

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HÉRCULES DE MELO BARCELOS
STEFANO MAURIZIO EMILIO GALLO

ANÁLISE DE FALHA DAS UNIÕES PARAFUSADAS DO
EIXO DE TRANSMISSÃO DO BERÇO Nº1, NO COILBOX DO
LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE (LTQ).

VITÓRIA
2011

HÉRCULES DE MELO BARCELOS
STEFANO MAURIZIO EMILIO GALLO

Análise de falha das uniões parafusadas do eixo de transmissão do Berço nº1, no COILBOX do laminador de tiras a quente (LTQ)

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a avaliação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Friedrich Loeffler Neto

VITÓRIA
2011

**HÉRCULES DE MELO BARCELOS
STEFANO MAURIZIO EMILIO GALLO**

**ANÁLISE DE FALHA DAS UNIÕES PARAFUSADAS DO EIXO DE
TRANSMISSÃO DO BERÇO Nº1, NO COILBOX DO LAMINADOR DE
TIRAS A QUENTE (LTQ)**

Projeto de Graduação apresentado ao Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em ____ de _____ de 2011

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Friedrich Loeffler Neto
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador.

Prof Márcio Coelho de Mattos
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof Fernando César Meira Menandro
Universidade Federal do Espírito Santo

Aos nossos pais que nos deram a vida.
Aos nossos familiares que tanto nos apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos especialistas e inspetores mecânicos da empresa AMT, na qual estagiamos, pelo apoio e pelas suas liberações concedidas, para que se pudesse realizar esse estudo em campo. Em especial, agradecemos ao Engenheiro Arnaldo Carneiro Salles, por ter representando a Empresa, cedido os dados necessários para a realização desse trabalho, e por nos orientar quanto às visitas feitas em campo.

Agradecemos, também, ao Professor Dr. Carlos Friedrich Loeffler Neto, pelo total suporte na realização desse trabalho, orientando de forma presente, norteador a linha de raciocínio para a realização desse projeto de graduação.

“Até aqui nos ajudou o Senhor”

I Samuel 7:12

RESUMO

Utiliza os conceitos e modelos de engenharia, para análise e identificação de causas das falhas, ocorridas em uniões parafusadas do eixo de transmissão do berço nº1 que é um componente do *Coilbox*, equipamento do laminador de tiras a quente (LTQ), pertencente ao grupo Arcelor Mittal Steel (AMT) e fonte de pesquisa deste estudo. Propõe uma solução para que o problema seja eliminado, aumentando assim o grau de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade do equipamento, diminuindo desta maneira, os prejuízos causados pelas falhas repentinas que compõem esse estudo de caso. Faz-se uma análise de esforços, considerando o caráter dinâmico da solicitação de trabalho, analisando assim a possibilidade da ocorrência do fenômeno da fadiga na redução da capacidade resistiva do material, de acordo com as metodologias usuais constantes dos textos, referentes ao dimensionamento de componentes mecânicos e as normas de projeto nesse ramo industrial. Consideram-se as particularidades operacionais, as quais estão submetidas às uniões parafusadas e demais equipamentos adjacentes, de forma a identificar com melhor precisão, os fatores determinantes da falha. As memórias de cálculo e os principais conceitos de projeto, são explicitados no corpo do texto deste trabalho.

Palavras-chave: Falhas em uniões parafusadas – fonte de pesquisa. Laminador de tiras a quente do grupo – AMT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo de produção siderúrgico Fonte: AMT Tubarão (2011).....	20
Figura 2: Foto ilustrativa do Pátio de Placas. Fonte: AMT (2011).	22
Figura 3: Vista lateral (do sistema supervisório) do forno de reaquecimento de placas. Fonte: AMT (2011).....	22
Figura 4: Foto Ilustrativa do Forno de Reaquecimento de Placas. Fonte: AMT (2011).	23
Figura 5: Desenho esquemático do Laminador de Desbaste. Fonte: AMT (2011)....	24
Figura 6: Desenho esquemático do Coilbox. Fonte: AMT (2011).....	24
Figura 7: Foto ilustrativa do Coilbox. Fonte: AMT (2011).	25
Figura 8: Foto ilustrativa do Trem Acabador. Fonte: AMT (2011).	26
Figura 9 – Foto ilustrativa do <i>Laminar Flow</i> . Fonte: AMT (2011).....	26
Figura 10: Vista geral do Laminador de Tiras a Quente da CST Fonte: AMT (2011).	27
Figura 11: Comparação utilizando ou não o Coilbox Fonte: AMT (2011).	28
Figura 12: Apresentando o Coilbox com o esboço Fonte: AMT (2011). Fonte: AMT (2011).....	29
Figura 13: Sequência de transferência ativa, para bobinas de elevado peso. Fonte: AMT (2011).	29
Figura 14: Design do Coilbox visto do lado acionamento, com o esboço já pré- bobinado. Fonte: AMT (2011).....	32
Figura 15: Transdutor angular localizado a esquerda do rolo 1A. Fonte: AMT (2011).	33
Figura 16: Transdutor angular ligado a direita do rolo 1B. Fonte: AMT (2011).....	34
Figura 17: Esquema de posicionamento do Coilbox para calandrar o esboço e bobiná-lo Fonte: AMT (2011).....	35
Figura 18: Esquemáticos dos movimentos sendo que o 1º representa o estagio de recebimento, 2º de transferência, 3º de retorno a posição horizontal e 4º de retorno ao recebimento. Fonte: AMT (2011).....	36
Figura 19: Foto no momento da quebra de carepas durante o bobinamento do esboço Fonte: AMT (2011).....	38

Figura 20: Fluxo do sistema de transmissão dos rolos 1A e 1B. Fonte: AMT (2011).	39
Figura 21: Ilustração apresentando o tipo de acoplamento lado rolos do CR1. Fonte: AMT (2011).	40
Figura 22: Ilustração apresentando o tipo de acoplamento que fica na ponta dos eixos-cardan. Fonte: AMT (2011).	41
Figura 23: Vista no plano yx ou superior, apresentando a distância fixa entre centros dos eixos-cardan lado motriz e o ângulo θ esférico. Fonte: AMT (2011).	43
Figura 24: Vista no plano zx, na lateral direita do conjunto, apresentando a constante de posição x e limitada pela montagem do equipamento. Fonte: AMT (2011).	44
Figura 25: Modelo do sistema de coordenadas esféricas aplicado ao CR1B lado motriz Fonte: Cálculo I, James Stewart.	44
Figura 26: Em “a” tem-se o movimento de bobinamento e em “b” a transferência para o CR2. Fonte: Modelo de processo da AMT (2011).	47
Figura 27: Apresentando o eixo- cardan com as seus segmentos e o “ d_f ” de deslocamento. Fonte: AMT (2011).	48
Figura 28: Para a construção do esquemático, ligamos os pontos onde estão os centros dos rolos do CR1 com local de articulação Fonte: AMT (2011).	49
Figura 29: Esquema do movimento do CR1, com os pontos 1A e 1B que são comuns aos rolos 1A e 1B e aos segmentos F’s dos eixos-cardan devido o acoplamento.	50
Figura 30: O esquema apresenta o plano zy e as posições de 1B respectivamente. Fonte: Elaborado pelo autor.	56
Figura 31: O esquema apresenta o plano zy e as posições de 1A respectivamente. Fonte: Elaborado pelo autor.	56
Figura 32: Distribuição de forças no início do estágio Fonte: Elaborado pelo autor.	77
Figura 33: Distribuição de forças no fim do estágio Fonte: Elaborado pelo autor	78
Figura 34 – Esquemático do momento da força P do segmento F sobre os parafusos Fonte: elaborado pelo autor	80
Figura 35: Máquina para corte do laboratório de materiais Fonte: laboratório de materiais UFES	87
Figura 36: Máquina para medição de dureza. Fonte: laboratório de materiais UFES.	87
Figura 37: Prateleira com lixas Fonte: laboratório de materiais UFES	89

Figura 38: Máquina para o polimento para preparação da amostra Fonte: laboratório de materiais UFES89

Figura 39: Superfície atacada com Nital 5% e com ampliação em 10000x no microscópio eletrônico nikon eclipse ma200 Fonte: Laboratorio de materiais/UFES 90

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: Utilizando mandril, sem mandril e sem mandril Fonte: AMT (2011)...	37
GRÁFICO 2: Temperaturas de entrada no Acabamento. Fonte: AMT (2011).....	37
GRÁFICO 3: Monitoramento de formação do esboço da bobina. Fonte: Ibaanalizer, software de monitoramento utilizado pela empresa.	46
GRÁFICO 4: Curvas de posição geradas pelo software Ibaanalizer . Fonte: AMT (2011).....	49
GRÁFICO 5: Nos pontos selecionados estão as curvas que apresentam mudança repentina de aceleração. Fonte: Software de monitoramento Ibaanalizer AMT (2011).	63
GRÁFICO 6: Posição.	64
GRÁFICO 7: Velocidade.	65
GRÁFICO 8: Aceleração.	66
GRÁFICO 9: Força com maior expressão no início do 4º estágio. Fonte: Elaborado pelo autor.	74
GRÁFICO 10: Força com maior expressão no início do 4º estágio. Fonte: Elaborado pelo autor.	75
GRÁFICO 11: Força com maior expressão no início do 4º estágio. Fonte: Elaborado pelo autor.	75
GRÁFICO 12: Curvas onde estão as maiores forças encontradas. Fonte: Sistema de monitoramento Ibaanalizer AMT (2011).	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Configuração inicial dos ângulos esféricos.....	45
Tabela 2: Configuração inicial dos ângulos de posição.....	54
Tabela 3: Comprimento dos arcos.	54
Tabela 4: Velocidades tangenciais estimadas de acordo com o tempo fornecido pelo Ibaanalyzer.....	55
Tabela 5: Valores das velocidades angulares médias obtidas para cada eixo-cardan.	57
Tabela 6: Velocidades relativa de F vista por E.	58
Tabela 7: Posições e velocidades dos CR's.....	60
Tabela 8: Aceleração de coriolis devido o deslizamento entre os corpos A e B dos eixos-cardan CR1B e CR1A [m/s^2].....	61
Tabela 9: Acelerações normais devido a ω do sistema em [m/s^2].	61
Tabela 10: Forças de Coriolis no 1º estágio.....	62
Tabela 11: Forças normais no 1º estágio.	62
Tabela 12: Posições analisadas na curva C_1	64
Tabela 13: Forças tangenciais máximas encontradas para o 1º estágio.	67
Tabela 14: Equações relacionadas às curvas de aceleração do 1º estágio.....	67
Tabela 15: Forças de coriolis no 2º estágio.....	68
Tabela 16: Forças Normais no 2º estágio.	68
Tabela 17: Forças tangenciais máximas encontradas no 2º estágio.....	69
Tabela 18: Equações relacionadas às curvas de aceleração do 2º estágio.....	69
Tabela 19: Forças de coriolis no 3º estágio.....	70
Tabela 20: Forças Normais no 3º estágio.	70
Tabela 21: Forças tangenciais máximas encontradas no 3º estágio.....	71
Tabela 22: Equações relacionadas às curvas de aceleração do 3º estágio.....	71
Tabela 23: Forças de coriolis no 4º estágio.....	72
Tabela 24: Forças Normais no 4º estágio.	72
Tabela 25: Forças tangenciais máximas encontradas no 4º estágio.....	73
Tabela 26: Equações relacionadas às curvas de aceleração do 4º estágio.....	73
Tabela 27: Especificações de classe SAE para parafusos de aço.....	83

Tabela 28: Comparação entre resistência a tração e dureza na escala HRC	86
Tabela 29: Interpretação dos dados obtidos	88

LISTA DE ABREVIATURAS

AMT- Arcelor Mittal Tubarão

CR1 – Cradle Roll1 ou Berço nº1

CR2 – Cradle Roll2 ou Berço nº2

CR1A – Eixo-cardan fixado ao rolo 1ª do Berço nº1

CR1B - Eixo-cardan fixado ao rolo 1ª do Berço nº1

CST – Companhia Siderúrgica de tubarão

FM- Finishing Mill

LTQ – Laminador de tiras a quente

PPC – Planejamento, Programação e controle

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_{me}^{total} – Tensão total media sobre os parafusos

$A_{t,p}$ – Área da seção transversal do parafuso

$F_{f,p}$ – Força peso do segmento F sobre os parafusos

F_i – Carga inicial

$F_{max,alt}$ – Força máxima alternada

$F_{min,alt}$ – Força mínima alternada

M – Somatório de momentos

P_f – Força peso do segmento F (N)

$a_{(t)}$ – Aceleração em função do tempo (mm/s²)

\vec{a}_E – Aceleração do segmento E (m/s²)

$\vec{a}_{F/E}^c$ – Aceleração de coriolis de “F” vista por “E” (m/s²)

$\vec{a}_{F/E}^n$ – Aceleração normal de “F” vista por “E” (m/s²)

$\vec{a}_{F/E}^t$ – Aceleração tangencial de “F” vista por “E” (m/s²)

\vec{a}_F – Aceleração do segmento F (m/s²)

$\vec{a}_{e/o1}^n$ – Aceleração normal de E vista pela origem (m/s²)

$\vec{a}_{e/o1}^c$ – Aceleração de coriolis de E vista pela origem (m/s²)

$\vec{a}_{e/o1}^t$ – Aceleração tangencial de E vista pela origem (m/s²)

\vec{a}_e – Aceleração do segmento E (m/s²)

\vec{a}_{o1} – Aceleração da origem do sistema (m/s²)

m_f – Massa do segmento (kg)

m_t – Massa total do conjunto eixo-cardan (kg)

r_c – Raio do centroide do Eixo-cardan (m)

$s_{(t)}$ – Posição em função do tempo (mm)

$v_{(t)}$ – Velocidade em função do tempo (mm/s)

$v_{F/E}$ – Velocidade linear de F em relação a E (m/s)

v_m^t – Velocidade tangencial média (m/s)

σ_{med} – Tensão média (GPa)

$\sigma_{mf,p}$ – Tensão média do segmento F sobre o parafuso (GPa)

σ_t – Tensão de aperto (GPa)

$\omega_{m,cr}^2$ – Velocidade angular média do Eixo-cardan (rd/s)

ΔS – Variação dos arcos para os pontos 1ª e 1B (m)

Δt – Intervalo de tempo durante a abertura dos arcos(s)

d – Diâmetro nominal do parafuso

h – Altura da chaveta acima da face do flange (m)

M – Distância da cruzeta a face do flange (m)

MF_c – Momento da força coriolis (Nm)

MF_n – Momento da força normal (Nm)

MF_t – Momento da força normal (Nm)

M_t – Massa total do eixo (kg)

$\varnothing A$ – Diâmetro do flange de acoplamento do eixo (m)

T_{ap} – Torque de aperto do parafuso (Nm)

θ – Ângulo polar horizontal (°)

Φ – Ângulo polar vertical (°)

k – Constante de torque

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Comentários Preliminares	18
1.2	O objetivo e o problema de pesquisa	18
1.3	A base metodológica construída	18
2	A empresa	19
2.1	Descrições do processo siderúrgico	19
2.2	Implantação do LTQ.....	21
2.3	Conceituação do processo de laminação a quente e características do equipamento	21
3	Coilbox.....	28
3.1	Descrição do equipamento.....	29
3.1.1	Apresentação dos Dados técnicos operacionais	30
3.1.2	Principais componentes do Coilbox:.....	30
3.2	Descrições do Berço nº1 ou CR1	32
3.2.1	Dinâmica do conjunto associada à transferência de bobina	33
3.3	Vantagens e desvantagens da tecnologia Coilbox.....	36
3.3.1	As vantagens de sua utilização	36
3.3.2	As desvantagens no uso da tecnologia Coilbox	38
4	Estudo sobre as falhas dos parafusos do sistema de acoplamento dos eixos-cardan com os Rolos do CR1	39
4.1	Comentários preliminares	39
4.2	Condições de acoplagem dos eixos-cardan com os rolos do CR1	39
4.3	ANÁLISES DINÂMICAS DOS ESFORÇOS	42
4.3.1	Histórico de falhas	42
4.3.2	Estudo dos movimentos do CR1	43
4.3.3	Análise do 1º estágio – Receber esboço a bobinar	48

4.3.4	Análise geral das forças encontradas	74
5	Análise dos ensaios de dureza e microestrutura	86
5.1	Comentários preliminares sobre o ensaio de dureza	86
5.1.1	Procedimentos e resultados do ensaio de dureza	87
5.2	Comentários preliminares sobre o ensaio de Microestrutura	89
5.2.1	Procedimentos e resultados do ensaio de Microestrutura	89
6	CONCLUSÃO.....	91
7	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comentários Preliminares

O *Coilbox*, equipamento da empresa Arcelor Mittal Steel (AMT), deve apresentar um alto índice de disponibilidade durante o processo de laminação, pois além de estar no meio da linha de laminação, garante a qualidade final do produto semiacabado, que são as bobinas de aço. Durante seu funcionamento são geradas pequenas carepas de aço que se soltam no processo de bobinamento do esboço, as quais podem vir a danificar elementos móveis, como os eixos-cardan de acionamento. A fim de manter a integridade desses eixos-cardan, foi feita pela equipe de inspeção e manutenção, uma modificação de projeto original de montagem, invertendo o eixo, antes montado com sua parte de peso maior para o lado redutor, para agora o lado acionado (berço nº1). Após essa mudança, surgiram falhas nas fixações dos parafusos no lado movido do eixo cardan. Estas falhas foram de afrouxamento dos parafusos e em alguns casos, os mesmos falharam. Portanto, com o intuito de estudar o fenômeno da falha dos parafusos, sistematicamente observada no processo, foi elaborado o projeto de graduação aqui proposto.

1.2 O objetivo e o problema de pesquisa

O objetivo deste projeto visa precisamente, estudar as causas das falhas estruturais, observadas nas uniões parafusadas dos eixos-cardan de transmissão do Berço nº1 do *Coilbox*, equipamento do Laminador de Tiras a Quente (LTQ) do grupo AMT.

1.3 A base metodológica construída

Para verificar as possíveis causas das falhas nas uniões parafusadas dos eixos cardan, foram utilizados os conteúdos relacionados à cinemática e dinâmica do movimento relativo entre componentes, que surgem durante o processo de atuação do berço nº1. Esta análise, empreendida com o auxílio de métodos analíticos para a

obtenção das velocidades e acelerações instantâneas, objetivou estudar as cargas cíclicas atuantes sobre os parafusos, que poderiam levá-los ao fenômeno de fadiga. Paralelamente, foram realizados ensaios de microdureza e microestruturas, com a intenção de aferir os valores de resistência mecânica e estruturais dos parafusos fornecidos pelas empresas revendedoras.

2 A empresa

A AMT, produtora de semiacabados de aço, foi instalada em junho de 1976, antiga Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) de controle estatal com uma participação minoritária de grupos estrangeiros. Porém suas atividades começaram em novembro de 1983.

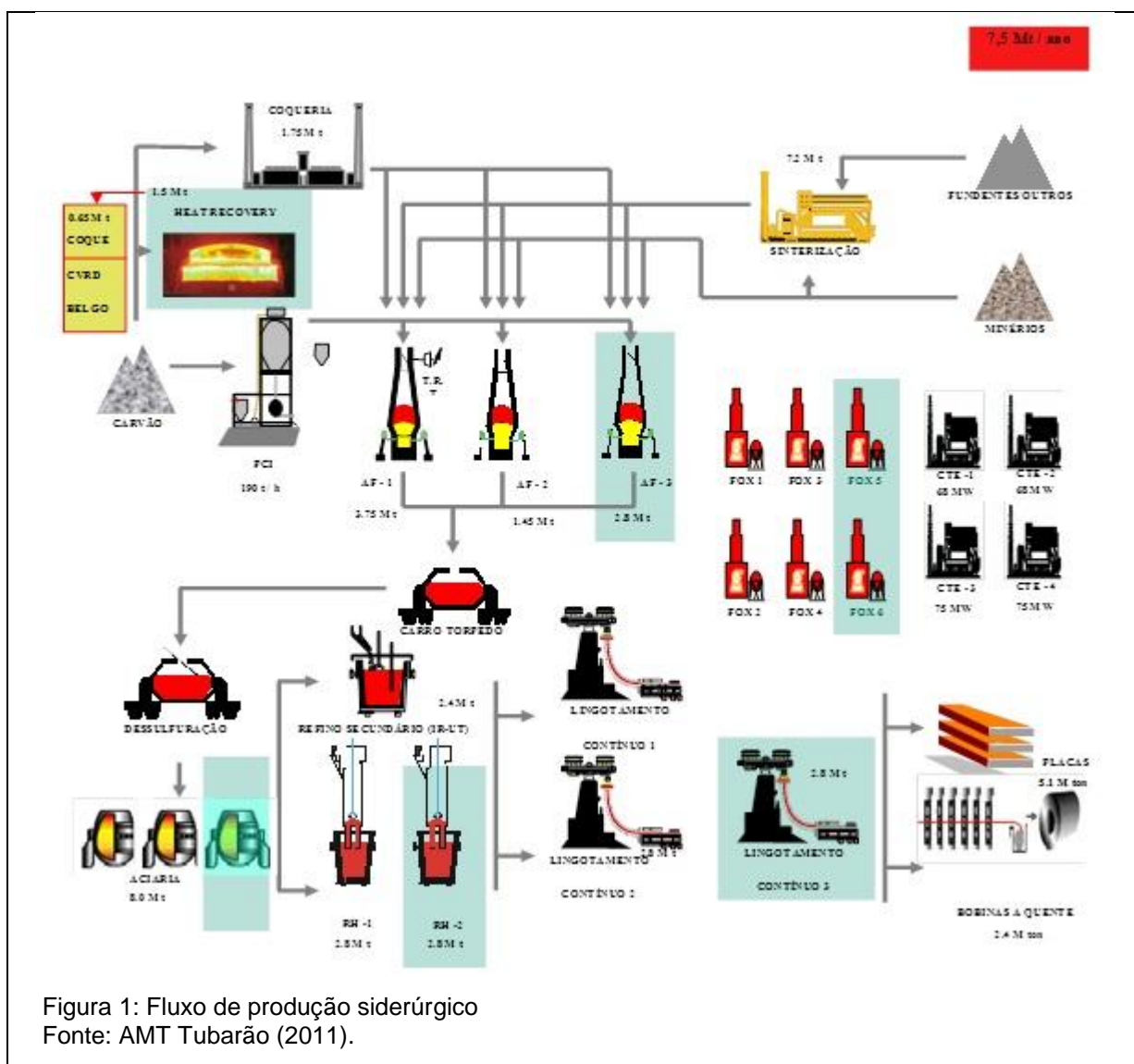
Em agosto de 2002 entrou em operação o laminador de tiras a quente (LTQ), incorporando a mais avançada tecnologia do mercado, passando a comercializar bobinas a quente, proveniente do bobinamento das tiras a quente.

As bobinas laminadas correspondem ainda a maior porcentagem do faturamento global da AMT, sendo a maior parte para atender o mercado interno.

Como a AMT considera a manutenção um processo estratégico em seu negócio e, desta forma, as equipes de manutenção têm como foco principal a disponibilidade e estabilidade operacional dos seus equipamentos, maximizando a utilização dos ativos da empresa, apoiadas em uma forte filosofia de análise de tendências, PPC das atividades de manutenção. Assim sendo, diversos processos ligados ao LTQ oferecem oportunidades relevantes de melhoria.

2.1 Descrições do processo siderúrgico

Uma siderúrgica integrada como a AMT, promove a transformação do minério de ferro em produtos siderúrgicos, semiacabados (placas) ou acabados (laminados). A seguir tem-se na Figura 1, o fluxo produtivo.



As principais unidades da AMT são: duas Coquerias, sendo uma própria com pressão positiva de trabalho nas baterias de fornos de coque e outra pertencente à Suncoke, instalada dentro polo industrial; uma Sinterização; três Altos-Fornos; uma Aciaria com três Convertedores; três Lingotamentos Contínuos; um Condicionamento de Placas e um Laminador de Tiras à Quente, contando também com uma área denominada Utilidades, na qual comporta seis fábricas de oxigênio e quatro centrais termoelétricas. O processo inicia-se com o recebimento de matérias-primas nos pátios de carvão, pátio de minério de ferro e fundentes diversos. O carvão é enviado para a Coqueria, através de correias transportadoras e transformado em coque. Os fundentes e os minérios de ferro são enviados para Sinterização e transformados em sinter, um material com grande carga metálica para os Altos-Fornos. O sinter e o coque são transportados para os altos-fornos,

onde são fundidos e transformados em ferro gusa. O carro torpedo transporta o ferro gusa para aciaria, setor responsável pela redução do ferro gusa em aço, que após passar por um processo de refino primário e secundário, é enviado para o Lingotamento Contínuo, onde são produzidas as placas de aço. O LTQ pode receber placas diretamente do Lingotamento contínuo ou do Condicionamento de Placas, que são processadas e transformadas em bobinas.

2.2 Implantação do LTQ

Com a decisão de diversificação de seus produtos, a empresa optou por investir na aquisição de um LTQ, com o qual pudesse produzir bobinas laminadas a quente, produto este de maior valor agregado, possibilitando atuar também no mercado doméstico, com margens de lucro atraentes e no mercado com tendência de alto crescimento ao longo dos próximos anos. Para manter o alto padrão de qualidade e custos baixos com que atua e é reconhecida no mercado internacional, a empresa buscou adquirir um equipamento que apresentasse a mais atualizada tecnologia disponível no mercado e com condições de atender uma variada gama de espessura e largura de material a ser processado.

Assim sendo, em Agosto de 2002 deu-se a partida do Laminador e em 2005 o LTQ já estará atingindo a capacidade nominal para sua atual configuração, cerca de 2,4 milhões de toneladas anuais de bobinas laminadas a quente.

2.3 Conceituação do processo de laminação a quente e características do equipamento

O LTQ é um equipamento que transforma as placas de aço, oriundas das Máquinas de Lingotamento Contínuo em bobinas de aço laminadas a quente, através de passes de reduções sucessivas, sendo suas principais partes integrantes descritas abaixo:

Pátio de Placas – área destinada ao armazenamento e sequenciamento das placas de aço a serem laminadas, sendo apresentada na figura 2. Seu volume de

armazenamento é de cerca de 75.000 toneladas, sendo subdividido em três pátios (A, B e C) e possuindo cinco pontes rolantes com capacidade de 60 toneladas cada uma, projetadas para operação em automático;



Figura 2: Foto ilustrativa do Pátio de Placas.
Fonte: AMT (2011).

Forno de Reaquecimento de Placas – sua função é realizar o reaquecimento controlado das placas a serem laminadas até a temperatura de desenformamento, em cerca de 1.200°C , conforme o material que será processado. Sua capacidade de produção é de 400 t/h. Tem-se logo a seguir a Figura 3 representando um esquemático do forno, visualizado na sala de controle operacional. Na figura 4 uma visão externa do forno de reaquecimento de placas;

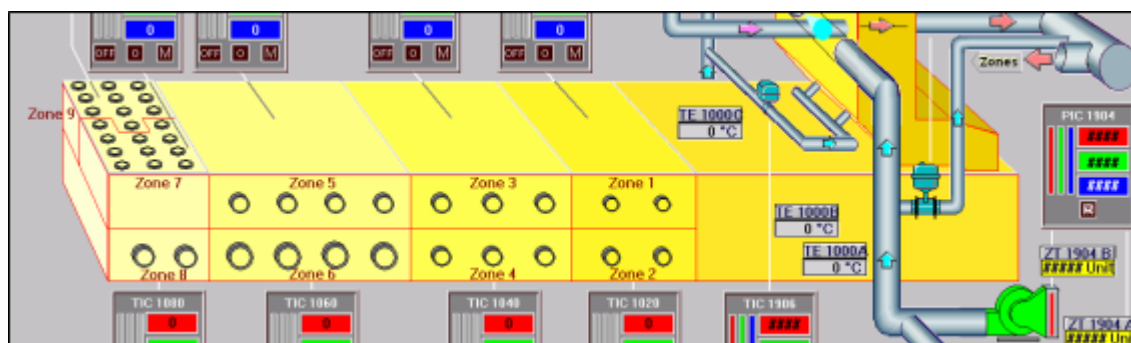


Figura 3: Vista lateral (do sistema supervisório) do forno de reaquecimento de placas.
Fonte: AMT (2011).



Figura 4: Foto Ilustrativa do Forno de Reaquecimento de Placas.
Fonte: AMT (2011).

Descarepação Primária – equipamento cuja função é remover o óxido de ferro (carepa) formado na superfície do material antes do mesmo ser laminado, evitando assim a presença destes óxidos no material processado. São utilizados jatos de água a altas velocidades e pressão de cerca de 190 bar;

Laminador Desbastador e Laminador Vertical – laminador desbastador do tipo quádruplo reversível, podendo operar entre 5 e 9 passes, sendo responsável pela formação do esboço a ser acabado. Promove grandes reduções de espessura no material, partindo de uma espessura máxima de placas de 250 mm até uma espessura final de saída do esboço entre 20 e 40 mm. Sua potência total é de 15.000 kW, tendo acoplado a ele um laminador vertical que garante a largura desejada do esboço laminado. Segue a Figura 5 como ilustração;

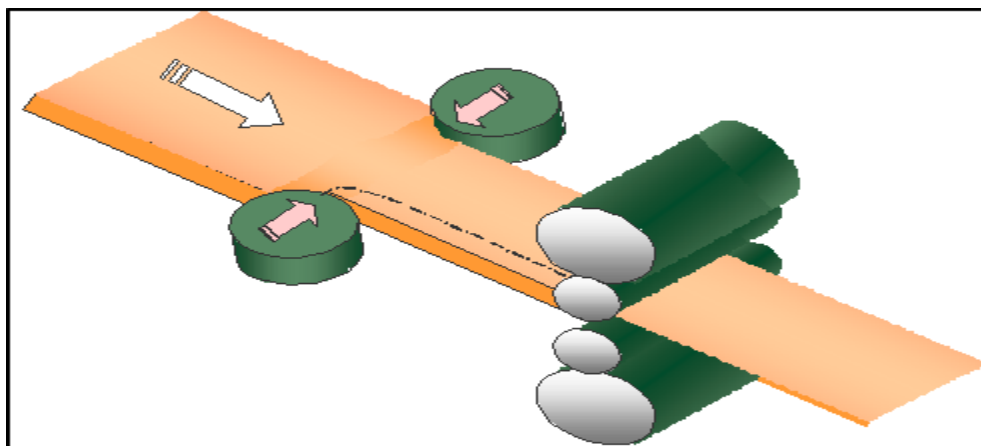


Figura 5: Desenho esquemático do Laminador de Desbaste.
Fonte: AMT (2011).

Coilbox— equipamento único na siderurgia brasileira, o Coilbox propicia uma redução substancial do comprimento total da mesa de saída do desbastador e, conseqüentemente, do comprimento total do LTQ (cerca de 200 m) e também permite melhor homogeneidade de temperatura entre a cauda e o topo do esboço a ser laminado no Trem Acabador (cerca de 20°C contra 70°C no sistema convencional). Segue na figura 6 uma representação do equipamento processando o esboço de bobina e na figura 7 uma visão lateral do lado da operação do equipamento;

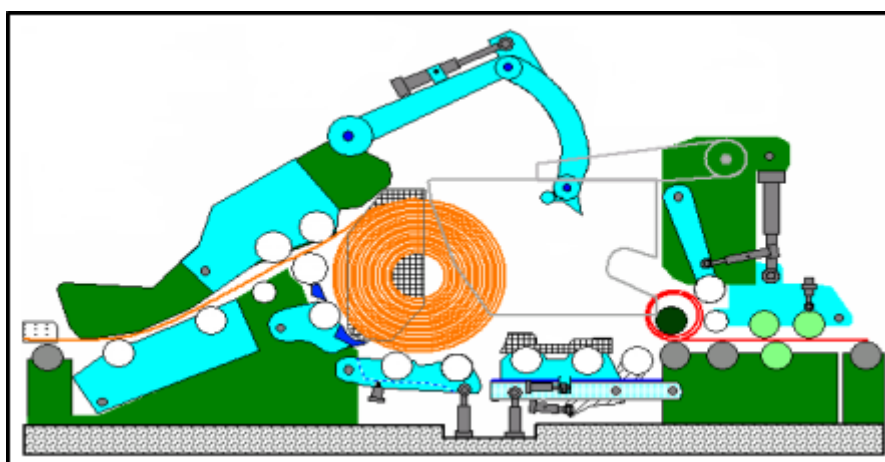


Figura 6: Desenho esquemático do Coilbox.
Fonte: AMT (2011).



Figura 7: Foto ilustrativa do Coilbox.
Fonte: AMT (2011).

Tesoura de pontas – Equipamento responsável pelo aparamento do topo e cauda do esboço. O aparamento das pontas do esboço é fundamental para a entrada deste no Trem acabador, pois ele deve entrar totalmente uniforme para que não ocorram falhas durante o processo de laminação, tais como: o rompimento da tira devido a uma tensão não uniforme, falhas superficiais na formação da tira entre outros;

Descarepação Secundária – Idem a Descarepação primária, porém responsável pela remoção da carepa formada entre o Laminador Desbastador e o Trem Acabador;

Trem Acabador – “Coração” do LTQ, promove a redução da espessura do esboço de 20 a 40,0mm para espessuras finais entre 1,2 e 16,0mm. Tipo tandem quádruplo, está sendo apresentado na figura 8 e possui seis cadeiras de laminação com todas as tecnologias hoje disponíveis com potência total de 48.000 kW, sendo 8.000 kW por cadeira. A velocidade máxima de saída da tira, na última cadeira (F6), é de 20 m/s, ou aproximadamente 72 km/h;



Figura 8: Foto ilustrativa do Trem Acabador.
Fonte: AMT (2011).

Mesa de Saída (Laminar Flow) – Com cerca de 100m de comprimento e 265 rolos de transporte da tira, a mesa possui 15 bancos de resfriamento, com fluxo de água laminar, e controlados independentemente pelo modelo matemático de acordo com a especificação metalúrgica do material em processamento. Tem-se na figura 9 o sistema em funcionamento;

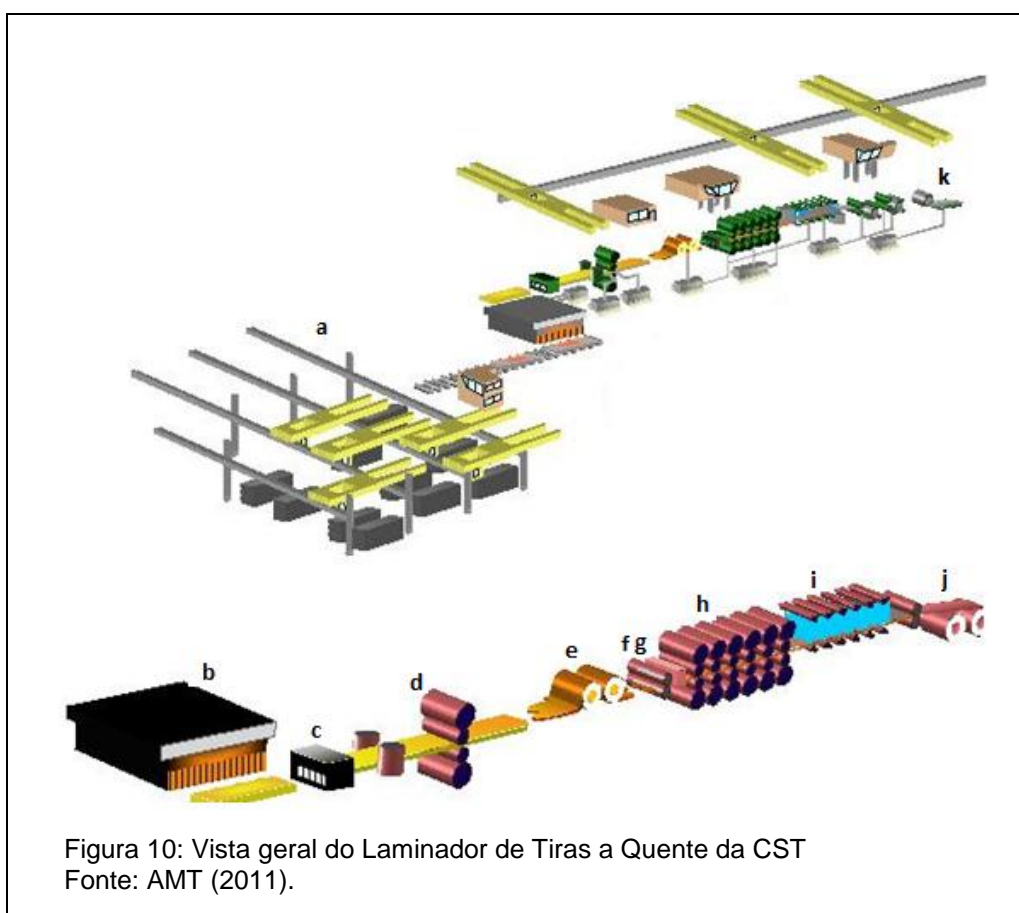


Figura 9 – Foto ilustrativa do *Laminar Flow*.
Fonte: AMT (2011).

Bobinadeiras – Última parte do processo, as bobinadeiras recebem o material em movimento oriundo do Trem Acabador e da Mesa de Saída e, através de rolos puxadores e rolos abraçadores, o direcionam em torno do mandril já em movimento rotativo, conformando o mesmo e transformando a tira em bobina;

Máquinas de Cintar, de Marcar e Carros de Transporte – responsáveis por acondicionar, identificar e transportar as bobinas produzidas no laminador para o pátio de resfriamento e estocagem de bobinas ou para as Linhas de Acabamento e destes para os clientes finais;

Abaixo, tem-se na figura 10 a representação esquemática da planta produtiva do LTQ:



3 Coilbox

O princípio da tecnologia Coilbox, foi inventada e desenvolvida no final dos anos 60 e início dos anos 70 pela Stelco Canadá. Sua função é promover o bobinamento e desbobinamento do esboço, reduzindo o tamanho da mesa de transferência (comprimento da linha), amenizando a perda térmica e equalizando a temperatura ao longo do esboço¹. A redução do tamanho da mesa está relacionada aos custos de concretagem, rolos, cabearios elétricos, tubulações diversas, cobertura do galpão, mão de obra e etc. Ao longo do seu período de pesquisa, pode-se afirmar que o Coilbox, além de reduzir custos em montagem e construção, é um equipamento essencial na linha de Laminação de Tiras à Quente, pois com a sua correta utilização, o esboço bobinado a quente, adquire uma uniformidade térmica ao longo do comprimento laminado no Trem acabador.

O primeiro Coilbox foi posto em operação no LTQ da Austrália Western Port em 1978 e existem no mundo, atualmente, cerca de 50 empresas que utilizam esta tecnologia. Na figura 11 tem-se o demonstrativo de redução da linha de laminação.

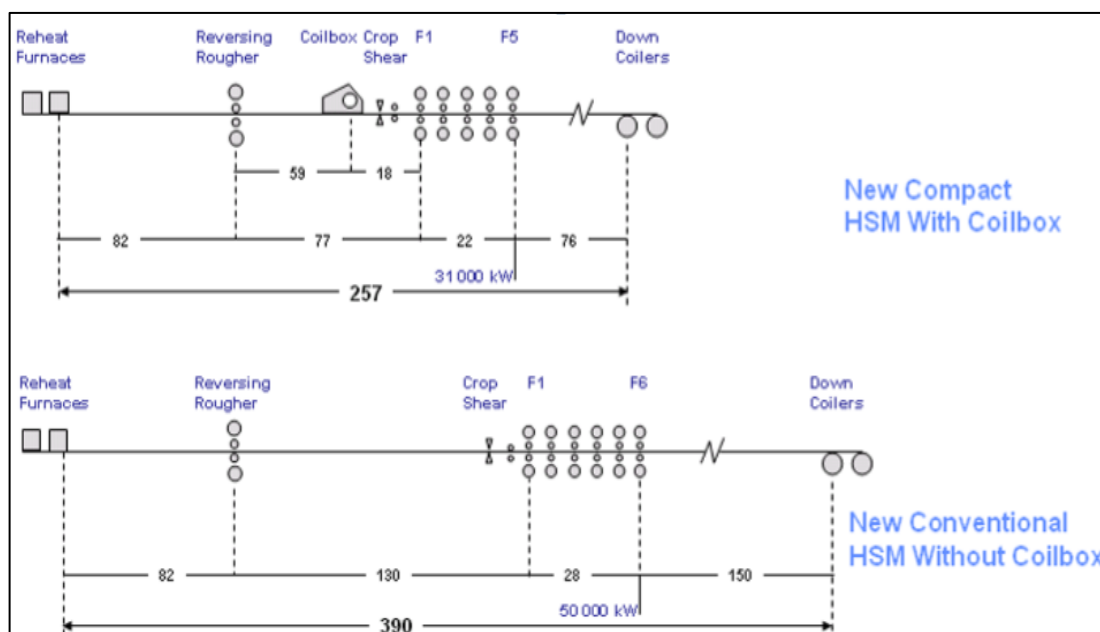


Figura 11: Comparação utilizando ou não o Coilbox

Fonte: AMT (2011).

¹ Denominação dada à placa de aço desenformada, antes de sua entrada no Trem Acabador.

3.1 Descrição do equipamento

O Coilbox da AMT é do tipo sem mandril, equipado com dois estágios independentes, podendo executar simultaneamente operações de bobinamento e desbobinamento do esboço, contando ainda com escudos térmicos laterais para reduzir a perda de calor por convecção com o ar do ambiente. Existem dois modos de transferência de bobina no Coilbox chamados de transferência Ativa e Passiva. Nas figuras 12 tem-se o Coilbox funcionando durante o processo de produção e na figura 13 tem-se o processo de transferência tipo ativa.



Figura 12: Apresentando o Coilbox com o esboço Fonte: AMT (2011).
Fonte: AMT (2011).



Figura 13: Sequência de transferência ativa, para bobinas de elevado peso.
Fonte: AMT (2011).

3.1.1 Apresentação dos Dados técnicos operacionais

Espessura de calandramento mínima e máxima do esboço para a entrada no Trem

Acabador (FM): 20 – 40 mm;

Largura do esboço: 700 – 1880 mm;

Temperatura de bobinamento: 900 – 1150°C;

Velocidade máxima de entrada: 3m/s;

Velocidade máxima de bobinamento: 5,5 m/s;

Velocidade máxima de desbobinamento: 2 m/s;

Tipo sem mandril, com duplo estágio, operações de bobinamento e desbobinamento simultâneas;

Proteção térmica lateral ajustável à largura do esboço (menor perda de temperatura nas bordas);

Diâmetro externo máximo de bobina: 2200 mm;

Mesa de entrada: 9 motores de 36 KW cada;

Rolos defletores: 2 motores de 20 KW cada;

Rolos dobradores: 2 motores de 315 KW cada;

Berço nº1: 1 motor de 315 KW;

Berço nº2: 1 motor de 75 KW;

Rolos puxadores: 2 motores de 75 KW cada

Rolo Nivelador: 1 motor de 75 KW

3.1.2 Principais componentes do Coilbox:

A seguir são apresentados os principais componentes do Coilbox. Por estratégia, os itens destacados a seguir, estão devidamente listados na figura listados a seguir aparecem destacados na figura 14. Os números indicados previamente em cada parágrafo remetem diretamente ao desenho da figura, para melhor orientação, tem-se em ordem, os seguintes itens mais relevantes no processo, são estes:

(02) Guias de entrada – alinham e centralizam o esboço. São operadas hidráulicamente.

(03) Rolos defletores – Guiam o material para os bending rolls. São abaixados quando o coilbox não é utilizado.

(04) Rolos dobradores (Bending rolls) – Responsáveis pelo calandramento do material. São dois rolos superiores e um inferior, acionados separadamente.

(08) Rolos Formadores (Forming roll) – Usado para formar a bobina entre eles e a estação de bobinamento. É abaixado quando o coilbox não é utilizado.

(9b) Berço nº2 ou CR2 (Cradle Roll 2) – Estação onde ocorre o desbobinamento do esboço. Também possui pequenas guardas para evitar descentralização do material.

(12) Pinos retentores (Retention Pinns) – Operados hidraulicamente, são responsáveis por abrir o olho da bobina na última volta.

(13) Rolo de apoio (Hold Back Roll) – Promove um apoio a bobina no final do desbobinamento, para sincronização da lógica de inserção dos pinos retentores.

(20) Braço Abridor (Peeler Arm) – Dispositivo responsável por abrir o esboço bobinado após a base do esboço ficar na posição de abertura.

(21) Braço Pênsil (Tuck Arm) – Acoplado ao braço abridor, o braço pênsil se apoia sobre a bobina para que seja permitido “descolamento” das espiras da bobina no início do desbobinamento.

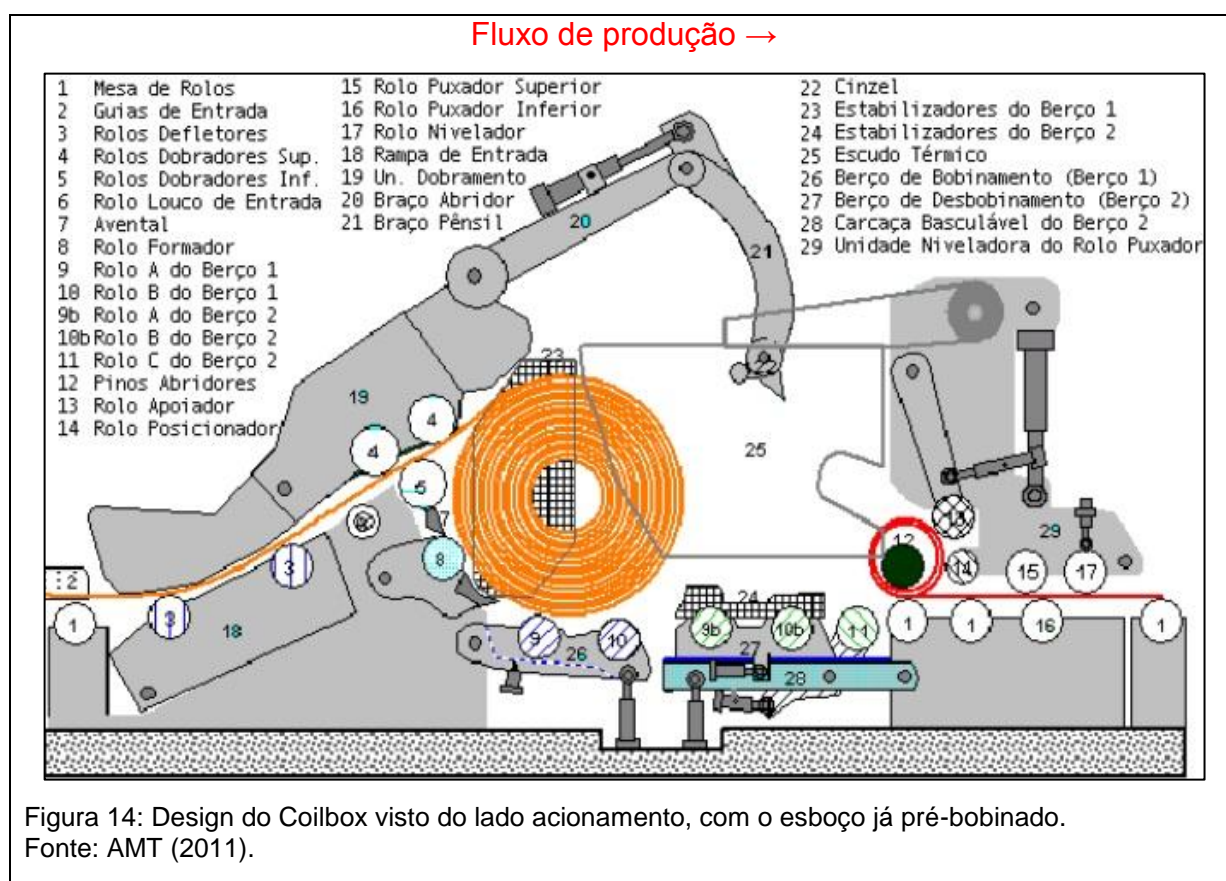
(23) Estabilizadores – Mantêm a bobina centralizada durante o bobinamento. São fortes o suficiente para eliminar telescopsidade.

(25) Escudos Térmicos – Podem ser posicionadas hidraulicamente, de acordo com a largura do material.

(26) Berço nº1 ou CR1 (Cradle Roll 1) – Estação onde ocorre o bobinamento do esboço, participando tanto da transferência ativa quanto passiva. Os rolos 9 e 10

são denominados 1a e 1b respectivamente, são montados em uma estrutura chamada de berço 1 e possuem acionamento via eixo-cardan acoplado entre flanges com posicionamento hidráulico para ambos.

(29) Unidade de nivelamento e rolos puxadores (Leveling Rolls and Pinch Rolls) – É responsável por parar e posicionar a bobina durante a transferência passiva, direcionar o material para o Trem Acabador e nivelar o esboço antes da descarepação.



3.2 Descrições do Berço nº1 ou CR1

Na figura 14 acima, o item 26 representa o Berço nº1 ou CR1 com dois rolos de suporte chamados wrapping rolls² que correspondem ao item 9 e 10, de acordo com

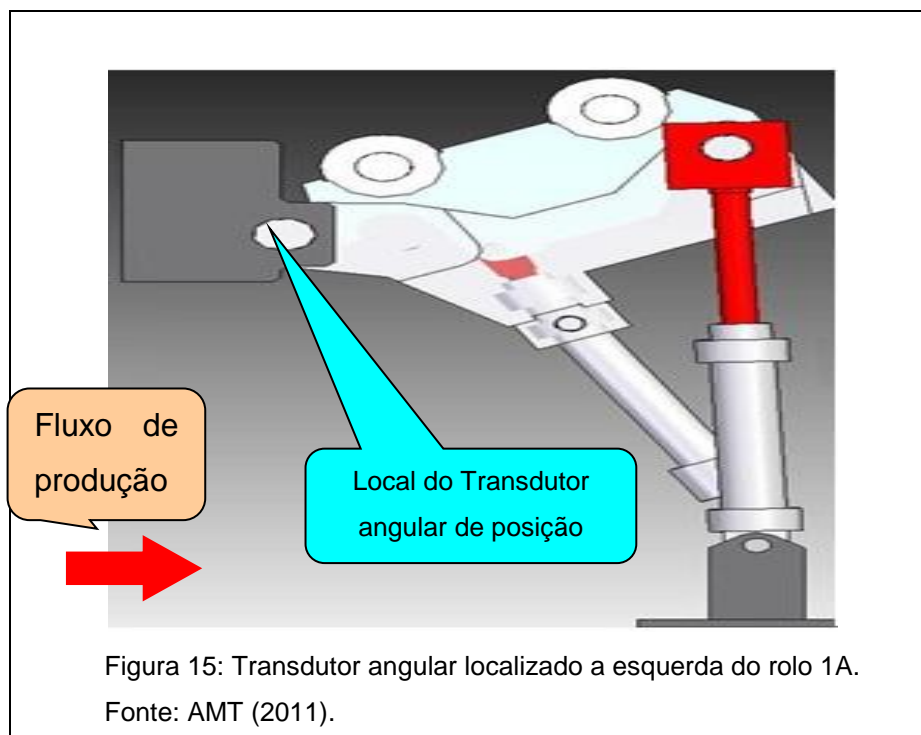
² Identificação em inglês dos Rolos 1A e 1B pertencentes ao CR1

a localização em que é direcionado o fluxo de produção. Eles são utilizados para bobinar o esboço e para fornecer as forças de dobramento necessárias. Além disso, os rolos são usados para mover a bobina para o CR2 que está representado no item 27 também da figura 14.

Durante a operação *Pass trough*³, os rolos são usados como rolos de mesa, direcionando o esboço diretamente para o Trem Acabador. Essa operação é realizada quando o produto final é uma bobina com espessura maior ou igual a 6,0mm.

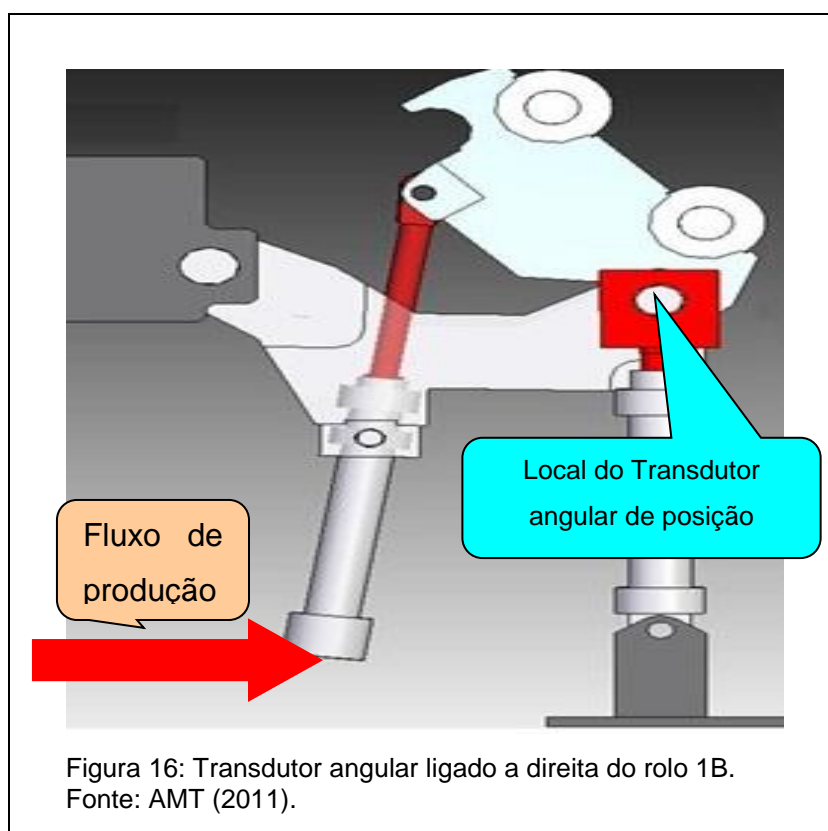
3.2.1 Dinâmica do conjunto associada à transferência de bobina

Associados aos movimentos de recebimento e transferência de bobina do Berço nº01 têm-se dois pares de cilindros hidráulicos, sendo que no movimento angular de recebimento do esboço, o primeiro par está com sua haste ligada ao CR1, pelo lado direito do rolo 1B e com sua base fixa na estrutura do Coilbox. Um transdutor de ângulo é conectado ao ponto de articulação do berço localizado a esquerda do rolo 1A, sua função é medir a posição angular do berço durante o recebimento do esboço a bobinar, na figura 15 têm-se o esquemático.



³ Passagem direta do esboço para o Trem Acabador sem o Coilbox, neste instante os CR1 e CR2 estão com seus cilindros de acionamento recolhidos, permanecendo na posição horizontal.

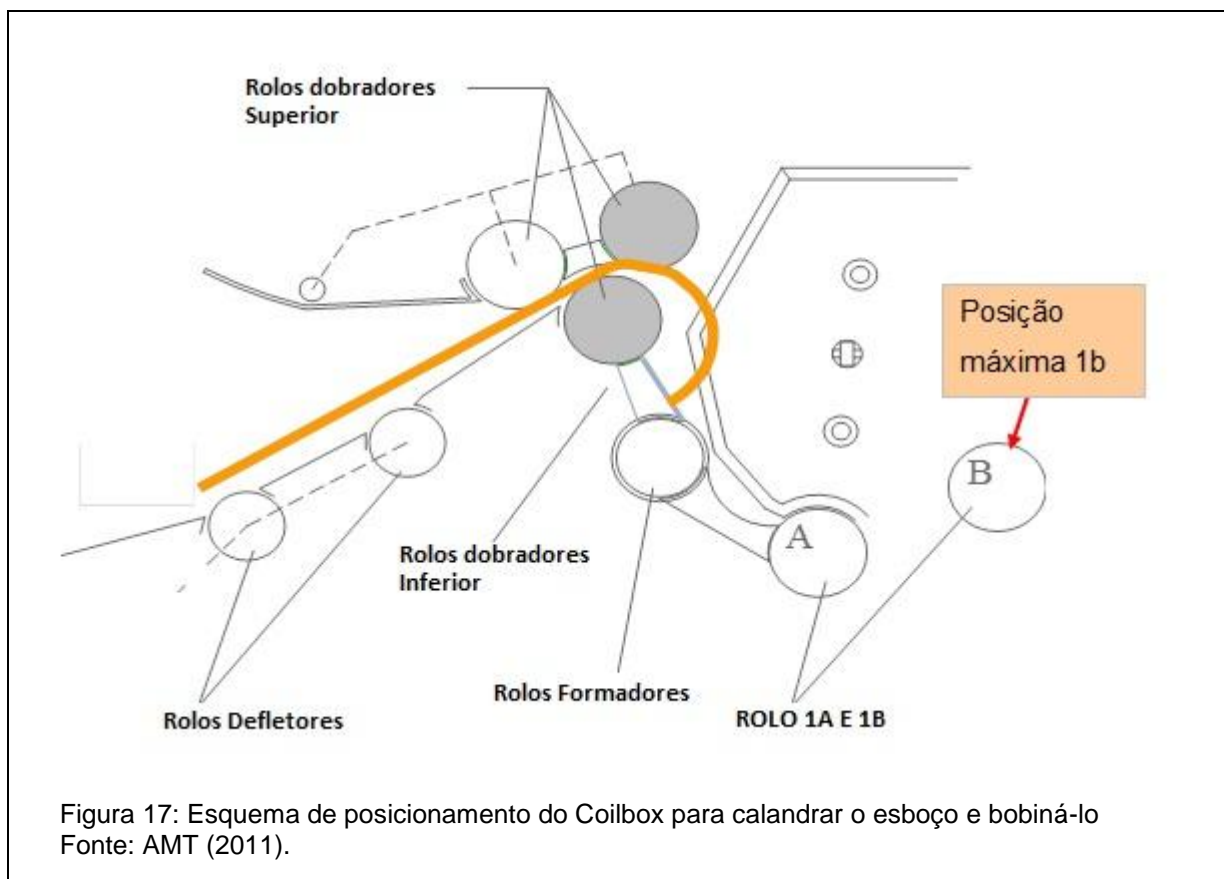
O segundo par de cilindros hidráulicos, está associado ao movimento angular de transferência de esboço e retorno do CR1 a posição horizontal, com sua haste ligada ao CR1, pelo lado do rolo 1A e com sua base fixa também no CR1. Um transdutor de ângulo é ligado no ponto articulado localizado a direita do rolo 1B, sua função é medir a posição angular do berço durante o recebimento do esboço. A seguir na figura 16, tem-se um esquemático do movimento do CR1.



Os rolos 1A e 1B do Berço 01, com um diâmetro de 400 mm são acionados por um motor da mesa AC, acoplado a um redutor de velocidade com duas saídas e um sistema de eixos-cardan para transmissão final de torque e velocidade aos rolos. As forças de alongamento dos parafusos de fixação dos eixos-cardan CR1A e CR1B nos acoplamentos dos rolos 1A e 1B são os pontos focais deste estudo.

Os movimentos anti-horários e horários do CR1, iniciados pelo acionamento dos cilindros hidráulicos, tem posição e velocidade controlada. As posições de referências individuais são fixadas de acordo com o estágio real de início do movimento.

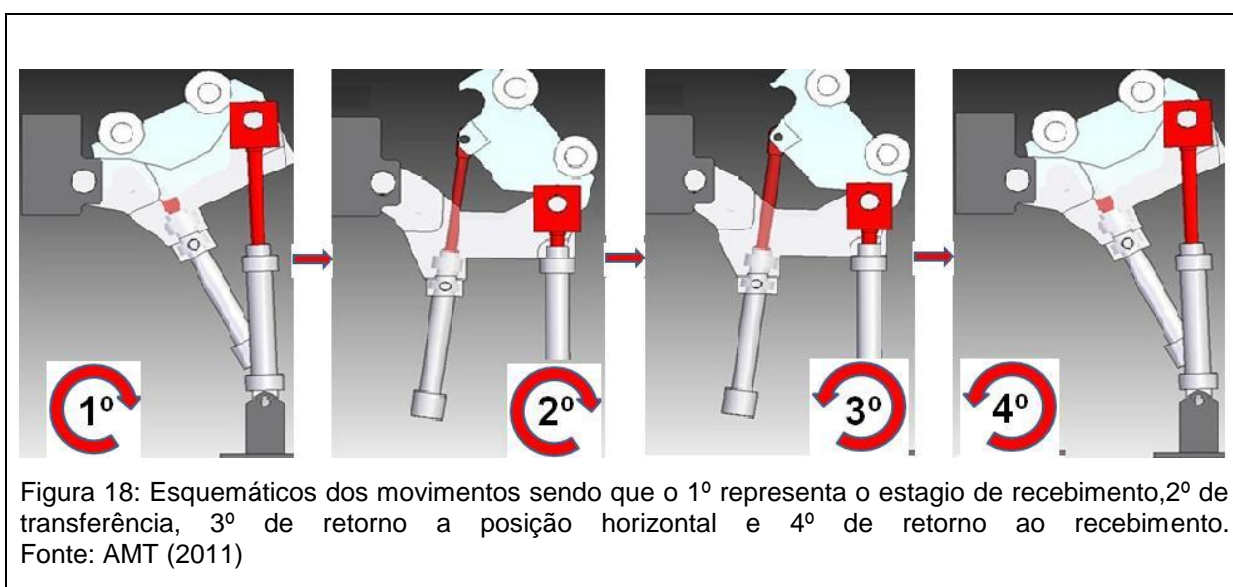
Antes de o esboço entrar na unidade, o rolo 1A deve estar com seu cilindro de movimento em posição de recuo e o rolo 1B com seu cilindro de movimento em posição máxima de avanço, levantando-o completamente. Além disso, rolo 1B não deve ser levantado até que o “Forming roll” (rolo formador) seja levantado devido à interferência mecânica. Com isso configura-se a posição inicial de trabalho do Coilbox conforme figura 17



Em relação a velocidade dos rolos 1A e 1B, ela é definida para ser muito menor do que a velocidade de entrada do esboço. Quando a extremidade da cabeça do esboço toca os rolos, estes são acelerados rapidamente até a velocidade de chegada do esboço. Então a velocidade dos rolos é adaptada para a velocidade de formação da bobina.

Depois que as primeiras três “espiras” são formadas, o rolo 1B é abaixado suavemente para a posição passline (posição horizontal), enquanto a bobina em formação chega a certo diâmetro previamente calculado. Neste momento, o rolo 1B tem sua velocidade de abaixamento reduzida, a fim de manter o contato com a bobina até o final do bobinamento.

Quando a transferência ativa é selecionada para desbobinamento, o cilindro hidráulico do lado 1A é acionado e o rolo 1A é elevado até sua altura máxima, em função do curso máximo do cilindro, que é de 800 mm. Com velocidade de desbobinamento controlada e com o movimento de transferência ativa, o centro de gravidade da bobina passa sobre o rolo 1B e a direciona até o berço nº2 ou CR2. Dependendo do tipo de material, temperatura e espessura, pode também ser selecionada a opção de transferência passiva, onde não ocorrem os movimentos relativos entre o CR1 e CR1, ficando os mesmos com a simples função de mesa de rolos. Temos abaixo na figura 18 o esquemático dos movimentos em transferência ativa.



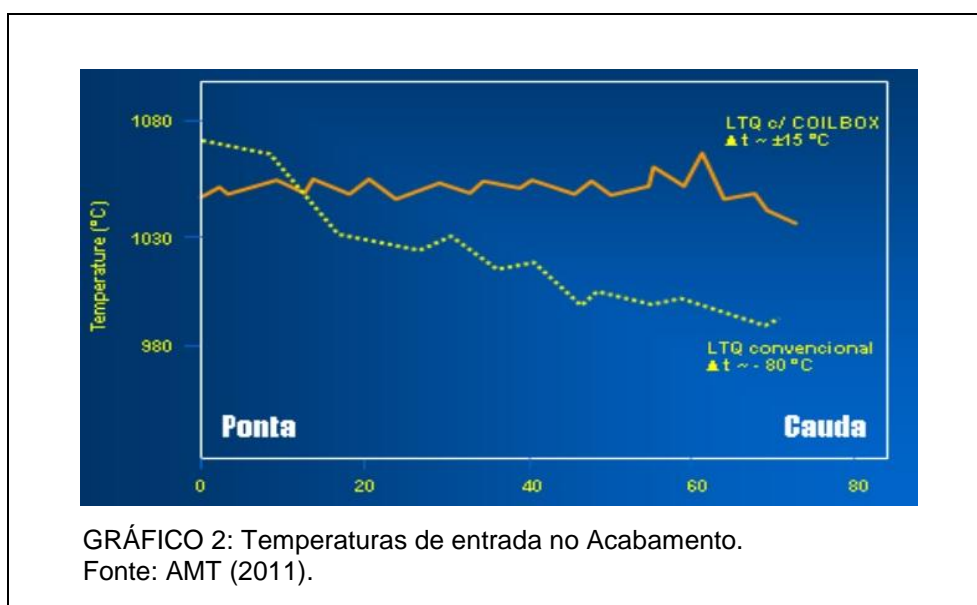
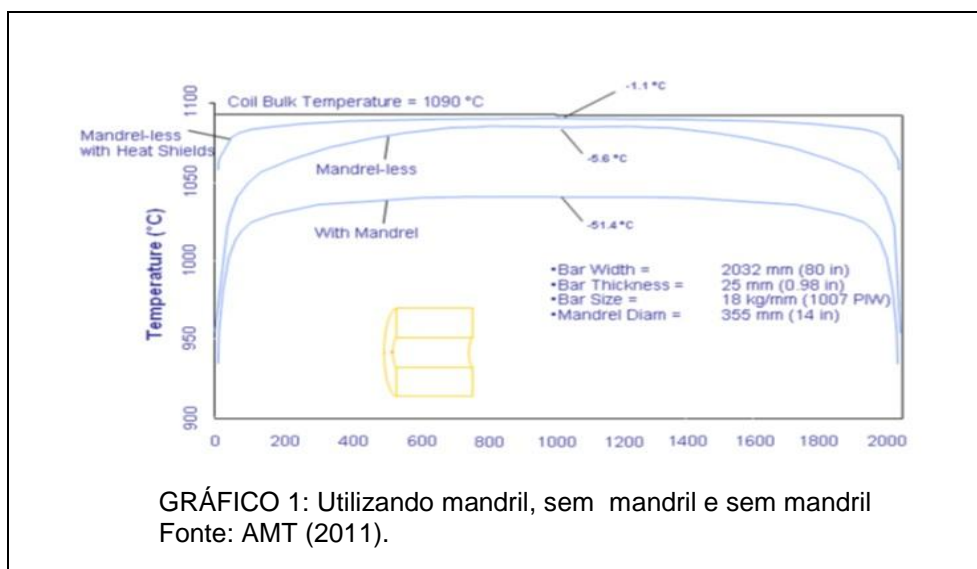
3.3 Vantagens e desvantagens da tecnologia Coilbox

3.3.1 As vantagens de sua utilização

A utilização da tecnologia Coilbox, oferece muitas vantagens, dentre elas estão:

- Retenção da temperatura do esboço, propiciando condições de produção uniforme;
- Permite a utilização de esboços com comprimentos maiores e mais finos e possibilita o aumento da relação largura/espessura;

- Redução da potência necessária para laminação no Trem Acabador (Redução da carga de laminação);
- Redução do consumo de combustível no forno de reaquecimento;
- Redução da linha com consequente redução de custos;
- Possibilidade de remoção rápida de sucatas ocorridas no Trem Acabador;
- Pannel de proteção térmica em suas laterais, diminuindo a taxa de perda de calor por convecção e radiação, durante o processo de bobinamento. Tem-se no gráfico 1, os benefícios utilizando proteção térmica. O gráfico 2 apresenta a variação da temperatura de ponta e cauda na entrada do Trem Acabador.



3.3.2 As desvantagens no uso da tecnologia Coilbox

Dentre as desvantagens apresentadas, estão:

- Como há maior homogeneização da temperatura do esboço, não há necessidade de aceleração no FM, acarretando num processo de laminação mais lento;
- Diminuição de produtividade diária em função de menores velocidades de laminação;
- Necessidade de sistemas de refrigeração entre cadeiras para compensar a redução da velocidade de laminação;
- Riscos devido a temperaturas menores no topo e na base do esboço em relação ao restante do material;
- Desprendimento de carepa durante o bobinamento como mostra a figura 19, deixando a superfície propícia à formação de nova camada de óxido, gerando perda de material;

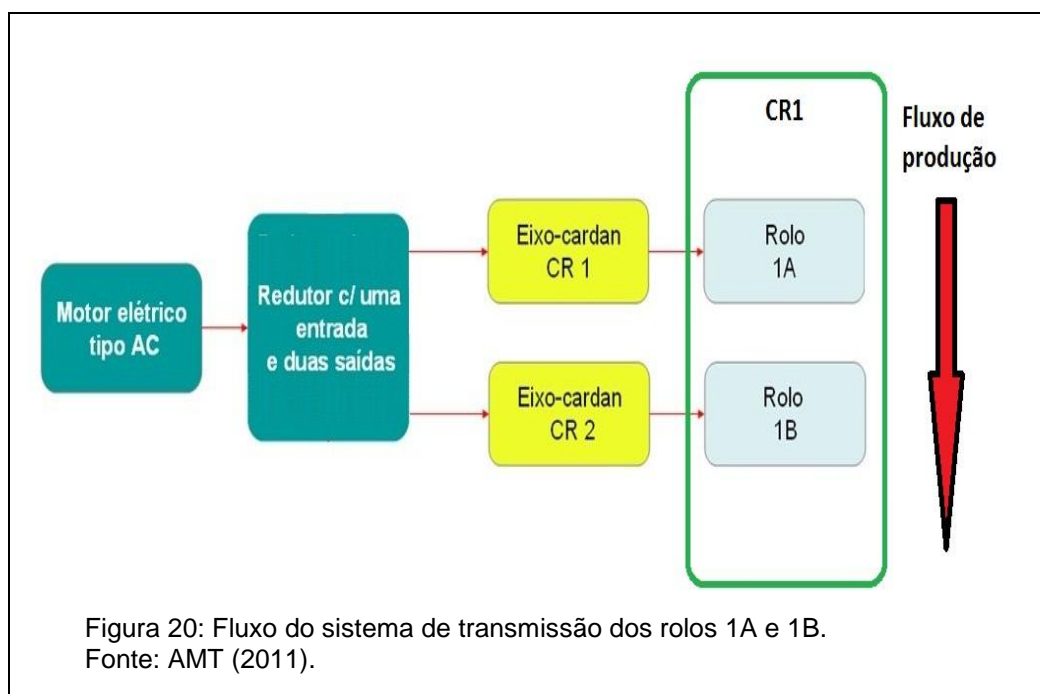


Figura 19: Foto no momento da quebra de carepas durante o bobinamento do esboço
Fonte: AMT (2011).

4 Estudo sobre as falhas dos parafusos do sistema de acoplamento dos eixos-cardan com os Rolos do CR1

4.1 Comentários preliminares

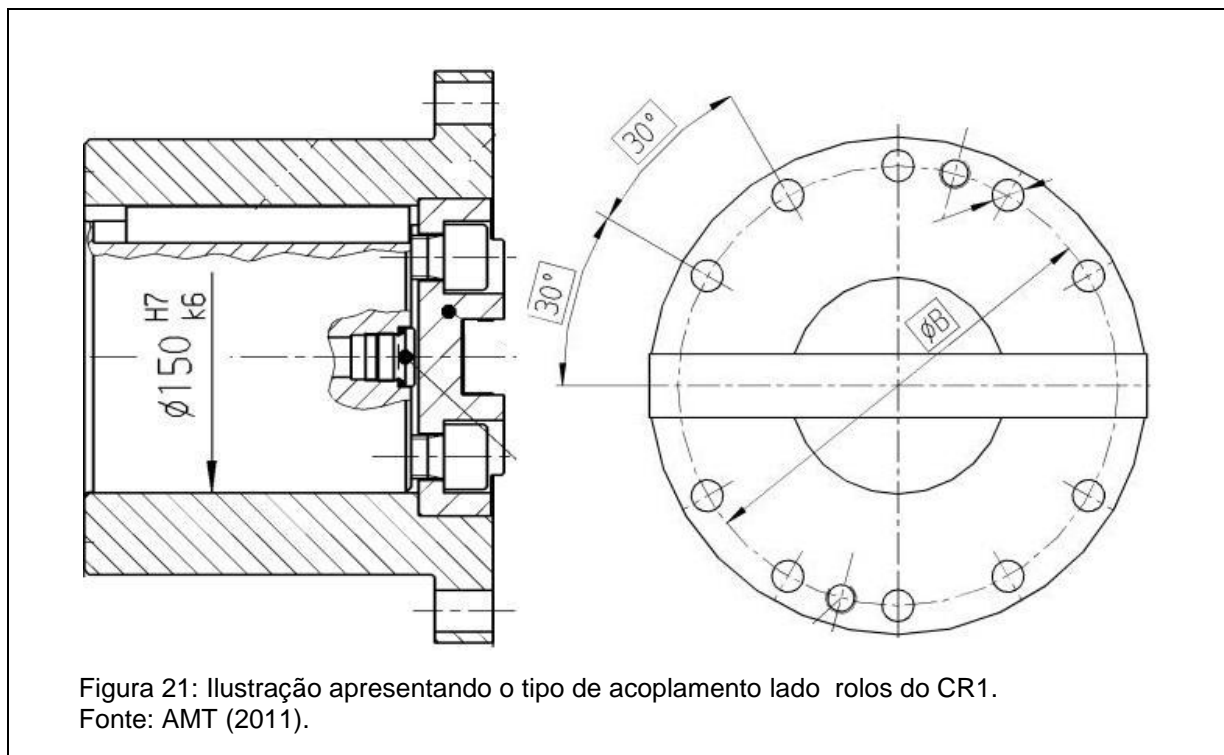
Dando-se início ao estudo, é apresentado na figura 20, um esquemático do sistema de transmissão de torque e velocidade dos Rolos do CR1.



4.2 Condições de acoplamento dos eixos-cardan com os rolos do CR1

Focando-se no sistema de acoplamento dos eixos-cardan com os rolos do CR1, onde ocorrem as quebras dos parafusos de fixação, é apresentado a seguir os detalhes do sistema de acoplamento, sabendo que valem para ambos.

Têm-se na figura 21, uma ilustração do acoplamento, apresentando alguns detalhes importantes para as considerações deste estudo.



Os detalhes encontrados na figura 21, e que serviram como suportes para as condições iniciais desde estudo foram:

- Presença de um rasgo para montagem de chaveta, cujo principal objetivo é absorver grande parte do torque, transferido pelo eixo-cardan sobre os parafusos de fixação, evitando assim o movimento relativo entre os acoplamentos e possíveis falhas por cisalhamento pelos parafusos;
- Identificação da quantidade de parafusos presentes no acoplamento, contabilizando um total de 8 parafusos.

E apresentado uma ilustração do flange de acoplamento dos eixos-cardan. Foram consideradas algumas características, tais como:

- Distância “M” da cruzeta a face do flange igual a 205,0mm;
- Diâmetro “ØA” do flange de acoplamento do eixo igual a 315,0mm;
- Altura “h” da chaveta acima da face do flange igual a 15,0mm.

- As formas Geométricas da peça para análise de manutenibilidade.

Abaixo na figura 22, temos o desenho deste do flange de acoplamento montado no eixo-cardan.

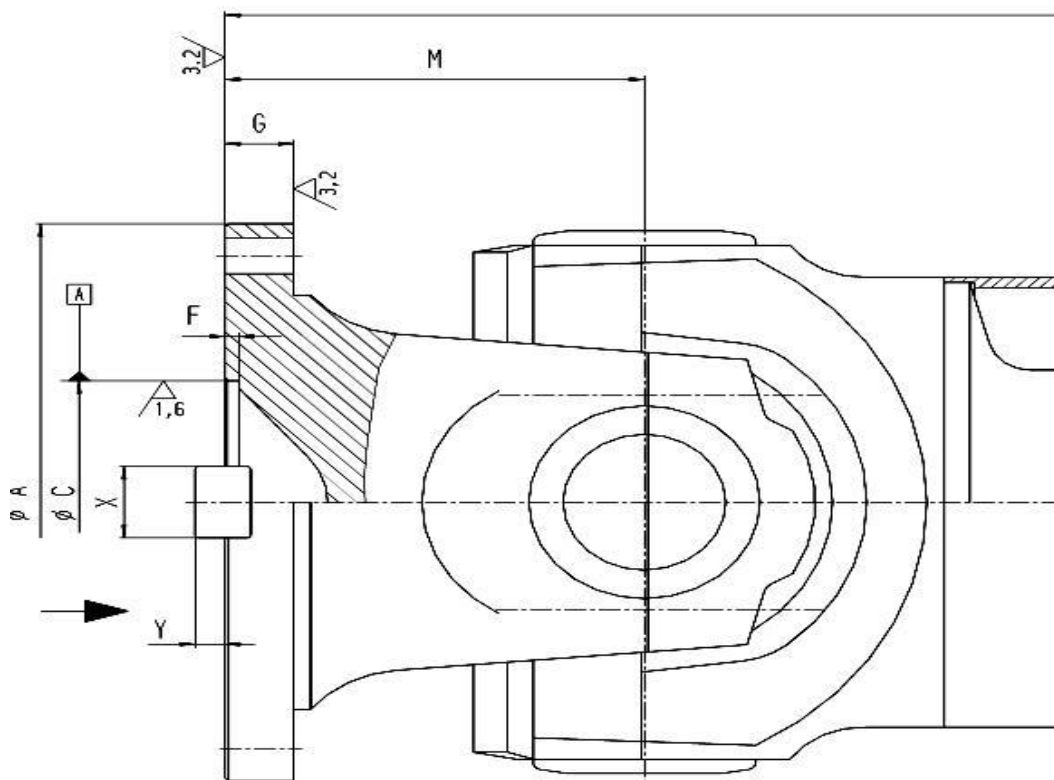


Figura 22: Ilustração apresentando o tipo de acoplamento que fica na ponta dos eixos-cardan.
Fonte: AMT (2011).

As considerações adotadas para o eixo-cardan (ANEXO A) estão descritas abaixo, lembrado que mesmo com a chaveta presente na montagem, os parafusos recebem ainda um torque residual, transmitido pelo eixo cardan porem aqui são desconsiderados para efeito de cálculo.

- Massa total do eixo “ M_t ” igual a 590kg;
- Comprimento inicial “ C_i ” do eixo-cardan igual a 3875,74mm;
- Faixa do ângulo “ β ” de trabalho entre 5,3° a 13,7°;
- Faixa de alongamento do eixo-cardan entre 3840 a 3970,00mm;
- Faixa operacional de torque variando entre 40000,0 a 75000,0Nm.

Sobre os parafusos de fixação dos acoplamentos (ANEXO B), têm-se as seguintes especificações:

- Parafuso norma Din 931 / Norma isso 898.1;
- Microestrutura de aço carbono;
- Classe resistência 10.9
- Torque conforme norma DIN 267 (ANEXO C)
- M22 com cabeça sextavada;
- Diâmetro nominal 22,00 mm;
- Rosca métrica parcial;
- Passo 2,50 mm;
- Comprimento total 95 mm;
- Oleado;
- Rosca métrica parcial;
- Diâmetro nominal 22,00 mm;
- Forjado com rosca laminada a frio;

4.3 ANÁLISES DINÂMICAS DOS ESFORÇOS

4.3.1 Histórico de falhas

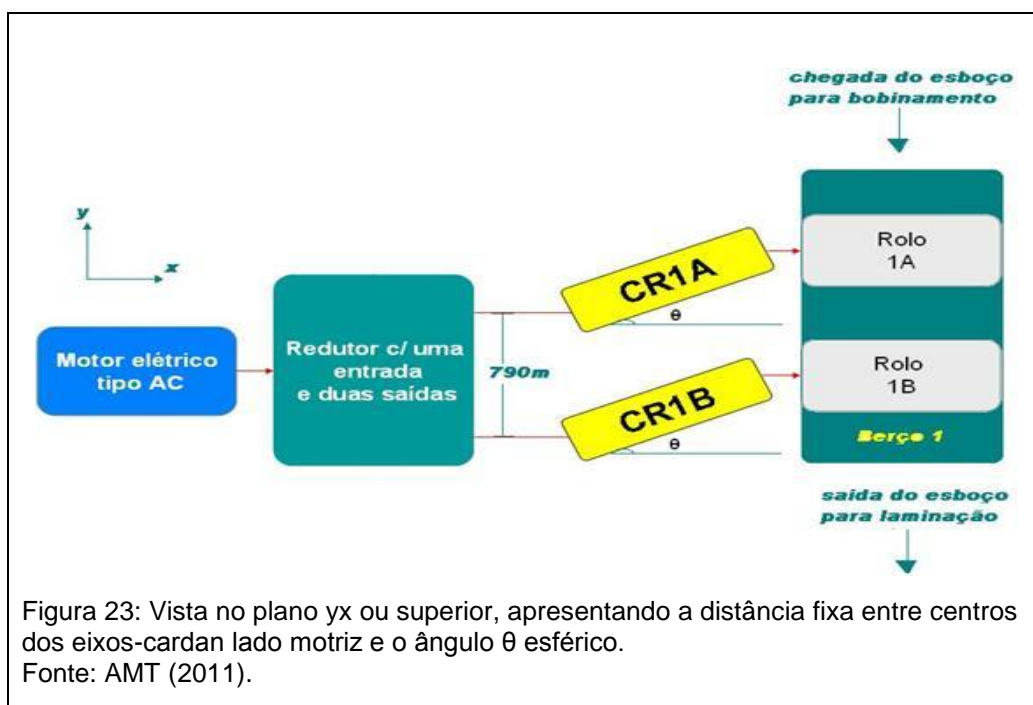
Desde 2006 até a presente data, têm-se alguns registros de danos aos parafusos de fixação dos eixos-cardan com os rolos do CR1. As maiores ocorrências estão registradas como:

- Troca normal devido plano de manutenção;
- Alongamento dos parafusos;
- Parafusos folgados;
- Chaveta do acoplamento quebrada;
- Torque inadequado dos parafusos.

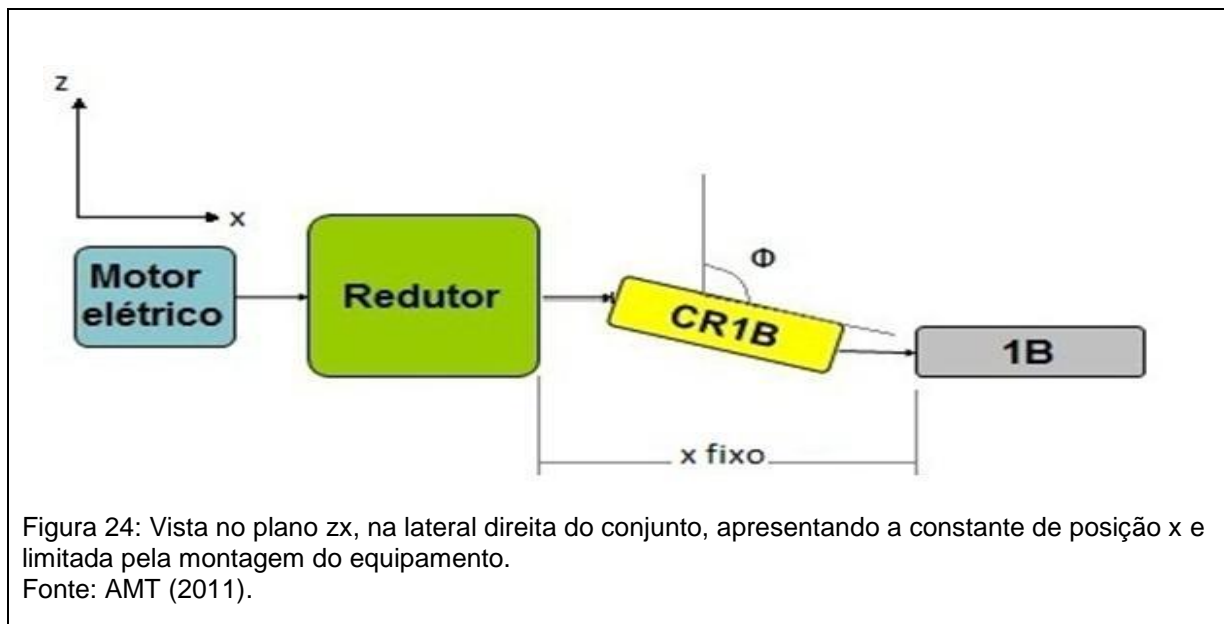
Os dados acima são registros de um relatório de causalidades, fornecido pela AMT. Após esses registros, começou-se a observar o comportamento dos eixos- cardan durante o processo de produção do Coilbox, pois as ocorrências surgiram após a inversão dos mesmos, ficando a parte mais pesada dos eixos acoplada aos rolos do CR1.

4.3.2 Estudo dos movimentos do CR1

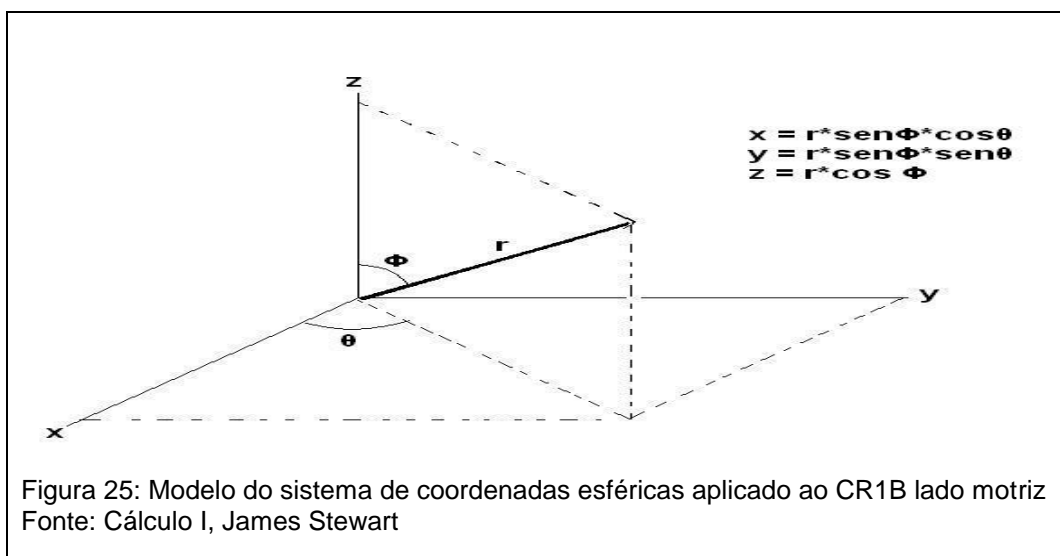
Com o objetivo de estimar as forças em que os parafusos estão sendo solicitados, é aplicado o método das velocidades e acelerações relativas neste trabalho, a fim de analisar as cargas cíclicas, atuantes nos parafusos de fixação dos eixos-cardan lado CR1. Para este fim, foram definidos os parâmetros iniciais de posição dos eixos-cardan, com relação ao lado motriz (reductor) e lado acionado (Rolos 1A e 1B). A figura 23 apresenta um esquemático da disposição do conjunto em vista superior conforme abaixo.



A figura 24 apresenta um esquemático da disposição do conjunto em vista lateral esquerda conforme abaixo.



A figura 25 tem-se uma simples representação do modelo esquemático de coordenadas esféricas.



Observa-se que nas figuras 23 e 24 anteriores, os ângulos iniciais Φ (fi) e θ (teta) são iguais para os dois eixos-cardan, devido o projeto apresenta-los desta maneira quando os cilindros hidráulicos de acionamento estão recuados. Após obtê-los com os desenhos de projeto, aplicando as equações esféricas para obter as coordenadas iniciais, cria-se a tabela 1 de configuração inicial:

Tabela 1: Configuração inicial dos ângulos esféricos

Ângulos esféricos			Comprimento inicial dos eixos-cardan em milímetros	Coordenada x "fixa" em milímetros	Coordenada y em milímetros	Coordenada z em milímetros
θ	graus	4	3897	3875,74	271,02	-303,04
	rad	0,0698				
Φ	graus	94,46				
	rad	1,6486				

Fonte: Desenho original de projeto do equipamento (2011).

Durante o processo produtivo do Coilbox, foram coletados os dados referentes a avanço e recuo dos cilindros hidráulicos com também, a taxa de crescimento do diâmetro da bobina esboço através do sistema de monitoramento de posição da empresa, representado no gráfico 3 abaixo.

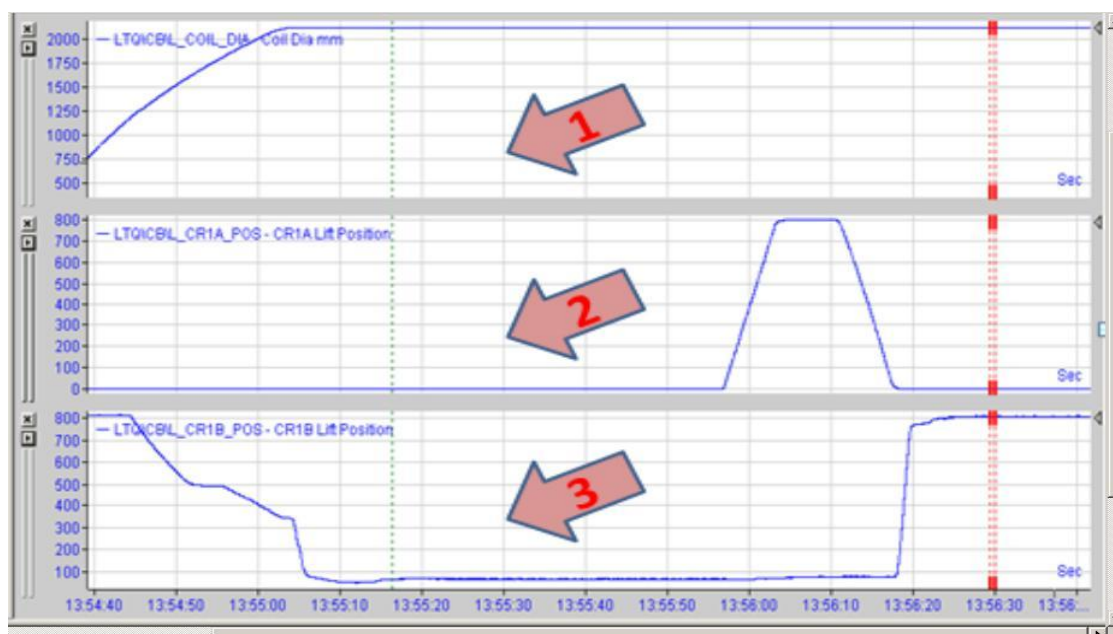
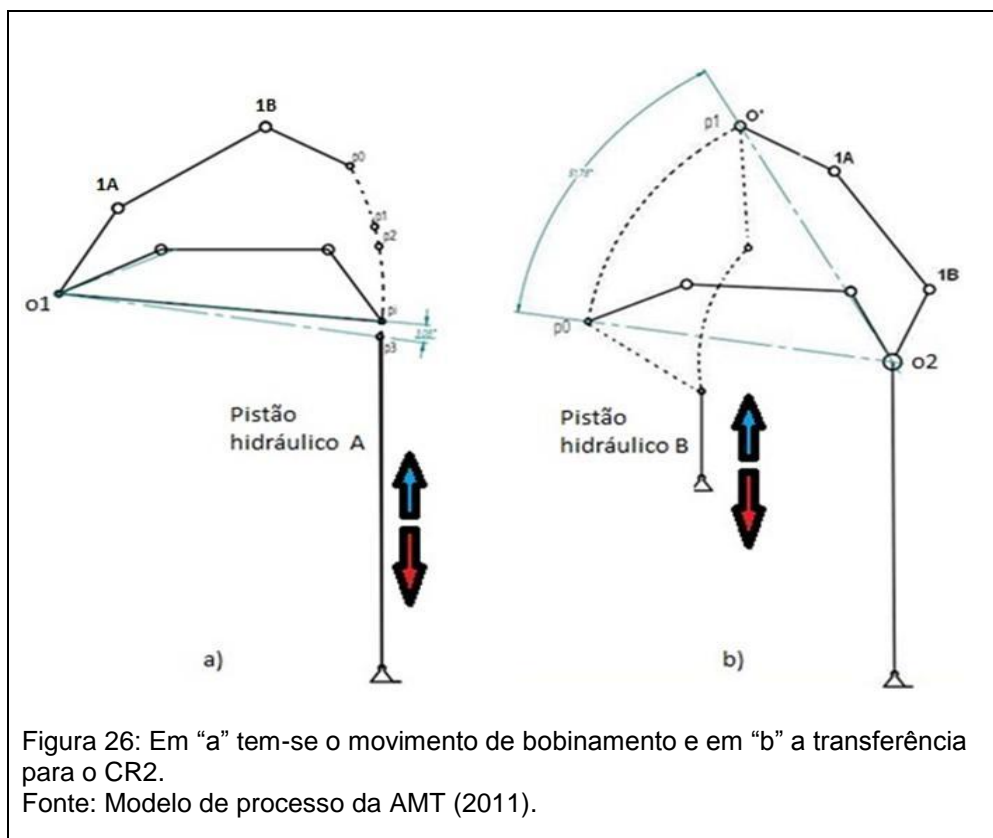


GRÁFICO 3: Monitoramento de formação do esboço da bobina.
 Fonte: Ibaanalyzer, software de monitoramento utilizado pela empresa.

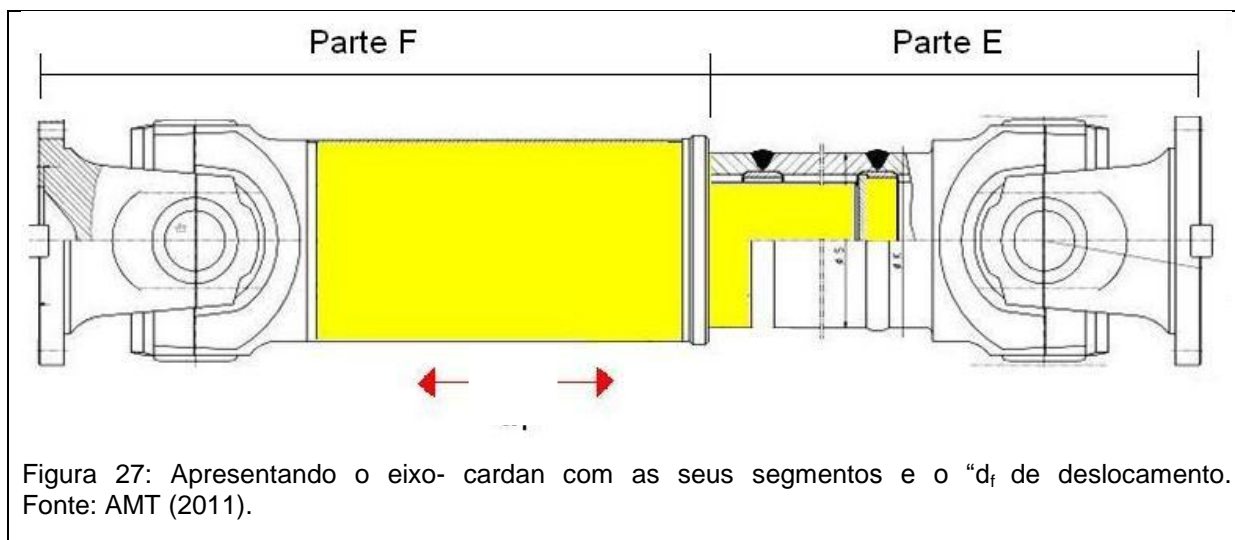
As setas indicativas apresentam as seções dos gráficos onde:

- 1 – Representa o controle dimensional da bobina, iniciando a partir do diâmetro inicial de 700,0mm;
- 2 – Posições variando de 11,90 a 800,0mm de curso da haste do cilindro hidráulico de movimento do rolo 1A;
- 3 – Posições variando de 11,90 a 800,0mm de curso da haste do cilindro hidráulico de movimento do rolo 1B.

Apresentando estes dados acima e com os desenhos de projeto do CR1, pode-se criar um esquemático do movimento conforme figura 26 a seguir, levando em conta seus pontos articulados, seu sistema de acionamento e os pontos onde estão acoplados os eixos-cardan, que também estão localizados na face de montagem dos acoplamentos dos rolos do CR1.



As estimativas das cargas instantâneas sobre os parafusos, foram obtidas através do grau de liberdade de alongamento dos eixos-cardan, pois conforme desenho a seguir. O eixo é dividido em dois segmentos, denominados E e F, onde E representa o eixo estriado e F o cubo com o estriado interno, montados e em operação, tem-se durante todo o processo, a possibilidade do eixo ter seu comprimento aumentado ou recuado, ocorrendo assim um movimento relativo entre as partes conforme Figura 27.



Esse movimento relativo resulta em cargas dinâmicas de inércia. O estudo dessas cargas de inércia adicionais (existem cargas torcionais, devido à transmissão de potência), em comparação com o limite de resistência dos parafusos, pode dar uma estimativa quantitativa da solicitação dos parafusos.

As propriedades cinemáticas obtidas com o sistema montado, em conjunto com os dados do programa de monitoramento, são as necessárias para estimar as forças dinâmicas que atuam sobre os parafusos de fixação dos eixos-cardan no CR1.

A seguir classificam-se os movimentos do CR1 em 4 partes, sendo estas:

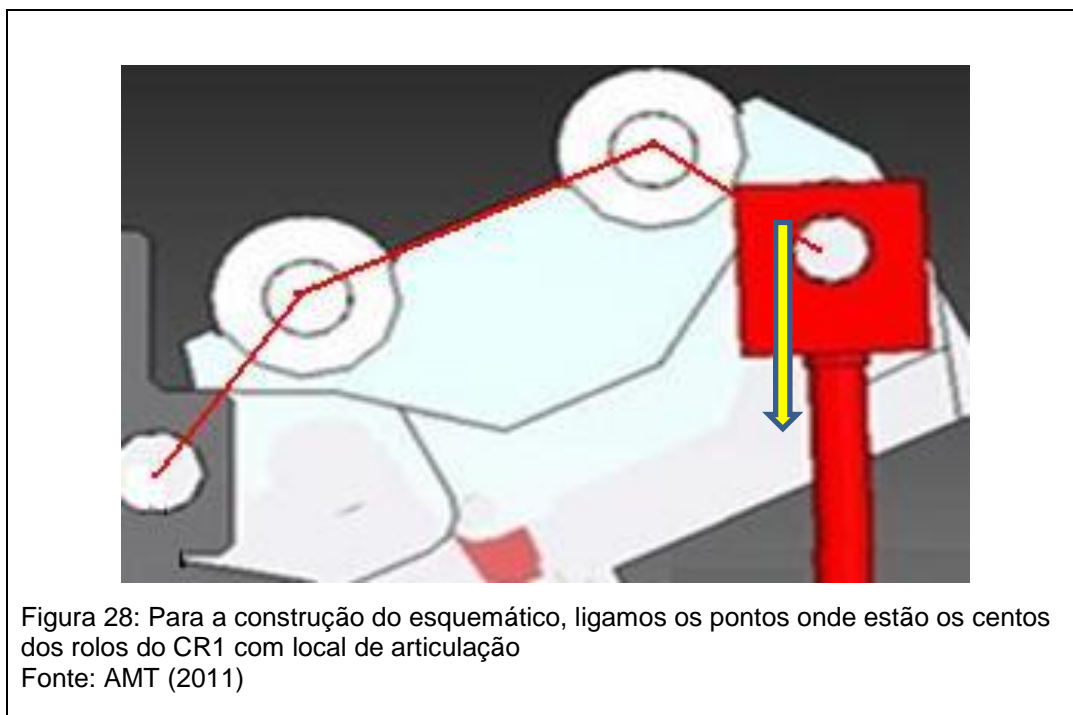
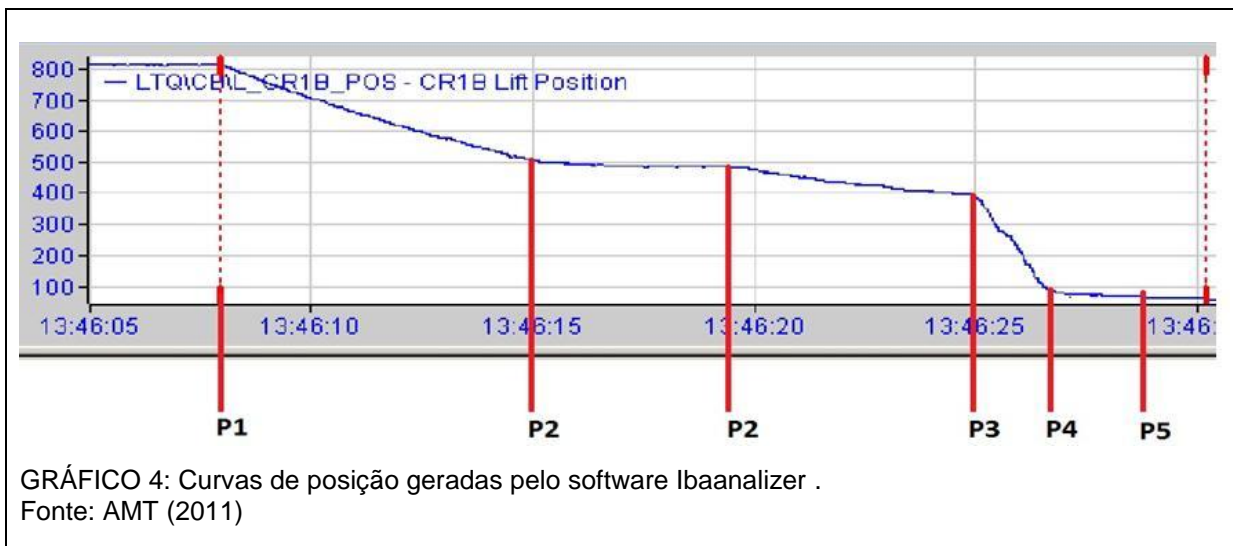
- 1º Receber esboço para pré-bobinar;
- 2º Transferir esboço bobinado para o CR2;
- 3º Recolher CR1;
- 4º Retornar CR1 a posição de recebimento.

A seguir, analisam-se as forças para cada estágio.

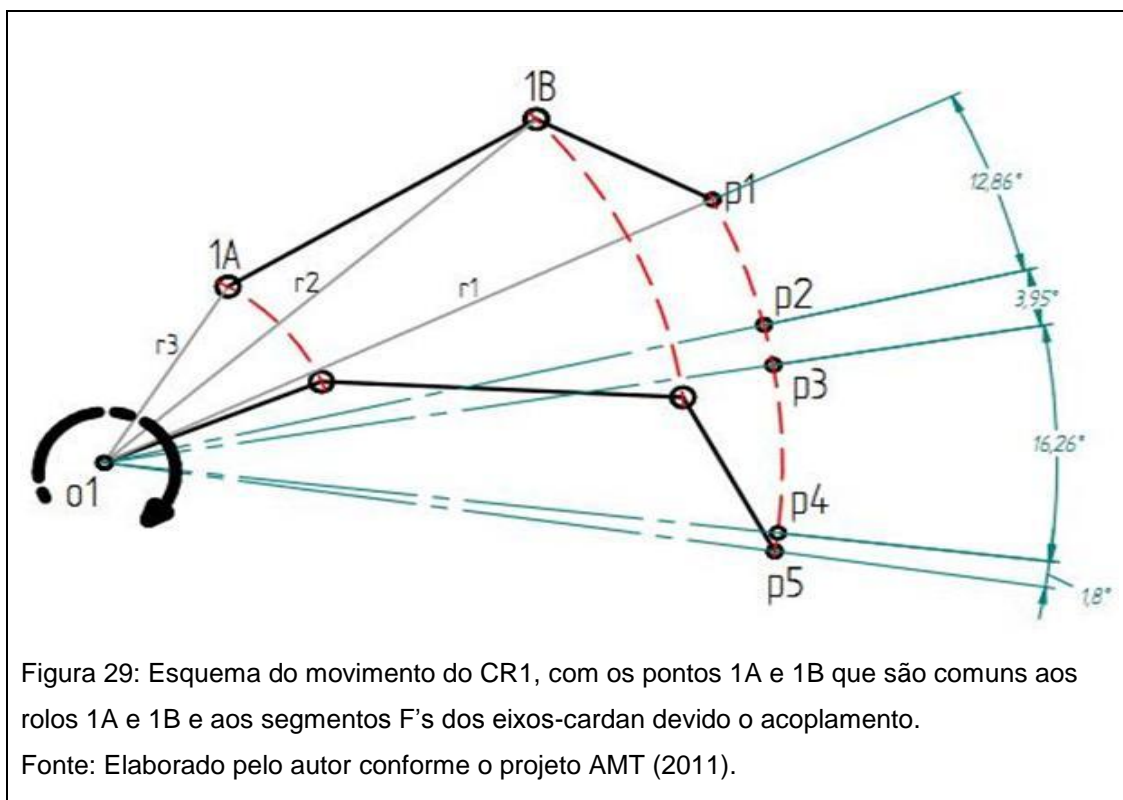
4.3.3 Análise do 1º estágio – Receber esboço a bobinar

Com o auxílio do programa Ibaanalyzer conforme gráfico 4 e a figura esquemática 28, foram obtidas as curvas de deslocamento do cilindro hidráulico lado rolo 1B. Neste momento o cilindro está tendo sua haste recuada, gerando um movimento em

sentido horário no CR1 que por sua vez desloca o eixo-cardan CR1B para a posição de repouso do esboço bobinado.



A figura 29 apresenta o modelo de estudo para o movimento de recebimento de bobina.



As forças que ocorrem sobre os parafusos, estão localizadas nos pontos 1A e 1B e podem ser analisadas pela 2ª lei de Newton que define força como:

$$F = m \cdot a \quad (4.1)$$

Em relação a massa envolvida têm-se a seguinte informação fornecida pela empresa:

Massa total do conjunto:

$$m_t = 590 \text{ kg} \quad (4.2)$$

Massa do segmento F:

$$m_f = 0,76 \cdot m_t = 448,4 \text{ kg} \quad (4.3)$$

Logo:

A Força peso de F é igual a:

$$P_f = m_f \cdot g \quad (4.4)$$

$$P_f = 4396,84 \text{ N} \quad (4.5)$$

Em relação às acelerações, analisa-se um ponto “f” e “e” em comum entre o segmento “E” e o segmento “F” e aplica-se a teoria das acelerações relativas, onde tem-se que:

Para o ponto E, pertencente ao segmento fixo no redutor, tem-se a seguinte relação cinemática conforme [4] (Russell, 2011):

$$\vec{a}_e = \vec{a}_{o1} + \vec{a}_{e/o1}^n + \vec{a}_{e/o1}^t + \vec{a}_{e/o1}^c \quad (4.6)$$

Onde:

\vec{a}_e , é a aceleração do segmento E;

\vec{a}_{o1} , é a aceleração da origem do sistema, tendo módulo igual a 0;

$\vec{a}_{e/o1}^n$, é a aceleração normal de E vista pela origem;

$\vec{a}_{e/o1}^t$, é a aceleração tangencial de E vista pela origem, tendo modulo igual a 0 pois considera-se a aceleração angular desprezível;

$\vec{a}_{e/o1}^c$, é a aceleração de coriolis de F vista pela origem, tendo módulo igual a 0 pois os dois pontos pertencem ao mesmo corpo.

Logo, a equação fica reduzida em:

$$\vec{a}_e = \vec{a}_{e/o1}^n \quad (4.7)$$

$$|\vec{a}_e| = \omega_m \cdot r_{centróide} \quad (4.8)$$

Como $\vec{a}_{e/o1}^n$ tem a mesma direção do corpo do eixo-cardan e sentido de E para O₁, conclui-se que seu módulo não exerce força sobre os parafusos, pois E e F são segmentos diferentes, logo:

$a_e^{\rightarrow} = 0$, para efeito de cálculos.

Têm-se agora a análise das acelerações no ponto F em relação ao ponto E sendo:

$$a_F^{\rightarrow} = a_E^{\rightarrow} + a_{F/E}^{\rightarrow n} + a_{F/E}^{\rightarrow t} + a_{F/E}^{\rightarrow c} \quad (4.9)$$

Onde:

a_F^{\rightarrow} , é a aceleração do segmento F;

a_E^{\rightarrow} , é a aceleração do segmento E, tendo módulo igual a zero para efeito de cálculos;

$a_{F/E}^{\rightarrow n}$, é a aceleração normal de “F” vista por “E”

$a_{F/E}^{\rightarrow t}$, é a aceleração tangencial de “F” vista por “E”

$a_{F/E}^{\rightarrow c}$, é a aceleração de coriolis de “F” vista por “E” devido o movimento rotacional do eixo-cardan.

Logo, têm-se abaixo as acelerações envolvidas no processo e suas equivalências.

$$a_{F/E}^{\rightarrow n} = \omega_{m,cr}^2 \times r_{centróide} \quad (4.10)$$

Onde:

$\omega_{m,cr}^2$ é a velocidade angular média do Eixo-cardan;

r_c é o raio do centroide do Eixo-cardan;

$$a_{F/E}^{\rightarrow c} = 2 \times v_{F/E} \times \omega_{m,cr} \quad (4.11)$$

Onde:

$v_{F/E}$ é a velocidade linear de F em relação a E;

Obtendo $\omega_{m,cr}$

Com referência a figura 29 anterior, têm-se os seguintes pontos de destaque:

- O_1 , que é Ponto de origem do movimento fixado na articulação do CR1;
- 1A, que é Ponto onde esta fixado o eixo-cardan CR1A;
- 1B, que é Ponto onde esta fixado o eixo-cardan CR1B;

Como neste momento, o objetivo é estimar as velocidades angulares dos CR1A e CR1B, coletam-se os seguintes raios:

$$r_1 = O_1P = 1477,30 \text{ mm}$$

$$r_2 = O_1B = 1270,98 \text{ mm}$$

$$r_3 = O_11A = 514,30 \text{ mm}$$

Os ângulos de posição foram obtidos com o deslocamento de recuo da haste do cilindro hidráulico lado 1B. A equação 4.12 abaixo foi utilizada, para transformar graus em radianos.

$$\frac{2\pi\theta_g}{360^\circ} = \theta_{rd} \quad (4.12)$$

Onde:

θ_g é o ângulo medido;

θ_{rd} é o ângulo correspondente a θ_g em radianos.

Temos na tabela 2, os ângulos obtidos:

Tabela 2: Configuração inicial dos ângulos de posição.

Posição	Ângulos		Tempo de abertura
	<i>em graus</i>	<i>em radianos</i>	<i>em segundos</i>
De P ₁ para P ₂	12°52'	0,224	7,2
De P ₂ para P ₃	3°57'	0,069	5,5
De P ₃ para P ₄	16°15'	0,284	2,0
De P ₄ para P ₅	16°48'	0,031	2,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por trigonometria e apresentado na tabela 3, calculam-se os comprimentos dos arcos gerados por 1A e 1B entorno de O₁ pela equação:

$$S = r\theta_{rd} \quad (4.13)$$

Onde:

S é um arco qualquer;

r é o raio para a abertura do ângulo θ_{rd} .

Tabela 3: Comprimento dos arcos.

Comprimento dos arcos [m]				
	S1	S2	S3	S4
P	0,332	0,102	0,419	0,046
1B	0,285	0,088	0,361	0,040
1A	0,115	0,035	0,146	0,016

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de encontrar as velocidades tangenciais médias, nas extremidades dos eixos-cardan, faz-se uso o uso da seguinte expressão:

$$v_m^t = \Delta S / \Delta t \quad (4.14)$$

Onde:

v_m^t é a velocidade média tangencial;

ΔS é a variação dos arcos para os pontos 1A e 1B;

Δt é o intervalo de tempo durante a abertura dos arcos.

Logo, tem-se na tabela 4, o registro das velocidades médias tangenciais do CR1A e CR1B.

Tabela 4: Velocidades tangenciais estimadas de acordo com o tempo fornecido pelo Ibaanalizer.

Velocidades tangenciais médias em m/s				
	Posições			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	0,039621	0,015931	0,180346	0,019965
CR1A	0,016033	0,006447	0,072977	0,008079

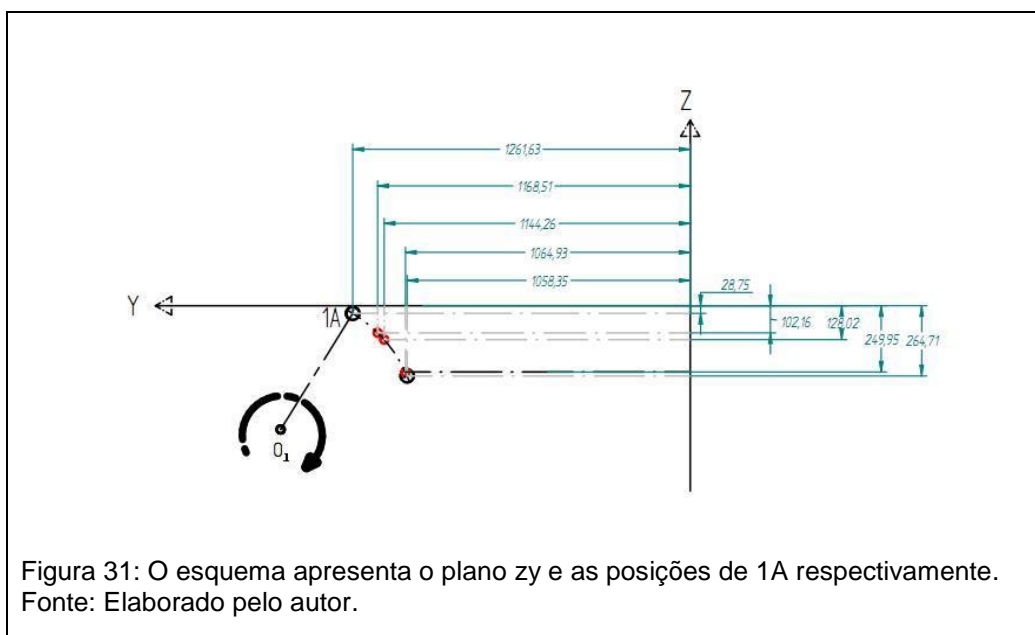
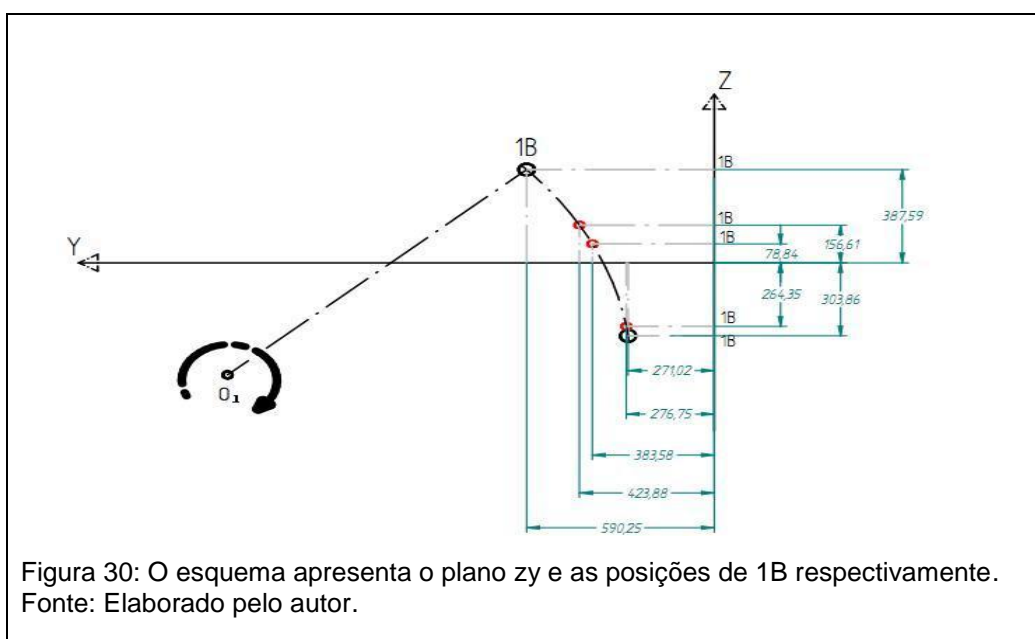
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dado que estas velocidades tangenciais médias pertencem aos CR1A e CR1B, calculam-se agora as velocidades angulares médias de cada eixo-cardan, nas 4 posições e nas seguintes considerações:

- Tem-se para cada um dos eixos-cardan, a propriedade de alongar ou encurtar seu comprimento em virtude da união de suas partes em cubo e eixo estriado.

- b) A coordenada x do sistema esférico não varia em virtude do projeto logo, para obter as coordenadas faltantes, desloca-se a origem do sistema esférico (que está no centro da cruzeta do CR1B lado redutor) pelo eixo x, até o plano zy de movimento das pontas dos CR1A e CR1B acoplados aos rolos do CR1.

Com essas condições foram criados dois esquemas separados de coordenadas para a obtenção do tamanho médio de cada cardan em cada posição conforme as figuras 30 e 31 abaixo:



O comprimento “L” de cada cardan é calculado pela equação trigonométrica:

$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4.15)$$

Onde:

x, y e z são os valores das coordenadas esféricas encontradas;

L é um comprimento qualquer do eixo-cardan no sistema de coordenadas esféricas.

- c) Após obter os valores dos comprimentos dos eixos-cardan para cada posição estudada, calculam-se as velocidades angulares médias com a seguinte expressão:

$$\omega_m = \frac{v_m^t}{L} \quad (4.16)$$

Onde:

ω_m = Velocidade angular média para cada cardan;

Têm-se na tabela 5 abaixo os valores encontrados:

Tabela 5: Valores das velocidades angulares médias obtidas para cada eixo-cardan.

Velocidades angulares médias em [rd/s]				
	Posições			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	0,010057	0,004083	0,046296	0,005126
CR1A	0,004106	0,001655	0,018741	0,002075

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter $v_{F/E}$, a mesma foi estimada, verificando a variação do comprimento para cada eixo-cardan em cada posição no intervalo de tempo registrado. Logo tem-se que:

$$v_{F/E} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (4.17)$$

Onde:

$v_{F/E}$ é a velocidade de F vista por E;

ΔL é a variação do comprimento do cardan durante a mudança de posição

Têm-se na tabela 6 abaixo os valores encontrados, sendo que valores negativos indicam o encurtamento e positivos alongamentos dos eixos.

Tabela 6: Velocidades relativa de F vista por E.

Velocidades relativas registradas [m/s]				
	Posição			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	-5,21E-03	-1,19E-03	-4,41E-04	1,24E-03
CR1A	-1,24E-03	-2,76E-04	-2,46E-04	2,58E-04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso da posição do centroide r_c de cada eixo-cardan, utiliza-se a definição de centroide a seguir, partindo do referencial fixo do eixo que seria no ponto de acoplamento do redutor:

$$r_{centroide} = \frac{m_e c_e + m_f c_f}{m_e + m_f} \quad (4.18)$$

Partido da suposição que apenas os cubos dos eixos se deslocam, tem-se uma variação da posição dos centroides em função de x_f onde x_f é a coordenada axial, referenciada na figura 28:

$$c_f = c'_f + \Delta l \quad (4.19)$$

Onde:

$c'_f = 2,9882 \text{ m}$, é distância entre o centroide do corpo F com a origem do sistema esférico;

Δl é a variação entre o comprimento final e inicial do eixo.

Logo para o cálculo do centroide em qualquer posição tem-se:

$$r_{centroide} = \frac{m_e d_e m_f (2,9882 + \Delta l)}{m_e m_f} \quad (4.20)$$

Com os dados anteriores e utilizando as equações de coordenadas esféricas, foi gerada a tabela 7 a seguir:

Tabela 7: Posições e velocidades dos CR's.

Com os dados obtidos, e fazendo o uso das equações abaixo:

$$a_{F/E}^{\vec{n}} = \omega_{m,cr}^2 \times r_{centróide} \quad (4.21)$$

$$a_{F/E}^{\vec{c}} = 2 \times v_{F/E} \times \omega_{m,cr} \quad (4.22)$$

Encontram-se os módulos estimados para essas acelerações, em cada ponto conforme as tabelas 8 e 9 abaixo:

Tabela 8: Aceleração de coriolis devido o deslizamento entre os corpos A e B dos eixos-cardan CR1B e CR1A [m/s^2].

Posição				
	1º	2º	3º	4º
CR1B	-9,02E-05	-8,33E-06	-3,52E-05	1,09E-05
CR1A	-3,54E-06	-3,18E-07	-3,21E-06	3,73E-07

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9: Acelerações normais devido a ω do sistema em [m/s^2].

Normais				
	1º	2º	3º	4º
CR1B	1,76E-04	2,87E-05	3,68E-03	4,52E-05
CR1A	4,76E-06	7,71E-07	9,88E-05	1,21E-06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Multiplica-se a massa m_f do segmento F pelas acelerações obtidas, elaborando-se abaixo as tabelas 10 e 11 de resultados:

Tabela 10: Forças de Coriolis no 1º estágio.

Força devido a aceleração de coriolis [N]				
	Posição			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	-0,461	-0,043	-0,180	0,056
CR1A	-0,045	-0,004	-0,041	0,005

Fonte: Elaborado pelo autor.

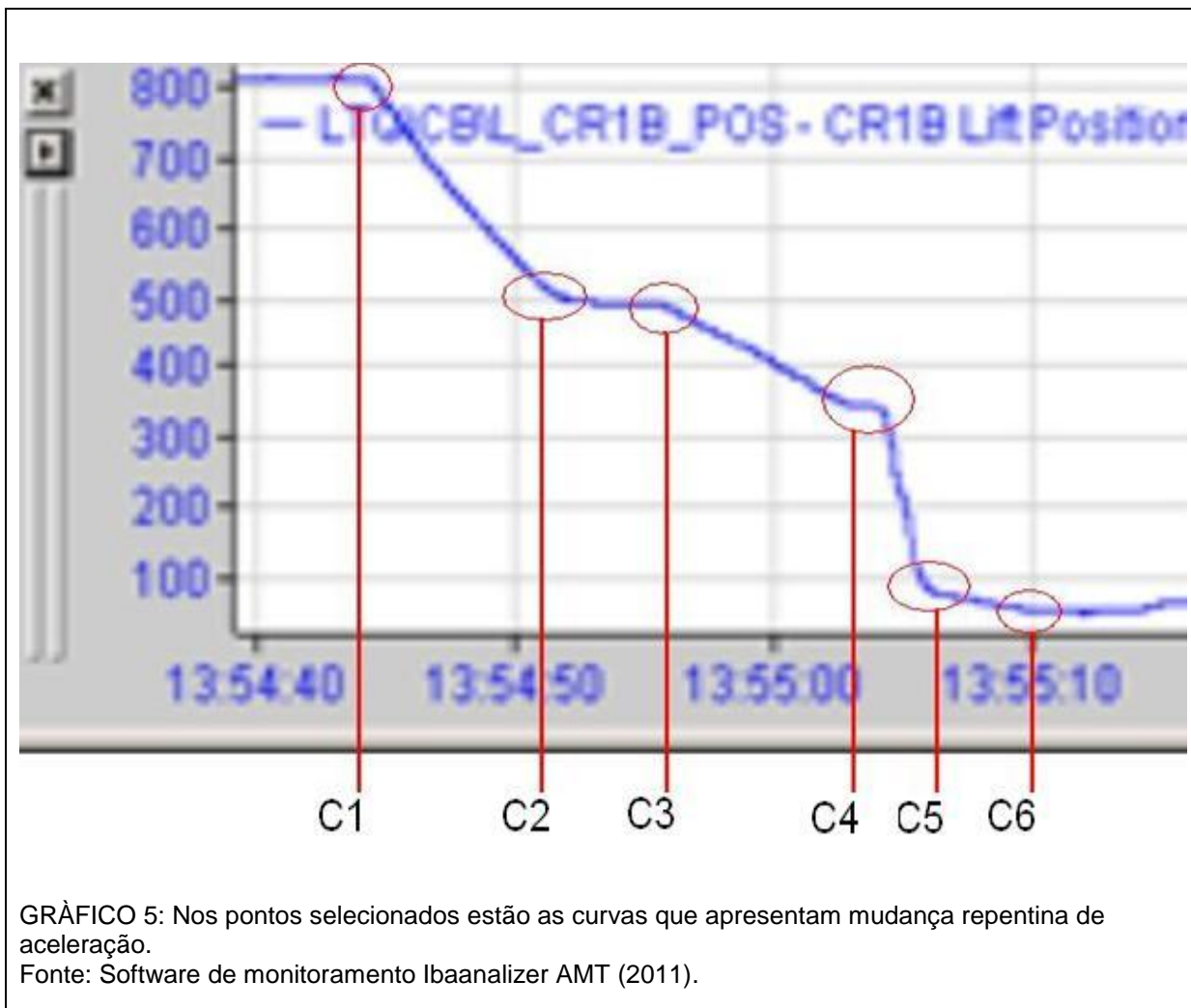
Tabela 11: Forças normais no 1º estágio.

Força devido aceleração normal [N]				
	Posição			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	1,037	0,169	21,667	0,266
CR1A	0,171	0,028	3,549	0,043

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para estimar a componente $a_{F/E}^t$, fez-se uma análise das curvas do gráfico de posição versus tempo nas regiões onde ocorrem as acelerações de arranque ou máximas do conjunto CR1.

O gráfico 5 a seguir, apresenta os locais do gráfico, onde ocorrem as máximas acelerações.



Através do software de design gráfico Corel Draw x3, foi possível coletar alguns pontos bem próximos de cada curva, a fim de construir as equações aproximadas das curvas de posição, velocidade e aceleração. O software utilizado para determinar tais equações foi o Maple 14.

Demonstrando-se como foi feita a análise, utiliza-se como exemplo, a curva C_1 do gráfico 5. Nesta curva, foram coletados os seguintes pontos de posição versus tempo conforme tabela 12.

Tabela 12: Posições analisadas na curva C_1 .

Tempo	Posição
0,000	39,915
0,252	37,618
0,547	30,101
0,748	18,142
0,866	10,186

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do software Maple 14, encontrou-se as equações e gráficos de posição, velocidade e aceleração para a C_1 durante o intervalo de tempo ocorrido:

$$\text{Posição} \rightarrow s(t) = -36,84 \cdot t^2 - 2,03 \cdot t + 40,12 \text{ mm} \quad (4.23)$$

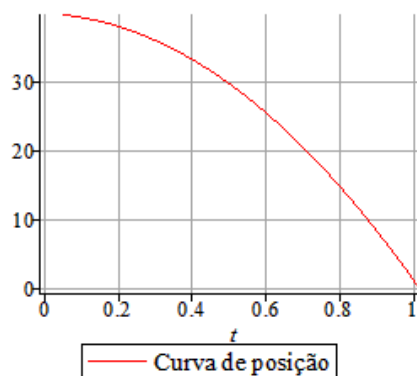


GRÁFICO 6: Posição.

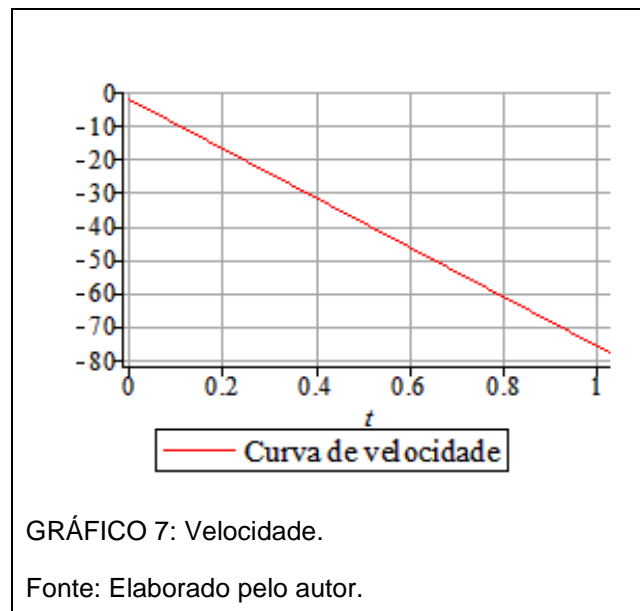
Fonte: Elaborado pelo autor.

Derivando a equação 4.23 tem-se:

$$v_{(t)} = \frac{ds_{(t)}}{dt} \quad (4.24)$$

$$v_{(t)} = \frac{d(-36,836 \cdot t^2 - 2,0238 \cdot t + 40,1126)}{dt} \quad (4.25)$$

$$velocidade \rightarrow v_{(t)} = -73,672 \cdot t - 2,03 \text{ mm/s} \quad (4.26)$$

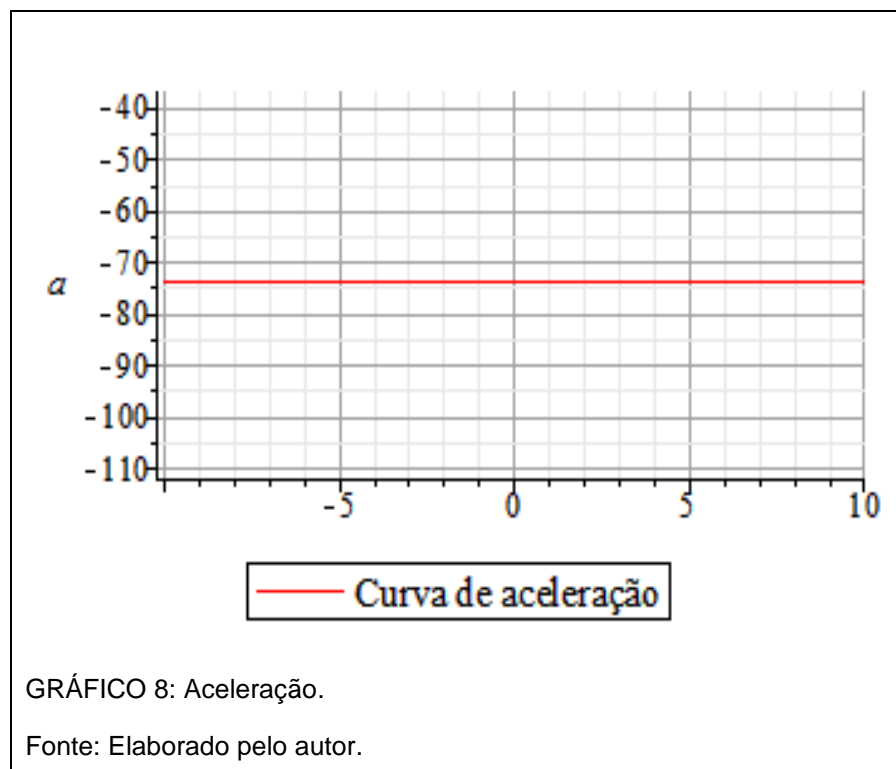


Derivando a equação 4.26 tem-se:

$$a_{(t)} = \frac{dv_{(t)}}{dt} \quad (4.27)$$

$$a_{(t)} = \frac{d(-73,672 \cdot t - 2,0238)}{dt} \quad (4.28)$$

$$aceleração \rightarrow a_{(t)} = -73,67 \text{ mm/s} \quad (4.29)$$



Como estamos trabalhando no sistema internacional de unidades (SI), nossa aceleração estimada para esta curva fica:

$$\text{aceleração} \rightarrow a_{(t)} = -0,08 \text{ m/s}^2 \quad (4.30)$$

Obtendo-se as acelerações com todas as curvas plotadas (porem não descritas neste trabalho), montam-se uma tabela onde constam todas as forças estimadas para os movimentos analisados, em função das acelerações encontradas do conjunto, juntamente com a influência da massa do segmento F.

Têm-se aqui, as tabelas de resultados 13 e 14, apresentando as forças tangenciais máximas e as equações que originaram as acelerações estimadas.

Tabela 13: Forças tangenciais máximas encontradas para o 1º estágio.

Curvas	instantes [s]	aceleração máxima [m/s ²]	Força máxima [N]
C1	0	-0,074	-33,035
C2	0	0,014	6,179
C3	0	-0,029	-12,974
C4	0	0,147	65,959
	2,426	-0,184	-85,231
C5	0	0,832	373,069
	0,718	-0,791	-354,684
C6	0	0,682	305,808
	0,625	0,026	11,658

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14: Equações relacionadas às curvas de aceleração do 1º estágio.

Equações estágio 1	
C1	$s_{(t)} = -36,836 \cdot t^2 - 2,0238 \cdot t + 40,1126$
	$v_{(t)} = -73,672 \cdot t - 2,0238$
	$a_{(t)} = -73,672$
C2	$s_{(t)} = 6,890 \cdot t^2 - 35,374 \cdot t + 45,015$
	$v_{(t)} = 13,780 \cdot t - 35,374$
	$a_{(t)} = 13,780$
C3	$s_{(t)} = 2,830 \cdot t^3 - 14,467 \cdot t^2 + 3,221 \cdot t + 33,555$
	$v_{(t)} = 8,488 \cdot t^2 - 28,935 \cdot t + 3,221$
	$a_{(t)} = 16,975 \cdot t - 28,935$
C4	$s_{(t)} = -22,749 \cdot t^3 + 73,510 \cdot t^2 - 72,603 \cdot t + 76,278$
	$v_{(t)} = -68,246 \cdot t^2 + 147,011 \cdot t - 72,603$
	$a_{(t)} = -136,492 \cdot t + 147,011$
C5	$s_{(t)} = -376,787 \cdot t^3 + 416,126 \cdot t^2 - 279,093 \cdot t + 125,782$
	$v_{(t)} = -1130,361 \cdot t^2 + 832,252 \cdot t - 279,093$
	$a_{(t)} = -2260,722 \cdot t + 832,252$
C6	$s_{(t)} = -174,503 \cdot t^3 + 340,902 \cdot t^2 - 247,766 \cdot t + 68,999$
	$v_{(t)} = -523,509 \cdot t^2 + 681,804 \cdot t - 247,776$
	$a_{(t)} = -1047,018 \cdot t + 681,804$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os estágios não demonstrados, têm-se os seguintes resultados:

2º Estágio - Transferir esboço bobinado para o CR2:

Nas tabelas 15 e 16, têm-se as forças de coriolis e normais encontradas:

Tabela 15: Forças de coriolis no 2º estágio.

Força devido a aceleração de coriolis [N]				
	Posição			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	-0,174	0,000	0,000	0,000
CR1A	1,089	0,000	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16: Forças Normais no 2º estágio.

Força devido aceleração normal [N]				
	Posição			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	2,274	0,000	0,000	0,000
CR1A	14,030	0,000	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 17, têm-se as forças tangenciais e na tabela 18, as equações polinomiais que descrevem as curvas de posição, velocidade tangencial e aceleração tangencial do conjunto.

Tabela 17: Forças tangenciais máximas encontradas no 2º estágio.

Curvas	instantes [s]	aceleração máxima [m/s ²]	Força máxima [N]
C1	0	0,531	238,1
	0,352	0,232	104,03
C2	0	-0,15	-67,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18: Equações relacionadas às curvas de aceleração do 2º estágio.

Equações estágio 2	
P1	$s_{(t)} = -141,481 \cdot t^3 + 265,433 \cdot t^2 - 11,633 \cdot t + 0,166$
	$v_{(t)} = -424,443 \cdot t^2 + 530,886 \cdot t - 11,633$
	$a_{(t)} = -848,886 \cdot t + 530,886$
P2	$s_{(t)} = 17,370 \cdot t^3 - 75,441 \cdot t^2 + 115,077 \cdot t + 0,415$
	$v_{(t)} = 52,109 \cdot t^2 - 150,882 \cdot t + 115,077$
	$a_{(t)} = 104,217 \cdot t - 150,882$

Fonte: Elaborado pelo autor.

3º Estágio - Recolher CR1

Nas tabelas 19 e 20, têm-se as forças de coriolis e normais encontradas:

Tabela 19: Forças de coriolis no 3º estágio.

Força devido a aceleração de coriolis [N]				
	Posição			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	0,152			
CR1A	-0,940			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20: Forças Normais no 3º estágio.

Força devido aceleração normal [N]				
	Posição			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	1,977			
CR1A	12,131			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 21, têm-se as forças tangenciais e na tabela 22, as equações polinomiais que descrevem as curvas de posição, velocidade tangencial e aceleração tangencial do conjunto.

Tabela 21: Forças tangenciais máximas encontradas no 3º estágio.

Curvas	instantes [s]	aceleração máxima [m/s ²]	Força máxima [N]
C1	0	-0,221	-99,096
C2	0	0,373	167,253

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22: Equações relacionadas às curvas de aceleração do 3º estágio.

Equações estágio 3	
P1	$s_{(t)} = 47,485 \cdot t^3 - 110,622 \cdot t^2 - 3,825 \cdot t + 51,926$
	$v_{(t)} = 142,445 \cdot t^2 - 221,244 \cdot t - 3,825$
	$a_{(t)} = 284,911 \cdot t - 221,244$
P2	$s_{(t)} = -77,716 \cdot t^3 + 186,635 \cdot t^2 - 171,255 \cdot t + 62,172$
	$v_{(t)} = -233,149 \cdot t^2 + 373,27 \cdot t - 171,255$
	$a_{(t)} = -466,298 \cdot t + 373,272$

Fonte: Elaborado pelo autor.

4º Estágio - Retornar CR1 a posição de recebimento.

Nas tabelas 23 e 24, têm-se as forças de coriolis e normais encontradas:

Tabela 23: Forças de coriolis no 4º estágio.

Força devido a aceleração de coriolis [N]				
	Posição			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	17,747	9,861		
CR1A	1,714	1,133		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24: Forças Normais no 4º estágio.

Força devido aceleração normal [N]				
	Posição			
	1º	2º	3º	4º
CR1B	106,689	17,577		
CR1A	17,479	2,894		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Têm-se abaixo, a tabela 25 com as forças tangenciais e na tabela 26, as equações:

Tabela 25: Forças tangenciais máximas encontradas no 4º estágio.

Curvas	instantes [s]	aceleração máxima [m/s ²]	Força máxima [N]
C1	0	1,405	630,002
C2	0	-1,649	-739,421
	0,779	0,833	373,517
C3	0	-0,514	-230,477
	0,252	0,746	334,506
C4	0	-0,136	-60,982
	0,524	-0,032	-14,348

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26: Equações relacionadas às curvas de aceleração do 4º estágio.

Equações estágio 4	
P1	$s(t) = -463,274 \cdot t^3 + 702,366 \cdot t^2 - 47,731 \cdot t + 0,120$
	$v(t) = -1389,822 \cdot t^2 + 1404,732 \cdot t - 47,731$
	$a(t) = -2779,644 \cdot t + 1404,732$
P2	$s(t) = 531,090 \cdot t^3 - 824,794 \cdot t^2 + 421,002 \cdot t + 4,650$
	$v(t) = 1593,27 \cdot t^2 - 1649,588 \cdot t + 421,002$
	$a(t) = 3186,540 \cdot t - 1649,588$
P3	$s(t) = 833,524 \cdot t^3 - 256,978 \cdot t^2 + 36,123 \cdot t + 0,019$
	$v(t) = 2500,572 \cdot t^2 - 513,956 \cdot t + 36,123$
	$a(t) = 5001,144 \cdot t - 513,956$
P4	$s(t) = 33,510 \cdot t^3 - 68,443 \cdot t^2 + 54,530 \cdot t + 0,015$
	$v(t) = 100,531 \cdot t^2 - 136,885 \cdot t + 54,530$
	$a(t) = 201,061 \cdot t - 136,885$

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Análise geral das forças encontradas

Depois de Feito o levantamento das forças de coriolis, tangenciais e normais atuantes sobre os parafusos, estas foram agrupadas conforme sua classificação e o sequenciamento dos estágios, gerando o gráficos 9, assim como também o gráfico 10 e 11 da página seguinte:

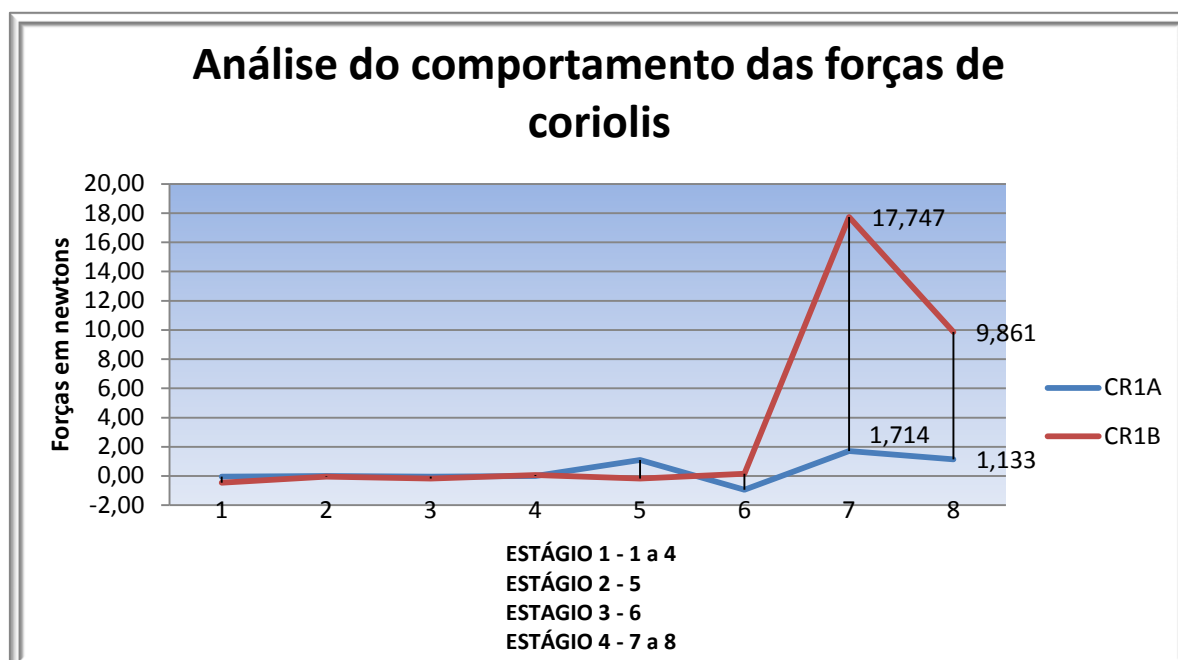


GRÁFICO 9: Força com maior expressão no início do 4º estágio.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Análise do comportamento das forças normais

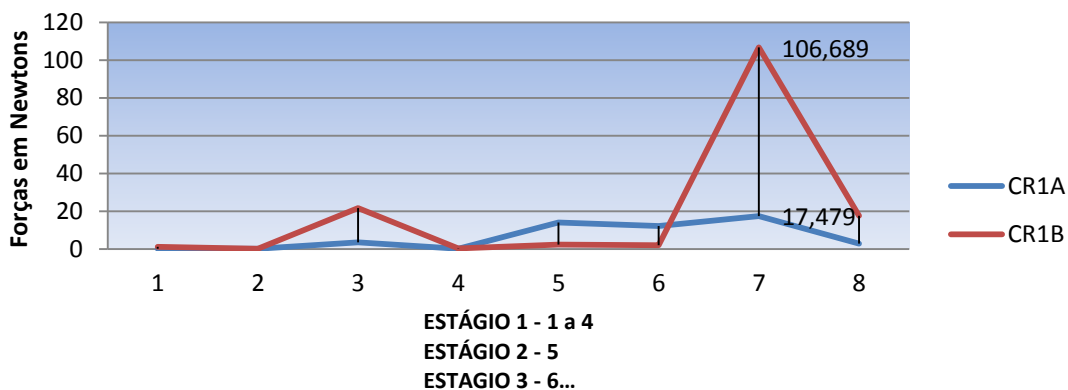


GRÁFICO 10: Força com maior expressão no início do 4º estágio.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Análise das Forças tangenciais

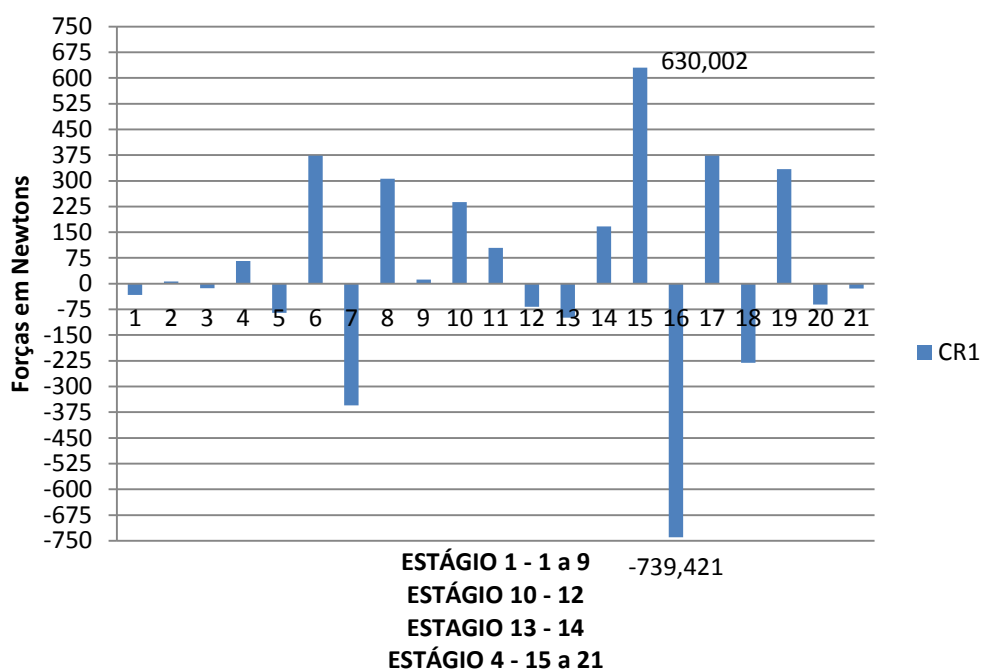
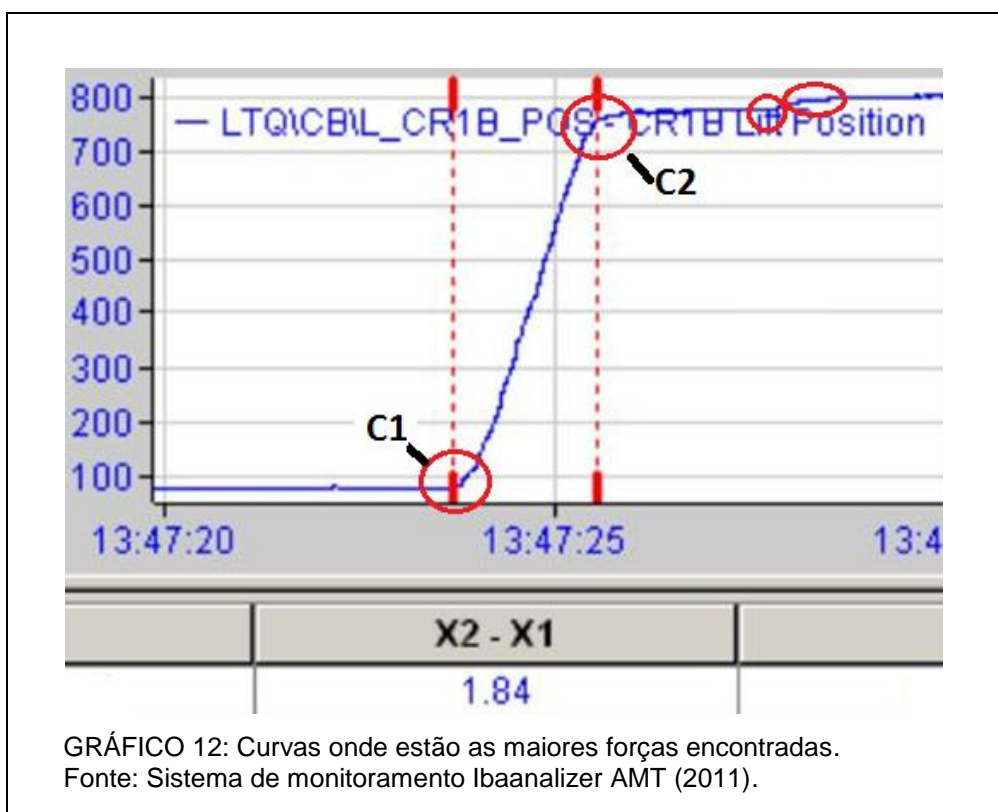


GRÁFICO 11: Força com maior expressão no início do 4º estágio.
Fonte: Elaborado pelo autor.

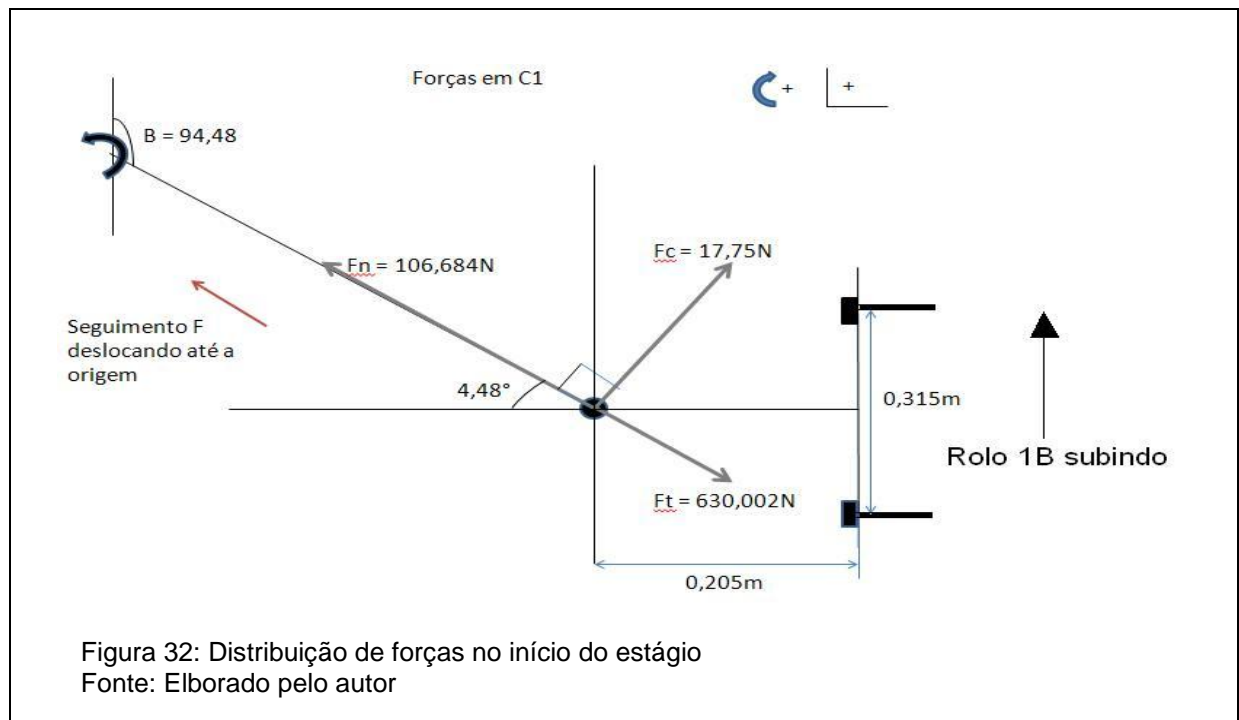
Analisando os gráficos desta seção, observa-se que:

- As forças com os maiores módulos localizam-se nas curvas 1 e 2 do 4º estágio, que é o estágio de retorno à posição de recebimento de esboço bobinado.
- O eixo-cardan que apresenta os maiores esforços no 4º estágio sobre os parafusos é o CR1B, têm-se a configuração do movimento no gráfico 12.



Definidos a região onde ocorrem as maiores forças de inercia, calculam-se os momentos presentes, que atuam sobre os parafusos, que variam o coeficiente de segurança a fadiga em relação às tensões medias e alternadas também presentes neste estágio. A seguir tem-se:

a) Cálculo dos momentos [6] (Russell, 2011)



Momentos das Forças atuando sobre os parafusos em na curva C1 de subida do CR1B, apresentada no na figura 32.

$$MF_n = 106,689 \cdot \sin(4,48) \cdot 0,205 \quad (4.31)$$

$$MF_n = 1,71\text{Nm} \quad (4.32)$$

$$MF_c = 17,75 \cdot \cos(85,52) \cdot 0,205 \quad (4.33)$$

$$MF_c = 0,28\text{Nm} \quad (4.34)$$

$$MF_t = 630 \cdot \sin(4,48) \cdot 0,205 \quad (4.35)$$

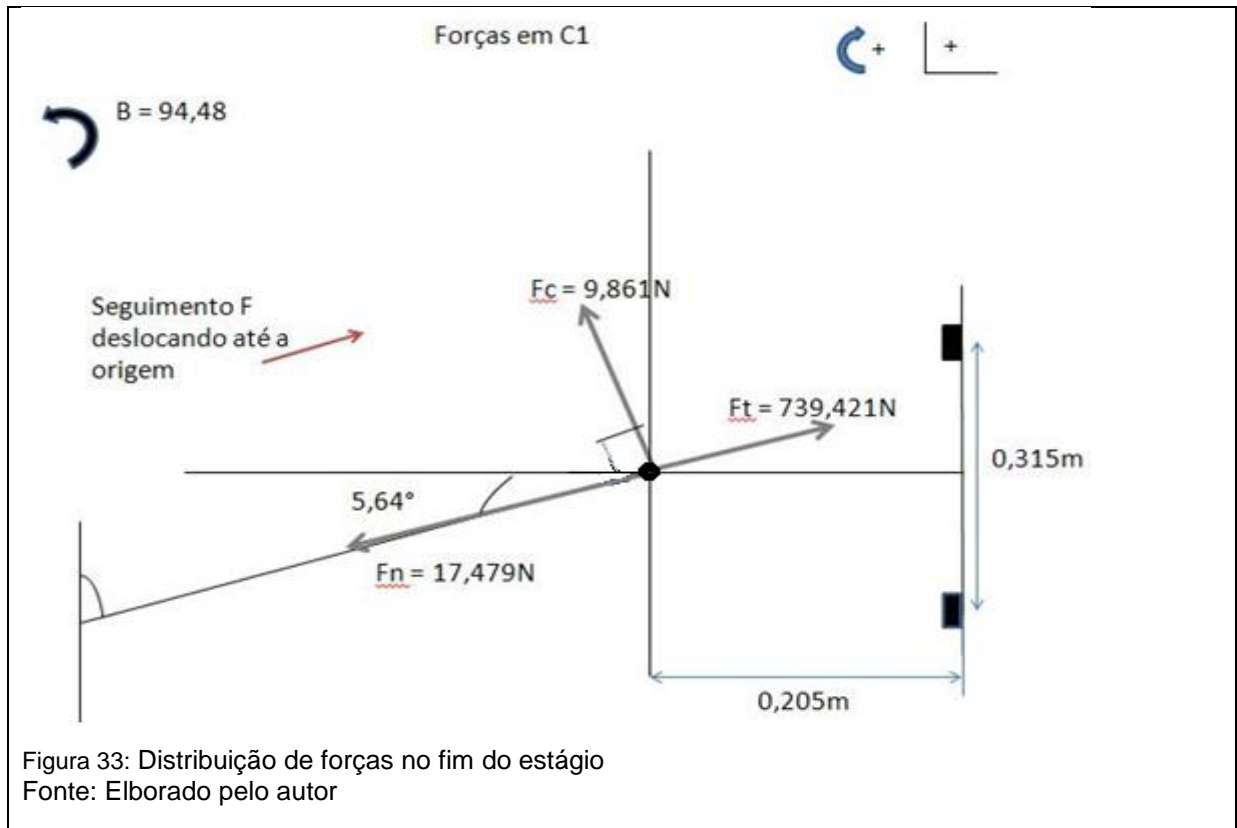
$$MF_t = -10,1\text{Nm} \quad (4.36)$$

$$M = MF_n + MF_c + MF_t \quad (4.37)$$

$$M = -8,11\text{Nm} \quad (4.38)$$

Realizando uma comparação entre o momento de aperto máximo dos parafusos e o momento gerado pelas forças de inércia, conclui-se que:

$M \ll$ Momento de aperto máximo = 790Nm, logo foi desconsiderado.



Momentos das Forças atuando sobre os parafusos em na curva C2 de parada do CR1B, apresentada no na figura 33.

$$MF_n = 17,48 \cdot \sin(5,64) \cdot 0,205 \quad (4.39)$$

$$MF_n = -0,35 \text{ Nm} \quad (4.40)$$

$$MF_c = 9,86 \cdot \sin(84,36) \cdot 0,205 \quad (4.41)$$

$$MF_c = 2,01 \text{ Nm} \quad (4.42)$$

$$MF_t = 630 \cdot \sin(5,64) \cdot 0,205 \quad (4.43)$$

$$MF_t = 12,65 \text{ Nm} \quad (4.44)$$

$$M = MF_n + MF_c + MF_t \quad (4.45)$$

$$M = -14,31 \text{ Nm} \quad (4.46)$$

Realizando uma comparação entre o momento de aperto máximo dos parafusos e o momento gerado pelas forças de inércia, conclui-se que:

$M \ll$ Momento de aperto máximo = 790Nm, logo foi desconsiderado.

Com base nos cálculos, os momentos gerados pelo o peso do segmento F em conjunto com a dinâmica do conjunto, não impactam significativamente sobre os parafusos.

b) Análise do coeficiente de segurança

O coeficiente de segurança para o cálculo de fadiga (HIBBELER, 2004) é definido como:

$$\frac{\sigma_{alt}}{s_n} + \frac{\sigma_{me}^{total}}{s_{rt}} = \frac{1}{n} \quad (4.47)$$

Onde

σ_{alt} = Tensão alternada sobre os parafusos

σ_{me}^{total} = Tensão média total sobre os parafusos

s_n = Limite de escoamento dos parafusos

s_{rt} = Limite de resistência dos parafusos

Para realizar o cálculo no fator de segurança n , faz-se um estudo separado dos componentes da equação conforme abaixo:

$$\sigma_{me}^{total} = \sigma_{mf,p} + \sigma_t + \sigma_{med} \quad (4.48)$$

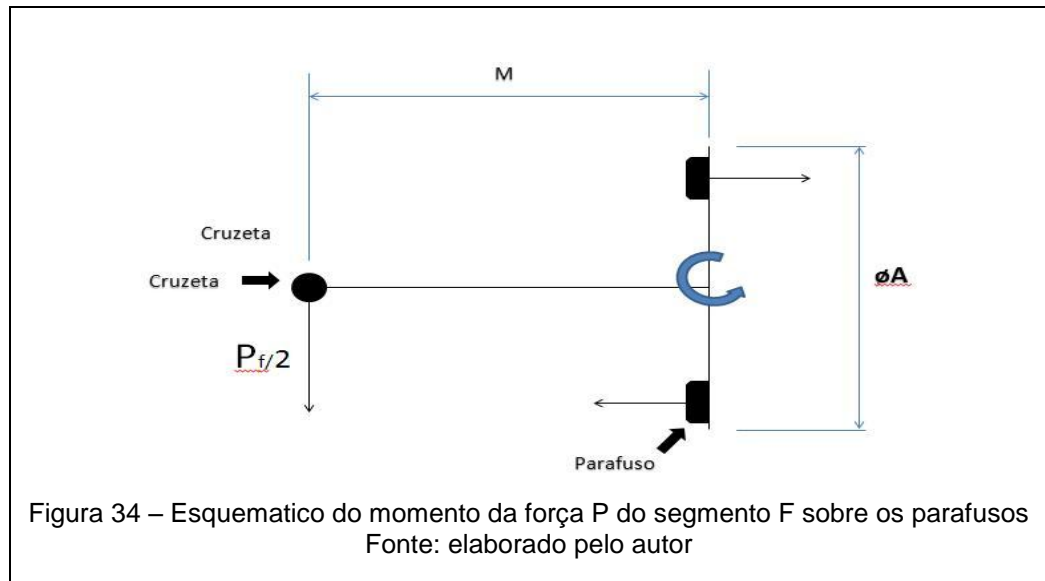
Onde:

$\sigma_{mf,p}$ = Tensão de momento da força peso do segmento F sobre os parafusos.

σ_t = Tensão de torque sobre os parafusos

σ_{med} = Tensão média das forças alternadas

Para obter a tensão do momento da força peso do segmento F sobre os parafusos $\sigma_{mf,p}$, aplica-se o momento no centro do flange do eixo cardan acoplado no rolo 1B onde tem-se a seguinte configuração:



$$\frac{P_f}{2} \cdot M = 2 \cdot F_{f,p} \cdot \frac{A}{2} \quad (4.49)$$

Onde:

$F_{f,p}$ = Força do segmento F sobre os parafusos

$$F_{f,p} = 1426,19 \text{ N} \quad (4.50)$$

$$\sigma_{mf,p} = \frac{F_{f,p}}{A_{t,p}} \quad (4.51)$$

Onde :

$A_{t,p}$ = Área da seção transversal do parafuso

Sendo

$$A_{t,p} = 3,801 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (4.52)$$

$$\sigma_{mf,p} = 3,75 \text{ Mpa} \quad (4.53)$$

Obtendo a tensão gerada pelo torque nos parafusos conforme (ANEXO C) NORMA DIN 267 para a classe 10.9, tem-se o momento de aperto máximo no parafuso igual a:

$$T_{ap}=780Nm \quad (4.54)$$

De acordo com o livro elementos de maquinas [8] (Shigley, 2004), os coeficientes de atrito abrangem uma faixa que vai de 0,12 até 0,2, dependendo sobretudo do acabamento e da precisão da rosca e do grau de lubrificação. Em média, os coeficientes de atrito μ para os parafusos, estão em torno de 0,15 e para esse coeficiente, a constante de torque $k \approx 0,2$ não importando o tamanho dos parafusos empregados e nem se as porcas são grossas ou finas, logo:

$$T_{ap} = k \cdot F_i \cdot d \quad (4.55)$$

Onde

T_{ap} é a tensão de aperto

k é a constante de torque e vale 0,2

F_i é a carga inicial

d é o diâmetro nominal do parafuso e vale 0,022 m

calculando F_i , tem-se:

$$F_i = 177,27 \text{ kN} \quad (4.56)$$

E a tensão constante devido o torque aplicado sobre o parafuso e dada por

$$\sigma_t = \frac{F_i}{A_{t,p}} \quad (4.57)$$

$$\sigma_t = 466,38MPa \quad (4.58)$$

A definição de Tensão media das forças alternadas diz que:

$$\sigma_{med} = \frac{F_{max,alt} + F_{min,alt}}{2 \cdot A_{t,p}} \quad (4.59)$$

Sendo

$$F_{max,alt} = 630,00N \quad (4.60)$$

$$F_{min,alt} = -739,42N \quad (4.61)$$

Logo encontra-se a tensão media de:

$$\sigma_{med} = -0,14MPa \quad (4.62)$$

Voltando a equação da tensão média total obtêm-se:

$$\sigma_{me}^{total} = 470,00MPa \quad (4.63)$$

Para o cálculo da tensão alternada, são analisadas as forças alternadas iniciais e máximas do 4º estágio, sendo:

Força máxima igual a 630,00 N

Força mínima igual a -740,00 N

Tensão alternada

$$\sigma_{alt} = \frac{F_{max,alt} - F_{min,alt}}{2 \cdot A_{t,p}} \quad (4.64)$$

$$\sigma_{alt} = 1,80MPa \quad (4.65)$$

Agora para obter o limite de resistência a tração e o limite de escoamento, tem-se na tabela 27:

Tabela 27: Especificações de classe SAE para parafusos de aço

Padronização - SAE

Grau SAE	Material	Faixa Dimensional, in	Mínimo Limite de Resistência, à Tração, ksi	Mínimo Limite de Escoamento, ksi	Mínima Resistência de Prova, ksi
1	Baixo ou médio carbono	$\frac{1}{4}$ –1 $\frac{1}{2}$	60	36	33
2	Baixo ou médio carbono	$\frac{1}{4}$ – $\frac{3}{4}$	74	57	55
		$\frac{7}{8}$ –1 $\frac{1}{2}$	60	36	33
4	Médio carbono, estirado a frio	$\frac{1}{4}$ –1 $\frac{1}{2}$	115	100	65
5	Médio carbono, T&R	$\frac{1}{4}$ –1	120	92	85
		1 $\frac{1}{8}$ –1 $\frac{1}{2}$	105	81	74
5,2	Baixo carbono martensítico, T&R	$\frac{1}{4}$ –1	120	92	85
7	Médio carbono ligado, T&R	$\frac{1}{4}$ –1 $\frac{1}{2}$	133	115	105
8	Médio carbono ligado, T&R	$\frac{1}{4}$ –1 $\frac{1}{2}$	150	130	120
8,2	Baixo carbono martensítico, T&R	$\frac{1}{4}$ –1	150	130	120

Fonte: Collins, J.A. Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas, 1ªEd., 2006

Logo como o parafuso esta no grau SAE 8 apresenta um limite de resistência a Tração:

s_{srt} igual a **150ksi ou 1034,218MPa**

O Limite de Escoamento s_n para as condições dos parafusos e ambiente altera-se para:

$$s_n = \frac{1}{2} \cdot s_{srt} \cdot k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \quad (4.66)$$

Para análise dos fatores modificadores, e usado como orientação o capítulo 5 e 6 do livro de elementos de máquinas [8] (Shigley, 2004), conforme se segue:

- a) O fator de acabamento superficial k_a é obtido através do fator tabelado de s_{srt} do parafuso e do processo de conformação mecânica que ele sofre que no caso é de Forjamento, logo:

$$k_a = 0,32 \quad (4.67)$$

- b) O fator relacionado a dimensão da peça e o k_b e neste caso é selecionado pelo diâmetro nominal do parafuso em milímetros, sabendo-se que esse diâmetro vale 22,0mm este está dentro do intervalo abaixo:

$$7,6mm < \varnothing \leq 50mm, \text{ logo:}$$

$$k_b = 0,85 \quad (4.68)$$

- c) O fator de confiabilidade k_c é considerado igual a 1 neste trabalho.
- d) Mesmo com a proteção para retenção de temperatura do Coilbox, há uma grande incidência de transferência de calor por radiação sobre os parafusos sendo exposto a uma temperatura de trabalho $T \approx 400^\circ$. como no livro é considerado que:

$$k_d = \frac{344,4}{273,3+T}, \text{ para } T > 71^\circ\text{C}, \text{ tem-se então:}$$

$$k_d = 0,51 \quad (4.69)$$

- e) As características do parafuso, tais como: classe SAE 8 e Rosca laminada a frio, determinam o fator de redução de resistência a fadiga igual a:

$$k_F = 3 \quad (4.70)$$

E como k_F se relaciona com o fator de concentração de tensão k_F na seguinte expressão:

$$k_e = \frac{1}{k_F}, \text{ tem-se:}$$

$$k_e = 0,33 \quad (4.71)$$

Logo o limite de escoamento fica

$$s_n = \frac{1}{2} \cdot 1034,22 \cdot 0,32 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 0,51 \cdot 0,33 \quad (4.72)$$

$$s_n = 15,62 \text{ MPa} \quad (4.73)$$

Estes resultados apresentam o seguinte fator de segurança a fadiga calculado abaixo:

$$\frac{1,801}{15,62} + \frac{469,992}{1034,218} = \frac{1}{n} \quad (4.74)$$

$$n = 1,755 \quad (4.75)$$

O fator de segurança a fadiga para as condições expostas, está dentro dos padrões normais que estão no intervalo de:

$$1,5 \leq n \leq 2,5 \quad (4.76)$$

O resultado obtido estima que as cargas alternadas, providas pela dinâmica do conjunto em operação não influenciam na falha dos parafusos por Fadiga, lembrando que foi considerado o torque padrão de aperto que é de 780 NM.

5 Análise dos ensaios de dureza e microestrutura

5.1 Comentários preliminares sobre o ensaio de dureza

Na ciência dos materiais, “dureza” é a propriedade característica de um material sólido, que expressa sua resistência a deformações permanentes e está diretamente relacionada, com a força de ligação dos átomos. Com o objetivo de verificar se a dureza do parafuso está na faixa correta de aplicação, tem-se a seguinte tabela comparativa abaixo:

Tabela 28: Comparação entre resistência a tração e dureza na escala HRC

RESISTÊNCIA APROXIMADA N/mm ²	DUREZA ROCKWELL ESCALA C 150kg CONE DE DIAMANTE
1245	40
1216	39
1177	38
1157	37
1118	36
1079	35
1059	34
1030	33
1000	32
981	31

Fonte:

www.Revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia:php?id=48

Como o parafuso estudado está na faixa de 150ksi/1034,218MPa de resistência a tração, interpolando esse valor na tabela 28 seria coerente encontrar um valor de dureza HRC igual a 33,14. Este valor pode ser utilizado para comparação no ensaio.

5.1.1 Procedimentos e resultados do ensaio de dureza

- a) Feito o corte da seção transversal do filete do parafuso.



Figura 35: Máquina para corte do laboratório de materiais
Fonte: laboratório de materiais UFES

- b) Realizado as medidas de dureza do tipo Rockwell C



Figura 36: Máquina para medição de dureza.
Fonte: laboratório de materiais UFES.

Após ensaio realizado com um número de 5 repetições obtivemos os seguintes resultados:

Tabela 29: Interpretação dos dados obtidos

Sequência	Valor de dureza em HRC	Média	Desvio	Quadrado dos desvios
y1	34,5	34,2	0,3	0,09
y2	34,5	34,2	0,3	0,09
y3	33,0	34,2	-1,2	1,44
y4	35,0	34,2	0,8	0,64
y5	34,0	34,2	0,2	0,04

Fonte: Dados obtidos no laboratório de materiais/UFES

A variância para os dados obtidos fica sendo calculada como:

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2 \quad (5.1)$$

$$V = 2,3 \quad (5.2)$$

O desvio padrão D_p é obtido por:

$$D_p = \sqrt{V} \quad (5.3)$$

$$D_p = 1,5 \quad (5.4)$$

Os resultados demonstraram-se satisfatórios, tendo uma média de 34,2 HRC variando de 32,7 HRC a 35,7 HRC e apresentando neste intervalo, o valor de 33,14 HRC obtido pela interpolação linear da tabela 28, logo O parafuso está com a dureza adequada conforme ensaio.

5.2 Comentários preliminares sobre o ensaio de Microestrutura

O objetivo desse ensaio é identificar e inspecionar as microestruturas presentes no corpo de prova, extraído do parafuso estudado.

5.2.1 Procedimentos e resultados do ensaio de Microestrutura

- a) Foi recolhida a amostra do parafuso utilizada para o ensaio de dureza, a fim de reutilizá-la para a análise microestrutural.
- b) A amostra foi cortada ao meio, tendo sua face polida com lixas de granulometria de 320, 400, 500, 600, 800, 1200.



Figura 37: Prateleira com lixas
Fonte: laboratório de materiais UFES

- c) Polimento da peça com soluções de alumina.



Figura 38: Máquina para o polimento para preparação da amostra
Fonte: laboratório de materiais UFES

.O resultado obtido esta ilustrado na figura 38 abaixo:



Figura 39: Superfície atacada com Nital 5% e com ampliação em 10000x no microscópio eletrônico nikon eclipse ma200
Fonte: Laboratorio de materiais/UFES

Pode-se observar que a imagem da microestrutura do parafuso ficou com uma boa qualidade e comparando com [5] (Joseph R. Davis, 1988) as imagens contidas no livro Metals handbook, pode-se verificar que a microestrutura e do tipo aço de médio carbono austenizado, temperado a 400°C, sofrendo tratamento térmico.

A microsestrutura condiz com o informado pelo fabricante onde classifica o parafuso como aço de médio carbono com limite de resistência a tração na ordem de 150ksi e com limite de escoamento na ordem de 130ksi.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho utilizou conceitos e modelos de engenharia para analisar as possíveis causas de falhas nas uniões parafusadas CR1, um dos elementos do equipamento Coilbox, que pertence a uma linha de laminação de tiras a quente. Foi informado que, as falhas dos parafusos estavam ocorrendo devido à inversão de montagem dos eixos-cardan, que transmitem torque e velocidade para os rolos do CR1, porém as forças dinâmicas encontradas, em função do estudo das máximas acelerações dos eixos-cardan, levando ainda em consideração o segmento F de maior peso, não geram momentos e cargas alternadas necessárias para levar os parafusos ao fenômeno de fadiga, não impactando no fator de segurança a fadiga, o qual ficou estimado entorno de 1,755 para as maiores forças encontradas, estando dentro da faixa admissível de 1,5 a 2,5.

Partindo desta conclusão, foi feita uma análise de dureza e microestrutural, para identificar possíveis falhas estruturais do parafuso, porém a dureza padrão para este tipo de parafuso ficou dentro da faixa de desvio padrão das amostragens retiradas, analisadas na escala de HRC. Em relação à microestrutura do parafuso, foi verificado que a mesma está de acordo com a norma de fabricação para este parafuso de classe 10.9 de alta resistência. Pode-se até determinar que foi aplicado um tipo de tratamento térmico durante a fabricação em função das microestruturas encontradas.

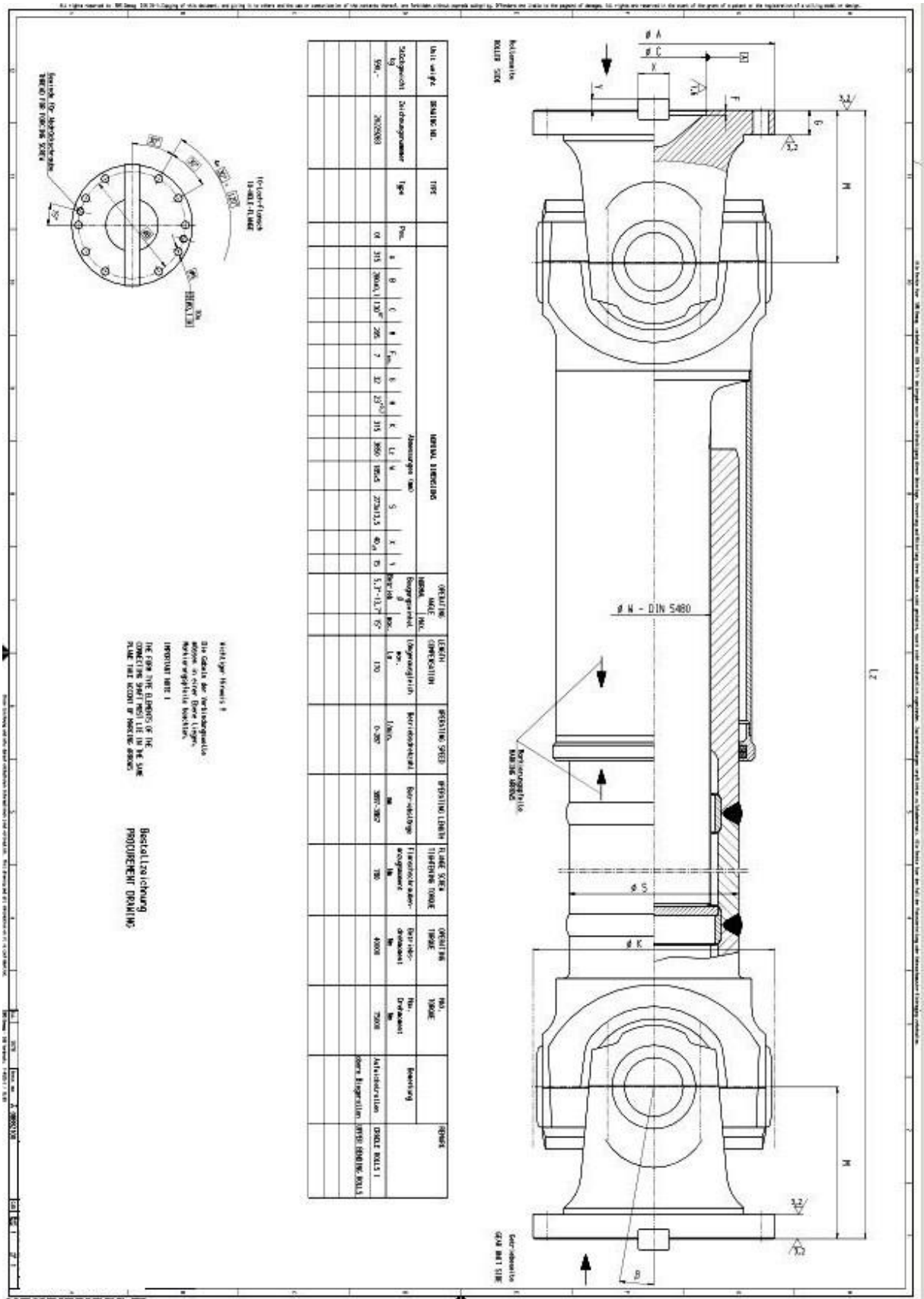
Como os resultados indicam que os parafusos não estão falhando devido ao erro de fabricação, ou devido às cargas alternadas que surgem durante o processo, chama-se a atenção para os procedimentos de manutenção, tanto de montagem quanto de inspeção mecânica, pois foi informado (conforme ANEXO D), que não existe um controle do momento de aperto máximo dos parafusos durante a montagem, pois o sistema de acoplamento dos eixos, não dão condições adequadas para o torqueamento dos parafusos e não existe um dispositivo que garanta o mesmo, ficando para a sensibilidade do executante a estimativa de força de aperto. Isto é um fator preocupante, pois o fator que da estabilidade em operação aos parafusos de fixação é a pré-carga ou carga de aperto. Esta carga garante que em operação os elementos unidos continuarão comprimidos, apesar das forças de trabalho tentar separá-los.

Um momento de aperto maior ou menor que o máximo indicado, pode acarretar falhas aos parafusos por alongamento excessivo, ou afrouxamento dos elementos tornando o conjunto exposto à vibração excessiva, expondo os parafusos a maiores forças de cisalhamento. Este trabalho sugere uma revisão no plano de manutenção do equipamento, onde garanta que os parafusos tenham o devido torque de aperto, que está na ordem de 780 Nm (ANEXO C).

7 REFERÊNCIAS

1. AMT. (2011). *Relatório técnico semanal*. AMT, IDA. Serra/ES: Equipe de confiabilidade AMT.
2. Beer, & Berr, F. P. (1992). *mechanics of materials* (2ª ed.). New york: Mac Graw.
3. engelke, H. J. (2011). *Solid edge ST3*. Nordeerstedt.
4. HIBBELER, R. (2004). *Resistência dos Materiais*. Prentice Hall Brasil.
5. Joseph R. Davis. (1988). *Metals handbook* (Vol. 8). ASM International.
6. Russell, H. C. (2011). *Dinâmica - Mecânica para engenharia* (12ª ed.). Pearson.
7. Santo, U. F. (2006). *Guia de normatização de referências*. Vitória: Copi graf.
8. Shigley, J. (2004). *Projeto de engenharia mecânica*. New York: Bookman.
9. Siemens. (2011). <http://www.edainc.net/SolidEdge>. Acesso em 10 de 09 de 2011, disponível em Edainc.

ANEXO A – DESENHO TÉCNICO DO EIXO-CARDAN DE TRANSMISSÃO

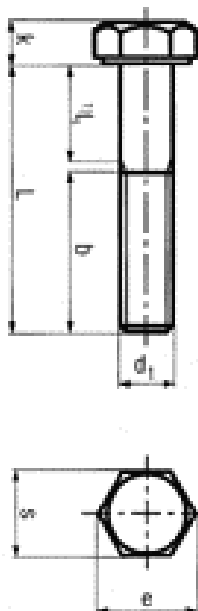


ANEXO B – NORMA DIN 931 COMPATÍVEL COM NORMA ISSO 4014

Sechskantschrauben
mit und ohne Schraff

DIN 931

ISO 4014

[illegible]

d1	(M22)	M24	(M27)	M30	(M33)	M36	(M39)	M42	(M45)	M48
b L ≤ 125	50	54	60	66	72	78	84	90	96	102
b L > 125 & 200	56	60	66	72	78	84	90	96	102	108
b L > 200	69	73	79	85	91	97	103	109	115	121
e	35,72	39,96	45,2	50,85	56,37	60,79	66,44	71,3	76,95	82,6
k	14	15	17	18,7	21	22,5	25	26	28	30
s	32,04*	36	41	46	50	55	60	65	70	75
Projetant in N	182000	212000	275000	337000	416000	490000	596000			
Charge d'exp. en N										

Rechercher les **Gewichte** siehe Seiten 2.002 + 2.003

Valours indicatives de **points** voir aux pages 2.002 + 2.003

ANEXO C – NORMA DIN 267 – TORQUE EM PARAFUSOS

NORMA DIN 267: COPPIA DI SERRAGGIO - QUALITÀ E PASSO BULLONE DIN 267 STANDARD: TIGHTENING TORQUE - BOLT PITCH AND QUALITY

I numeri rappresentati nella riga di testa [es. 3.6] sono degli indici in cui il primo numero [es. 3] rappresenta il 10% del carico di rottura in kg/mm², mentre il secondo [es. 6] rappresenta il 10% del rapporto tra il limite elastico minimo ed il carico di rottura minimo.

The numbers given in the line of text [e.g. 3.6] are indexes in which the first number [e.g. 3] represents 10% of the breaking load in kg/mm², whilst the second [e.g. 6] represents 10% of the ratio between the minimum elastic limit and the minimum breaking load.



Qualità del bullone/Bolt quality			3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9	12.9
			Coppia Torque (Nm)	Coppia Torque (Nm)	Coppia Torque (Nm)	Coppia Torque (Nm)	Coppia Torque (Nm)	Coppia Torque (Nm)	Coppia Torque (Nm)	Coppia Torque (Nm)	Coppia Torque (Nm)
M4	3	7	0.85	1.1	1.5	1.4	1.9	2.3	2.9	4.1	4.9
M5	4	9	1.7	2.2	3.0	2.8	3.7	4.5	6.0	8.5	10
M6	5	10	2.9	3.9	5.1	4.8	6.4	7.7	10	14	17
M8	6	13	7	9.3	12	12	16	19	25	35	41
M10	8	17	14	19	25	23	31	37	49	69	83
M12	10	19	24	32	43	40	54	65	86	120	145
M14	12	22	39	51	68	64	86	105	135	190	230
M16	14	24	59	79	105	98	130	155	210	295	355
M18	14	27	81	110	145	135	180	215	290	405	485
M20	17	30	115	155	205	190	255	305	410	580	690
M22	17	32	155	205	275	260	345	415	550	780	930
M24	19	36	265	265	350	330	440	530	710	1000	1200
M27	19	41	295	390	520	490	650	780	1050	1500	1800
M30	22	46	395	530	710	660	880	1050	1450	2000	2400
M33	24	50	540	720	960	900	1200	1450	1900	2700	3250
M36	27	55	690	920	1250	1150	1550	1850	2450	3450	4150
M39	27	60	920	1200	1600	1500	2000	2400	3200	4500	5400
M42	32	65	1100	1500	1950	1850	2450	2950	3950	5550	6650
M45	32	70	1400	1850	2450	2300	3100	3700	4950	6950	8350
M48	36	75	1700	2250	3000	2800	3750	4450	5950	8400	10100
M52	36	80	2150	2900	3850	3600	4800	5750	7650	10800	12900
M56	-	85	2700	3600	4800	4500	5950	7150	9550	13400	16100
M60	-	90	3350	4450	5950	5550	7400	8900	11900	16700	20000
M64	-	95	4000	5350	7150	6700	8950	10700	14300	20100	24100
M68	-	100	4850	6500	8650	8100	10800	13000	17300	24300	29100

N.B. I valori di coppia servono solo per un'indicazione di massima e sono stati calcolati con un fattore di attrito di 0.125
N.B. The torque values are only a rough indication and have been calculated with a friction factor of 0.125

ANEXO D – FOTO ILUSTRATIVA DAS CONDIÇÕES INSEGURAS AOS PARAFUSOS

Apertos inadequados nos parafusos geram insegurança por parte da manutenção, vindo a soldar Batoques para garantir que os parafusos de fixação não venham a falhar afetando a disponibilidade do Coilbox.

Batoques

