



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CAMILLA SUELLEN DOS SANTOS SILVA

DEFORMAÇÃO NA MONTAGEM DE FLANGES PARA TORRES EÓLICAS

Cabo de Santo Agostinho

2025

CAMILLA SUELLEN DOS SANTOS SILVA

DEFORMAÇÃO NA MONTAGEM DE FLANGES PARA TORRES EÓLICAS

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Araújo Simões

Cabo de Santo Agostinho

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S586d Silva, Camilla Suellen dos Santos.
Deformação na montagem de flanges para torres eólicas /
Camilla Suellen dos Santos Silva. – Cabo de Santo Agostinho,
2025.
65 f.: il.

Orientador(a): Thiago Araújo Simões.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia
Mecânica, Cabo de Santo Agostinho, BR-PE, 2025.
Inclui referências.

1. Energia eólica 2. Flanges 3. Ondas (Física) 4. Motores de
combustão interna - Desgaste I. Simões, Thiago Araújo, orient.
II. Título

CDD 621.4

CAMILLA SUELLEN DOS SANTOS SILVA

DEFORMAÇÃO NA MONTAGEM DE FLANGES PARA TORRES EÓLICAS

Monografia apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 08/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Thiago Araújo Simões (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Aureliano Xavier dos Santos (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Erb Lins (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Arthur Moura Vellozo de Carvalho (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais, que mesmo distantes se fazem presentes pelo amor que têm por mim e por serem a razão que me inspira a crescer e seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, sabedoria e força que me sustentaram durante toda a minha trajetória acadêmica.

À minha noiva, pelo amor, paciência e apoio incondicional, sendo meu alicerce nos momentos mais desafiadores e celebrando comigo cada conquista.

À minha avó, por todo carinho, orações e por ser uma fonte de força e inspiração constante em minha vida.

À minha família, pelo suporte, amor e por acreditarem no meu potencial mesmo à distância.

Aos colegas de trabalho e operadores de produção, pela ajuda prática e pela vivência de chão de fábrica que contribuíram diretamente para o desenvolvimento deste estudo e meu crescimento profissional.

“Nada é pequeno quando é feito com amor”

- Santa Teresinha do Menino Jesus

RESUMO

O crescimento da energia eólica como alternativa às fontes fósseis exige processos de fabricação cada vez mais precisos para garantir a confiabilidade estrutural das torres e o desempenho das turbinas. Dentre os desafios enfrentados pela indústria, as deformações geométricas nos flanges, especialmente ondulação e ovalização, estão entre as principais causas de falhas no acoplamento das peças e de altos índices de retrabalho. Este trabalho tem como objetivo identificar e mitigar os retrabalhos e possíveis deformações no processo de fabricação de torres eólicas, contribuindo para a melhoria da qualidade dimensional. A metodologia adotada incluiu medições de alta precisão em diferentes etapas do processo, análise de variações dimensionais e aplicação de ferramentas de qualidade, como o Diagrama de Ishikawa, para levantamento e priorização de causas. Foram observadas falhas relacionadas à ausência de padronização na medição e à falta de critérios claros para aceitação dimensional das peças durante a montagem. A implementação de procedimentos de controle dimensional e de um checklist para validação das medidas, anteriormente verificadas apenas de forma visual pelos operadores, possibilitou a redução significativa do retrabalho, além de ganhos em eficiência produtiva. Os resultados reforçam a importância da metrologia industrial como ferramenta estratégica para controle de processos e mostram que ajustes simples, quando aplicados com base em dados, podem gerar impacto direto na confiabilidade das estruturas. Este estudo contribui para o fortalecimento da cadeia produtiva eólica, oferecendo subsídios práticos para a indústria no desenvolvimento de processos mais padronizados e eficientes.

Palavras-chave: energia eólica; flanges; ondulação; ovalização; metrologia industrial.

ABSTRACT

The growth of wind energy as an alternative to fossil fuels demands increasingly precise manufacturing processes to ensure the structural reliability of towers and turbine performance. Among the challenges faced by the industry, geometric deformations in flanges, especially waviness and ovality, are among the main causes of part coupling failures and high rework rates. This work aims to identify and mitigate rework and potential deformations in the wind tower manufacturing process, contributing to improved dimensional quality. The methodology adopted included high-precision measurements at different stages of the process, analysis of dimensional variations, and the application of quality tools, such as the Ishikawa Diagram, to identify and prioritize causes. Failures were observed related to the lack of standardized measurements and the lack of clear criteria for dimensional acceptance of parts during assembly. The implementation of dimensional control procedures and a checklist to validate measurements, previously only visually verified by operators, enabled a significant reduction in rework, in addition to gains in production efficiency. The results reinforce the importance of industrial metrology as a strategic tool for process control and show that simple adjustments, when applied based on data, can have a direct impact on structural reliability. This study contributes to strengthening the wind power production chain, offering practical insights for the industry in developing more standardized and efficient processes.

Keywords: wind energy; flanges; corrugation; ovalization; industrial metrology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do processo de fabricação de torres eólicas.	13
Figura 2 - Montagem de seções de torre eólica.	15
Figura 3 - Virola após o processo de calandragem.	16
Figura 4 - Representação esquemática de um flange de torre eólica com cotas e tolerâncias dimensionais.	17
Figura 5 - Representação esquemática da avaliação de circularidade e ovalização de flanges conforme ISO 1101:2017.	18
Figura 6 - Medição de Ovalização conforme a norma.	19
Figura 7 – <i>Demonstração do Tilt conforme a ISO.</i>	20
Figura 8 - Equipamento Easy Laser E910.	22
Figura 9 - Monitoramento da planicidade de flanges com sistema Easy-Laser.	22
Figura 10 - Uso do Easy-Laser no controle dimensional de flanges.	23
Figura 11 - Procedimento de medição com FOCUS na linha de produção.	24
Figura 12 - Aplicação do Laser Tracker em ambiente fabril.	26
Figura 13 - Trena Laser.	27
Figura 14 - Máquina CNC para corte de chapa.	28
Figura 15 - Ilustração de uma chapa calandrada.	29
Figura 16 - Diagrama de Ishikawa.	33
Figura 17 - Dados internos para gráfico e análise.	34
Figura 18 - Gráfico para tomada de decisão.	34
Figura 19 - Flange recém usinado e soldado.	35
Figura 20 - Flanges empilhados para medição de Easy Laser.	36
Figura 21 - Flange apoiado em tacos metálicos.	36
Figura 22 - Flanges em transporte.	37
Figura 23 - Flange apoiado na vertical.	37
Figura 24 - Gap entre flange e virola.	38
Figura 25 - 3D FARO Focus em preparação para medição da virola.	40
Figura 26 - Laser Tracker realizando medição interna de virola.	41
Figura 27 - Mapeamento e Resultados do Laser Tracker.	43
Figura 28 - <i>Biseladora semi manual.</i>	44
Figura 29 - Fresadora CNC TECOI utilizada no corte automatizado das chapas para virolas.	45
Figura 30 - Posicionamento correto para as medições na calandra.	46
Figura 31 - Posicionamento da régua de medição.	47
Figura 32 - Posicionamento da solda longitudinal.	47
Figura 33 - Posicionamento da solda longitudinal.	48
Figura 34 - Exemplo de marcação de ovalização.	49
Figura 35 - Correção do tilt com calor.	51
Figura 36 - Máquina fresadora portátil para faceamento de flanges.	51
Figura 37 - Dashboard para melhor visualização do progresso.	53
Figura 38 - Virolas seguindo o padrão das definições.	54
Figura 39 - Monitoramento das virolas.	55
Figura 40 - Acompanhamento da melhoria da ovalização.	56
Figura 41 - Comparativo de tempo de montagem.	56
Figura 42 - Dashboard de análises de 2022.	57
Figura 43 - Dashboard de análises de 2024.	58
Figura 44 - Evolução semanal W26 à W29.	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo	13
1.1.1	Objetivo principal	13
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.2	Fundamentação Teórica	14
1.2.1	Torres eólicas	14
1.2.2	Virolas e flanges	15
1.2.3	Ondulação e Ovalização	17
1.2.4	Características críticas dos flanges	19
1.2.5	Técnicas de Medição Dimensional	21
1.2.6	Equipamentos de Processamento ou Fabricação	27
1.2.7	Ferramentas de Análise da Qualidade	30
1.2.8	Conexão entre a Formação Acadêmica e a Pesquisa Desenvolvida	30
2	METODOLOGIA E RESULTADOS PARCIAIS	32
2.1	Planejamento e definição das causas	32
2.2	Etapas do estudo	35
2.2.1	Estudo inicial – Flanges e Easy-Laser	35
2.2.2	Análise das Virolas e uso da FARO	38
2.2.3	Máquina CNC de corte <i>TRF</i>	43
2.2.4	Calandra e Auditorias de Ovalização	45
2.2.5	Histórico de Ações Corretivas	50
2.3	Acompanhamento, controle e consolidação das ações	52
2.3.1	Auditorias e Checklists	52
2.3.2	<i>Dashboards</i> e Monitoramento Digital	52
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
3.1	Ações corretivas implementadas	53
3.2	Análise comparativa e ganhos obtidos	55
3.3	Sustentabilidade das melhorias	61
3.4	Melhorias futuras	61
3.4.1	Implementação de monitoramento em tempo real	61
3.4.2	Capacitação Contínua e Cultura de Qualidade	62
4	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial ainda é fortemente dependente de combustíveis fósseis, principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa. O World Energy Council (2013) estimava que o consumo global de energia poderia crescer até 56% entre 2010 e 2040, com a maior parte desse aumento baseada em fontes fósseis. Mesmo com o avanço das renováveis, projeções mais recentes da International Energy Agency (2021) indicam que os combustíveis fósseis ainda devem representar mais de 70% da matriz energética global até 2040, impulsionados pela demanda de países em desenvolvimento.

Por outro lado, dados do Our World in Data (2024) mostram que a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis já ultrapassou 8.000 TWh no mundo, e a energia eólica se destaca como uma das fontes que mais cresce na última década, assumindo papel central na transição energética. Esse cenário traz a necessidade de processos industriais mais confiáveis para garantir a qualidade e a eficiência dos componentes usados nas turbinas eólicas.

Entre esses componentes, as torres eólicas têm função estrutural essencial. Elas são formadas por grandes cilindros de aço conectados por flanges, anéis metálicos que unem as seções da torre. A precisão dimensional dessas peças é fundamental: pequenas deformações, como a ondulação, caracterizada por irregularidades na superfície da chapa, e a ovalização, que é a perda da forma circular ideal da virola ou flange, podem comprometer o encaixe, gerar retrabalho e aumentar custos de produção.

Para contextualizar o tema abordado, a Figura 1 ilustra as principais etapas do processo de fabricação de uma torre eólica, abrangendo desde a preparação das chapas de aço até a montagem final do conjunto. Em português, as etapas correspondem a: preparação da chapa, chanfragem, calandragem (curvatura da chapa para formar o cilindro), solda longitudinal, ajuste do flange, solda circunferencial, acabamento e limpeza, jateamento e pintura, e montagem final. Essa

visão ajuda a entender como cada fase pode influenciar a qualidade dimensional da torre e, conseqüentemente, o desempenho da turbina.

Este trabalho foi desenvolvido em uma indústria de fabricação de torres eólicas localizada na região Nordeste do Brasil. O objetivo principal é analisar e reduzir as deformações mais recorrentes nos flanges, com foco na ondulação, propondo melhorias baseadas em medições dimensionais e ferramentas da qualidade para reduzir o retrabalho e aumentar a confiabilidade na cadeia produtiva eólica.

Figura 1 - Etapas do processo de fabricação de torres eólicas.



Fonte: Energy I-SPARK, Berkeley Lab, 2025.

1.1 Objetivo

Esta seção apresenta o objetivo principal do trabalho e os objetivos específicos que orientaram o desenvolvimento da pesquisa.

1.1.1 Objetivo principal

O objetivo deste trabalho é analisar e mitigar as deformações mais recorrentes nos flanges utilizados na fabricação de torres eólicas, com ênfase na ondulação e na ovalização, desenvolvendo um modelo de controle dimensional e de processo que possa servir como referência para padronização interna e ser replicado em outras unidades produtivas da empresa.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal, este trabalho tem como objetivos específicos:

- Mapear as etapas críticas do processo de fabricação de flanges que influenciam a ocorrência dessas deformações geométricas;
- Realizar medições dimensionais de alta precisão para identificar desvios e variações ao longo do processo produtivo;
- Analisar as causas das não conformidades por meio de ferramentas da qualidade;
- Implementar e validar procedimentos de controle dimensional que possam ser padronizados e replicados em outras unidades da empresa.

1.2 Fundamentação Teórica

Para o desenvolvimento deste trabalho, é necessário apresentar os conceitos fundamentais relacionados ao processo de fabricação de torres eólicas e ao controle dimensional de seus componentes. Esta seção descreve os principais elementos estruturais e as deformações analisadas, fornecendo a base teórica para a compreensão dos resultados e das análises posteriores.

1.2.1 Torres eólicas

As torres eólicas são estruturas de grande porte que têm a função de sustentar e estabilizar os componentes destinados à geração de energia. Por atuarem em condições de operação exigentes, demandam elevado rigor técnico quanto à

resistência mecânica e à precisão dimensional, uma vez que pequenas variações podem comprometer a montagem e a integridade estrutural (Burton *et al.*, 2021).

No Brasil, a produção é majoritariamente realizada em aço, com torres segmentadas em seções cilíndricas chamadas virolas, que são unidas durante a montagem em campo (Figura 2). Esse formato modular facilita o transporte e permite atender às demandas de instalação em diferentes regiões, garantindo estabilidade e durabilidade ao longo da vida útil da estrutura (Cianciarullo, 2020).

Figura 2 - Montagem de seções de torre eólica.



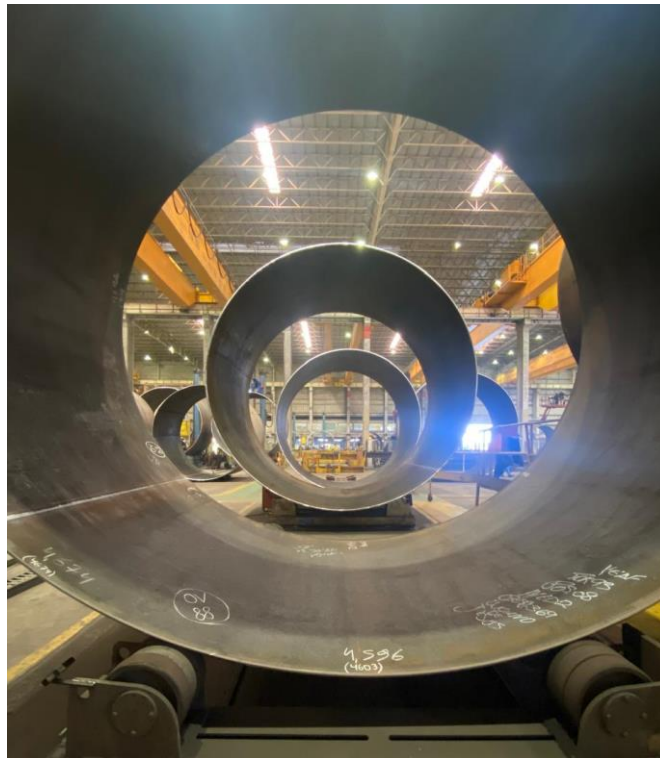
Fonte: Jahermosa, 2025.

1.2.2 Virolas e flanges

As virolas são seções cilíndricas de aço que compõem o corpo principal das torres eólicas. Elas são produzidas a partir de chapas metálicas planas que passam por um processo de calandragem, no qual são curvadas até atingir o diâmetro especificado em projeto. Após a conformação, as extremidades são unidas inicialmente por pontos de solda para garantir o posicionamento, conforme a Figura

3, sendo em seguida submetidas a uma solda longitudinal contínua, geralmente realizada pelo processo de arco submerso. Esse método utiliza um arco elétrico protegido por fluxo granuloso, proporcionando alta penetração e confiabilidade na união de chapas espessas (Tomé, 2014).

Figura 3 - Virola após o processo de calandragem.

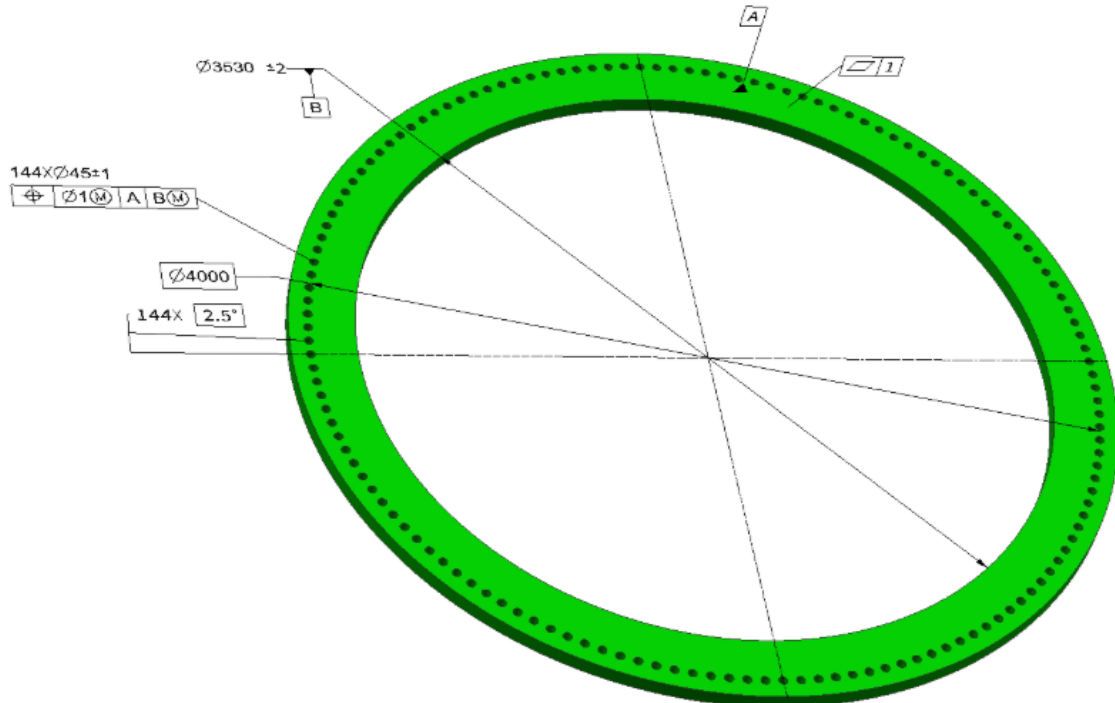


Fonte: Elaborado pela própria autora.

Os flanges, por sua vez, são elementos metálicos circulares posicionados apenas nas extremidades das seções da torre, funcionando como interface de união entre as virolas. A principal função do flange é garantir o alinhamento e a continuidade estrutural, permitindo que os diferentes segmentos da torre sejam conectados com precisão (Burton *et al.*, 2021).

Por serem a superfície de contato direto entre seções, os flanges são projetados com tolerâncias dimensionais rigorosas, assegurando o encaixe adequado e a integridade estrutural da torre durante toda a sua vida útil (Figura 4). Além disso, o aumento da demanda global por aerogeradores de grande porte impõe desafios crescentes à fabricação e ao controle de qualidade desses componentes, exigindo precisão e padronização em escala internacional (Global Wind Energy Council, 2025).

Figura 4 - Representação esquemática de um flange de torre eólica com cotas e tolerâncias dimensionais.



Fonte: FARO Technologies, 2025.

A interface flange-viola é considerada crítica, pois qualquer desvio dimensional pode comprometer o acoplamento entre seções e gerar esforços adicionais na estrutura (Burton *et al.*, 2021). Por isso, tanto as violas quanto os flanges passam por controles dimensionais detalhados antes e após a montagem, garantindo que as tolerâncias de projeto sejam atendidas.

1.2.3 Ondulação e Ovalização

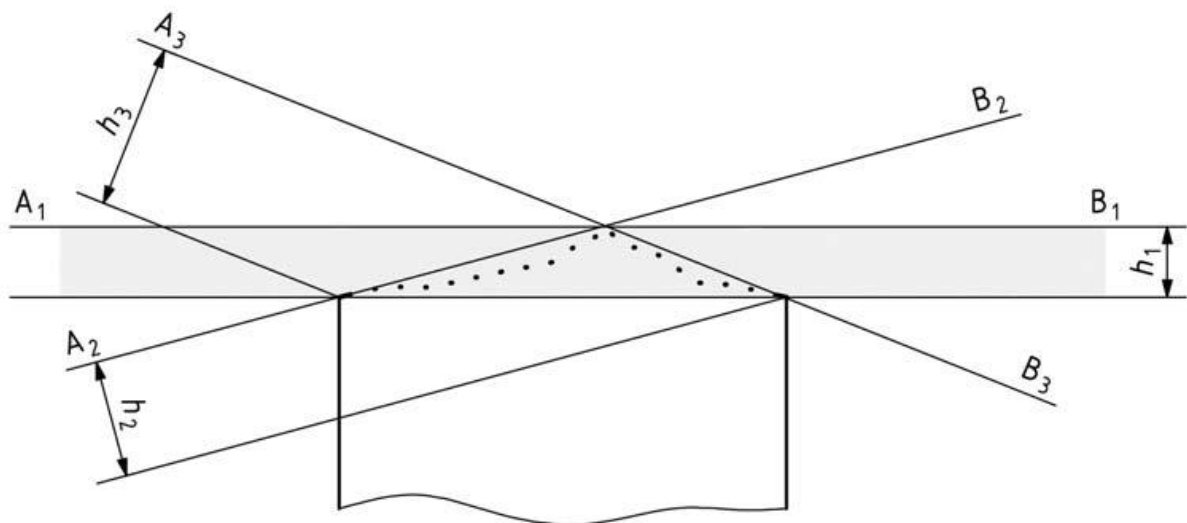
A qualidade dimensional dos flanges após a montagem e soldagem final é diretamente influenciada por desvios geométricos que podem comprometer o alinhamento e a integridade estrutural da torre. Entre eles, destacam-se a ondulação e a ovalização, ambos definidos e controlados de acordo com as tolerâncias geométricas descritas na ISO 1101:2017.

A ondulação refere-se a variações periódicas na superfície de contato do flange em relação ao seu plano ideal. Para torres eólicas, esse parâmetro é crítico, pois

desvios excessivos comprometem o assentamento uniforme entre seções, podendo gerar folgas na interface flange-viola e dificultar o alinhamento da torre. Conforme a ISO 1101:2017, a ondulação é avaliada medindo-se as diferenças de altura em diversos pontos ao longo da circunferência do flange, determinando a amplitude máxima do desvio.

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática do método de medição de ondulação. Nela, as alturas h_1 , h_2 e h_3 correspondem às distâncias medidas entre a superfície real e a referência em diferentes orientações. A ondulação é definida pela diferença máxima entre essas alturas, devendo estar dentro dos limites de tolerância especificados.

Figura 5 - Representação esquemática da avaliação de circularidade e ovalização de flanges conforme ISO 1101:2017.

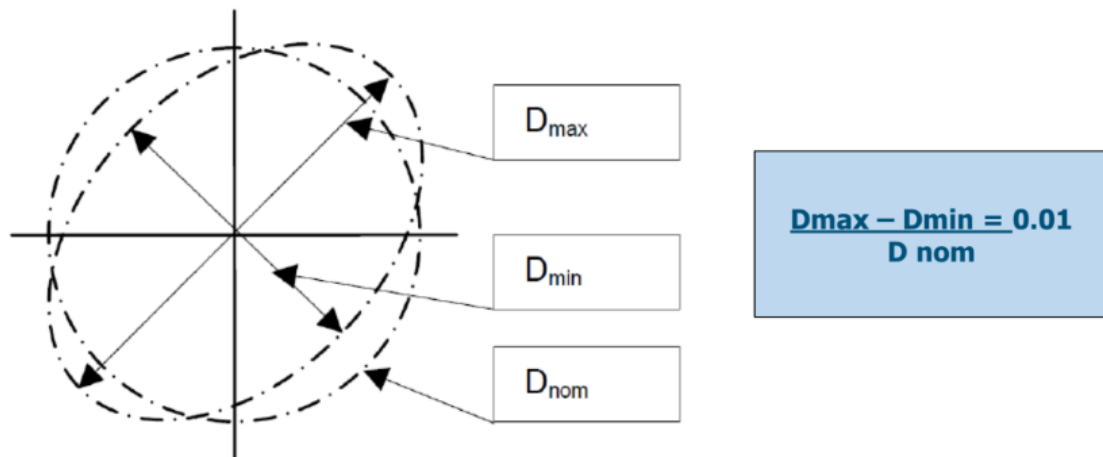


Fonte: ISO 1101:2017.

A ovalização corresponde à perda de circularidade, que nesse estudo o foco está na análise da circularidade da virola em relação ao seu diâmetro nominal. De acordo com a ISO 1101:2017, ela é determinada medindo-se o diâmetro em diferentes ângulos ao redor da peça e comparando o maior e o menor valor obtido. Neste estudo, as medições são realizadas em ambos os lados da virola, identificados como PA (ponto alto) e PB (ponto baixo), para avaliar possíveis variações entre as

extremidades. O resultado da ovalização é dado pela diferença entre o maior e o menor diâmetro medido, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Medição de Ovalização conforme a norma.



Fonte: elaborado pela própria autora.

1.2.4 Características críticas dos flanges

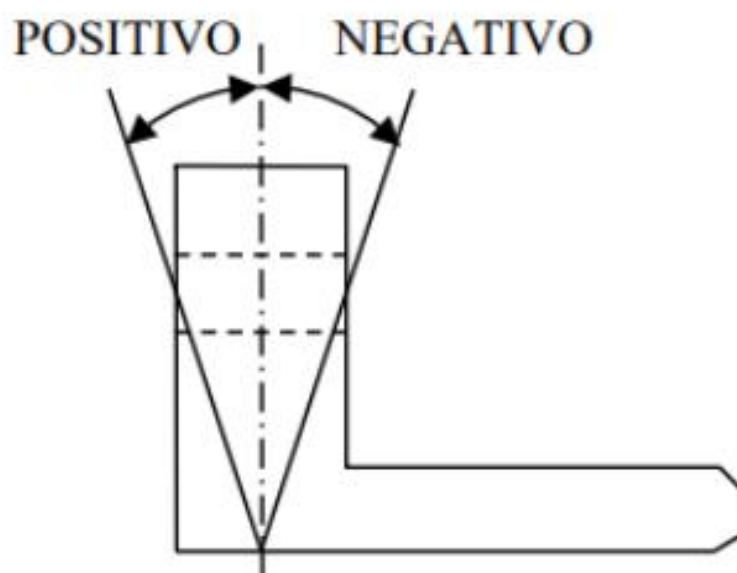
Após a montagem e a soldagem final, os flanges passam por avaliação dimensional como parte do controle de qualidade, garantindo o atendimento aos requisitos de montagem e alinhamento da torre eólica. Entre as características mais relevantes, a planicidade se destaca como parâmetro crítico definido conforme a ISO 1101:2017 e amplamente adotado na indústria de torres eólicas.

A planicidade (ou o termo em inglês *flatness*), avalia o quão plana está a superfície de contato do flange, sendo essencial para o assentamento uniforme e o alinhamento adequado entre as seções da torre. Para assegurar uma análise completa, a planicidade pode ser verificada a partir de três aspectos complementares:

- **Ondulação curta:** avalia variações repetitivas em pequenos trechos da circunferência do flange, afetando o contato imediato entre as peças durante a montagem.

- **Ondulação longa:** considera variações distribuídas ao longo de uma parte maior da circunferência, influenciando o encaixe geral da seção e a continuidade estrutural.
- **Tilt:** mede a inclinação do flange em relação à superfície externa de referência, geralmente utilizando uma régua e um calibrador de folga. A medição é feita entre dois pontos opostos (180°), permitindo identificar desvios positivos ou negativos, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Demonstração do Tilt conforme a ISO



Fonte: ISO 1101:2017

Quando desvios excedem as tolerâncias estabelecidas, é prática na indústria adotar técnicas corretivas, como aplicação de calor localizado para induzir contração controlada e, em alguns casos, usinagem mecânica da face do flange. Ambos os métodos são regulamentados por procedimentos internos da unidade e orientados pelas tolerâncias geométricas definidas na norma ISO 1101:2017, assegurando que as propriedades mecânicas do aço não sejam comprometidas.

Essas quatro características são amplamente reconhecidas na literatura técnica e em normas de tolerâncias geométricas, como a ISO 1101:2017, e serviram de referência para a definição dos parâmetros monitorados neste estudo.

1.2.5 Técnicas de Medição Dimensional

O controle dimensional desempenha papel central na fabricação das torres eólicas, uma vez que a conformidade com as tolerâncias de projeto é determinante para a integridade estrutural da torre. Diversas tecnologias são empregadas para assegurar a precisão dimensional, variando de acordo com a complexidade da geometria, o nível de exatidão requerido e as condições de produção. A escolha da tecnologia depende do nível de precisão requerido e das condições de fabricação, sendo orientada por normas de tolerâncias geométricas como a ISO 1101:2017.

1.2.5.1 Easy-Laser

O Easy-Laser é um sistema portátil de alinhamento e medição a laser amplamente utilizado para controle dimensional de componentes industriais de grande porte (Figura 8). O modelo utilizado no projeto, equipado com o transmissor D22, permite medições de planicidade, retilinearidade, perpendicularidade, paralelismo e nivelamento com alta precisão. O feixe de laser realiza varredura de 360° com alcance de até 40 metros de raio e pode ser inclinado em 90°, possibilitando a captura de desvios em diferentes planos.

Figura 8 - Equipamento Easy Laser E910.



Fonte: Easy Laser, [202-?].

O funcionamento baseia-se na emissão de feixes de laser que são lidos por sensores, permitindo calcular variações de superfície com precisão de até 0,01 mm/m. Essa característica o torna ideal para estruturas como flanges de torres eólicas, onde pequenas variações podem comprometer a montagem, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Monitoramento da planicidade de flanges com sistema Easy-Laser.



Fonte: Manual técnico do Easy-Laser E910/E915.

No contexto deste estudo, o Easy-Laser foi empregado para monitorar a planicidade dos flanges em múltiplas etapas do processo: após usinagem, durante transporte, empilhamento e na montagem final. A portabilidade do equipamento foi essencial para realizar medições diretamente na linha de produção, sem necessidade de desmontagens ou ambiente controlado (Figura 10).

Figura 10 - Uso do Easy-Laser no controle dimensional de flanges.



Fonte: elaborado pela própria autora.

1.2.5.2 FARO Focus

O FARO Focus é um scanner a laser 3D desenvolvido para a captura precisa de geometrias complexas e ambientes de grande porte por meio da geração de nuvens de pontos de alta densidade. O equipamento emite milhões de feixes de laser em 360°, medindo a distância de cada ponto com base no tempo de retorno do feixe e criando representações tridimensionais detalhadas sem necessidade de contato físico.

Para este estudo, o Focus foi utilizado de forma complementar às medições convencionais, sendo aplicado na análise geométrica dos flanges e das bocas das virolas, possibilitando identificar variações de ondulação e desvios com rapidez e alta confiabilidade.

O equipamento integra tecnologias proprietárias, como a *Hybrid Reality Capture* e a *Flash Technology*, que permitem aquisição de dados em tempo reduzido e fornecem *feedback* em tempo real, mesmo em condições industriais adversas. Os dados capturados são pré-registrados e podem ser exportados para plataformas digitais de análise, facilitando a tomada de decisão e a integração com softwares de engenharia.

De acordo com as especificações do fabricante (FARO, 2025), o Focus oferece uma solução robusta e de fácil operação para inspeção dimensional em larga escala, destacando-se como ferramenta estratégica para o diagnóstico rápido de não conformidades em processos de fabricação de componentes de grande porte, como flanges e virolas de torres eólicas, assim como a Figura 11.

Figura 11 - Procedimento de medição com FOCUS na linha de produção.



Fonte: elaborado pela própria autora.

1.2.5.3 FARO Laser Tracker

O FARO *Laser Tracker* é um sistema de metrologia tridimensional de alta precisão, amplamente utilizado na inspeção de peças e estruturas de grande porte. O equipamento opera através da emissão de um feixe de laser direcionado a uma esfera refletora (SMR – *Spherically Mounted Retroreflector*), que permite medir coordenadas espaciais com elevada acurácia em longas distâncias.

No presente estudo, o *Laser Tracker* foi empregado de forma pontual, por meio de locação, com o objetivo de realizar análises críticas que exigiam confiabilidade metrológica superior à obtida com instrumentos de uso rotineiro, como o Easy-Laser. O equipamento foi utilizado para a inspeção detalhada dos flanges já montados com as virolas, possibilitando identificar variações mínimas de ondulação e fornecer dados com alta resolução para a tomada de decisões no processo.

De acordo com as especificações do fabricante (Faro, 2025), o *Laser Tracker* apresenta capacidade de medição em grandes volumes, sendo considerado referência no setor automotivo, aeronáutico e de geração de energia para o controle dimensional de componentes críticos.

A utilização deste sistema no projeto foi estratégica para confirmar a conformidade geométrica dos flanges e auxiliar na detecção de desvios associados à montagem flange-viola, permitindo estabelecer correlações entre ovalização, ondulação e variações no processo (Figura 12).

Figura 12 - Aplicação do Laser Tracker em ambiente fabril.



Fonte: elaborado pela própria autora.

1.2.5.4 Trena Laser

As trenas a laser são instrumentos de medição sem contato que utilizam feixes de luz para determinar distâncias com alta precisão (Figura 13). Esse tipo de tecnologia é amplamente empregado em processos industriais que exigem rapidez e confiabilidade na obtenção de medidas lineares, especialmente em componentes de grande porte.

O princípio de funcionamento baseia-se no cálculo do tempo de retorno do feixe de laser após refletir na superfície medida, permitindo leituras precisas em poucos segundos. Em estruturas cilíndricas, como as virolas de torres eólicas, a trena a laser pode ser utilizada para verificar variações de diâmetro e avaliar parâmetros geométricos essenciais, como circularidade e alinhamento.

Por fornecer resultados imediatos e de fácil repetibilidade, a trena a laser se torna uma ferramenta importante no controle dimensional em linha de produção, complementando técnicas mais complexas de medição e garantindo a conformidade com normas de tolerâncias geométrica.

Figura 13 - Trena Laser.



Fonte: elaborado pela própria autora.

1.2.6 Equipamentos de Processamento ou Fabricação

1.2.6.1 Máquina CNC de corte

As máquinas CNC (*Controle Numérico Computadorizado*) de corte são amplamente utilizadas na fabricação de componentes metálicos que exigem alta precisão dimensional, especialmente em estruturas de grande porte como as torres eólicas. O processo é controlado por comandos numéricos computadorizados, permitindo cortes e faceamentos com tolerâncias muito mais rigorosas do que os métodos manuais.

O modelo TRF (*Torch Rotary Frame*) é um exemplo desse tipo de tecnologia, projetado para executar cortes de chapas metálicas com elevada repetibilidade e padronização. A principal vantagem desse sistema está na capacidade de garantir a geometria correta das bordas e superfícies de montagem, fator essencial para a integridade estrutural das virolas e dos flanges.

Por operar de forma automatizada, a CNC minimiza variações humanas no processo e assegura que os perfis cortados estejam dentro das especificações geométricas previstas em normas internacionais, como a ISO 1101:2017, contribuindo para a confiabilidade dimensional dos componentes ao longo de todo o processo produtivo, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Máquina CNC para corte de chapa.



Fonte: Brasil Vapor, 2023.

1.2.6.2 Corte manual

O corte manual das chapas destinadas às virolas de torres eólicas, tradicionalmente realizado por oxicorte ou plasma manual, apresenta limitações intrínsecas relacionadas à variabilidade dimensional e à dependência da habilidade do operador. De acordo com a ISO 9013:2017, processos manuais de corte térmico apresentam tolerâncias significativamente mais amplas quando comparados ao corte automatizado.

Além disso, a preparação manual do bisel tende a reproduzir imperfeições da chapa original, resultando em desalinhamentos críticos na interface flange–virola.

Essa característica foi observada no processo estudado, em que desvios acumulados no bisel manual impactavam diretamente a circularidade e o encaixe durante a montagem.

1.2.6.3 Calandra

A calandra é um equipamento utilizado no processo de conformação mecânica de chapas metálicas, essencial na fabricação de componentes cilíndricos como as virolas das torres eólicas. Ela atua por meio de rolos que aplicam força sobre a chapa, curvando-a progressivamente até atingir o diâmetro especificado em projeto, obtendo o ângulo de curvatura desejado (Ramos *et al.*, 2019, p. 6). O tipo mais comum é a calandra de três rolos, sendo dois inferiores fixos e um superior móvel, que pressiona a chapa entre os demais.

Na fabricação de torres eólicas, a calandragem é uma etapa crítica, pois pequenas variações durante o processo podem gerar ovalização e falta de circularidade, comprometendo o encaixe com os flanges e exigindo retrabalho. Para evitar isso, é essencial seguir procedimentos padronizados de medição e centralização da chapa (SENAI, 2020).

Figura 15 - Ilustração de uma chapa calandrada.



a) Chapa de aço

b) Calandragem da chapa

Fonte: elaborado pela própria autora.

1.2.7 Ferramentas de Análise da Qualidade

Neste estudo, foram aplicadas ferramentas de análise da qualidade para investigar as causas dos desvios dimensionais e priorizar ações corretivas nos flanges de torres eólicas. O Diagrama de Ishikawa foi utilizado para organizar visualmente possíveis causas em categorias como método, material, máquina e mão de obra, facilitando a identificação de fatores críticos. O Gráfico de barras auxiliou na priorização dessas causas, permitindo concentrar esforços nos pontos de maior impacto, checklist para controle e coleta de dados para futuras análises. Essas ferramentas são amplamente utilizadas na indústria para controle de não conformidades e melhoria contínua (Montgomery, 2016).

1.2.8 Conexão entre a Formação Acadêmica e a Pesquisa Desenvolvida

O desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso não se restringe apenas à experiência prática em ambiente industrial, mas também reflete a aplicação direta dos conhecimentos adquiridos ao longo da graduação em Engenharia Mecânica. As análises realizadas e as soluções propostas foram fundamentadas em disciplinas essenciais do curso, que forneceram base teórica e metodológica para a compreensão e enfrentamento dos problemas observados no processo produtivo.

1.2.8.1 Resistência dos Materiais

Os conceitos de tensão, deformação e concentração de esforços estudados em Resistência dos Materiais foram fundamentais para compreender como pequenas irregularidades geométricas, como ondulação e ovalização, poderiam comprometer a integridade estrutural das torres eólicas. O entendimento da relação entre propriedades mecânicas do aço e sua resposta a cargas e tensões auxiliou na avaliação dos riscos associados às deformações e nas justificativas para a implementação de ações preventivas.

1.2.8.2 Metrologia

A disciplina de Metrologia contribuiu diretamente para a definição dos métodos de medição empregados no estudo. O uso de instrumentos e equipamentos como o Easy-Laser, o FARO Laser Tracker e a trena a laser foi fundamentado em princípios de tolerâncias geométricas, exatidão e repetibilidade das medições, além do que chamamos de básico, saber as escalas, medidas e tudo que vemos ao longo do curso.

1.2.8.3 Usinagem

Os conhecimentos de Processos de Fabricação e Usinagem foram aplicados no projeto a nível de entender a importância e o porquê utilizar esse método, nesse processo utiliza a solda por arco submerso, que é muito utilizada na fabricação de torres eólicas, principalmente para unir as virolas, porque apresenta uma série de vantagens em relação a outros processos de soldagem, como alta penetração e resistência mecânica, proteção contra contaminações, elevada produtividade e menor retrabalho. Outro ponto importante que irei apresentar, foi identificação de falhas recorrentes no bisel manual e a decisão de implementar o corte CNC como solução padronizada refletem diretamente os conceitos de variabilidade do processo, eficiência produtiva e confiabilidade dimensional discutidos durante a formação acadêmica. Do mesmo modo, a análise do processo de calandragem foi orientada pelos princípios de conformação mecânica estudados na disciplina.

1.2.8.4 Gestão da Qualidade

Outra disciplina fundamental foi a de Gestão da Qualidade se mostrou essencial para a estruturação metodológica do estudo. O uso do Diagrama de Ishikawa, de checklists de auditoria e de dashboards digitais para acompanhamento contínuo dos indicadores é resultado da aplicação prática de ferramentas da qualidade, vemos em aula o poder que essas ferramentas têm e que surgiram a muito tempo atrás. Além disso, a visão de melhoria contínua e a ênfase na padronização de procedimentos estão alinhadas aos princípios aprendidos sobre sistemas de gestão e controle de não conformidades.

2 METODOLOGIA E RESULTADOS PARCIAIS

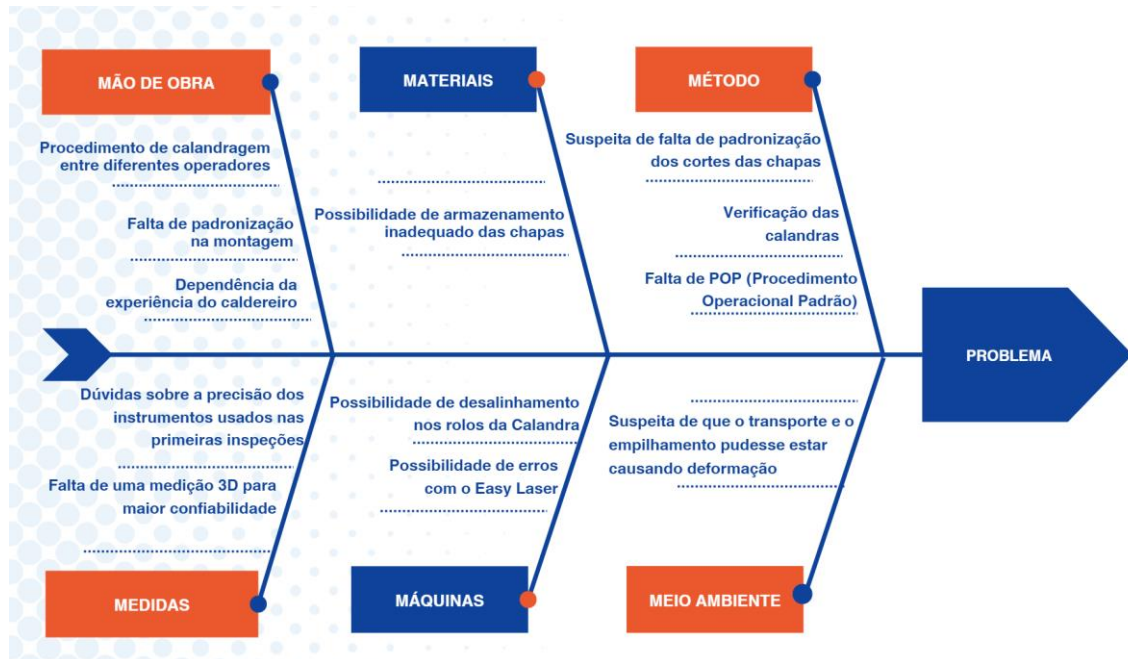
Este capítulo descreve as etapas adotadas para a identificação das causas da ondulação nos flanges e as ações implementadas para reduzir o índice de retrabalho. A abordagem combinou análises dimensionais, uso de ferramentas da qualidade e aplicação de técnicas de metrologia para controle preciso das variáveis envolvidas no processo de montagem de torres eólicas.

2.1 Planejamento e definição das causas

A investigação foi realizada em uma indústria localizada na região Nordeste do Brasil, dedicada exclusivamente à montagem de torres eólicas. O objetivo central do estudo foi reduzir a ondulação nos flanges, uma característica crítica que compromete o alinhamento dimensional das seções da torre, gerando retrabalho elevado e aumento de custos. A tolerância dimensional especificada para a fabricação dos flanges era de 0,5 mm na face usinada e de 2 mm para a montagem completa da seção (360°), parâmetros utilizados como base em todas as análises, segundo especificações internas da empresa.

O primeiro passo consistiu na formação de um grupo multifuncional com engenheiros, equipe de qualidade, líderes de produção e outros. Em reunião inicial, foi elaborado um Diagrama de Ishikawa, mapeando potenciais causas do problema a partir de categorias como Método, Mão de Obra, Máquina, Material e Medição. Essa ferramenta permitiu uma visão ampla e estruturada dos fatores que poderiam estar influenciando a ocorrência de ondulação nos flanges, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Diagrama de Ishikawa.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Com as possíveis causas levantadas, foram utilizados os dados internos obtidos a partir dos relatórios de medição do Easy-Laser (Figura 17), que indicavam o índice de reprovação dos flanges conforme a seção da torre. O objetivo foi identificá-los e priorizar quais seriam monitorados durante o estudo.

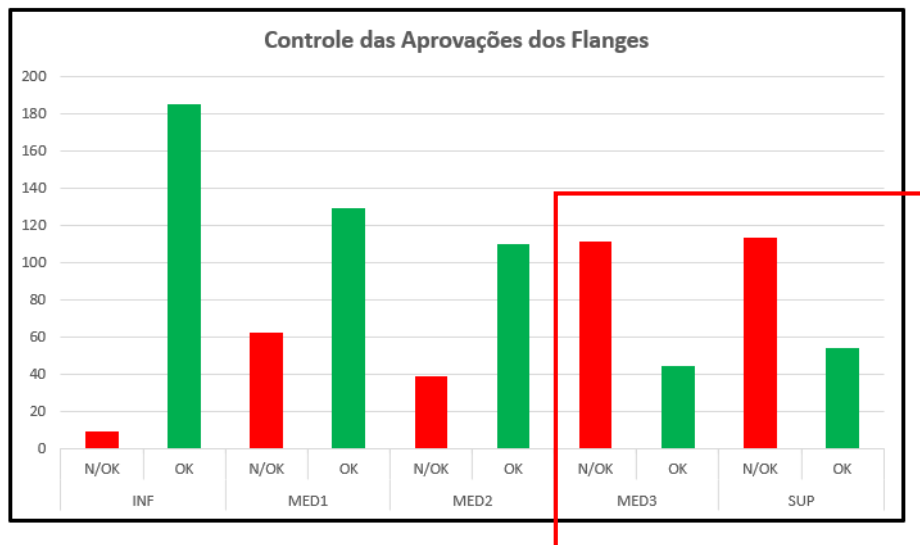
Figura 17 - Dados internos para gráfico e análise.

Controle das Medições dos Flanges - Easy Laser													F_TBR_IP_25_R2
													Data: 18/01/2021
													01/02
Projeto	Tramo	Seção	Flange	P:W	Medição	Flatness Long	Flatness Sho	Tilt M	Tilt Min	Status F	Status T	Status	
AB	32	MED3	BF	P	1*	1,80	1,20	2,30	1,00	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	36	MED3	TF	W	1*	3,30	2,50	0,80	-0,40	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	37	MED3	TF	P	1*	1,30	1,30	-0,40	-1,10	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	38	MED3	BF	P	1*	3,60	2,20	0,90	-0,30	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	40	SUP	BF	P	1*	1,30	1,10	0,90	-0,20	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	39	SUP	BF	W	1*	1,60	1,40	0,70	-0,10	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	40	MED3	BF	P	1*	1,30	1,10	0,90	-0,20	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	39	MED3	BF	P	1*	2,40	2,20	1,60	-0,80	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	39	MED3	TF	W	1*	2,00	1,50	-0,80	-1,60	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	41	SUP	BF	P	1*	1,50	1,10	0,10	-0,60	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	42	MED3	BF	P	1*	3,00	2,50	1,20	-0,30	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	42	MED3	TF	P	1*	3,00	2,00	-0,30	-1,00	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	41	MED3	BF	P	1*	1,40	1,40	0,60	-0,10	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	43	SUP	BF	W	1*	2,50	2,00	0,00	-0,90	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	44	SUP	BF	P	1*	1,80	1,60	0,90	-0,20	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	44	MED3	TF	W	1*	4,30	3,40	0,10	-1,00	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	44	MED3	BF	W	1*	1,80	1,60	0,90	-0,20	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	45	MED3	TF	P	1*	3,80	3,30	-0,30	-1,40	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	46	MED3	TF	P	1*	2,70	1,60	0,00	-0,80	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	45	SUP	BF	P	1*	2,70	1,70	0,80	-0,30	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	46	SUP	BF	P	1*	2,10	1,20	0,70	-0,60	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	48	SUP	BF	P	1*	4,40	2,10	0,60	-0,50	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	47	SUP	BF	P	1*	2,50	2,10	0,70	-0,30	N/OK	N/OK	FT N/OK	
AB	47	MED3	TF	W	1*	2,30	2,30	0,70	-0,10	N/OK	N/OK	FT N/OK	

Fonte: Elaborado pela própria autora.

A partir desses registros, foi elaborado um gráfico de distribuição que permitiu visualizar as áreas mais críticas. As seções avaliadas incluíram INF, MED1, MED2, MED3 e SUP. Com base nessa análise, as seções MED3 e SUP foram identificadas como as de maior índice de não conformidades, sendo, portanto, selecionadas para o início das ações corretivas, conforme ilustrado na Figura 18. Esse filtro inicial possibilitou concentrar esforços nos pontos mais críticos e deu direcionamento para as etapas seguintes de medição e análise dimensional.

Figura 18 - Gráfico para tomada de decisão.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

2.2 Etapas do estudo

Antes da execução das medições e análises, foi realizado um alinhamento inicial com a equipe técnica por meio de reuniões específicas para definição das ações prioritárias. Nessa fase, estruturou-se um plano de ação preliminar, contemplando as possíveis causas do problema e os métodos de verificação a serem aplicados. Foram realizadas reuniões semanais de acompanhamento, que permitiram monitorar a evolução das análises, ajustar estratégias em tempo real e manter a equipe alinhada durante todas as etapas do estudo.

2.2.1 Estudo inicial – Flanges e Easy-Laser

A primeira etapa consistiu na validação dimensional dos flanges para verificar se o defeito de ondulação estava relacionado ao próprio componente. Para isso, foram realizadas medições com o equipamento Easy Laser em diferentes condições: flange recém-usinado e soldado, empilhado, apoiado em tacos metálicos, após transporte entre setores e na posição vertical simulando montagem. Os resultados obtidos foram positivos em todas as seções, conforme as Figuras 19, 20, 21, 22 e 23.

Figura 19 - Flange recém usinado e soldado.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 20 - Flanges empilhados para medição de Easy Laser.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 21 - Flange apoiado em tacos metálicos.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 22 - Flanges em transporte.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 23 - Flange apoiado na vertical.

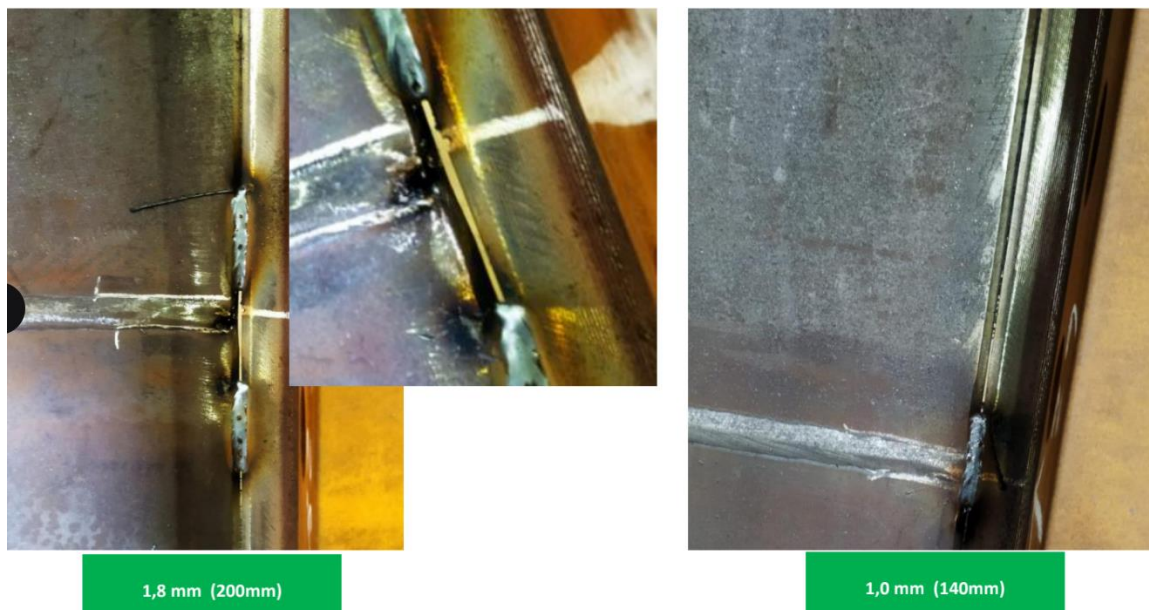


Fonte: Elaborado pela própria autora.

Os resultados demonstraram que, independentemente da condição de apoio ou transporte, os flanges mantinham a planicidade dentro da tolerância de fabricação de 0,5 mm em 360°, conforme especificações internas e normas ISO 1101:2017. Esse resultado confirmou que o defeito não estava no flange em si, direcionando a investigação para a interação flange–virola.

Além da planicidade, foi realizada a medição de folga (*gap*) entre flange e virola em pontos estratégicos. As leituras indicaram valores como 1,8 mm a 200 mm da referência e 1,0 mm a 140 mm da referência (zero graus da circunferência), o que serviu para mapear regiões críticas de ajuste (Figura 24). O critério de aceitação seguiu as especificações do cliente e a norma ISO 1101:2017, que estipulavam tolerância máxima de 2 mm para a interface flange-virola.

Figura 24 - Gap entre flange e virola.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

2.2.2 Análise das Virolas e uso da FARO

Após a confirmação de que os flanges atendiam plenamente às especificações dimensionais (0,5 mm na face usinada e 2 mm para a montagem completa em 360°), a segunda etapa concentrou-se na avaliação das virolas. As medições iniciais com o

Easy-Laser demonstraram-se limitadas para esse componente, devido à baixa espessura das bordas e à dificuldade de capturar desvios geométricos ao longo de toda a superfície de contato com o flange. Essa limitação reforçou a necessidade de utilizar uma auditoria externa de alta precisão.

Para essa etapa, foi contratada uma análise dimensional 3D com os equipamentos da FARO: o *Laser Tracker*, referência em metrologia tridimensional de grandes estruturas, e o Focus Scanner a laser para captura de nuvem de pontos em 360°.

O Focus foi utilizado como ferramenta complementar, mas apresentou limitações relevantes na detecção de deformações na interface flange-viola. Essas restrições ocorreram porque o scanner requer áreas com largura e espessura suficientes para gerar um plano de referência confiável, assim como demonstrado na Figura 25. No entanto, a reduzida espessura das bordas das virolas dificultou a obtenção de uma nuvem de pontos com a resolução necessária, evidenciando a necessidade de recorrer ao *Laser Tracker* para realizar essa medição com maior precisão.

Figura 25 - 3D FARO Focus em preparação para medição da virola.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Sendo um sistema baseado em SMR (é um espelho esférico que reflete o feixe de laser exatamente de volta para o equipamento), ele permite posicionar alvos pontuais e obter coordenadas com alta precisão mesmo em geometrias estreitas e superfícies com pouca área útil para escaneamento.

O processo de medição consistiu na instalação de alvos refletivos distribuídos em pontos estratégicos ao redor da circunferência e na varredura completa da face da virola utilizando o Laser Tracker da FARO. A varredura gerou uma nuvem de pontos tridimensional, posteriormente alinhada aos eixos teóricos e comparada ao modelo de referência. O mapeamento revelou variações de ondulação entre 7 e 8 mm na face das virolas, valores significativamente superiores aos limites de tolerância estabelecidos para o conjunto: 0,5 mm para a planicidade da face usinada do flange e 2 mm para a montagem completa em 360°. A Figura 26 apresenta um dos mapas

de medição obtidos, evidenciando as regiões críticas de desvio ao longo da circunferência.

Figura 26 - Laser Tracker realizando medição interna de virola.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

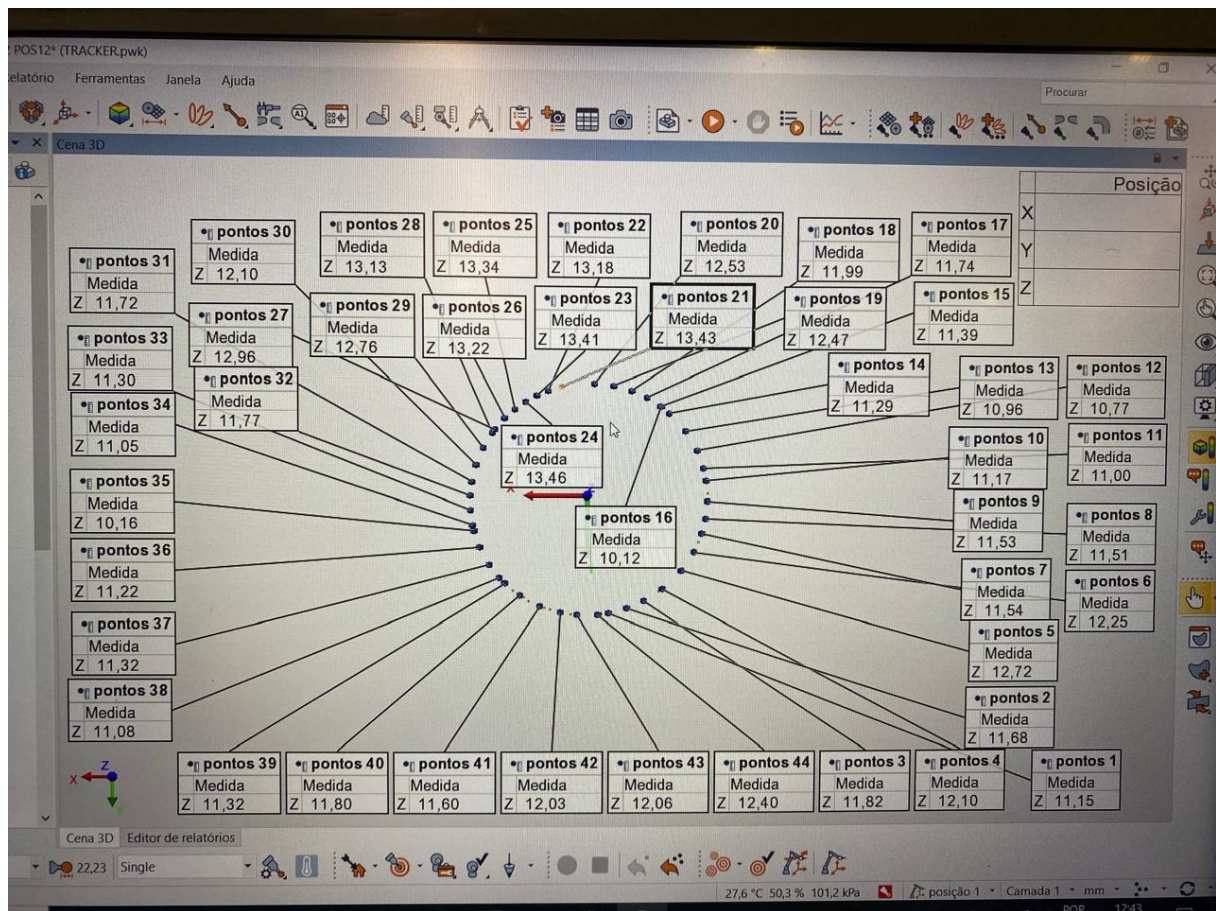
Para a virola em si, normalmente não existe uma tolerância direta definida em norma, uma vez que o alinhamento dimensional é garantido pelo conjunto flange + virola. Por isso, na prática, utilizam-se como referência indireta as tolerâncias do flange e da montagem final. Assim, quando a virola apresenta deformações que, isoladamente, já excedem a tolerância de montagem de 2 mm, ela é considerada a origem do problema dimensional.

No caso estudado, as variações de 7–8 mm encontradas antes da soldagem do flange demonstraram que a virola, sozinha, já impunha uma deformação muito acima do limite admissível para o conjunto. Isso fazia com que, mesmo produzidos dentro das especificações, os flanges copiassem a geometria irregular da virola, reproduzindo a ondulação na interface de montagem.

Esse diagnóstico dimensional representou a confirmação da causa raiz do problema e redefiniu a direção do estudo. A partir desse resultado, a investigação

passou a concentrar-se nas etapas iniciais de fabricação das violas, buscando identificar em que momento do processo produtivo as deformações estavam sendo geradas. O mapeamento obtido com o Laser Tracker serviu como referência metrológica para as análises seguintes e ponto de partida para todas as decisões subsequentes, Figura 27, direcionando o foco para etapas críticas como o corte das chapas metálicas e o faceamento em máquina CNC (TRF), identificadas como ações-chave para corrigir a não conformidade dimensional.

Figura 27 - Mapeamento e Resultados do Laser Tracker.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

2.2.3 Máquina CNC de corte TRF

Na análise do corte das chapas, identificou-se que as tolerâncias adotadas no processo de bisel manual (Figura 28) permitiam variações de até 3 mm em cada lado, o que resultava em desvios acumulados quando as chapas eram conformadas na calandra. Constatou-se também que o bisel manual replicava o erro dimensional da chapa, transferindo-o diretamente para a face da virola e, conseqüentemente, para a interface flange–virola.

Figura 28 - Biseladora semi manual.



Fonte: Celmar Comercial, 2022.

Como uma das primeiras ações corretivas do projeto e etapa essencial para garantir qualquer possibilidade de melhoria no processo, definiu-se que todas as chapas destinadas às virolas que receberiam flanges passariam obrigatoriamente por uma máquina CNC de corte (modelo TRF – *Torch Rotary Frame*), como mostrado na Figura 29, sendo as seções SUP e MED 3 as prioridades. Essa medida foi adotada de forma imediata para padronizar o faceamento e eliminar as variações provenientes do processo manual, estabelecendo uma base dimensional precisa para a montagem e contribuindo diretamente para a redução da ondulação.

Figura 29 - Fresadora CNC TECOI utilizada no corte automatizado das chapas para virolas.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

2.2.4 Calandra e Auditorias de Ovalização

Em paralelo a etapa de análise das chapas, a investigação direcionou-se para a calandra, equipamento responsável por conformar as chapas em virolas cilíndricas. Inicialmente, não foram identificados defeitos estruturais no maquinário, o problema estava relacionado ao procedimento operacional. O procedimento oficial determinava a verificação com gabaritos na parte baixa (A) e mais próxima do operador, parte alta (C) sendo o lado oposto ao A, e o central (B) da virola (Figura 30), porém constatou-se que os operadores utilizavam apenas a parte baixa por ser de acesso mais fácil, o que resultava em virolas fora das tolerâncias geométricas especificadas.

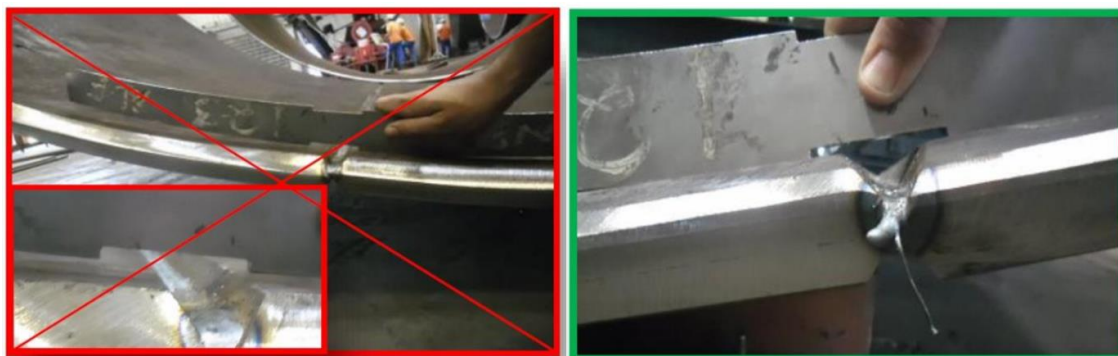
Figura 30 - Posicionamento correto para as medições na calandra.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Como ação corretiva, foram realizados treinamentos com todos os operadores, reforçando o uso adequado dos gabaritos (Figura 31), nessa figura é demonstrado o gabarito em uso da operação, aonde na figura a esquerda mostra a forma incorreta que seria uma folga e na segunda foto seria o gabarito bem encostado na virola, no qual seria a forma correta e perfeita para aprovação. A importância de medir nos três pontos prescritos pelo procedimento. Os treinamentos foram realizados com todos os operadores de calandra e foi construído um POP (procedimento operacional), sendo um documento interno da empresa, porém nele contém todo o passo a passo de como fazer as medições ainda na calandra e também posicionamento das ferramentas de trabalho. Além disso, foram implementadas melhorias básicas preventivas nas calandras, como alinhamento de rolos e centralização de chapa.

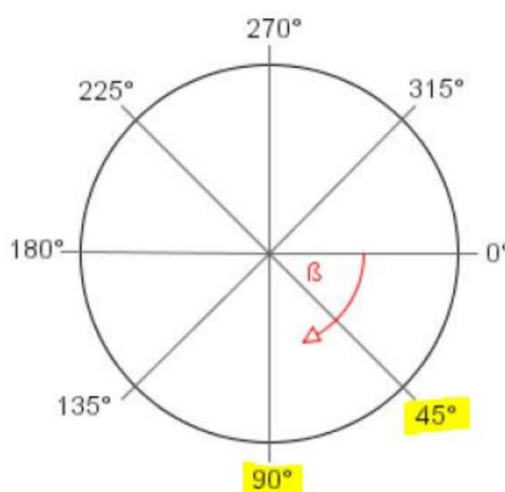
Figura 31 - Posicionamento da régua de medição.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Simultaneamente, iniciou-se o controle rigoroso de ovalização das virolas. A medição era realizada utilizando uma trena a laser nos pontos definidos como PA (Ponto Alto) e PB (Ponto Baixo), calculando as ovalizações em ambos os lados. Para garantir consistência e padronização no processo, as medições foram sempre executadas com a solda longitudinal posicionada a 45° e 90° (Figura 32), conforme prática recomendada para reduzir interferências de tensões residuais na leitura.

Figura 32 - Posicionamento da solda longitudinal.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Para reforçar esse controle, foram implementadas auditorias dimensionais diretamente na linha de produção. As medidas de ovalização eram registradas no

próprio interior da virola, com marcações visuais que indicavam os valores obtidos para PA e PB. Quando as medições ultrapassavam as tolerâncias estabelecidas, a virola era imediatamente reprovada e retornava ao processo de calandragem para correção.

Esse método de auditoria direta permitiu identificar desvios ainda na etapa inicial, reduzindo a propagação de não conformidades e tornando o processo mais estável. Na Figura 33, por exemplo vemos uma virola com ovalização muito alta de 113, essa mesma virola foi reprovada e voltou para o processo anterior, para que pudesse estar no padrão da melhoria. De acordo com a norma ISO 1101:2017, a ovalização admissível deve ser limitada a 10% do diâmetro nominal da peça. Contudo, devido à grande variedade de tamanhos de virolas produzidas na unidade, foi definido internamente um padrão de controle para simplificar e garantir consistência entre os projetos.

- ≤ 50 mm para virolas não associadas diretamente os flanges (seções intermediárias);
- ≤ 40 mm para virolas que receberiam flanges padrão;
- ≤ 30 mm para virolas acopladas aos flanges mais críticos (seções de top e base).

Figura 33 - Posicionamento da solda longitudinal.

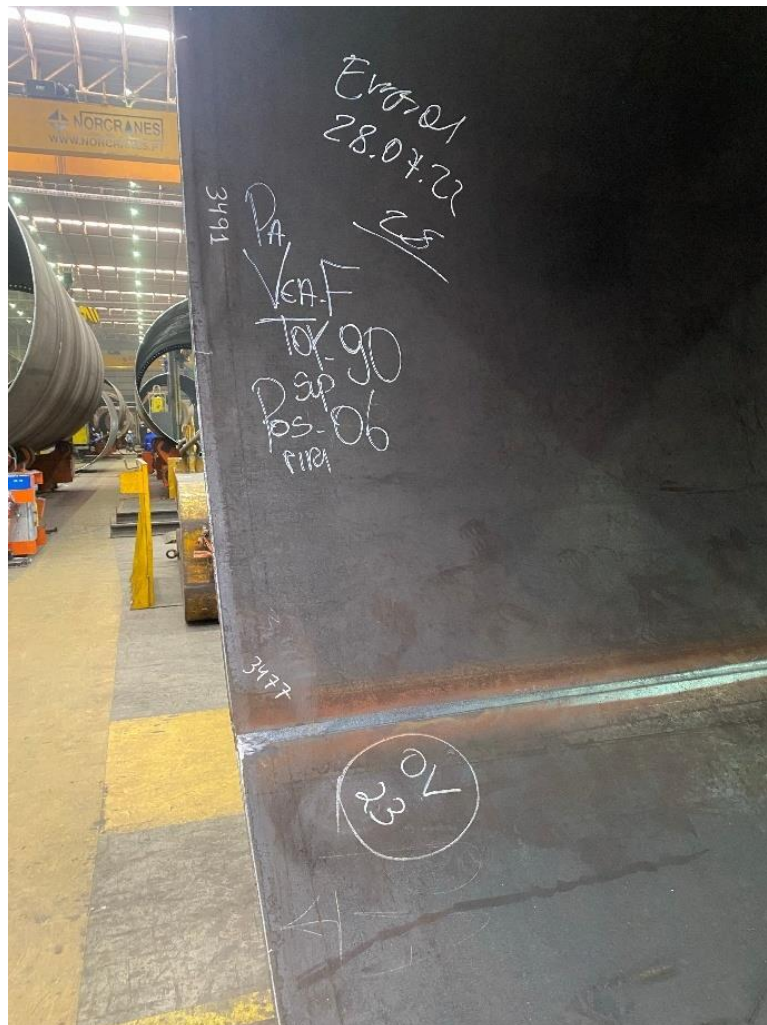


Fonte: Elaborado pela própria autora.

Ao longo do estudo, as marcações de ovalização passaram a apresentar maior padronização e consistência. Com o avanço do projeto, alguns operadores foram treinados especificamente para realizar as medições e registrar corretamente os valores. À medida que os turnos progrediam, auditorias eram realizadas diretamente sobre as medições já executadas, garantindo a confiabilidade dos dados e reprovando, quando necessário, as peças que excediam as tolerâncias estabelecidas.

Na Figura 34 é possível observar uma virola da seção superior de um determinado projeto. Inicialmente, a medição indicou 28mm de ovalização, e, após a intervenção e correção do time de melhoria, o valor foi reduzido para 23mm, representando um resultado significativo no controle dimensional.

Figura 34 - Exemplo de marcação de ovalização



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Com a evolução do processo e a melhoria dos resultados, esses limites foram posteriormente reduzidos para faixas mais restritivas (**25–30 mm**) conforme o projeto apresentou ganhos de estabilidade dimensional.

Durante essa fase, foram também padronizadas práticas operacionais para reduzir variações geométricas e garantir maior repetibilidade no processo:

- Alinhamento preciso dos rolos da calandra;
- Controle da pressão de trabalho aplicada;
- Centralização adequada da chapa;
- Conferência contínua com gabarito durante todo o curvado;

Essas ações, somadas ao treinamento e às auditorias, estabeleceram uma base sólida de controle dimensional, permitindo reduzir de forma significativa as ovalizações e contribuindo diretamente para a diminuição dos problemas de ondulação observados na montagem da torre.

2.2.5 Histórico de Ações Corretivas

Apesar das ações preventivas implementadas ao longo do projeto, a unidade possuía procedimentos padronizados para correção de ondulação e *tilt* (desvios pontuais) em flanges quando os desvios ultrapassavam as tolerâncias de 0,5 mm na face usinada e 2 mm no conjunto flange–virola (360°). Dois métodos principais eram adotados:

- Correção por aquecimento localizado: realizada conforme instrução interna (Figura 35). Consistia na aplicação de calor controlado (560–600 °C) diretamente sobre os pontos de maior pico de ondulação identificados pelo Easy Laser. O processo utilizava maçarico de oxiacetileno e monitoramento contínuo com pirômetro, garantindo que a temperatura não alterasse as propriedades metalúrgicas do aço. A contração térmica induzida equalizava os picos em relação aos vales adjacentes, reduzindo o desvio para dentro da tolerância. A velocidade de aquecimento era sincronizada com o virador, assegurando uniformidade no ajuste.

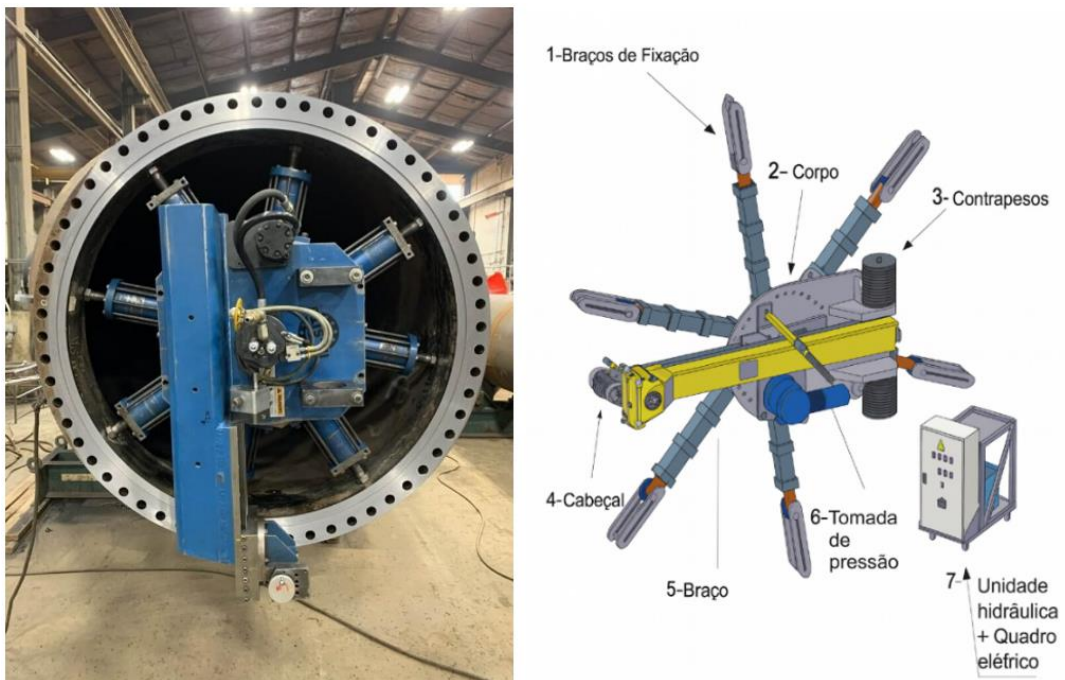
Figura 35 - Correção do tilt com calor.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

• Correção por usinagem: conforme a figura 36, quando aprovado pelo cliente, realizava-se a fresagem vertical da face do flange, removendo camadas mínimas de material até restabelecer a planicidade. Esse método era aplicado prioritariamente em situações em que a movimentação do tramo completo seria inviável, oferecendo uma alternativa mecânica ao processo térmico.

Figura 36 - Máquina fresadora portátil para faceamento de flanges.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

O projeto contribuiu significativamente para reduzir a dependência dessas técnicas. Com a implementação do corte CNC das chapas, o controle rigoroso de ovalização e os treinamentos na calandra, a necessidade de correção por calor diminuiu drasticamente, restringindo-se a casos pontuais. O uso de fresagem tornou-se ainda mais raro, reforçando que o controle preventivo se mostrou mais eficaz que o retrabalho corretivo.

2.3 Acompanhamento, controle e consolidação das ações

Com as ações implantadas, foi estabelecido um acompanhamento contínuo das medições e resultados. Todas as etapas passaram a ser registradas em checklists e integradas a um *dashboards* no *Power BI* o mesmo já construído no início do projeto, permitindo análise da evolução dos índices de ondulação. Essa prática está alinhada às recomendações recentes de controle visual e digitalização de processos na indústria moderna (Quality [...], 2023; Oliveira, 2024).

2.3.1 Auditorias e Checklists

Foram criadas rotinas de auditoria diária em todos os turnos de produção, com medições sistemáticas de ovalização em cada virola. O procedimento utilizava uma trena a laser para determinar as ovalizações, medidas pela diferença dos diâmetros nos ângulos conforme citados anteriormente, nos pontos PA (Ponto Alto) e PB (Ponto Baixo) da virola. Todas as medições eram registradas inicialmente direto na peça e depois adicionada a um checklist padrão interno para controle e depois passada no *Dashboard*. Essa abordagem segue o padrão atual de checklists digitais aplicados à inspeção de qualidade industrial, que melhoram a rastreabilidade e reduzem erros operacionais (Quality [...], 2023).

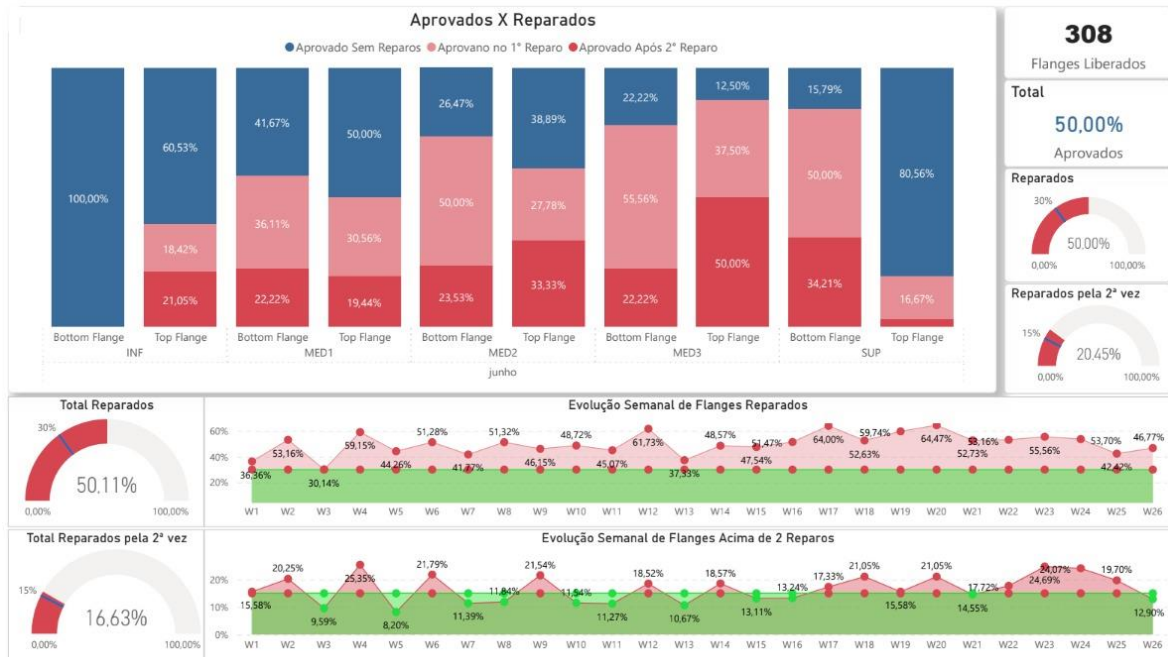
2.3.2 *Dashboards* e Monitoramento Digital

Os dados coletados foram integrados em um *dashboard* desenvolvido no *Power BI* (Figura 37), permitindo análise total compartilhada com todos os setores e um acompanhamento mais preciso. Esse painel apresenta:

- Percentual de flanges aprovados x reparados;

- Reincidência de reparos (1º, 2º e acima de 2 reparos);
- Evolução temporal semanal e mensal.

Figura 37 – Dashboard para melhor visualização do progresso.



Fonte: elaborado pela própria autora.

A visualização permitiu comparar o cenário inicial (2022), com 50% de flanges necessitando reparo e 20,45% voltando para um segundo reparo, no mesmo ano já conseguíamos ver um acompanhamento mais preciso. O uso de dashboards interativos em Power BI é uma prática consolidada na indústria 4.0, trazendo eficiência na análise de dados e no controle de indicadores (Top 10 [...], 2025; Butalapalli, 2024; O'Neill *et al.*, 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos podem ser diretamente associados às principais ações implementadas no processo. Cada medida contribuiu para reduzir as causas de ondulação, atacando o problema desde a origem até a montagem final.

3.1 Ações corretivas implementadas

As ações corretivas tiveram como foco principal a redução da ondulação nos flanges, atuando sobre as principais causas identificadas durante as análises. Entre as medidas adotadas, destacaram-se:

- **Padronização das chapas com a máquina CNC (Torch Rotary Frame – TRF):** eliminou variações provenientes do bisel manual, garantindo uniformidade no faceamento das virolas destinadas aos flanges. Essa ação foi decisiva para reduzir deformações na interface flange–virola logo nas primeiras medições pós-corte.
- **Controle rigoroso de ovalização:** definição de tolerâncias internas mais restritivas que as especificadas pelo cliente, estabelecendo valores de ≤ 50 mm para virolas comuns, ≤ 40 mm para virolas de flanges padrão e ≤ 30 mm para virolas de flanges críticos. As medições eram realizadas com trena a laser nos pontos PA (Ponto Alto) e PB (Ponto Baixo), calculando a diferença entre eles (PA–PB) e marcadas no interior da virola, conforme a figura 38.

Figura 38 - Virolas seguindo o padrão das definições.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Com o monitoramento realizado nas virolas, as informações coletadas eram registradas em uma planilha no Microsoft Excel (Figura 39) e, em seguida, compartilhadas com as lideranças e com a equipe de melhoria contínua. Esse processo tinha como objetivo controlar e acompanhar a evolução dos indicadores,

permitindo a tomada de decisões mais assertivas e o direcionamento de ações corretivas de forma estruturada.

Figura 39 - Monitoramento das virolas.

Auditorias para Ovalização - LW (Camilla)												
Torre	Posição	Projeto	Seção	Operador LW	Calandra	Operador Calandra	Recalibrar	Ovalização PA	Ovalização PB	Aprovação		
								OVAL	OVAL	1ª	2ª	3ª
T32	TF	VE - AH	SUPERIOR	1904	1	1991		6	10	OK		
T64	TF	VE - AG	SUPERIOR	1857	1	1991		23	13	OK		
T35	TF	VE - AH	MED02	1876	NI	1982		40	39			OK
T35	BF	VE - AH	SUPERIOR	1876	6	1121		34	19		OK	
T32	BF	VE - AH	SUPERIOR	1738	6	1121		30	16	OK		
T26	BF	VE - AH	MED 02	1848	3	1998	x	37			OK	
T37	TF	VE - AH	MED 01	1406	3	913		7	20		OK	
T69	BF	VE - AG	MED02	1997	1	1740		28	41		OK	
T36	BF	VE - AH	MED02	1997	6	1636		18	15	OK		
T111	BF	VE - AF	SUPERIOR	1876	1	1982		51	39		OK	
T37	BF	VE - AH	MED02	884	5	269		22	27	OK		
T33	BF	VE - AH	SUPERIOR	1860	5	269		8	21		OK	
T69	BF	VE - AG	MED01	417	1	1982		14	34	OK		
T35	TF	VE - AH	MED01	1738	6	1121		18	18	OK		
T71	BF	VE - AG	MED02	1970	3	1533		37	52		OK	
T113	BF	VE - AF	MED 02	1970	6	288		43	27	OK		
T38	BF	VE - AH	MED 01	1960	5	1740		15	40	OK		
T33	BF	VE - AH	INFERIOR	2005	5	1740		45	44	OK		

Fonte: elaborado pela própria autora.

- **Treinamentos e auditorias na calandra:** reforço do uso dos gabaritos nas partes (alta, baixa e central da virola), correção de desvios operacionais e auditorias diárias para garantir a aplicação correta do procedimento.
- **Monitoramento contínuo com *dashboards*:** integração das medições em um painel no *Power BI*, permitindo análise em tempo real e tomada de decisão ágil durante o processo produtivo.

3.2 Análise comparativa e ganhos obtidos

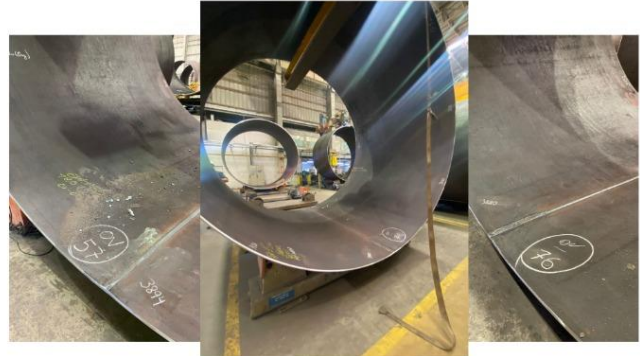
Com o objetivo de comprovar a relação entre a qualidade dimensional das virolas e o tempo necessário para montagem dos flanges, foi realizado um acompanhamento pontual de duas situações contrastantes: uma virola com baixa ovalização ($OV \leq 20$) e outra com alta ovalização ($OV \geq 70$).

Figura 40 - Acompanhamento da melhoria da ovalização.

- Acompanhamento de duas virolas MED 2 – VE-AG, uma com a ovalização ≥ 70 e outra com a ovalização ≤ 20 .



Virola com ovalização ≤ 20 .
PA = 9 OV
PB = 14 OV



Virola com ovalização ≥ 70
PA = 76 OV
PB = 57 OV

Fonte: elaborado pela própria autora.

A primeira apresentou montagem facilitada, com tempo médio de 18 minutos, enquanto a segunda demandou 36 minutos para o mesmo processo o que representa uma diferença de 100% no tempo de execução.

Figura 41 - Comparativo de tempo de montagem.

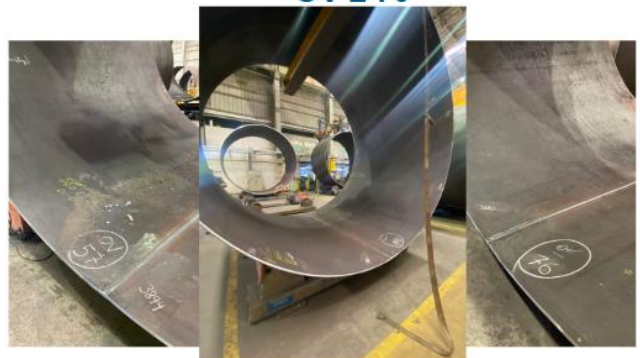
- Levantamento de tempos

OV ≤ 20



Tempo
✓ Montagem = 18 min

OV ≥ 70



Tempo
✓ Montagem = 36 min

Fonte: elaborado pela própria autora.

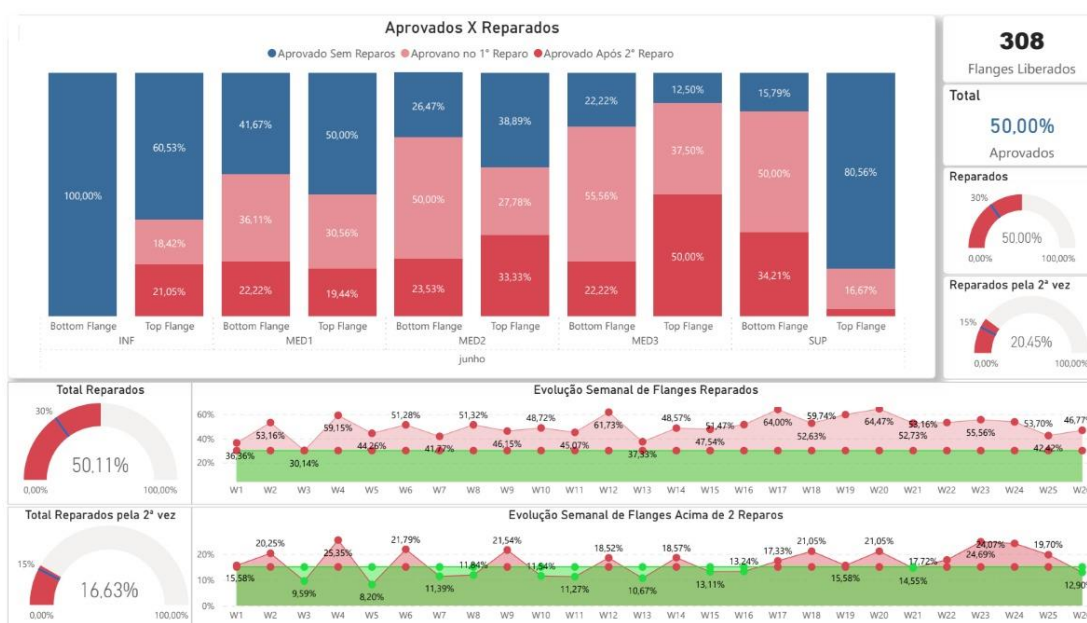
Esse dado reforça a importância do controle de ovalização durante a conformação, uma vez que virolas fora da tolerância dimensional dificultam o encaixe

do flange, exigindo ajustes manuais adicionais, maior tempo de manuseio e podendo até causar retrabalhos.

A implementação das ações corretivas e do sistema de monitoramento contínuo trouxe ganhos expressivos, comprovados pelos dados coletados e analisados nos *dashboards* de controle. A comparação entre o cenário inicial (2022) e o cenário após consolidação das melhorias (2024) evidencia a efetividade do projeto.

- **2022:** 50% dos flanges medidos necessitavam de reparo, sendo que 20,45% retornavam para uma segunda correção (Figura 42). O índice de aprovação sem reparo era de apenas 50%.

Figura 42 - Dashboard de análises de 2022.



Fonte: elaborado pela própria autora.

- **2024:** após a padronização das chapas via CNC TRF, controle rigoroso de ovalização, treinamentos na calandra e auditorias diárias, o percentual de flanges reparados caiu para apenas 4,08%, com 95,92% aprovados sem necessidade de correção (Figura 43). A reincidência de reparos acima da segunda vez despencou para 0,17%.

Figura 43 - Dashboard de análises de 2024.

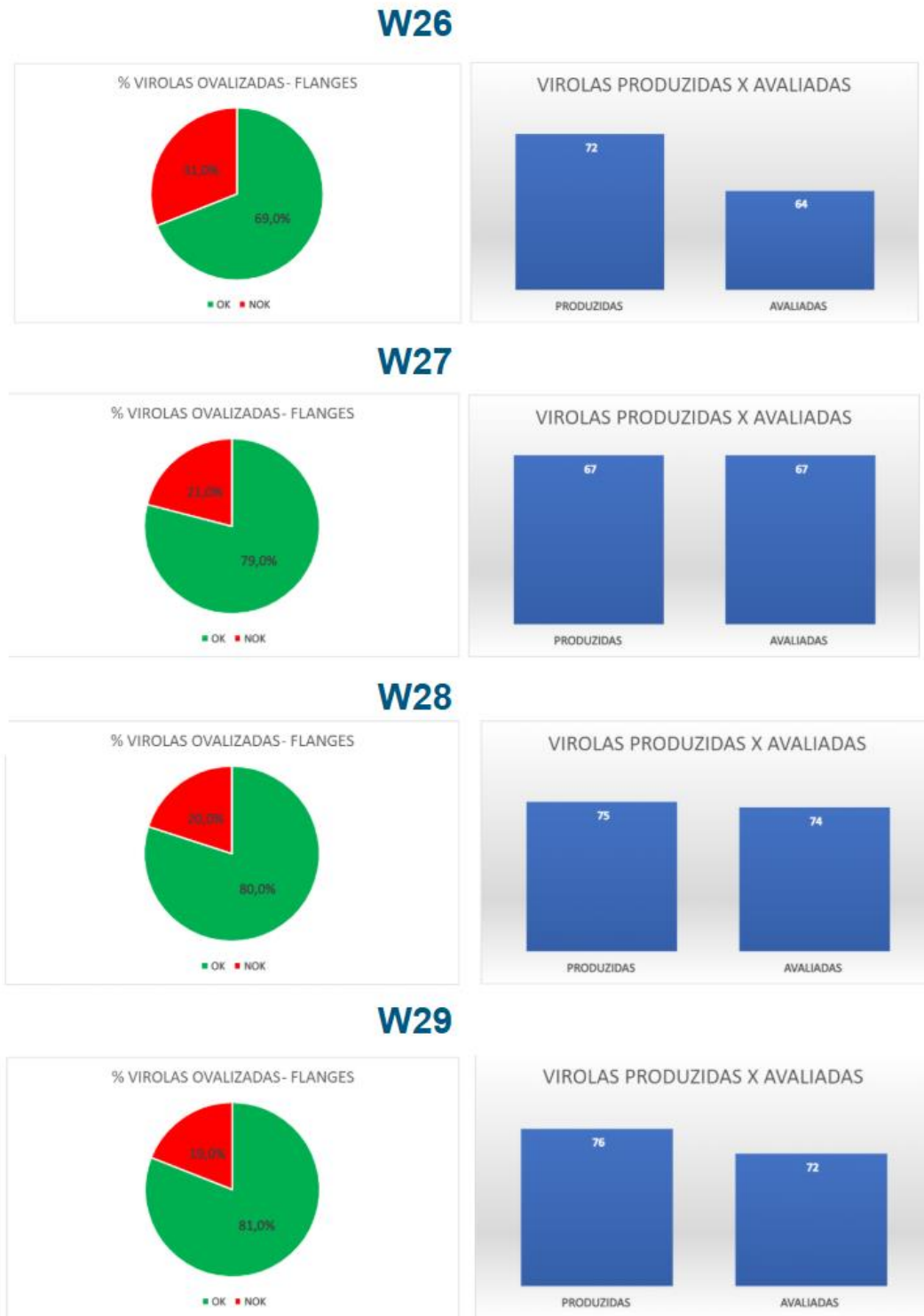


Fonte: elaborado pela própria autora.

Além da significativa redução dos flanges com necessidade de reparo, observou-se também uma melhoria constante nos índices de ovalização das virolas superiores ao longo das semanas. A Figura 44 apresenta a evolução percentual das ovalizações fora do padrão (NOK) e mostra também a quantidade de virolas produzidas e efetivamente medidas.

Entre as semanas W26 e W28, houve uma clara tendência de melhoria, com o percentual de virolas OK subindo de 72,5% para 86%. Essa melhora pode ser atribuída à estabilização do processo e ao reforço nas auditorias diárias. Já na semana W29, apesar de uma leve piora (queda para 79% OK), o índice ainda se manteve superior ao patamar inicial.

Figura 44 - Evolução semanal W26 à W29.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Essa melhora na ovalização das virolas está diretamente relacionada à redução da necessidade de reparo dos flanges. Como os flanges são soldados nas extremidades das virolas, qualquer desvio geométrico, como a ovalização excessiva,

compromete o alinhamento e o encaixe adequado durante a montagem, resultando em retrabalho. Com a diminuição dos índices de ovalização, o processo de montagem se tornou mais eficiente e padronizado, reduzindo significativamente os reparos nas flanges e contribuindo para o aumento do percentual de peças aprovadas sem necessidade de correção.

Também foi realizada uma comparação das horas dedicadas a reparos ao longo do período de implantação do projeto, com foco nos anos de 2021 (cenário antes da melhoria) e 2024 (após consolidação das ações). Conforme apresentado no Gráfico 1, houve uma redução significativa, passando de 195,18 horas em 2021 para 54,5 horas em 2024 — o que representa um ganho operacional expressivo e reflete diretamente a efetividade das medidas adotadas.

Gráfico 1 - Redução das horas de reparo.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Embora a redução nas horas de reparo tenha sido significativa, o valor registrado (54,5 h em 2024) pode parecer superior ao esperado considerando a queda do índice de flanges com retrabalho de 50% para 4,08%. Essa diferença pode ser atribuída a variações no volume de produção, à complexidade dos poucos reparos realizados ou à concentração dos retrabalhos em seções mais críticas e demoradas.

Esses números representam uma redução de aproximadamente 90% no índice de retrabalho, demonstrando que as ações tomadas atacaram as causas principais do problema. Os ganhos obtidos com a padronização das etapas de corte, calandragem e controle de ovalização refletem diretamente na melhoria da integridade estrutural da torre, o que está alinhado com estudos que apontam a importância do controle geométrico para evitar falhas e assegurar a confiabilidade das estruturas tubulares de grande porte (Santos, 2022).

3.3 Sustentabilidade das melhorias

A análise dos gráficos de acompanhamento comprova que as melhorias implementadas não foram pontuais, mas sustentáveis ao longo do tempo. Em 2024, mesmo com produção em escala e variabilidade de projetos, os índices de aprovação se mantiveram estáveis, reforçando a robustez do processo.

Além disso, a padronização das etapas críticas como corte de chapa, calandragem e montagem flange–virola criou uma base replicável para outras unidades da empresa. O método de controle de ovalização associado ao monitoramento contínuo tem potencial para ser expandido para todas as fábricas do grupo, elevando o padrão de qualidade global e reduzindo custos com retrabalho em larga escala.

Essa busca por padronização, eficiência produtiva e redução de desperdícios está alinhada com os desafios enfrentados mundialmente pelo setor de energia eólica, especialmente diante do aumento da demanda e da complexidade dos projetos, conforme destacado pelo GWEC em seu relatório anual (Global Wind Energy Council, 2025).

3.4 Melhorias futuras

3.4.1 Implementação de monitoramento em tempo real

Como desdobramento dos resultados obtidos neste trabalho, algumas ações podem ser propostas para aumentar a confiabilidade do processo, reduzir o tempo de retrabalho e avançar na direção da Indústria 4.0.

Uma das principais sugestões é a implementação de um sistema de monitoramento em tempo real na etapa de montagem da interface flange-virola. Hoje, a medição depende majoritariamente de equipamentos portáteis e inspeção manual, o que pode gerar variações ou atrasos. Com o uso de sensores ópticos fixos ou scanners a laser integrados à linha de produção, seria possível acompanhar continuamente o alinhamento, a planicidade e o folga entre as superfícies, gerando alertas imediatos em caso de desvio dimensional. Esse tipo de sistema pode ser conectado a softwares de metrologia com análise automática das tolerâncias estabelecidas, possibilitando uma resposta mais rápida e precisa dos operadores, além de fornecer dados históricos para análises futuras.

3.4.2 Capacitação Contínua e Cultura de Qualidade

Como proposta de melhoria contínua, sugere-se a implantação de um programa de capacitação semestral, com treinamentos técnicos voltados a operadores e inspetores que atuam diretamente na interface flange–virola. Os conteúdos abordariam atualização de procedimentos, boas práticas de medição, leitura de tolerâncias e prevenção de retrabalhos. Complementarmente, recomenda-se a realização da "Semana da Melhoria" duas vezes ao ano, promovendo o compartilhamento de resultados, discussão de casos reais e oficinas práticas com foco na padronização e inovação. Essas ações visam reduzir a variabilidade entre equipes, fortalecer a cultura de qualidade e manter o alinhamento técnico ao longo do tempo.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo principal reduzir a ondulação dos flanges em torres eólicas, uma característica crítica que impactava diretamente a montagem e a integridade dimensional da estrutura, além de gerar elevados índices de retrabalho e custos associados. A investigação permitiu compreender que o problema não estava apenas nos flanges, mas, sobretudo, na interface flange–virola e nos processos anteriores à montagem.

A aplicação de análises dimensionais sistemáticas, aliadas ao uso de tecnologias de medição de alta precisão (Easy-Laser, FARO Laser Tracker, FARO Focus, CNC TRF e trena a laser), possibilitou identificar que virolas fora de tolerância geométrica transferiam deformações para flanges perfeitamente usinados, amplificando a ondulação no conjunto. A implementação de ações corretivas — como a padronização do corte de chapas via CNC, auditorias diárias, treinamentos na calandra e controle rigoroso de ovalização — resultou em ganhos expressivos de qualidade e significativa redução do retrabalho.

O projeto evidenciou que o controle preventivo de variáveis geométricas ao longo de toda a cadeia de fabricação é determinante para a estabilidade dimensional de torres eólicas. Além disso, demonstrou que o uso de ferramentas da qualidade, como Ishikawa, Checklist e Gráficos bases, aliado a medições de alta confiabilidade e monitoramento contínuo, pode gerar melhorias sustentáveis e replicáveis em outras unidades produtivas.

Por fim, os resultados alcançados comprovam que a integração entre engenharia, qualidade e operação, associada ao uso adequado de tecnologia, é capaz de transformar um problema crônico em um processo controlado, reduzindo custos, aumentando a eficiência e garantindo maior confiabilidade estrutural. O trabalho, portanto, não apenas atendeu ao objetivo inicial, como também forneceu uma base sólida para futuras padronizações e expansão das práticas adotadas para outras fábricas do grupo.

REFERÊNCIAS

BURTON, D.; JENKINS, N.; SHARPE, D.; BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. Disponível em: https://library.uniteddiversity.coop/Energy/Wind/Wind_Energy_Handbook.pdf. Acesso em: 07 jul. 2025.

BUTALAPALLI, Vidyasagar. **Driving manufacturing efficiency with Microsoft Power BI analytics**. [S. l.]: Vertex Consulting Services, 2024. *Blog*. Disponível em: <https://vertexcs.com/driving-manufacturing-efficiency-with-microsoft-power-bi-analytics/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

CIANCIARULLO, Mauro Iwanow. **Construção de gasodutos e oleodutos: orçamento e planejamento**. Rio de Janeiro: Interciência, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN>. Acesso em: 07 jul. 2025.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2025**. Lisboa, Portugal: GWEC, 2025. Disponível em: https://26973329.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/26973329/2.%20Reports/Global%20Wind%20Report/GWEC%20Global%20Wind%20Report%202025.pdf?__hstc=45859835.097739f84d7d5527f6771afbde39935.1745426990438.1745426990438.1745426990438.1&__hssc=45859835.2.1745426990439&__hsfp=737915754. Acesso em: 07 jul. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2021**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acaef789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1101:2017: Geometrical Product Specifications (GPS) - Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out**. Genebra: ISO, 2017.

ISHIKAWA, Kaoru. **What is total quality control?: the japanese way**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1986.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico de Qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

O'NEILL, Meadhbh *et. al.* Process visualization of manufacturing execution system (MES) data. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, [s. l.], p. 659–664, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2201.06465>. Acesso em: 07 jul. 2025.

OLIVEIRA, Adeline de. **How Manufacturing Dashboards Boost Your Plant's Productivity**. [S. l.]: U-Trakk Proaction International, 2024. *Site*. Disponível em:

<https://blog.proactioninternational.com/en/manufacturing-dashboards-boost-productivity>. Acesso em: 07 jul. 2025.

QUALITY control digital checklist: streamline manufacturing processes. Houston: Fat Finger, 2023. *Blog*. Disponível em: <https://fatfinger.io/quality-control-checklist/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

RAMOS, B. A. *et al.* **Calandra manual**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Minas Gerais, Arcos, jul. 2019. Disponível em: https://www.ifmg.edu.br/arcos/ensino-1/tai/20191_TAI1_Calandramanual.pdf. Acesso em: 07 jul. 2025.

SANTOS, Mirelle Batista dos. **Análises e verificações de torres tubulares de aço para aerogeradores**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/49517>. Acesso em: 07 jul. 2025.

TOMÉ, P. M. N. **Simulação de um Processo Industrial de Fabrico de Torres Eólicas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146463754/dissertacao.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2025.

TOP 10 uses of Power BI in manufacturing industry. [S. l.]: X-Byte Analytics, 2025. *Blog*. Disponível em: <https://www.xbyteanalytics.com/top-10-power-bi-use-cases/>. Acesso em: 08 jul. 2025.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Scenarios: composing energy futures to 2050**. Londres: WEC, 2013. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Scenarios_Composing-energy-futures-to-2050_Full-report1.pdf. Acesso em: 08 jul. 2025.