


**ENGENHARIA MECÂNICA NA CONSTRUÇÃO DE MÁQUINA-FERRAMENTA
PORTÁTIL PARA USINAR PEÇAS DE ATÉ 1200 MILÍMETROS DE DIÂMETRO**

**MECHANICAL ENGINEERING IN THE CONSTRUCTION OF PORTABLE MACHINE
TOOLS FOR MACHINING PARTS UP TO 1200 MILLIMETERS IN DIAMETER**

**INGENIERÍA MECÁNICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE MÁQUINAS HERRAMIENTA
PORTÁTILES PARA EL MECANIZADO DE PIEZAS DE HASTA 1200 MILÍMETROS DE
DIÁMETRO**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n7-295>

Data de submissão: 23/06/2025

Data de publicação: 23/07/2025

Antonio Lima da Silva Filho

Mestrando em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade de Taubaté

Endereço: São Paulo, Brasil

E-mail: efraimben@yahoo.com.br

Marcello Pereira Benevides

Mestrando em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade de Taubaté

Endereço: São Paulo, Brasil

E-mail: marcello.benevides@sp.senai.br

Evandro Luís Nohara

Doutor em Física e Química de Materiais

Instituição: Universidade de Taubaté

Endereço: São Paulo, Brasil

E-mail: evandro.nohara@unitau.com.br

Roque Antônio de Moura

Doutor em Engenharia Biomédica Instrumentação

Instituição: Fatec São José dos Campos

Endereço: São Paulo, Brasil

E-mail: roque.moura@fatec.sp.gov.br

RESUMO

A engenharia mecânica desempenha um papel fundamental no projeto e construção de uma máquina-ferramenta portátil capaz de usinar peças de 400 até 1200 milímetros de diâmetro. A engenharia e os conceitos da mecânica dos sólidos, cinemática e ciência dos materiais assegura projetar equipamentos que aliam precisão, robustez e mobilidade. Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa é demonstrar que o uso da engenharia mecânica e seus conceitos agiliza com qualidade os ensaios de novos projetos de máquinas com eficiência evitando desgastes e folgas prematuros. A metodologia baseia-se na pesquisas de artigos e outras publicações alusivas ao tema revisados nas últimas décadas em periódicos com estudos científicos. Também se contou com softwares especializados que possibilitaram a criação de modelo tridimensional com visão detalhada da máquina-ferramenta. Como resultado, o uso da engenharia mecânica e seus princípios contribuíram para minimizar erros durante o processo de

conceituação, confecção, construção e montagem da máquina, como também, facilitou parametrizar todo o processo de usinagem. Conclui-se que a engenharia mecânica é uma ferramenta essencial que minimiza falhas e maximiza a taxa de sucesso nos projetos mecânicos além de impactar positivamente, por agilizar, facilitar registros e alterações para projetos robustos de máquinas-ferramentas portáteis, muitas vezes empregando conceitos de modularidade e ergonomia, para usinar peças de grande diâmetros como por exemplo, as flanges (raquetes) que desempenham um papel crucial na segurança, confiabilidade e na intercambiabilidade para assegurar uma perfeita vedação das tubulações da área de petróleo e gás.

Palavras-chave: Engenharia Mecânica. Projetos Mecânicos. Manufatura Subtrativa. Usinagem de Grande Diâmetros.

ABSTRACT

Mechanical engineering plays a fundamental role in the design and construction of a portable machine tool capable of machining parts from 400 to 1200 millimeters in diameter. Engineering and the concepts of solid mechanics, kinematics, and materials science ensure the design of equipment that combines precision, robustness, and mobility. Therefore, the objective of this research is to demonstrate that the use of mechanical engineering streamlines the quality testing of new machine designs efficiently, thus preventing premature wear and backlash. The methodology is based on research into articles and other publications related to the topic, reviewed in recent decades in scientific journals. Specific software was also used to create a three-dimensional model with a detailed view of the machine tool. As a result, the use of mechanical engineering and its principles helped minimize errors during the conceptualization, design, construction, and assembly of the machine, as well as facilitating parameterization of the entire machining process. It can be concluded that mechanical engineering is an essential tool that minimizes failures and maximizes the success rate of mechanical projects. It also has a positive impact by streamlining, facilitating registration, and making changes to robust portable machine tool designs. These designs often employ modularity and ergonomics to machine large-diameter parts such as flanges (rackets), which play a crucial role in the safety, reliability, and interchangeability of oil and gas pipelines, ensuring perfect sealing.

Keywords: Mechanical Engineering. Mechanical Design. Subtractive Manufacturing. Large-Diameter Machining.

RESUMEN

La ingeniería mecánica desempeña un papel fundamental en el diseño y la construcción de una máquina herramienta portátil capaz de mecanizar piezas de 400 a 1200 milímetros de diámetro. La ingeniería y los conceptos de mecánica de sólidos, cinemática y ciencia de los materiales garantizan el diseño de equipos que combinan precisión, robustez y movilidad. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es demostrar que el uso de la ingeniería mecánica optimiza las pruebas de calidad de nuevos diseños de máquinas, previniendo así el desgaste prematuro y el juego. La metodología se basa en la investigación de artículos y otras publicaciones relacionadas con el tema, revisadas en las últimas décadas en revistas científicas. También se utilizó un software específico para crear un modelo tridimensional con una vista detallada de la máquina herramienta. Como resultado, el uso de la ingeniería mecánica y sus principios ayudó a minimizar errores durante la conceptualización, el diseño, la construcción y el montaje de la máquina, además de facilitar la parametrización de todo el proceso de mecanizado. Se puede concluir que la ingeniería mecánica es una herramienta esencial que minimiza los fallos y maximiza la tasa de éxito de los proyectos mecánicos. También tiene un impacto positivo al optimizar, facilitar el registro y realizar cambios en los robustos diseños de máquinas herramienta portátiles. Estos diseños suelen emplear la modularidad y la ergonomía para mecanizar

piezas de gran diámetro, como bridas (raquetas), que desempeñan un papel crucial en la seguridad, la fiabilidad y la intercambiabilidad de oleoductos y gasoductos, garantizando un sellado perfecto.

Palabras clave: Ingeniería Mecánica. Diseño Mecánico. Fabricación Sustractiva. Mecanizado de Gran Diámetro.

1 INTRODUÇÃO

Devido à forte concorrência de mercado de manutenção de peças e estruturas mecânicas, os produtos tornam-se mais complexos para atender as exigências do cliente ou pela entrada de novas tecnologias de fabricação mecânica. O mercado de prestação de serviços tem demandado cada vez mais que as organizações ao conceber, projetar e construir máquinas e equipamentos tenham produtos mais diversificados com nível de serviço e qualidade que satisfaçam as necessidades dos clientes (Nusraningrum, 2019; Park *et al.*, 2024).

Conforme Parrilla *et al.* (2002), nas revoluções industriais novos materiais leves e mais resistentes surgiram, impulsionando assim, o desenvolvimento de ligas de aço e ferro fundido que favoreceram o desenvolvimento de novos equipamentos e máquinas.

A máquina-ferramenta é essencial para a fabricação, como por exemplo, usinar diâmetros superiores aos 800 mm com ferramentas de aço-carbono temperado (McGeough, 1988; Iida; Buarque, 2016; Moura *et al.*, 2019; Antônio *et al.*, 2024) que requerem avanços tecnológicos, robustez e mobilidade para serem transportadas até o local do problema. Quanto a força laboral, frente a modernização das máquinas e equipamentos, há também a necessidade que as organizações busquem por um novo perfil profissional (Moura *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2025; Machado *et al.*, 2015).

Nesse viés, processos para se usinar geometrias e tamanhos não convencionais demandam equipamentos sofisticados e condições especiais, denotando intervenções complexas que acabam elevando os custos operacionais e aumentam consideravelmente o risco potencial de acidentes e danos ambientais, o que quase sempre, são negligenciados (Moura *et al.*, 2021).

Mediante o controle dos custos de manutenção e vanguarda competitiva, o segmento de usinagem na indústria metalmecânica busca por uma manutenção industrial eficiente e eficaz, visto que é necessária e imprescindível para que a organização possa produzir e oferecer produtos com as melhores técnicas, funcionalidade e em prazos apertados (Parrilla *et al.*, 2002).

A manufatura subtrativa torna-se um delineamento de experimentos por envolver diferentes atividades, fatores e níveis que devem encontrar a melhor combinação em *prol* de uma ótima resposta produtiva (Moura *et al.*, 2024). Um dos fatores por exemplo, é atender as características ou requisitos de usinagem no cliente muitas das quais requerem máquinas-ferramentas especiais antiexplosivas para procedimentos não convencionais na prestação de serviço de usinagem *in loco*.

Construir uma máquina ferramenta portátil para usinar peças com diâmetros de até 1200 mm e que possa ser facilmente transportada até o cliente para usinagem em campo é uma inovação, seja pela dificuldade de transportar a peça avariada pelo porte ou por integrar um modal de transporte dutoviário instalado no chão de fábrica.

Quanto ao prazo de atendimento e disponibilidade de peças, atender com um menor tempo de resposta é vanguarda competitiva. Nesse sentido, a portabilidade da máquina-ferramenta que usina peças de até 1200 mm de diâmetro no cliente, torna o atendimento mais rápido.

Para a prestadora de serviço, ao se investir em equipamentos com capacidade avançada e confiabilidade coloca-se a empresa em uma posição vantajosa em relação aos concorrentes, oferecendo serviços de manutenção e usinagem para peças de grande porte em campo.

Outra inovação deste projeto é a intercambialidade da força motriz de elétrico para pneumático, o que definitivamente resolve a restrição que para se atender *in loco* o funcionamento da máquina respeite as normas de segurança, por exemplo, na indústria petróleo e gás, usar máquinas elétricas na maioria das vezes não é permitido devido à operação em ambiente inflamável (Moura *et al.*, 2021).

2 REVISÃO DA LITERATURA

No ambiente da manutenção e recuperação de peças com diâmetros menores, a usinagem geralmente ocorre nas instalações do cliente. Na indústria petrolífera, química e agrícola com peças de grande porte e diversos tipos de operações, a dificuldade de usinar em campo torna-se mais desafiadora. O torneamento envolvendo recuperação de tubulações, flanges e superfícies cilíndricas internas e externas com diâmetros de grande porte deve ser prevista em projeto (PMKB, 2017).

Usinar em campo é muito requerido e representa uma fonte de menor custo de manutenção para o cliente e agilidade no reparo sem precisar envolver o transporte até a oficina, o que geralmente é oneroso. Nesse sentido a manutenção pode ser facilitada ao se adotar indicadores de tempo médio de reparo (MTTR) considerando a usinagem em campo, ou seja, quanto menor for o tempo de reparo, mais disponível o equipamento estará (Moura; Moura, 2019; Basit *et al.*, 2024).

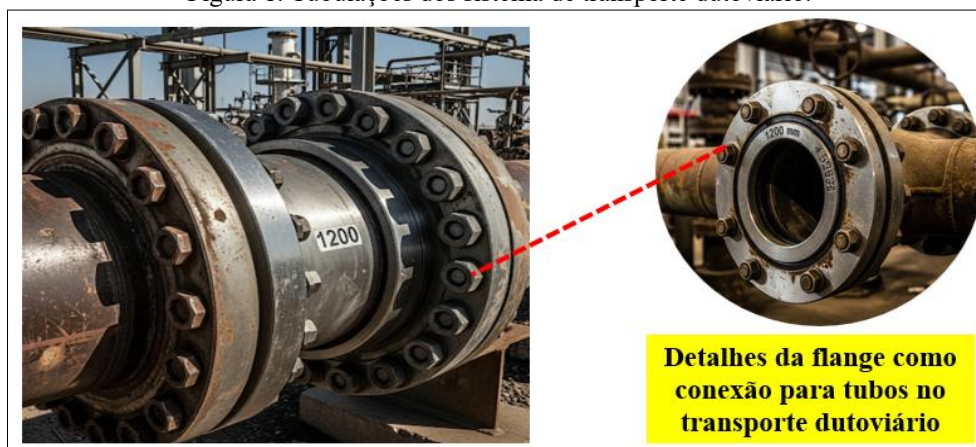
Uma máquina-ferramenta pode ser desenvolvida por meio de novas tecnologias e ferramentas de corte que visam facilitar o trabalho diminuindo o MTTR. Por exemplo, o mandrilhamento em campo realizado em um equipamento específico para a usinagem de superfícies planas. Manter as peças com diâmetros maiores fixas na máquina-ferramenta enquanto a ferramenta de corte se movimentava (Machado *et al.*, 2015).

Segundo Rao (2008) para se eliminar o desbalanceamento que causa vibrações em uma máquina-ferramenta, este projeto prevê uma estrutura robusta e uso não convencional de arruelas de alumínio em substituição as arruelas de aço e coxins com acuracidade no tipo de metal trabalhando com a ferramenta de corte em baixa velocidade de usinagem. Em muitas aplicações, a força gerada pelo desbalanceamento é insignificante se comparada às forças de corte, por outro lado em altas

velocidades o desbalanceamento pode causar vibrações excessivas que influenciam na qualidade da usinagem (Inman, 2018; Kelly, 2017).

Segundo Totis *et al.* (2024), um projeto deve buscar sanar a carência de máquinas-ferramentas portáteis estimando a força de corte, ou seja, precisam ser simultaneamente robustas, precisas e versáteis para realizar usinagens complexas em peças de grandes diâmetros e geometrias não convencionais, diretamente no local de instalação do equipamento, como é o caso das flanges para tubulações das empresas de petróleo-gás que utilizam o transporte dutoviário conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Tubulações dos sistema de transporte dutoviário.

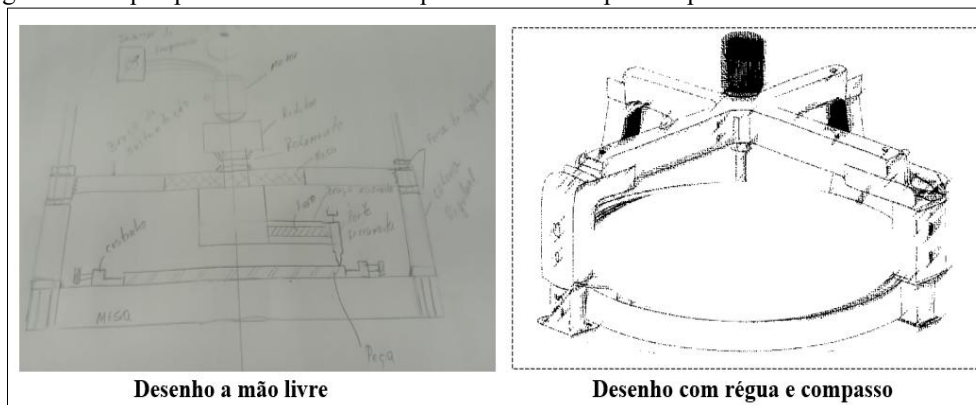


Fonte: Autores (2025).

A máquina-ferramenta de campo deve realizar operações de usinagem em superfície interna, externa, extremidades de eixos e tubos fixos não rotativos, equipadas com um sistema simples e útil como é a proposta desta projeto (Sir Meccanica, 2016).

Niemann (2002) ensina que a maioria dos erros no projeto ocorre porque não se conhece o processo e o problema nele inserido. Norton (2013) sugere traçar e verificar usando croquis, cálculos e ensaios computacionais conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2. Croquis para desenvolver a máquina-ferramenta portátil para diâmetro de até 1200 mm.



Fonte: Autores (2025).

Segundo Parrilla *et al.* (2002), a indústria moderna, em sua contínua busca por eficiência e produtividade depara-se com a necessidade de operar equipamentos de grande porte e alta complexidade. A manutenção desses ativos é crucial para garantir a continuidade operacional e a segurança dos processos (Bott *et al.*, 2024).

Flanges de 1200 mm são amplamente utilizadas no sistema dutoviário para transporte de fluidos sólidos, líquidos e gasosos, como por exemplo, oleodutos, gasodutos e plataformas onde a robustez e a capacidade de suportar altas pressões são essenciais. A sua manutenção requer inspeção visual e medições das superfícies de contato conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3. Inspeção visual e por medição das flanges.



Fonte: Autores (2025).

Uma flange de 1200 mm é um componente crítico em sistemas de tubulação de grande diâmetro, especialmente em setores como petróleo e gás, saneamento e indústria química (Fischer *et al.*, 2011).

As flanges ou raquetes são projetadas para suportar altas pressões e volumes de fluxo, garantindo a integridade e a estanqueidade das conexões (Chiaverini, 1987b; Almeida, 2015).

Comumente fabricadas em aço carbono (ASTM A-36), ferro fundido dúctil (GGG 40) ou até mesmo materiais compósitos para aplicações específicas, como por exemplo, vedadores de *nylon*. A escolha do material depende da pressão, temperatura, tipo de fluido e ambiente de operação (Chiaverini, 1987b).

Segundo Ferraresi (1977) dependendo da classe de pressão a usinagem ou reparo é mais crítico para atender os limites de rugosidade, vedação e estanqueidade que a tubulação suportará. Há diferentes tipos, de flanges como as que fecham a extremidade de uma tubulação (cegas), flanges soltas que facilitam o alinhamento, flanges de junta de colo entre outras, mas, cada qual com sua aplicação e requisitos normatizados por padrões específicos.

2.1 AÇO SAE 1045 PARA BASE ESTRUTURAL DO TORNO

O aço SAE 1045 é uma escolha comum para bases estruturais de tornos devido às suas boas propriedades mecânicas e custo-benefício. O Quadro 2 mostra como se comporta em relação à rigidez, vibração e qualidade de acabamento final (Ferraresi, 1977).

Quadro 1. Comportamento do Aço SAE 1045: rigidez, vibração e qualidade de acabamento final.

Comportamento	Propriedade mecânica e estrutural do aço SAE 1045
Rigidez	Aço carbono de médio teor com alta resistência à tração e limite de escoamento. Sua rigidez e módulo de elasticidade (200 GPa) é ideal para base do torno pela precisão dimensional e resistência à deformação sob carga (Chiaverini, 1986).
Vibração	Possibilita estabilidade e maior vida útil das ferramentas. Possui boa tenacidade e resistência ao impacto. Para melhorar sua capacidade de reter as vibrações é necessário um projeto mais robusto e apoios antivibratórios (Rao, 2008).
Qualidade (durável, estética e funcionalidade)	Boa usinabilidade, soldabilidade e acabamento. Possibilita construir estruturas complexas por soldagem. Resistente ao desgaste. Pode ser tratado termicamente por têmpera e revenido para aumentar a dureza superficial em áreas críticas (Chiaverini, 1987a; Budynas; Nisbett, 2016).

Fonte: Autores (2025).

2.2 FLANGES FABRICADAS EM AÇO ASTM A36 E EM FERRO FUNDIDO DÚCTIL GGG 40

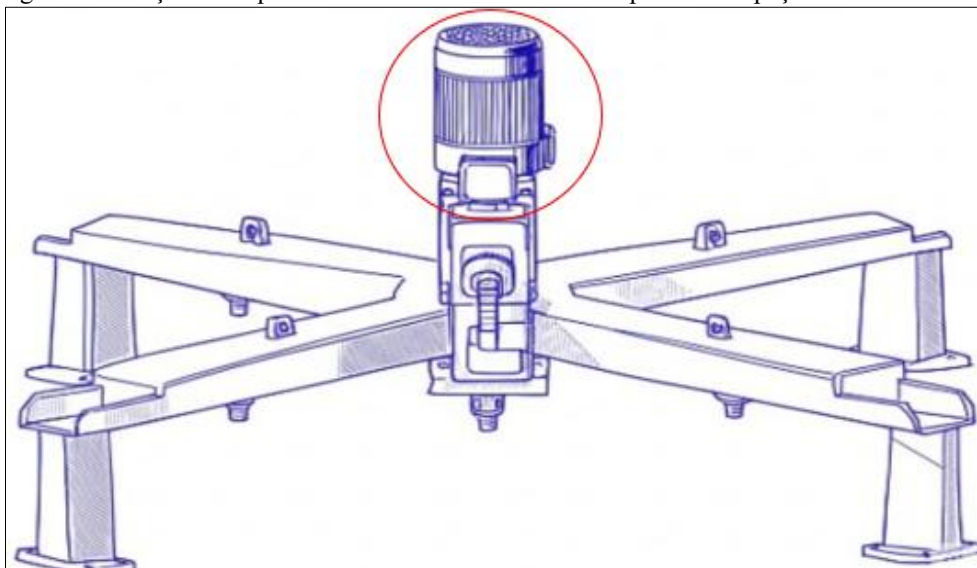
O metal ASTM A36 é um aço carbono com propriedades adequadas para aplicações estruturais e de média pressão, sendo comum em sistemas de água, ar comprimido e redes industriais em geral. Sua composição química possibilita conformação a quente e a frio, o que facilita a fabricação de flanges com diferentes padrões assegurando precisão dimensional e compatibilidade com diversos equipamentos. As flanges fabricadas em aço ASTM A36 são amplamente utilizadas em sistemas de tubulações industriais devido à sua boa soldabilidade, resistência mecânica e custo acessível (Chiaverini, 1986).

O ferro fundido dúctil GGG 40 tem características distintas, com destaque para sua excelente resistência ao impacto, à fadiga e à corrosão, além de boa absorção de vibrações. Conhecido também

conhecido como ferro de estrutura nodular, é composto por grafita esferoidal em sua estrutura, o que confere maior ductilidade em relação ao ferro cinzento. Flanges em GGG 40 são frequentemente empregados em sistemas de saneamento, adutoras e redes de esgoto pressurizado, onde se requer alta durabilidade e confiabilidade estrutural. Comparado ao aço ASTM A36, o GGG 40 é mais resistente à corrosão em ambientes úmidos, porém menos indicado para aplicações com solicitações de soldagem (Chiaverini, 1986).

O projeto prevê um único motor elétrico central de 2 CV acoplado em um redutor com velocidade variável de 5 a 25 RPM regulado por inversor de frequência que gera um torque de até 130 Kgf.m. conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4. Esboço da máquina-ferramenta com único motor para usinar peças de até 1200 mm.



Fonte: Autores (2025).

Outra inovação do projeto é que dependendo do risco e necessidade do ambiente no campo, o motor elétrico pode ser substituído por um motor pneumático, regulado por uma válvula de fluxo sem qualquer perda ou prejuízo no rendimento da máquina-ferramenta em sua operação de acabamento. O desenvolvimento da máquina-ferramenta portátil para usinar peças específicas e não convencionais com diâmetros de até 1200 mm e geometrias complexas representa uma contribuição significativa para o campo da manutenção industrial e projeto de máquinas (Ferraresi, 1977).

A concepção deste projeto e construção da máquina-ferramenta surgiu da identificação de uma lacuna crítica no mercado, ou seja, a dificuldade de realizar reparos de usinagem *in loco* em componentes de grande porte e enorme diâmetros, que são logisticamente inviáveis ou excessivamente custosos para serem transportados para oficinas convencionais. Os testes práticos e protótipo são

fundamentais para validar o desempenho real e acessibilidade à máquina (Silva *et al.*, 2024; Benevides *et al.*, 2024; Silva, 2023).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada conta com desenvolvimento e execução do trabalho, utilizando a experimentação para a validação da hipótese proposta. Foram pesquisados artigos e outras publicações alusivas ao tema revisados nas últimas décadas em periódicos com estudos científicos. Também se contou-se com *softwares* específicos que possibilitaram a criação de modelo tridimensional com visão detalhada da máquina-ferramenta, sendo todo o projeto da máquina-ferramenta desenvolvido virtualmente utilizando *software SolidWorks*.

3.1 LISTA DE PEÇAS E COMPONENTES

- Motor 2 CV;
- Inversor;
- Motorreductor;
- 4 Rolamentos cônicos;
- Mesa em aço;
- 04 braços de sustentação em aço 1045;
- 04 colunas de sustentação e regulagem em aço 1045;
- 02 guias lineares com 4 sapatas;
- Porta-ferramenta com inserto intercambiável;
- Fuso (porca de regulagem);
- 04 Castanhas em aço 1045;
- 80 Arruelas de alumínio de 3 mm;
- 133 Porcas diversas (M4, M8, M12, M16);
- 133 Parafusos diversos (M4, M8, M12, M16);
- Cabos e fiação elétrica;
- Conduite em PVC;
- Solda MIG/MAG com arame tubular 1,2 mm.

3.2 IMPORTÂNCIA DA FLANGE NO SISTEMA DE TRANSPORTE DUTOVIÁRIO

Segundo Cardoso (2004), o transporte dutoviário é um dos métodos mais eficientes e seguros para movimentar grandes volumes de petróleo, gás natural e seus derivados por longas distâncias. Como uma espinha dorsal da infraestrutura energética global possui suas particularidades que requerem planejamento e gestão de manutenção contínua, conforme Quadro 2.

Quadro 2. Particularidades do sistema de transporte dutoviário.

Transporte Dutoviário	Premissas e cuidados
Capacidade e Eficiência	Transportam alto volume de fluidos continuamente, superando a capacidade de outros modais em termos de fluxo constante.
Segurança como modal de transporte	Estatisticamente considerado meio de transporte de petróleo e gás seguro, com menor incidência de acidentes e derramamentos por falhas humanas.
Baixo Custo Operacional	Custos operacionais baixos, pois não requerem mão de obra (motoristas) e manutenção menos onerosa por desgastar menos que veículos.
Confiabilidade e Consistência	Operam 24 horas por dia, 7 dias por semana, independentemente das condições climáticas, garantindo um fornecimento contínuo e estável.
Impacto na Pegada de Carbono	A pegada de carbono por tonelada-quilômetro transportada é menor que outros modais que emitem gases efeito estufa
Baixo risco de roubo e adulterações	Sistemas fechados e subterrâneos são menos vulneráveis a roubos e adulterações de carga em comparação com o modal rodoviário.
Manutenção tecnológica	A inspeção e manutenção de dutos, especialmente os subterrâneos ou submarinos, usam tecnologias avançadas (ROVs, drones e especialistas).
Manutenção e reparos (Usinagem)	Montagem e desmontagem fácil da tubulação, facilitando inspeções, reparos e substituições. Recomendável reparação em campo.
Padronização e conformidade	A fabricação conforme normas internacionais garante a qualidade, a intercambialidade e a segurança do produto.

Fonte: Autores (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INOVAÇÃO TECNOLÓGICA POSITIVA NA PRESTAÇÃO DE SERVIÇO EM CAMPO

Identificou-se um *gap* tecnológico e de mercado para o desenvolvimento de uma máquina-ferramenta portátil nacional com capacidade para usinagem de diâmetros de até 1200 mm com robustez e precisão sob as condições de campo, ou seja, no cliente.

Este projeto alcançou uma solução oferecendo uma máquina-ferramenta com usinagem versátil para auxiliar na manutenção de flanges em campo conforme são mostradas no Quadro 3.

Quadro 3. Operação ou atividade de manutenção corretiva das flanges.

Operação ou atividade de manutenção corretiva das flanges	Antes	Atual
Facilidade de transporte para usinar <i>in loco</i> da peça danificada/desgastada	Não	Sim
Usinagem convencional de 400 a 1200 mm	Não	Sim
Usinagem de geometrias complexas em campo (no cliente)	Não	Sim
Reduzir MTTR por realizar a usinagem no cliente	Não	Sim
Eliminação de custos de transporte e logística para o cliente	Não	Sim
Menor necessidade de estoque de peças sobressalentes de grande porte	Não	Sim
Aumento da capacidade competitiva da empresa prestadora de serviço	Não	Sim
Maior margem de lucro pela flexibilidade e adaptação no serviço	Não	Sim
Desenvolvimento livre e nacional da Engenharia (zero importação)	Não	Sim

Fonte: Autores (2025).

Quanto a facilidade de transportar a máquina-ferramenta até o cliente para usinar peças em campo a mesma foi projetada sob uma estrutura modular rígida e precisa. Atende menores custos operacionais e prazos de entrega contribuindo para que o indicador tempo médio de reparo seja rápido.

A eliminação do custos de transporte, movimentação e armazenagem logística podem ser revertidos em nível de serviço e lucro para a empresa prestadora de serviço de manutenção.

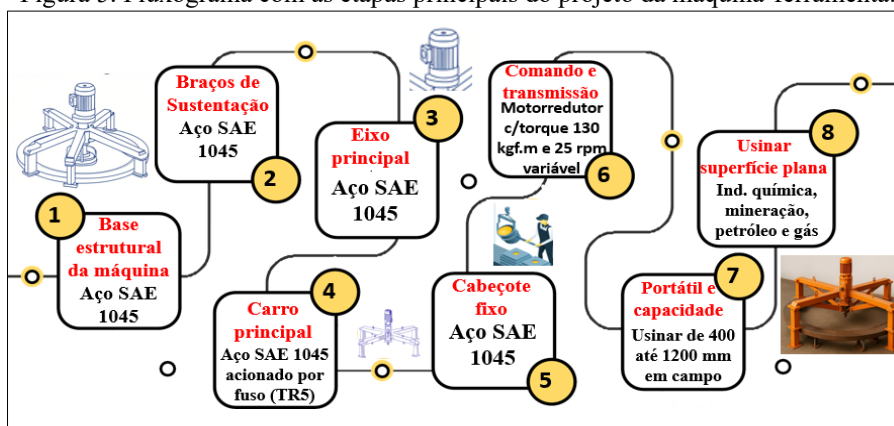
Pela flexibilidade e adaptação, a máquina-ferramenta projetada e construída nacionalmente, com conhecimento técnico local, pode ser mais facilmente adaptada ou modificada para atender a necessidades futuras ou requisitos específicos de diferentes clientes, em comparação com as importadas.

Para empresas prestadoras do serviço de manutenção, possuir uma máquina-ferramenta portátil com capacidade de mobilidade e usinar enormes diâmetros representa um diferencial competitivo significativo, possibilitando atender a um nicho de mercado com alta demanda por soluções especializadas e ágeis e, portanto, potencial de novos negócios e oportunidades com clientes que possuem equipamentos de grande porte e diâmetro.

4.2 FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PRINCIPAIS DO PROJETO

Um fluxograma esquemático detalha o processo de construção de uma máquina-ferramenta portátil, focado na manutenção e usinagem de flanges metálicas em campo, especificamente para a indústria de petróleo e gás, mineração, agrícola, papel e celulose e química conforme Figura 5.

Figura 5. Fluxograma com as etapas principais do projeto da máquina-ferramenta.



Fonte: Autores (2025).

O fluxograma ilustra a engenharia mecânica por trás de uma máquina-ferramenta capacitada e especializada para reparos e ajustes de precisão em flanges de diâmetro de até 1200 mm com serviço de usinagem diretamente no local da operação, ou seja, em campo.

4.3 VANTAGENS COMPETITIVAS PARA A EMPRESA DE MANUTENÇÃO E USINAGEM

- Concepção, desenvolvimento e operacionalização de uma máquina-ferramenta portátil para prestação de serviço de usinagem com capacidade de atender diâmetros de até (hum mil e duzentos) 1.200 milímetros executada *in loco* no cliente (em campo);
- Máquina-ferramenta construída com material e recurso nacional com fácil desmontagem, mobilidade, montagem e reposição de peças;
- Vanguarda competitiva ao possibilitar o intercâmbio do motor elétrico por um motor pneumático tornando a máquina-ferramenta adequada às normas de segurança vigentes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo traçado para este projeto foi substancialmente alcançado, ou seja, aplicar os conceitos de engenharia mecânica na construção de uma máquina-ferramenta portátil para usinar peças de até 1200 mm de diâmetro. O planejamento e o projeto da máquina-ferramenta foram conduzidos com base em princípios de engenharia robustos.

A seleção criteriosa de materiais para a estrutura da máquina juntamente com o dimensionamento preciso do sistema de acionamento (motorreductor), foram essenciais para assegurar a capacidade de usinagem, portabilidade e a confiabilidade operacional.

Este projeto explorou alternativas para a nacionalização de componentes, um aspecto relevante para a autonomia tecnológica e para a redução de custos e menor dependência de importações.

Outra inovação do projeto foi que dependendo do risco e necessidade do ambiente em campo, o motor elétrico pode ser substituído por um motor pneumático, regulado por uma válvula de fluxo sem qualquer perda ou prejuízo no rendimento da máquina em sua operação de acabamento final.

Partindo do princípio de não gerar vibração excessiva, a construção da máquina-ferramenta portátil de usinagem para diâmetros de até 1200 mm manterá a peça fixa e a ferramenta deslizará usinando e reparando todo o diâmetro da peça avariada.

Do ponto de vista acadêmico e profissional, este trabalho consolida conhecimentos multidisciplinares, integrando mecânica dos sólidos, processos de usinagem, projeto de máquinas, automação e análise de custos.

A metodologia empregada, desde a revisão bibliométrica até a construção oferece um *roadmap* que pode ser adaptado para o desenvolvimento de outras máquinas e equipamentos especiais.

Sugere-se para trabalhos futuros, aprofundar os estudos de otimização da estrutura visando a redução de peso e o aumento da portabilidade sem sacrificar a rigidez.

Conclui-se que o desenvolvimento desta máquina-ferramenta portátil não apenas soluciona um problema prático real da indústria, mas também fomenta a inovação, desenvolvimento tecnológico nacional e construção de equipamentos modernos e portáteis para peças de grande porte visando uma manutenção industrial avançada *in loco*.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. S. D. Processos de usinagem: utilização e aplicações das principais máquinas operatrizes. São Paulo: Saraiva, 2015.
- ANTÔNIO, M. R.; REGINA, O. M.; GOUSSAIN, B. G. C. S.; SILVA, M. B. Neuroergonomics approach in the workplace aiming to standardize movements and increase workers' sense of well-being. CLM, [S. l.], v. 24, n. 10, p. 472-482, 2024. DOI: 10.53660/CLM-3313-24H27.
- BASIT, A.; KHAN, N. B.; ALI, S.; MUHAMMAD, R.; ABDUVALIEVA, D.; KHAN, M. I.; JAMEEL, M. Chatter detection and suppression in machining processes: a comprehensive analysis. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, [S. l.], v. 18, n. 6, p. 3751-3771, 2024. DOI: 10.1007/s12008-023-01716-8.
- BENEVIDES, M. P.; XAVIER, K. R. S. L. et al. Sign talk assistive technology: real-time recognition of the libras typical alphabet using artificial intelligence. RGSA, [S. l.], v. 18, n. 12, p. e010610, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n12-214.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. Elementos de máquinas de Shigley. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- BOTT, A.; ANDERLIK, S.; STRÖBEL, R.; FLEISCHER, J.; WORTHMANN, A. Framework for holistic online optimization of milling machine conditions to enhance machine efficiency and sustainability. Machines, [S. l.], v. 12, n. 3, art. 153, 2024. DOI: 10.3390/machines12030153.
- CARDOSO, L. C. S. Logística do petróleo: transporte e armazenamento. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.
- CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica: estrutura e propriedades das ligas metálicas. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. v. 1.
- CHIAVERINI, V. Processos de fabricação e tratamento. 2. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1987a. v. 2.
- CHIAVERINI, V. Materiais de construção mecânica. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1987b. v. 3.
- COSTA, J. C. L.; SANTOS, D. F. A.; OLIVEIRA, M. R.; MOURA, R. A. Aprendizagem com solução de problemas reais para aprimoramento discente na injunção socioprofissional. CLCS, [S. l.], v. 18, n. 2, p. e15288, 2025. DOI: 10.55905/revconv.18n.2-100.
- FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. v. 1.
- FISCHER, U.; GOMERINGER, R.; HEINZLER, M.; KILGUS, R.; NÄHER, F.; OESTERLE, S.; PAETZOLD, H.; STEPHAN, A. Manual de tecnologia metal mecânica. Tradução de Helga Madjderey. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2011.
- IIDA, I.; BUARQUE, L. Ergonomia: projeto e produção. 3. ed. São Paulo: Blücher, 2016.
- INMAN, D. Vibrações mecânicas. São Paulo: GEN LTC, 2018.

KELLY, S. G. Vibrações mecânicas: teoria e aplicações. São Paulo: Cengage Learning, 2017.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos materiais. 3. ed. São Paulo: Blücher, 2015.

MCGEOUGH, J. A. Métodos avançados de usinagem. New York: Chapman e Hall, 1988.

MOURA, J. L.; MOURA, R. A. Interação humano-máquina no sistema produtivo da indústria 4.0 visando aumentar a produtividade e reduzir lesões por esforços repetitivos. Fatec de São José dos Campos, [S. l.], v. 1, n. 6, p. 213-227, 2019. DOI: 10.37619/issn2447-5378.v1i6.213.

MOURA, R. A.; SANTOS, D. F. A.; GOUSSAIN, B. G. S.; OLIVEIRA, M. R.; SILVA, M. B. Design of Experiments (DoE) for non-specialists in statistics in the food industry: trials with popcorn. RGSA, [S. l.], v. 18, n. 10, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n10-229.

MOURA, R.; MARQUES, D.; COSTA, J.; SILVA, M. A urbanidade da higiene ocupacional na era digital e social da antecipação e prevenção. Sodebras, [S. l.], v. 16, n. 184, p. 29-33, 2021. DOI: 10.29367/issn.1809-3957.16.2021.184.29.

MOURA, R.; RICHETTO, M.; LUCHE, D.; TOZI, L.; SILVA, M. New professional competencies and skills leaning towards Industry 4.0. In: 14th International Conference on Computer Supported Education, [S. l.], v. 2, p. 622-630, 2022. DOI: 10.5220/0011047300003182.

NIEMANN, G. Elementos de máquinas. São Paulo: Blücher, 2002. v. 2.

NORTON, R. L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NUSRANINGRUM, D. Eficácia geral dos equipamentos (OEE). [S. l.]: Lambert Academic Publishing, 2019.

PARK, I.-H.; YOON, J. S.; SOHN, J. H.; LEE, D. Y. Platform supporting intelligent human-machine interface (HMI) applications for smart machine tools. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, [S. l.], v. 25, n. 5, p. 1073-1086, 2024. DOI: 10.1007/s12541-024-00960-6.

PARRILLA, F. R.; OLIVEIRA, J. S.; DOVICO, E. Manutenção: gestão compartilhada com a produção, uma experiência de sucesso na Votorantim Celulose e Papel. O Papel, São Paulo, v. 2, p. 90-100, 2002.

PMKB. Tipos de manutenção. Project Manager Knowledge Base, [S. l.], 2017. Disponível em: <https://pmkb.com.br/artigos/tipos-de-manutencoes-manutencao-corretiva-programada/>. Acesso em: 12 mar. 2021.

RAO, S. Vibrações mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2008.

SILVA, E. A.; CAMARGO, A. A.; SILVA, M. B.; MOURA, R. A. Neuroergonomía y tecnologías inmersivas para lograr un envejecimiento saludable sin dolor y además ortesis. Revista Exatas, [S. l.], v. 30, n. 2, 2024. DOI: 10.69609/1516-2893.2024.v30.n2.a3916.

SILVA, J. Flexibilidade na usinagem de grandes componentes: tendências e desafios. Anais do Congresso Nacional de Manufatura Avançada, [S. l.], v. 10, p. 45-52, 2023.

SIR MECCANICA. Catálogo de produtos/informação técnica sobre mandriladoras portátil de campo. [S. l.]: Sir Meccanica, 2016. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/sir-meccanica-spa/product-40443-397072.html>. Acesso em: 21 jun. 2025.

TOTIS, G.; BORTOLUZZI, D.; SORTINO, M. Development of a universal, machine tool independent dynamometer for accurate cutting force estimation in milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, [S. l.], v. 198, art. 104151, 2024. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2024.104151.