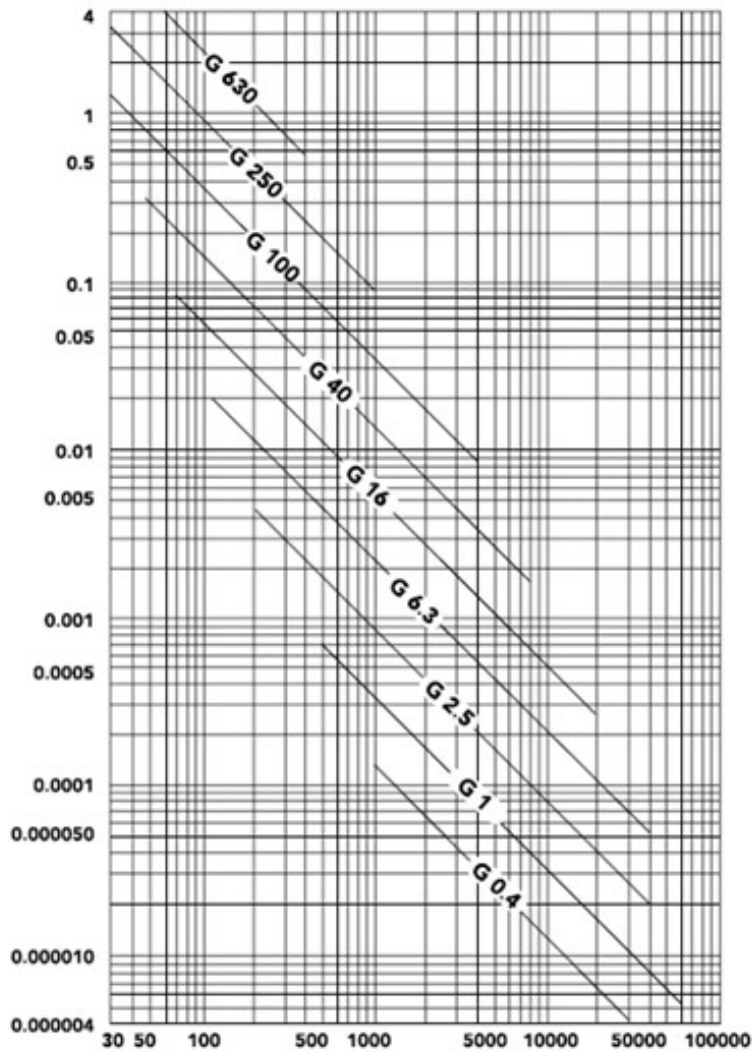


Figura 40: Graus de qualidade de balanceamento para diferentes tipos de rotores.

Fonte: DIN ISO 1940-1, 2003.

Antes da montagem, o colaborador deverá efetuar limpeza técnica nas faces do eixo cardan e contra-flanges. Para os parafusos de fixação, deverão seguir rigorosamente a especificação de aperto (torque) conforme o fabricante do eixo cardan, os parafusos devem possuir resistência mínima conforme norma DIN 931 classe 10.9 e as porcas estarem conforme norma DIN 980 classe 10.0, outrossim, caso necessário em ambientes onde há muita vibração, será necessário o uso de porcas auto-travante ou outro sistema de fixação.

3.5 MANUTENÇÃO DO EIXO CARDAN

3.5.1 Inspeção

A manutenção dos eixos cardan são de extrema importância, devemos ter um plano de manutenção preventiva bem estruturada para que não ocorra falhas no componente. O ponto de partida para sua manutenção é a etapa de inspeção, tal etapa ocorre durante a operação do componente, onde é observado qualquer anormalidade, como ruídos e desgastes prematuros. São itens de inspeção indispensáveis:

- Aperto dos garfos de entrada e saída;
- Frouxidão radial excessiva do eixo de entrada e saída;
- Aperto das extremidades da cruzeta;
- Movimento radial excessivo do eixo de deslizamento com ranhuras;
- Danos no eixo, contrapesos e tubos curvados;
- Plugues frouxos ou soltos;
- Elementos de fixação.

3.5.2 Falhas e possíveis causas

Nos tubos podemos observar torção, causados por torque excessivo, choque forte contra objeto imóvel ou pneus que travam subitamente enquanto giram.



Figura 41 - Tubo retorcido.

Fonte: SPICER, 2017.

Outra falha observada nos tubos são as soldas rompidas, provenientes de cargas de choque, soldagem inadequada ou problema de vibração.



Figura 42 - Solda rompida.

Fonte: SPICER, 2017.

Nas juntas universais podemos ter os seguintes problemas:

- Cruzeta da junta universal queimada
 - Causas prováveis: falta de lubrificação, lubrificante fora da especificação ou aplicação inadequada.



Figura 43 - Cruzeta da junta universal queimada.

Fonte: SPICER, 2017.

- Junta universal fraturada
 - Causas prováveis: cargas de torque excessivas, choque ou aplicação inadequada.



Figura 44 - Junta universal fraturada.

Fonte: SPICER, 2017.

- Escoriação das extremidades
 - Causas prováveis: Garfo curvado ou empenado, falta de lubrificação, montagem inadequada ou ângulo de operação excessivo.



Figura 45 - Escoriação das extremidades.

Fonte: SPICER, 2017.

- Marcas superficiais
 - Causas prováveis: Cargas de torque contínuas excessivas, ângulos excessivos da transmissão, garfo curvado ou empenado, emperramento dos entalhados do garfo de deslizamento ou parafusos em U apertados em excesso.



Figura 46 - Marcas superficiais

Fonte: Manual Spicer, 2017.

- Descamação
 - Causas prováveis: contaminação por água, lubrificação errada ou lubrificante fora da especificação.



Figura 47 – Descamação

Fonte: Manual Spicer, 2017.

- Garfo curvado
 - Causas prováveis: excesso de torque, aplicação inadequada ou remoção inadequada da junta universal.



Figura 48 - Garfo curvado

Fonte: Manual Spicer, 2017.

Outro equipamento comum de falhar é o garfo, podendo apresentar as seguintes falhas:

- Garfo fraturado
 - Causas prováveis: choque, torque excessivo, aplicação inadequada ou defeito no kit da junta universal.



Figura 49 - Garfo fraturado

Fonte: Manual Spicer, 2017.

- Espiga da forquilha quebrada
 - Causas prováveis: torque inadequado do retentor do rolamento ou instalação inadequada.

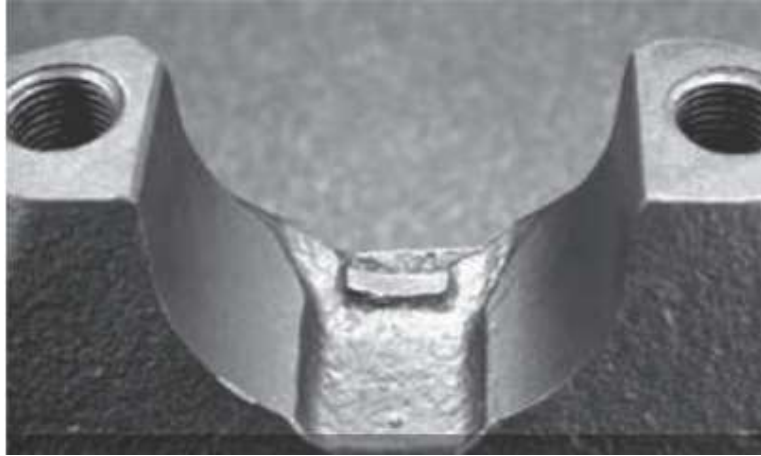


Figura 50 - Espiga da forquilha quebrada

Fonte: Manual Spicer, 2017.

Os eixos dos tubos podem apresentar fratura nas ranhuras de deslizamento, tendo como possíveis causas as cargas excessivas, choque ou aplicação inadequada.



Figura 51 - Fratura nas ranhuras de deslizamento

Fonte: Manual Spicer, 2017.

3.5.3 Lubrificação

Pelo fato do eixo cardan ser um elemento rotativo, a lubrificação é item imprescindível para o funcionamento correto, deverá ser utilizada graxa com base de sabão lítio com aditivos de extrema pressão e grau de consistência NLGI 2.

A graxa deve possuir características especiais, como consistência homogênea a base de óleo mineral e aditivos anticorrosivos, estabilidade e resistência à oxidação mecânica e água. Outro ponto de destaque é que a graxa deve ser compatível com o material de vedação, possuindo propriedades para operar sob temperaturas externas sem perder as características originais.

Para os eixos que funcionam 24 horas por dia, deverá ser realizado lubrificação a cada 20 dias, os pontos de lubrificação são apresentados com bicos graxeiros, cruzetas, luva dentada e nos copinhos.

São utilizados os seguintes itens para realizar a lubrificação:

- Graxa EP, NLGI 2;
- Engraxadeira;
- Parafusos, springtabs e braçadeiras para reposição;
- Parafusadeira ou ferramenta para aplicar torque.

Na montagem e desmontagem do eixo cardan para lubrificação poderemos encontrar algumas falhas, como cruzeta fundida, ocasionada por falta de lubrificação ou lubrificante incorreto, cruzeta com munhões, capa dos roletes ou castanhas marcadas com sulcos, causadas por roletes trabalhando em condições impróprias (torque em excesso) ou ponteira deslizante travada. Outros problemas encontrados são a descamação/perda de material no topo dos munhões ou na capa dos roletes em virtude de lubrificação incorreta, fraturas na cruzeta, flange e ponteira por esforços excessivos ou trancos.

Em caso de remoção e transporte do eixo cardan, devemos evitar apoiar o eixo diretamente no solo, procurar sempre apoiar em calços, tomando precaução para não danificar a graxadeira, pois irá causar problemas futuros no momento da lubrificação do cardan, igualmente, ao realizar o transporte, o mesmo deverá ser de forma lenta e contínua para evitar empenamentos, transportando sempre na horizontal e com o conjunto deslizante fechado.

As vibrações nos eixos cardan devem ser olhadas com atenção e podem estar associadas a diversas causas, como por exemplo: desalinhamento do eixo, rotação fora da especificação, desalinhamento dinâmico, picos de tensão durante o funcionamento, entre outros, devendo intervir de maneira corretiva se o problema for grave ou agendar manutenção preventiva, caso o problema não esteja comprometendo os componentes.

4 CONCLUSÃO

Após pesquisa bibliográfica, sobretudo junto aos catálogos dos principais fornecedores da transmissão cardan no mercado, foi verificada a existência de diversas soluções e métodos de dimensionamento fornecidos pelo fabricante, cada qual com sua capacidade específica, condição de trabalho e aplicação típica. Para o dimensionamento conforme o passo a passo estabelecido através dos catálogos é necessário que seja caracterizada a aplicação com informações de processo.

Além disso, caso o levantamento das informações e dados necessários para o dimensionamento sejam de maneira correta e atenciosa, irá elevar o nível de confiabilidade do projeto, gerando assim um resultado aceitável que atenderá a demanda exigida. Desta maneira, cabe ao projetista estabelecer os parâmetros a serem respeitados durante o projeto, além de informar qualquer tipo de informação ou dado que trará alguma peculiaridade ao mesmo, podendo assim ao final de todo o processo escolher um fabricante que atenda integralmente sua necessidade levando em consideração também a análise de seu custo final.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAVES, C. **Métodos mecânicos**. 2015. Disponível em: <http://eng-cleitonchaves.blogspot.com/2015/03/forjamento.html>. Acesso 27/07/2019.

CSN. **Produtos e serviços**. Disponível em: www.csn.com.br Acesso 26/08/2019.

GWB. **Eixo Cardan para aplicações industriais**, 2015. Disponível em: <https://gwbcardans.com.br/downloads/> Acesso 03/07/19

METSA INDUSTRIAL. **Fundição por centrifugação**. 2012. Disponível em: <http://metsaindustrial.com.br/fund1.html>. Acesso 27/07/2019.

MOREIRA, C. A.; MAZIERO, J. V. G.; YANAI, K. **Equipamento para ensaios estáticos de transmissões a cardan**. Bragantia, Campinas, v. 61, n. 1, 77-79, 2002.

TORESAN JUNIOR, W. **Uma metodologia para o estudo da dinâmica de eixos rotativos de transmissão, com aplicações em semi-eixos homocinéticos e eixos cardan de dupla**

seção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Tese de Doutorado, Porto Alegre, 2001.

SPICER. **Entendendo os Eixos Cardans**, 2017. Disponível em: <https://spicer.com.br/catalogo/>
Acesso 04/07/2019.

SOLUÇÕES EM CAD/CAM. **Usinagem de Uma Cruzeta em SAE 8620**. 2011. Disponível em: <http://mauricio-cadcam.blogspot.com/2011/12/blog-post.html>. Acesso 27/07/2019.

SPICER. **Cardans, Manual de Lubrificação**, 2017. Disponível em: <https://spicer.com.br/catalogo/> Acesso 04/07/2019

VOITH, **High-Performance Universal Joint Shafts**, 2012. Disponível em: <http://www.voith.com/br/products-services/power-transmission/universal-joint-shafts-10128.html> Acesso 04/07/2019

ZAUPACARDANS. **O que é Eixo cardan**. Disponível em: <http://www.zaupacardans.com.br/cardans/o-que-e-eixo-cardan.html>. Acesso 26/03/2019.

SOARES, A. B. C.; FILHO, F. F. O. L.; PEREIRA, R. O. **Aumentar a produtividade, confiabilidade e desempenho da linha de laminação de tiras a frio – 1 (LTF-1)**. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA), Volta Redonda – RJ, 2011.

METALTHAGA. **Como funciona o processo de laminação de alumínio?** Disponível em: <http://www.metalthaga.com.br/artigos/como-funciona-o-processo-de-laminacao-de-aluminio>. Acesso 01/10/2019.

ANEXO I