

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GUSTAVO HENRIQUE DIAS ALVES

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE SOLDAGEM POR ATRITO

Ilha Solteira - SP

2025

Gustavo Henrique Dias Alves

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE SOLDAGEM POR ATRITO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para conclusão de curso em Bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A474p Alves, Gustavo Henrique Dias.
Projeto e construção de uma máquina de soldagem por atrito / Gustavo Henrique Dias Alves. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
67 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: José Gedael Fagundes Júnior

Inclui bibliografia

1. Soldagem por atrito. 2. Torno mecânico. 3. Adaptação de máquinas.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "Júlio de Mesquita Filho"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ATA DA DEFESA TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**TÍTULO: PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE SOLDAGEM POR
ATRITO A PARTIR DA ADAPTAÇÃO DE UM TORNO**

ALUNO: GUSTAVO HENRIQUE DIAS ALVES

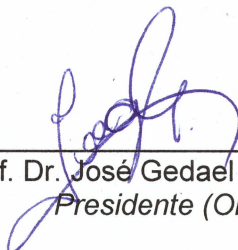
RA: 171052889

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSÉ GEDAEI FAGUNDES JÚNIOR

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota: 9,5


Comissão Examinadora:



Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior
Presidente (Orientador)



MsC. Letícia Karolayne Moreira Firmo
Membro da Banca



Engenheiro Bruno Alves de Andrade
Membro da Banca

Ilha Solteira, 05 de dezembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desse trabalho representa a superação diária que foi necessária para este momento, de modo que nada seria possível alcançar sem o apoio e esforço de pessoas que terão para sempre meu agradecimento.

Inicialmente eu agradeço a Cristo, foi quem eu recorri nos momentos de maiores aflições, me deu forças, saúde e principalmente determinação para buscar meus objetivos.

Agradeço aos meus pais: Silvio Antônio Alves e Viviane da Silva Dias Alves por todo apoio, amor, orações e principalmente por sempre acreditarem em mim, obrigado pelo amor incondicional. A minha irmã Mariana Dias Alves por todo carinho e cumplicidade, e toda minha família que sempre me apoiou e acreditou que tudo fosse possível.

Agradeço a minha namorada Ana Cecilia por me incentivar diariamente a me tornar melhor, por todo amor, carinho e apoio, foram muito importantes.

Agradecimento especial ao meu orientador, Gedael Fagundes, que não mediu esforços para contribuir com esse trabalho, sempre presente e dedicado a fazer acontecer.

Agradeço ao docente Vicente Afonso Ventrella que emprestou o torno de bancada, uma herança familiar que possibilitou esse trabalho. Aos técnicos da oficina, em especial Bruno Alves de Andrade e Diego de Alcântara meus agradecimentos pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a diversos colegas de curso que me apoiaram nessa jornada, contribuindo com aprendizados que foram de extrema importância para meu crescimento acadêmico.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma máquina de soldagem por atrito construída a partir da adaptação de um torno mecânico Myford ML7. A soldagem por atrito é um processo de união no estado sólido que utiliza o calor gerado pelo contato entre duas superfícies em movimento rotativo, dispensando a fusão do material e reduzindo a ocorrência de defeitos comuns em processos convencionais. Para viabilizar a adaptação, foi realizado um estudo teórico sobre o funcionamento do processo e seus principais parâmetros. Em seguida, o torno passou por modificações estruturais, além da construção de um sistema manual de aplicação de carga axial, equipado com célula de carga e aquisição de dados para acompanhar a força durante a soldagem. Após a montagem, foram feitas calibrações e posteriormente, testes experimentais em diferentes condições operacionais. As soldas produzidas foram avaliadas visualmente e submetidas a ensaios de tração, possibilitando analisar o comportamento mecânico das juntas. Os resultados mostraram que a máquina adaptada foi capaz de executar o processo de forma estável, repetitiva e com qualidade compatível ao esperado para estudos acadêmicos. Assim, o equipamento desenvolvido se apresenta como uma alternativa acessível e funcional para pesquisas, experimentação e uso didático relacionado à soldagem por atrito.

Palavras-chave: Soldagem por atrito. Torno mecânico. Adaptação de máquinas.

ABSTRACT

This work presents the development of a friction welding machine built from the adaptation of a conventional Myford ML7 lathe. Friction welding is a solid-state joining process in which heat is generated by the contact of two surfaces in relative motion under axial pressure, eliminating the need for material fusion and reducing defects commonly found in fusion-based welding processes. To make the adaptation feasible, a theoretical study was first carried out on the principles of the process and the main parameters involved. The lathe was then modified, and a manual axial loading system was constructed, including a load cell and data acquisition to monitor the force during welding. After assembly, the equipment was calibrated and experimental tests were performed under different operating conditions. The welded samples were visually examined and subjected to tensile tests to evaluate the mechanical behavior of the joints. The results showed that the adapted machine was capable of performing the process with stable and repeatable behavior, producing joints with mechanical quality appropriate for academic studies. Therefore, the developed equipment is presented as an accessible and functional alternative for research, experimentation, and educational purposes related to friction welding.

Keywords: Friction welding. Lathe adaptation. Machine adaptation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da soldagem por fricção convencional rotacional de topo	18
Figura 2 – Variação dos parâmetros de soldagem com o tempo	18
Figura 3 – Regiões de ZTA de soldagem por fricção rotativa	19
Figura 4 – Etapas da soldagem por fricção inercial	20
Figura 5 – Etapas da soldagem por fricção convencional	21
Figura 6 – Aplicações da soldagem por fricção	31
Figura 7 – Desenho do torno Myford ML7	32
Figura 8 – Equipamento desmontado	34
Figura 9 – Processo de desmontagem e manutenção	40
Figura 10 – Base da bancada limpa e lubrificada	40
Figura 11 – Placa motor WEG	41
Figura 12 – Usinagem do furo para o diâmetro do eixo	41
Figura 13 – Disjuntor de ligação da máquina	42
Figura 14 – Testes iniciais de soldagem	42
Figura 15 – Desmontagem do cilindro e furo da passagem de óleo.....	43
Figura 16 – Sistema de travamento no trilho	43
Figura 17 – Sistema de aplicação de força hidráulico	44
Figura 18 – Projeto do sistema de aplicação de carga	44
Figura 19 – Sistema de aplicação de carga montado	45
Figura 20 – Sistema de aplicação de carga e aquisição de dados	45
Figura 21 – Máquina de soldagem por atrito	46
Figura 22 – Software durante o ensaio plano 5	47
Figura 23 – Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 1	48
Figura 24 – Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 2	49
Figura 25 – Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 3	49
Figura 26 – Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 4	50
Figura 27 – Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 5	50
Figura 28 – Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 1	51
Figura 29 – Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 2	51
Figura 30 – Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 3	52

Figura 31 – Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 4	52
Figura 32 – Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 5	53
Figura 33 – Etapas da soldagem por atrito	55
Figura 34 – Corpos de prova soldados de ponta cônico 1	56
Figura 35 – Corpos de prova soldados de ponta cônica 2	56
Figura 36 – Corpos de prova soldados de ponta cônica 3	56
Figura 37 – Corpos de prova soldados de ponta cônica 4	56
Figura 38 – Corpos de prova soldados de ponta cônica 5	56
Figura 39 – Corpos de prova soldados de ponta plana 1	57
Figura 40 – Corpos de prova soldados de ponta plana 2	57
Figura 41 – Corpos de prova soldados de ponta plana 3	57
Figura 42 – Corpos de prova soldados de ponta plana 4	57
Figura 43 – Corpos de prova soldados de ponta plana 5	57
Figura 44 – Curvas dos ensaios cônicos.....	59
Figura 45 – Curvas dos ensaios planos	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Síntese das especificações.....	34
Tabela 2	- Faixas típicas de parâmetros para soldagem por fricção rotativa.....	38
Tabela 3	- Diferença de comprimento.....	58
Tabela 4	- Valores médios extraídos dos ensaios cônicos.....	59
Tabela 5	- Valores médios extraídos dos ensaios planos.....	60
Tabela 6	- Resultados dos ensaios de tração.....	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Processo de soldagem por fricção	15
2.1.1 Histórico breve	15
2.1.2 Etapas do processo de soldagem por fricção rotativa.....	17
2.1.3 Variantes do processo.....	19
2.2 Fundamentos da soldagem por atrito	22
2.2.1 Velocidade de rotação	23
2.2.2 Força de fricção e força de forjamento.....	23
2.2.3 Tempo de fricção e tempo de forjamento.....	24
2.2.4 Deslocamento axial e geometria de contato	26
2.2.5 Temperatura de interface, geração de calor e monitoramento.....	27
2.2.6 Vantagens, limitações e aplicações do processo	28
2.3 Características construtivas e especificações técnicas do Myford ML7	31
2.4 Sistemas de aplicação de carga e aquisição de dados	35
2.4.1 Sistemas de aplicação de força.....	35
2.4.2 Instrumentação e medição de força	35
2.4.3 Sistemas de aquisição de dados.....	36
3 METODOLOGIA	37
3.1 Estudo do Processo e Levantamento de Parâmetros	37
3.2 Materiais e Equipamentos	38
3.2.1 Materiais e equipamentos principais	38
3.2.2 Materiais soldados.....	39
3.3 Processo de manutenção e adaptação do Torno	39
3.3.1 Etapas iniciais.....	39
3.3.2 Instalação do motor	41
3.3.3 Testes Iniciais.....	42
3.3.4 Projeto do sistema de aplicação de carga	43
3.3.5 Desenvolvimento do sistema manual de compressão	44
3.3.6 Montagem da bancada.....	45
3.4 Execução dos Ensaios de Soldagem	46
4.1 Comportamento operacional da máquina	47

4.2 Comportamento dos ensaios	48
4.3 Aspectos visuais	54
4.4 Análise visual dos corpos de prova	55
4.5 Parâmetros obtidos	58
4.6 Ensaios mecânicos de tração	60
4.7 Análise comparativa entre geometrias	61
4.8 Avaliação geral do sistema de soldagem	62
4.9 Discussão técnica dos resultados	62
5 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A soldagem por atrito é um processo de união em estado sólido que utiliza o calor gerado pelo atrito entre duas superfícies em movimento relativo, sob pressão, para promover a ligação metalúrgica entre os materiais. Diferentemente dos processos convencionais de soldagem a arco, a soldagem por atrito não requer a fusão das peças, dispensando o uso de material de adição, gases de proteção e fundentes. Essa característica reduz significativamente a ocorrência de defeitos como porosidades, trincas e distorções térmicas, resultando em juntas de elevada qualidade e bom acabamento superficial (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013).

O processo tem se mostrado uma alternativa eficaz para a união de materiais semelhantes ou dissimilares, sendo amplamente empregado em setores como o automotivo, aeroespacial e de manufatura avançada (AKINLABI; MAHAMOOD, 2020). Contudo, as máquinas industriais dedicadas à soldagem por atrito possuem custo elevado e construção complexa, o que limita sua utilização em ambiente acadêmico e em projetos experimentais de baixo custo (ANDRADE, 2011).

Diante desse cenário, este trabalho propõe o projeto e a construção de uma máquina de soldagem por atrito a partir da adaptação de um torno Myford ML7, originalmente destinado a operações de usinagem. O equipamento foi modificado estruturalmente e funcionalmente para possibilitar o processo de soldagem, com ajustes no sistema de transmissão, usinagem de novas polias, revisão do motor e reposicionamento de componentes, garantindo o funcionamento seguro e adequado ao processo proposto.

Para permitir a aplicação e o controle da força axial durante a soldagem, foi desenvolvido um sistema de aplicação de carga manual, projetado especificamente para este equipamento. O dispositivo permite acompanhar a força em tempo real por meio de uma célula de carga acoplada a um sistema de aquisição de dados, que monitora o comportamento do processo durante a soldagem. Essa solução foi definida após a avaliação de diferentes métodos de aplicação de carga, destacando-se por sua praticidade, repetibilidade e efetividade.

Após a montagem e calibração da máquina, foram realizadas soldagens experimentais em diferentes condições de processo, seguidas de ensaios de tração para avaliar a resistência mecânica das juntas obtidas. Esses resultados permitiram verificar o desempenho da máquina e validar a efetividade do processo de soldagem por atrito desenvolvido neste trabalho.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral projetar, construir e avaliar o desempenho de uma máquina de soldagem por atrito a partir da adaptação de um torno Myford ML7, de modo a validar a viabilidade técnica do processo e a qualidade das juntas obtidas por meio de ensaios experimentais.

Objetivos específicos:

- Realizar o estudo teórico sobre o processo de soldagem por atrito, abordando seus princípios de funcionamento, parâmetros de controle e principais aplicações industriais;
- Executar a manutenção e adaptação do torno Myford ML7, modificando sua estrutura e sistema de acionamento para atender às exigências do processo de soldagem;
- Projetar e fabricar um sistema de aplicação de carga axial manual, incorporando uma célula de carga para o monitoramento da força durante a soldagem;
- Montar e calibrar o conjunto experimental, garantindo o funcionamento seguro e a repetibilidade do processo;
- Realizar testes experimentais de soldagem sob diferentes condições operacionais, registrando os parâmetros de força e rotação;
- Submeter as juntas obtidas a ensaios de tração, avaliando a resistência mecânica e a qualidade da solda;
- Analisar os resultados obtidos, verificando a efetividade da máquina desenvolvida e a viabilidade de utilização do equipamento em atividades acadêmicas e de pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os processos de soldagem no estado sólido surgiram como alternativa aos métodos de soldagem por fusão, especialmente para situações em que é desejável minimizar as distorções térmicas, tensões residuais e defeitos metalúrgicos típicos da fusão.

2.1 Processo de soldagem por fricção

Nesses processos, a união das peças ocorre sem que haja a fusão dos metais de base, sendo promovida por mecanismos de difusão e deformação plástica nas superfícies de contato (AKINLABI; MAHAMOOD, 2020; ASM, 1993; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013).

Entre os principais processos de soldagem no estado sólido, destacam-se a soldagem por fricção (*friction welding*), a soldagem por difusão, a soldagem por explosão, a soldagem por ultrassom e o *friction stir welding* (FSW). Esses métodos apresentam em comum a aplicação de energia mecânica e/ou térmica controlada para promover a união, permitindo a soldagem de materiais similares e dissimilares com excelente integridade estrutural (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013).

A soldagem no estado sólido vem ganhando destaque em indústrias que exigem elevada confiabilidade, como a aeroespacial, automotiva e nuclear, devido à sua capacidade de produzir juntas de alta resistência e baixo impacto térmico (AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

2.1.1 Histórico breve

A soldagem por fricção (*Friction Welding* – FW) é um processo de união em estado sólido desenvolvido na metade do século XX, com o objetivo de atender à necessidade industrial de produzir juntas metálicas de alta resistência sem recorrer à fusão dos materiais. O princípio fundamental do processo, geração de calor por atrito entre superfícies sob pressão, já era conhecido desde o século XIX, quando experimentos demonstravam a possibilidade de amolecimento superficial por fricção mecânica (WAINER, 1992).

No entanto, a aplicação controlada desse fenômeno para fins de soldagem teve origem apenas na década de 1950, na então União Soviética, sendo reconhecida oficialmente em 1956 como o primeiro método industrial de soldagem por fricção rotativa MAALEKIAN (2007). A

partir dessa data, o processo passou a ser estudado e aperfeiçoado, especialmente em países europeus e asiáticos, como Inglaterra, Alemanha e Japão, que desenvolveram as primeiras máquinas automáticas dedicadas ao processo.

Durante as décadas de 1960 e 1970, o avanço das tecnologias de automação e controle mecânico permitiu a expansão da soldagem por fricção para diferentes aplicações industriais. O processo mostrou-se especialmente eficaz na união de componentes cilíndricos, como eixos, hastes e tubos, consolidando-se como um método alternativo aos processos de soldagem por fusão (MAALEKIAN, 2007; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

Nessa mesma época, surgiram as primeiras máquinas industriais de fricção inercial, que armazenavam energia rotacional em um volante antes da união, e as máquinas de fricção contínua (ou convencional), nas quais o movimento de rotação é mantido ativamente durante a fase de aquecimento. Essas duas variantes constituíram as bases dos processos utilizados até hoje em aplicações industriais e acadêmicas (MAALEKIAN, 2007; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013).

Nas décadas seguintes, a soldagem por fricção se expandiu para novos setores como o aeroespacial, automotivo, nuclear e de energia devido à sua capacidade de unir materiais similares e dissimilares com elevada precisão dimensional e baixo impacto térmico. Essa expansão foi acompanhada pelo surgimento de outras variantes, como o *Friction Stir Welding* (FSW) e o *Linear Friction Welding* (LFW), que estenderam o uso do princípio da fricção a diferentes geometrias e materiais. No Brasil, a soldagem por fricção começou a ser estudada em instituições de pesquisa a partir da década de 1980, mas seu uso ainda é restrito a setores de alta tecnologia, como o automotivo e aeroespacial (AKINLABI; MAHAMOOD, 2020; TWI, 2025).

Atualmente, a soldagem por fricção é reconhecida como um dos processos mais confiáveis de união no estado sólido, sendo aplicada em componentes críticos que exigem elevada integridade estrutural. Seu princípio simples, aliado à possibilidade de controle preciso de rotação e força axial, torna o processo também ideal para aplicações experimentais e didáticas, como no caso do presente projeto, que busca desenvolver uma máquina de soldagem por atrito adaptada a partir de um torno.

2.1.2 Etapas do processo de soldagem por fricção rotativa

A soldagem por fricção rotativa (*Rotary Friction Welding – RFW*) é caracterizada por um ciclo de operação dividido em etapas bem definidas, que determinam a qualidade da junta e a efetividade do processo. Cada fase envolve a interação controlada entre força axial, velocidade de rotação e tempo, resultando em um aquecimento localizado suficiente para promover a união metalúrgica entre as peças sem fusão (WAINER, 1992; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013).

Segundo a AWS (1998), em consonância com Maalekian (2007) o processo apresenta as seguintes etapas básicas, representadas na Figura 1:

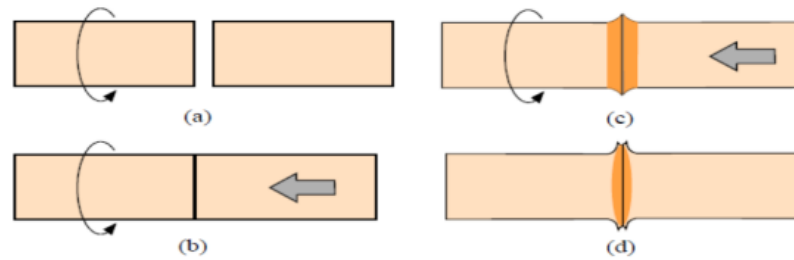
a) Início da rotação e aproximação das superfícies: uma das peças é colocada em rotação controlada enquanto a outra permanece fixa. Em seguida, inicia-se a aproximação entre as superfícies a serem unidas, garantindo o alinhamento axial e o contato uniforme.

b) Geração de calor por atrito: com o contato estabelecido, a energia cinética proveniente da rotação é convertida em energia térmica por meio do atrito entre as superfícies metálicas, elevando gradualmente a temperatura da interface.

c) Amolecimento e formação do “flash”: à medida que a temperatura aumenta, o material nas regiões de contato entra em estado plástico, promovendo o escoamento lateral do metal e a formação da rebarba característica (flash), que indica a plastificação adequada da interface.

d) Fase de forjamento e consolidação da junta: a rotação é interrompida e aplica-se uma força axial adicional de forjamento, responsável por expulsar o material plastificado remanescente e consolidar a união entre as peças, resultando em uma junta sólida e homogênea.

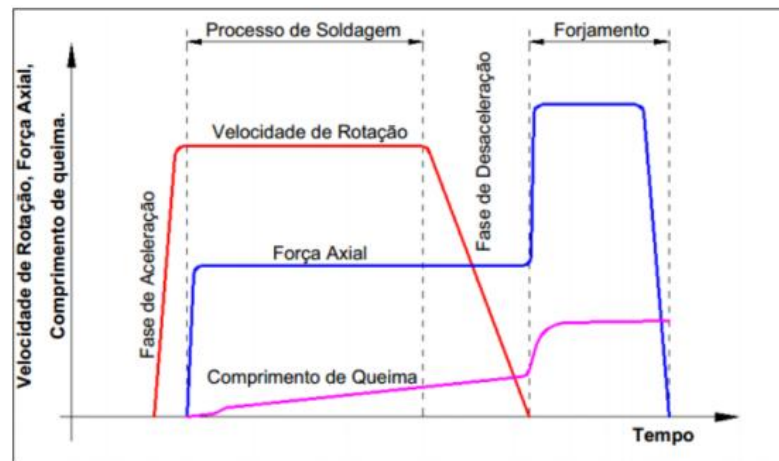
Figura 1 - Etapas da soldagem por fricção convencional rotacional de topo



Fonte: Modenesi e Marques (2011).

Podemos notar pela Figura 2 o comportamento gráfico ao longo do tempo dos parâmetros de soldagem:

Figura 2 - Variação dos parâmetros de soldagem com o tempo



Fonte: AWS (1998)

De acordo com Maakelian (2007), o processo de soldagem por fricção promove variações térmicas e mecânicas significativas nas regiões próximas à interface de solda. Essas regiões podem ser divididas em quatro zonas distintas, que representam as diferentes condições de temperatura, deformação e microestrutura observadas ao longo do processo (Figura 3).

Zona de contato (i):

É a região localizada exatamente na interface entre as duas peças, onde ocorre o contato direto e o atrito intenso. Nessa zona são registradas as maiores temperaturas e deformações plásticas, resultando em uma microestrutura extremamente refinada devido à elevada taxa de deformação e recristalização dinâmica.

Zona de plastificação (ii):

Situada logo após a interface de contato, essa região sofre deformações plásticas significativas, embora não participe diretamente da formação da rebarba (flash). O aquecimento e o escoamento do material nessa zona promovem uma estrutura de grãos finos e equiaxiais, típica de regiões submetidas a intensa deformação termomecânica.

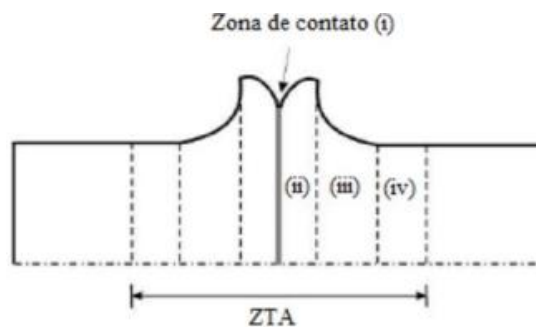
Zona parcialmente deformada (iii):

Caracteriza-se por temperaturas e deformações intermediárias, menores do que as observadas na zona de plastificação. Nessa área, o material sofre apenas uma leve deformação, mantendo uma estrutura de grãos parcialmente refinada, que representa a transição entre o núcleo e a interface soldada.

Zona sem deformação (iv):

Localiza-se nas regiões mais afastadas da junta, onde o efeito térmico do processo é mínimo. Nessa zona, não ocorre deformação plástica perceptível, e o material conserva sua microestrutura original, geralmente composta por grãos maiores e não recristalizados.

Figura 3 - Regiões de ZTA de soldagem por fricção rotativa



Fonte: Maakelian (2007).

2.1.3 Variantes do processo

A soldagem por fricção apresenta diversas variantes de processo, desenvolvidas ao longo das décadas para atender diferentes geometrias, materiais e aplicações industriais. Todas se baseiam no mesmo princípio fundamental, a geração de calor pelo atrito controlado entre

duas superfícies sob pressão, seguida da união em estado sólido, mas diferem quanto ao tipo de movimento relativo, forma de controle e fonte de energia utilizada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013).

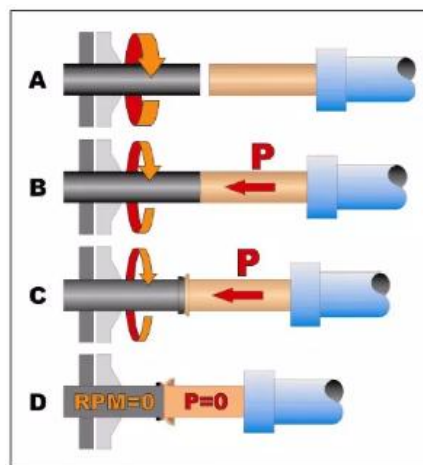
Soldagem Inercial

A soldagem por fricção inercial (*Inertia Friction Welding – IFW*) é uma variação da soldagem por fricção rotativa em que a energia necessária para a união é proveniente da energia cinética armazenada em um volante de inércia. Essa energia é liberada de forma controlada durante o contato entre as peças, substituindo a necessidade de rotação contínua durante toda a fase de aquecimento (AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

O processo inicia-se com o acoplamento de uma das peças ao eixo de um volante de alta inércia, o qual é acelerado até atingir uma velocidade angular pré-determinada. Em seguida, o sistema de acionamento é desacoplado do motor, e a peça em rotação é pressionada contra a peça estacionária. A energia cinética armazenada no volante é então convertida em calor por atrito, resultando na plastificação das superfícies em contato.

À medida que o atrito aumenta, a velocidade do volante diminui progressivamente até parar completamente. Nesse momento, aplica-se uma força de forjamento adicional, consolidando a junta (WAINER, 1992; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013). Podemos notar na Figura 4 o processo inercial:

Figura 4 - Etapas soldagem por fricção inercial



Fonte: American Friction Welding (2025).

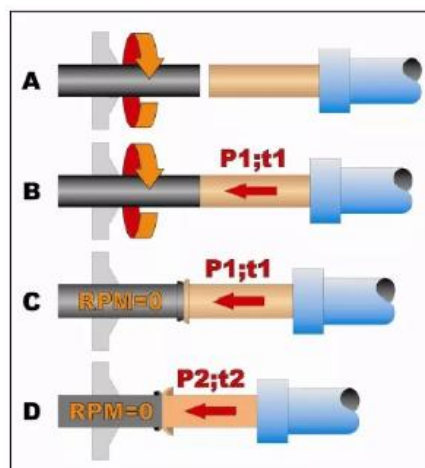
Entre as principais vantagens do processo inercial, destacam-se a precisão na quantidade de energia introduzida, uma vez que depende apenas da massa e da velocidade do volante, o ciclo rápido, devido à curta duração da fase de fricção, a repetibilidade elevada, ideal para processos automatizados e produção em série e a ausência de sobreaquecimento, pois o fornecimento de energia cessa naturalmente à medida que o volante desacelera (AWS, 1998).

Entretanto, o método requer máquinas robustas e sistemas de balanceamento complexos, além de controle rigoroso da energia acumulada, fatores que limitam sua aplicação em equipamentos adaptados ou de bancada. Por esse motivo, embora o processo inercial seja amplamente utilizado na indústria automotiva e aeroespacial, o processo rotativo convencional é o mais indicado para ensaios experimentais e protótipos acadêmicos, como o desenvolvido neste trabalho (AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

Soldagem convencional

A soldagem por fricção rotativa convencional (*Conventional Rotary Friction Welding – CRFW*) é a forma mais simples e amplamente empregada da soldagem por fricção. Nesse processo, uma das peças permanece fixa enquanto a outra gira continuamente em alta velocidade, sob a ação de uma força axial constante aplicada ao longo do contato. A fase de fricção é mantida até que o calor gerado seja suficiente para amolecer as superfícies, promovendo deformação plástica localizada. Em seguida, a rotação é interrompida e aplica-se uma força de forjamento, responsável por eliminar o material plastificado excedente e garantir a coalescência entre os metais (AWS, 1998; WAINER, 1992).

Figura 5 - Etapas soldagem por fricção convencional



Fonte: American Friction Welding (2025).

O processo apresenta maior flexibilidade e controle direto dos parâmetros operacionais, uma vez que a rotação, o tempo de fricção e a força axial podem ser ajustados de maneira independente. Essa característica torna o método adequado tanto para ensaios laboratoriais quanto para aplicações industriais de médio porte, como a união de eixos, barras, hastes e tubos metálicos (WAINER, 1992). Os dois processos podem ser comparados conforme apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Comparativo entre os tipos de soldagem

PARÂMETROS DO PROCESSO	FRICÇÃO CONVENCIONAL	FRICÇÃO INERCIAL
Parâmetros de soldagem	Velocidade relativa	Velocidade relativa
	Pressão	
	Tempo de aquecimento	Pressão
	Pressão	Inércia do volante
	Tempo de forjamento	
Tempo de soldagem	Maior	Menor
Energia de soldagem	Menor	Maior
Torque	Menor	Maior
Tamanho da ZTA	Maior	Menor
Resistência da solda	Menor	Maior
Fixação das peças	Garras do mandril normal	Garras do mandril com eficiência elevada
Equipamento	Pode ser projetado para operações portáteis	Robusto para resistir a altas cargas axiais

Fonte: Autor (2025).

No presente trabalho, a máquina projetada foi baseada no princípio convencional, utilizando um torno adaptado para atuar como sistema de rotação e fixação das peças.

2.2 Fundamentos da soldagem por atrito

A velocidade de rotação é um dos parâmetros mais importantes da soldagem por fricção rotativa, pois está diretamente relacionada à taxa de geração de calor na interface entre as peças.

2.2.1 Velocidade de rotação

O calor produzido é consequência do atrito entre as superfícies metálicas em contato, e sua intensidade depende da velocidade relativa, da força axial aplicada e do coeficiente de atrito dos materiais envolvidos. O aumento da velocidade de rotação eleva proporcionalmente a quantidade de calor gerado, favorecendo o amolecimento das superfícies e o início da deformação plástica, entretanto, valores excessivos de rotação podem causar superaquecimento local, oxidação e ejeção exagerada de material, comprometendo a integridade da junta (MAALEKIAN, 2007).

A escolha da rotação ideal depende do tipo de material e do diâmetro das peças. Materiais de alta condutividade térmica, como ligas de alumínio e cobre, exigem maiores velocidades para atingir a temperatura adequada de plastificação, enquanto aços de médio carbono podem ser soldados com rotações mais baixas (WAINER, 1992).

Em estudos realizados por SAHIN et al. (1998), Pinheiro (2021) e Maalekian (2017), observou-se que o aumento da velocidade de rotação tende a reduzir o tempo de fricção necessário e a melhorar a homogeneidade da interface, desde que seja acompanhado por controle adequado da força de atrito.

Além disso, a velocidade de rotação influencia diretamente a formação da rebarba e o escoamento do material plastificado. Em rotações muito baixas, o calor gerado é insuficiente, resultando em ligação incompleta; já em rotações muito elevadas, ocorre expulsão excessiva de material e formação de zonas termicamente afetadas amplas (SAHIN et al., 1998; MAALEKIAN, 2007; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020; SOUSA, 2017).

2.2.2 Força de fricção e força de forjamento

A força axial aplicada é outro parâmetro fundamental da soldagem por fricção, sendo responsável tanto pela geração de calor inicial, durante a fase de fricção, quanto pela consolidação final da junta, durante a fase de forjamento. O controle preciso dessas forças garante que a energia térmica e a deformação plástica ocorram de forma uniforme ao longo da interface de soldagem, evitando falhas de ligação ou defeitos geométricos (AWS, 1998; SOUSA, 2017; PIRES, 2007; SAHIN et al., 1998).

Com base em Marques, Modenesi e Bracarense (2013), as forças atuantes no processo podem ser divididas em duas etapas distintas:

- Força de fricção (F_1): aplicada durante a rotação da peça, é responsável por gerar o atrito e, conseqüentemente, o calor necessário para o amolecimento superficial do material;
- Força de forjamento (F_2): aplicada após a interrupção da rotação, tem por função expelir o material plastificado remanescente e promover a união metalúrgica definitiva entre as peças.

A magnitude da força de fricção está diretamente relacionada ao calor gerado sendo essencial para alcançar a temperatura ideal de plastificação. Uma força de atrito muito baixa resulta em aquecimento insuficiente e ligação incompleta, enquanto uma força excessiva pode provocar desgaste prematuro das superfícies, expulsão exagerada de material e desbalanceamento térmico (WAINER, 1992; PIRE S, 2007; SOUZA, 2017).

Já a força de forjamento deve ser suficiente para eliminar vazios e oxidações presentes na interface e assegurar o escoamento do material plastificado. Valores insuficientes de forjamento produzem juntas frágeis, enquanto forças excessivas podem gerar colapsos estruturais ou redução desnecessária no comprimento das peças (ASM, 1993; AWS, 1998 MAALEKIAN, 2007;).

Segundo AKINLABI e MAHAMOOD (2020), a força de forjamento também influencia a microestrutura da zona de contato, uma vez que o aumento da pressão promove o refinamento dos grãos e a recristalização dinâmica, elevando a resistência mecânica da junta.

Nos sistemas industriais, essas forças são controladas por atuadores hidráulicos ou pneumáticos, capazes de aplicar cargas constantes e repetitivas. Contudo, em equipamentos experimentais, a força axial foi aplicada manualmente, ou com métodos que buscam a padronização dessa carga.

É muito importante também observar o comportamento da força durante as fases de fricção e forjamento, pois dessa forma possibilita a correlação direta entre a curva de força versus tempo e o comportamento térmico do processo. Essa análise pode ser essencial para validar o funcionamento da máquina e ajustar os parâmetros para obtenção de juntas reprodutíveis e consistentes.

2.2.3 Tempo de fricção e tempo de forjamento

O tempo de fricção e o tempo de forjamento são parâmetros diretamente relacionados à quantidade total de energia introduzida no sistema e, portanto, à qualidade final da junta

soldada. Eles controlam o período durante o qual o calor é gerado e a deformação plástica ocorre, afetando a microestrutura, o tamanho da zona termicamente afetada (ZTA) e a resistência mecânica da solda (SAHIN et al. (1998); Dawood et al. (2017)).

Tempo de fricção

O tempo de fricção corresponde ao intervalo em que as superfícies estão em movimento relativo sob a ação da força de fricção, gerando o calor necessário para o amolecimento do material. Segundo Wainer (1992), esse tempo deve ser suficiente para promover o aquecimento uniforme da interface, sem causar superaquecimento ou perda de material por ejeção excessiva.

A duração ideal do tempo de fricção depende da velocidade de rotação, da força axial e da condutividade térmica do material. Materiais com alta condutividade, como alumínio e cobre, exigem tempos maiores para atingir a temperatura de plastificação, enquanto aços carbono necessitam de intervalos mais curtos.

Quando o tempo de fricção é insuficiente, ocorre a formação de zonas de ligação incompleta e microdefeitos interfaciais, comprometendo a resistência da junta. Em contrapartida, tempos excessivos elevam desnecessariamente a temperatura da interface, provocando aumento do tamanho de grão e formação de rebarbas volumosas (PIRES, 2007; SOUZA, 2017; MAALEKIAN, 2007).

A evolução da fase de fricção pode ser monitorada experimentalmente por meio da variação da força axial ao longo do tempo, identificando o ponto em que o material atinge a máxima plastificação.

Tempo de forjamento

O tempo de forjamento refere-se ao período em que a rotação é interrompida e uma força axial maior é aplicada para consolidar a junta. Durante esse tempo, o material plastificado é comprimido e expelido lateralmente, ocorrendo a coesão metalúrgica definitiva entre as superfícies (MAALEKIAN, 2007, ASM, 1993).

A duração dessa etapa influencia a densificação da interface e o refinamento da microestrutura. Um tempo de forjamento muito curto pode gerar discontinuidades internas, enquanto tempos muito longos favorecem o resfriamento prematuro da interface, reduzindo a difusão atômica e a qualidade da ligação (AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

Resultados experimentais mostram que tempos moderados de forjamento, associados a forças adequadas, resultam em zonas de solda homogêneas e de alta resistência mecânica, especialmente em materiais dissimilares como os aços SAE 1020 e SAE 1045 (PINHEIRO 2021; SOUZA, 2017).

2.2.4 Deslocamento axial e geometria de contato

O deslocamento axial e a geometria das superfícies de contato são parâmetros que influenciam diretamente o comportamento mecânico e térmico do processo de soldagem por fricção rotativa. Durante o ciclo de soldagem, ocorre uma redução no comprimento total do conjunto, provocada pela deformação plástica e pelo escoamento do material nas regiões de maior temperatura. Essa variação, conhecida como encurtamento axial (ΔL), é uma das principais indicações do grau de plastificação atingido na interface (AWS, 1998; ASM, 1993; PIRES, 2007).

Deslocamento axial (ΔL)

O deslocamento axial ocorre principalmente durante as fases de fricção e forjamento. Na etapa de fricção, ele está associado à expulsão do material plastificado em forma de rebarba (flash), enquanto na fase de forjamento é consequência da compressão axial aplicada para consolidar a junta. O valor total de deslocamento axial está diretamente relacionado à energia de deformação e à quantidade de material plastificado. Assim, valores muito baixos de encurtamento indicam aquecimento insuficiente e ligação incompleta, já deslocamentos excessivos podem resultar em perda dimensional significativa e escoamento exagerado de material (PIRES, 2007; SOUZA 2017);

Em processos instrumentados, o deslocamento axial pode ser monitorado por sensores lineares ou por análise das curvas de força versus tempo, permitindo correlacionar o grau de deformação com a qualidade metalúrgica da junta (FIGLIOLA; BEASLEY 2007).

Geometria das superfícies de contato

A geometria inicial das superfícies das peças exerce papel determinante na formação da rebarba, na distribuição de calor e no fluxo de material plastificado. Estudos mostram que diferentes perfis geométricos como faces planas, cônicas ou convexas

produzem padrões distintos de deformação, afetando a integridade da junta e o comportamento mecânico final (PIRES, 2007; PINHEIRO; 2021)

Superfícies planas promovem contato imediato e uniforme, o que resulta em geração de calor rápida e simétrica. Entretanto, pode levar à ejeção precoce de material se a rotação for elevada, exigindo controle rigoroso da força de atrito. Superfícies cônicas promovem o contato inicial ocorre apenas em uma pequena área central, concentrando o calor e favorecendo o escoamento gradual do material. Essa geometria promove maior homogeneidade na interface e melhor qualidade metalúrgica, além de reduzir a formação de trincas periféricas (MAALEKIAN, 2007; PINHEIRO 2021).

Esses efeitos foram comprovados experimentalmente em estudos com materiais dissimilares, como aço SAE 1020 e aço SAE 1045, em que pontas cônicas podem apresentar resistência mecânica da ordem de 5 a 10% superior em comparação às faces planas (PINHEIRO 2021).

2.2.5 Temperatura de interface, geração de calor e monitoramento

A temperatura de interface é o principal resultado combinado dos parâmetros de soldagem força, rotação, tempo e geometria e exerce influência direta sobre o comportamento metalúrgico da junta. O processo de soldagem por fricção ocorre totalmente no estado sólido, portanto, o objetivo térmico é alcançar uma temperatura suficiente para amolecer o material sem atingir o ponto de fusão (ASM, 1993; SAHIN et al., 1998).

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2013), o equilíbrio térmico é atingido quando a taxa de calor gerado iguala a taxa de calor dissipada por condução e convecção nas regiões adjacentes à junta.

Em processos bem controlados, a temperatura de interface situa-se entre 70% e 90% da temperatura de fusão do material base, garantindo condições ideais de amolecimento e difusão atômica sem ocorrência de fusão localizada (MAALEKIAN, 2007; ASM 1993).

Monitoramento da temperatura e controle do processo

O controle direto da temperatura na interface é desafiador devido ao caráter dinâmico e confinado da região de contato. Por isso, na maioria dos casos, o monitoramento é feito de forma indireta, por meio de variáveis como força axial, deslocamento e tempo de fricção (MAALEKIAN, 2007; AKINLABI; MAHAMOOD,2020).

A curva de força versus tempo pode ser usada como indicador da evolução térmica: durante o aquecimento, a força tende a cair ligeiramente devido à redução da viscosidade e aumento da plastificação do material; já na fase de forjamento, ocorre um aumento abrupto da carga, refletindo a consolidação da junta (PIRES, 2007; SOUZA, 2017).

Em equipamentos industriais, a temperatura pode ser registrada com termopares embutidos próximos à zona de contato ou através de câmeras termográficas. No entanto, em bancadas experimentais, métodos indiretos se mostram mais práticos e confiáveis (SAHIN et al., 1998).

Sem controle direto na interface pode se realizar uma análise simultânea dessas variáveis permitindo identificar o momento em que o material atinge o estado plástico adequado, definindo o ponto ótimo de transição entre fricção e forjamento. Além disso, a aparência visual da rebarba (flash) e o encurtamento axial podem ser utilizados como indicadores complementares do comportamento térmico, permitindo avaliar de forma empírica o equilíbrio entre geração e dissipação de calor durante a soldagem (PIRES, 2007).

2.2.6 Vantagens, limitações e aplicações do processo

A soldagem por fricção, como processo de união no estado sólido, apresenta uma série de vantagens técnicas e operacionais quando comparada aos processos convencionais de soldagem por fusão, como Gás inorgânico de metal (MIG), Gás inorgânico de Tungstênio (TIG) e arco submerso. Por não envolver a fusão dos metais de base, o processo elimina a necessidade de materiais de adição, reduz o consumo energético e minimiza defeitos típicos de solidificação, como trincas, porosidades e inclusões gasosas (ASM, 1993; AWS, 1998; MAALEKIAN, 2007; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013).

Vantagens do processo

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2013) e Maalekian (2007), as principais vantagens da soldagem por fricção rotativa são:

- Ausência de fusão: o processo ocorre totalmente no estado sólido, evitando segregações e tensões residuais típicas dos processos de soldagem por arco elétrico.
- Alta integridade metalúrgica: as juntas apresentam microestrutura refinada devido à recristalização dinâmica e à ausência de zonas fundidas.

- Capacidade de unir materiais dissimilares: permite a união de metais de propriedades físicas e químicas distintas, como aço com alumínio, cobre com latão, ou aço carbono com aço inoxidável.
- Excelente repetibilidade e automação: os parâmetros de força, tempo e rotação podem ser controlados com precisão, possibilitando soldas padronizadas e de alta qualidade.
- Baixa emissão de poluentes: o processo não produz fumos metálicos, escória nem radiação ultravioleta, sendo considerado **ambientalmente mais limpo** e seguro.
- Economia energética: o tempo de ciclo é curto e o aproveitamento da energia mecânica é elevado.
- Excelente resistência mecânica: as juntas alcançam resistência próxima ou superior à do metal base, especialmente em materiais ferrosos.

Limitações do processo

Apesar de suas vantagens, a soldagem por fricção apresenta algumas limitações técnicas que restringem seu uso em determinadas situações (AWS, 1998; ASM, 1993):

- Aplicável preferencialmente a peças simétricas, como barras, eixos e tubos, devido à necessidade de alinhamento coaxial.
- Necessidade de forças axiais elevadas, exigindo máquinas robustas e sistemas de fixação rígidos.
- Dificuldade de controle da temperatura em tempo real, pois o aquecimento ocorre internamente à interface.
- Não permite a soldagem de materiais com baixo coeficiente de atrito, como ferros fundidos, bronzes e latão;
- Desgaste mecânico dos componentes rotativos, especialmente em sistemas adaptados ou experimentais.

Apesar dessas restrições, a simplicidade operacional e o controle dos parâmetros tornam o processo extremamente atrativo para aplicações laboratoriais e industriais.

Aplicações industriais

A soldagem por fricção rotativa tem ampla aplicação em setores industriais que exigem altas propriedades mecânicas, precisão dimensional e confiabilidade estrutural (AWS, 1998; MAALEKIAN, 2007; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

O processo é amplamente utilizado nas seguintes áreas:

a) Indústria automotiva

Empregada na união de eixos de transmissão, válvulas, engrenagens, virabrequins, hastes de amortecedores e componentes de escape. A capacidade de unir materiais dissimilares como aços de alta resistência com ligas leves permite redução de peso e aumento da eficiência energética dos veículos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013; ASM, 1993; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

b) Indústria aeroespacial

Aplicada na fabricação de pás de turbinas, componentes estruturais e conexões de motores. A precisão do processo e a ausência de zonas fundidas garantem juntas confiáveis sob altas temperaturas e esforços cíclicos, sendo usada por fabricantes como Boeing e Rolls-Royce (ASM, 1993; AWS, 1998; TWI, 2025).

c) Indústria nuclear e de energia

Usada na produção de tubulações pressurizadas, conexões de trocadores de calor, barras de controle e juntas seladas, onde a integridade metalúrgica e a ausência de porosidades são fundamentais (AKINLABI; MAHAMOOD, 2020; TWI, 2025).

d) Indústria ferroviária e naval

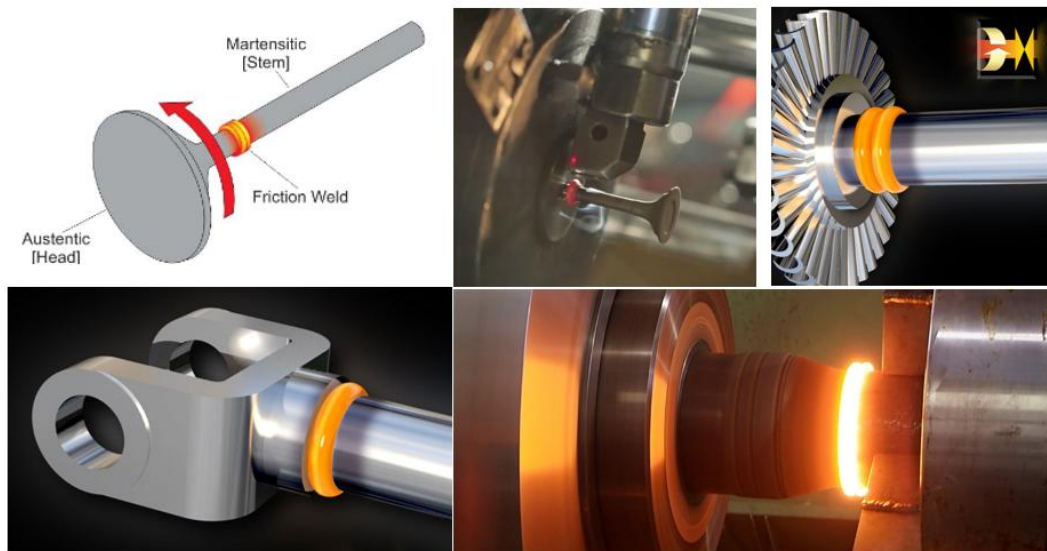
Aplicada na união de eixos ferroviários, rodas e flanges, proporcionando altas resistências à fadiga e confiabilidade estrutural em componentes submetidos a grandes esforços (MAALEKIAN, 2007).

e) Indústria de mineração e petróleo

Utilizada em barras de perfuração (drill pipes), válvulas de alta pressão e componentes de bombeamento, substituindo processos convencionais de soldagem por arco, com maior resistência e durabilidade (ASM, 1993; AWS, 1998; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

A Figura 6 apresenta a exemplificação das aplicações mencionadas:

Figura 6 – Aplicações da Soldagem por Fricção



Fonte: American Friction Welding (2025)

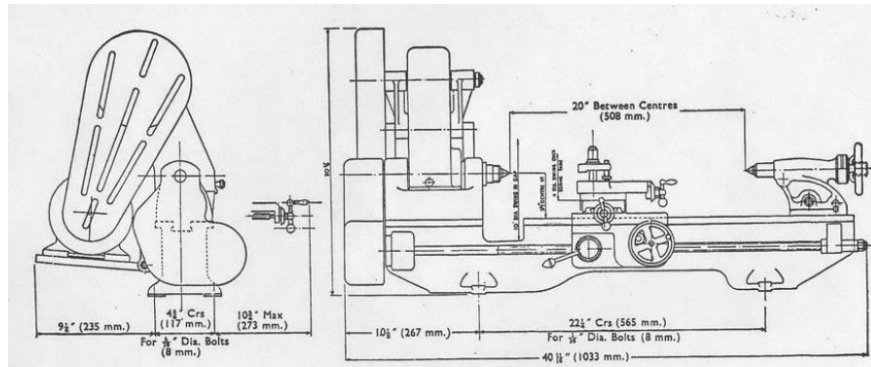
2.3 Características construtivas e especificações técnicas do Myford ML7

O torno mecânico Myford ML7 é um equipamento de bancada amplamente reconhecido por sua robustez, precisão e confiabilidade, sendo amplamente utilizado em oficinas mecânicas, laboratórios e aplicações didáticas desde a década de 1940. Fabricado pela empresa Myford Engineering Co. Ltd. (Inglaterra), o modelo ML7 foi projetado originalmente para operações de usinagem de precisão em metais, mas sua configuração mecânica e estrutural também o torna altamente adequado para estudos experimentais e adaptações laboratoriais, como no caso da soldagem por fricção rotativa.

Segundo o manual técnico original (MYFORD, 1952), o ML7 é constituído por um conjunto rígido e balanceado de componentes, composto por: cabeçote fixo, bancada em ferro fundido, carro transversal, mancais de precisão, sistema de transmissão por correias e polias, e

motor elétrico de acionamento independente. A Figura 12 apresenta o desenho do modelo citado.

Figura 7 - Desenho torno Myford ML7.



Fonte: Adaptado de Myford Engineering Co. Ltd. (1952).

Estrutura e cabeçote

O cabeçote fixo (*headstock*) é construído em ferro fundido e abriga o fuso principal (*spindle*) montado sobre mancais de bronze de alta precisão, ajustáveis por calços. Esses mancais são lubrificados por óleo SAE leve, garantindo operação suave e minimizando vibrações durante o funcionamento. O eixo principal é o responsável por transmitir o movimento rotacional às peças fixadas no plato ou castanha, permitindo o controle direto da rotação de fricção. O cabeçote foi projetado para suportar altas cargas radiais e axiais, característica que o torna particularmente adequado para processos que envolvem compressão axial como a soldagem por fricção rotativa (MYFORD ENGINEERING CO. LTD., 1952; FIGLIOLA; BEASLEY, 2007).

Sistema de transmissão

A transmissão de potência no ML7 é realizada por um conjunto de polias escalonadas acionadas por correia em “V”, permitindo diferentes faixas de velocidade. O sistema é simples e eficiente, possibilitando a variação manual da rotação do eixo principal sem necessidade de sistemas eletrônicos complexos. De acordo com o manual, a velocidade do fuso pode ser ajustada entre aproximadamente 35 e 640 rpm, dependendo da combinação de polias selecionadas e da potência do motor instalado (MYFORD, 1952).

Essa configuração mecânica permite controle direto sobre o aquecimento e a taxa de fricção durante a soldagem, já que a rotação é um dos parâmetros fundamentais do processo (ASM, 1993; SAHIN et al., 1998; MAALEKIAN, 2007; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

Motor elétrico e acionamento

O torno é originalmente equipado com um motor elétrico monofásico ou trifásico, geralmente entre 0,25 e 0,5 HP, com sistema de partida direta. O acoplamento é feito por correia e polia, o que facilita ajustes de torque e manutenção. No contexto da soldagem por atrito, esse tipo de motor oferece torque suficiente para gerar o calor necessário à plastificação dos metais, mantendo estabilidade de rotação durante a fase de fricção (SAHIN et al., 1998; MAALEKIAN, 2007; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

Bancada e estrutura

A bancada do ML7 é feita em ferro fundido de alta rigidez e precisão usinada, possuindo guias planas e prismáticas. Essa estrutura confere estabilidade mecânica e alinhamento entre o cabeçote e o contraponto, reduzindo vibrações e desalinhamentos durante o processo. A rigidez estrutural é um dos fatores que justificam a escolha do torno Myford para experimentos de soldagem por fricção, onde a estabilidade é essencial para manter a força axial constante (ASM, 1993; MAALEKIAN, 2007; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

Sistema de contraponto

O contraponto (*tailstock*) do ML7 é ajustável e permite o posicionamento axial preciso da peça oposta ao cabeçote. O avanço é realizado manualmente por fuso trapezoidal, possibilitando a aplicação controlada de pressão sobre o corpo de prova. Essa característica é particularmente útil em aplicações experimentais de soldagem, pois o mecanismo pode ser facilmente adaptado para acoplar dispositivos de aplicação de carga e células de medição de força, como será descrito na metodologia.

Lubrificação e manutenção

O manual do ML7 enfatiza a importância da lubrificação contínua dos mancais e guias, utilizando óleo de baixa viscosidade. O sistema de lubrificação simples e acessível garante

operações de longa duração sem desgaste prematuro, tornando o equipamento confiável para uso em projetos experimentais. Além disso, a facilidade de desmontagem e substituição de componentes permite adaptações e modificações personalizadas, sem comprometer o alinhamento estrutural original (MYFORD, 1952).

Síntese das especificações técnicas originais são apresentadas na Tabela 1.

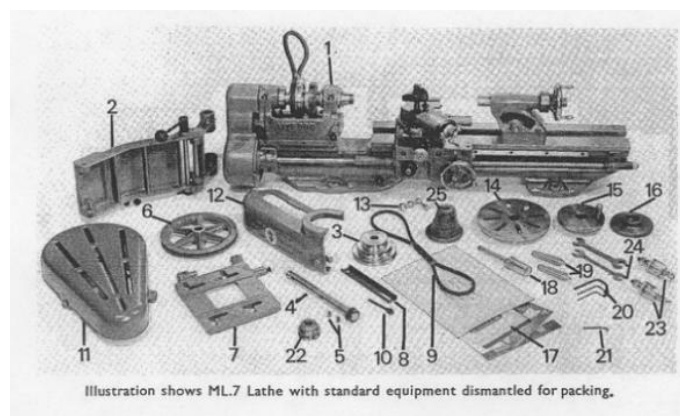
Tabela 1 - Síntese das especificações

Especificação	Valor aproximado
Curso máximo entre centros	20" (\approx 500 mm)
Diâmetro máximo sobre o barramento	7" (\approx 180 mm)
Faixa de velocidades	35 – 640 rpm
Tipo de transmissão	Polias escalonadas e correia em “V”
Tipo de mancais	Mancais de bronze ajustáveis
Potência do motor	0,25 a 0,5 HP
Peso aproximado	90 – 100 kg
Estrutura	Ferro fundido de alta rigidez
Lubrificação	Óleo leve SAE, aplicada manualmente

Fonte: Autor (2025).

A Figura 8 apresenta alguns componentes importantes para o torno.

Figura 8 - Equipamento desmontado



Fonte: Adaptado de Myford Engineering Co. Ltd. (1952).

2.4 Sistemas de aplicação de carga e aquisição de dados

Nos processos de soldagem por fricção rotativa, o controle da força axial aplicada e o monitoramento dos parâmetros de processo são fundamentais para assegurar a repetibilidade e a qualidade das juntas produzidas. Durante o ciclo de soldagem, a força axial atua em duas fases principais: a fase de fricção, responsável pela geração do calor devido ao atrito entre as superfícies; e a fase de forjamento, quando a rotação é interrompida e a pressão é mantida ou aumentada para consolidar a união dos materiais (AWS, 1998; ASM 1993).

2.4.1 Sistemas de aplicação de força

A aplicação controlada da força axial é um dos elementos críticos da soldagem por fricção. De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2013), o sistema de aplicação deve garantir estabilidade, precisão e resposta uniforme, de modo que a força seja transmitida de forma linear ao longo do eixo das peças. Em máquinas industriais, o controle da carga é realizado por sistemas hidráulicos ou servoassistidos, enquanto em dispositivos experimentais ou didáticos é comum o uso de mecanismos manuais ou mecânicos devidamente instrumentados. Entre os sistemas experimentais, destacam-se as alavancas mecânicas, fusos de avanço e braços de compressão, que permitem a aplicação progressiva da carga sobre o conjunto de soldagem. Esse tipo de mecanismo apresenta boa simplicidade construtiva e pode ser combinado a dispositivos de medição para registro das forças exercidas em tempo real (PIRES, 2007; SOUSA, 2017; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

2.4.2 Instrumentação e medição de força

A medição da força aplicada é realizada normalmente por células de carga de compressão, que operam com base no princípio dos *strain gauges* (extensômetros elétricos de resistência). Esses sensores convertem a deformação elástica gerada pelo esforço mecânico em sinais elétricos proporcionais, que podem ser amplificados, registrados e analisados (FIGLIOLA; BEASLEY, 2007).

A célula de carga deve ser instalada no eixo da força, geralmente entre o sistema de compressão (braço, fuso ou atuador) e o corpo de prova, garantindo que a leitura represente a carga efetivamente aplicada. Essa instrumentação possibilita monitorar a força em tempo real durante as fases de fricção, forjamento e resfriamento, o que permite identificar oscilações e

compreender o comportamento dinâmico do processo (FIGLIOLA; BEASLEY, 2007; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013).

2.4.3 Sistemas de aquisição de dados

O sinal elétrico proveniente da célula de carga é adquirido por um sistema de aquisição de dados (DAQ – *Data Acquisition System*) e processado em ambiente computacional. Entre as ferramentas mais utilizadas para esse tipo de monitoramento está o software LabVIEW®, desenvolvido pela *National Instruments*, que permite a criação de interfaces gráficas de controle e exibição de dados em tempo real.

O LabVIEW 2018 destaca-se por sua capacidade de integrar múltiplos canais de leitura e converter sinais analógicos de sensores em gráficos de força versus tempo, além de permitir o armazenamento digital das medições para posterior análise. Essa ferramenta é amplamente empregada em experimentos de soldagem por fricção para o acompanhamento simultâneo de força, torque e rotação, garantindo confiabilidade e repetibilidade nos ensaios. A interface gráfica facilita a visualização instantânea da força aplicada e a identificação das etapas do processo, possibilitando ajustes imediatos pelo operador. (FIGLIOLA; BEASLEY, 2007; PIRES, 2007; SOUSA, 2017; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

3 METODOLOGIA

Foi utilizado um torno Myford ML7, que passou por diversas etapas de desmontagem, manutenção, adaptação mecânica e integração de um sistema de aplicação e monitoramento de carga.

A metodologia desse projeto foi dividida em etapas conforme itens abaixo:

- Planejamento e definição do projeto;
- Preparação dos materiais e equipamentos;
- Manutenção e adaptação do torno Myford ML7;
- Projeto e desenvolvimento do sistema de aplicação de carga;
- Integração do sistema de aquisição e monitoramento de dados (LabVIEW);
- Ensaios de validação e testes preliminares;
- Execução das soldagens experimentais.

3.1 Estudo do Processo e Levantamento de Parâmetros

Inicialmente, realizou-se um estudo teórico aprofundado sobre o processo de soldagem por fricção rotativa, com o intuito de compreender os principais parâmetros de operação e sua influência na qualidade da junta soldada. Foram analisados trabalhos de referência, como os de Tavares (2017) e Pinheiro (2021), entre outros autores relevantes.

Esses estudos permitiram identificar as variáveis críticas do processo, tais como velocidade de rotação, força de fricção, tempo de atrito e força de forjamento, além das condições geométricas das superfícies e da espessura das amostras. Com base nesse levantamento, estabeleceram-se os parâmetros iniciais de projeto, bem como as exigências mecânicas e térmicas para o desenvolvimento da máquina experimental.

A Tabela 2 apresenta faixas típicas de parâmetros utilizados em diferentes estudos de soldagem por fricção rotativa.

Tabela 2 - Faixas típicas de parâmetros para soldagem por fricção rotativa

Diâmetro (mm)	Força Axial (kN)	Rotação (rpm)	Tempo de Fricção (s)	Observações / Fonte
6 – 8	2 – 5	1400 – 2000	2 – 6	PINHEIRO (2021)
10 – 12	5 – 8	1200 – 1600	3 – 8	TAVARES (2017); AWS (1998)
14 – 16	8 – 12	1000 – 1400	4 – 10	SAHIN et al. (1998)
18 – 20	12 – 18	800 – 1200	6 – 12	AKINLABI; MAHAMOOD (2020); ASM Handbook (1993)
25 – 30	20 – 30	600 – 900	8 – 15	MAALEKIAN(2007); AWS(1998)

Fonte: Autor (2025).

Com base nesses valores, iniciou-se o processo de seleção do motor elétrico, considerando potência, torque e faixa de rotação. Optou-se por um motor de 1 CV e 1750 rpm, sendo necessário garantir que o torno suportasse rotações superiores às especificadas em seu manual original. Além disso, realizou-se o dimensionamento da polia motriz, a fim de ajustar a relação de transmissão e alcançar as velocidades desejadas. Para o sistema de aplicação de carga, definiu-se a utilização de um mecanismo capaz de gerar uma força axial entre 200 e 300 kgf, atendendo às necessidades do processo.

3.2 Materiais e Equipamentos

Dessa forma foram definidos os equipamentos e materiais empregados no projeto.

3.2.1 Materiais e equipamentos principais

- Torno Myford ML7;
- Motor elétrico de 1 CV, 1750 rpm;
- Disjuntor elétrico;
- Polia motriz de 90 mm;
- Macaco hidráulico 400 Kgf;
- Manômetro de glicerina 400 Kgf;
- Perfil “U” aço carbono de 3mm;
- Perfis metálicos tipo metalon;

- Célula de carga de compressão;
- Sistema de aquisição de dados utilizando LabVIEW 2018;

3.2.2 Materiais soldados

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de aço SAE 1020 e SAE 1045, confeccionados em barras maciças cilíndricas com dimensões de 7,93mm de diâmetro, os pares formados eram de 50 mm para o aço 1020 e para o aço 1045, 65 mm de comprimento.

Foram dividido em dois grupos, onde primeiro eram cilindros com face de contato cônicas, apresentando ângulo de 90° em relação a base, e o outro faces de contato planas.

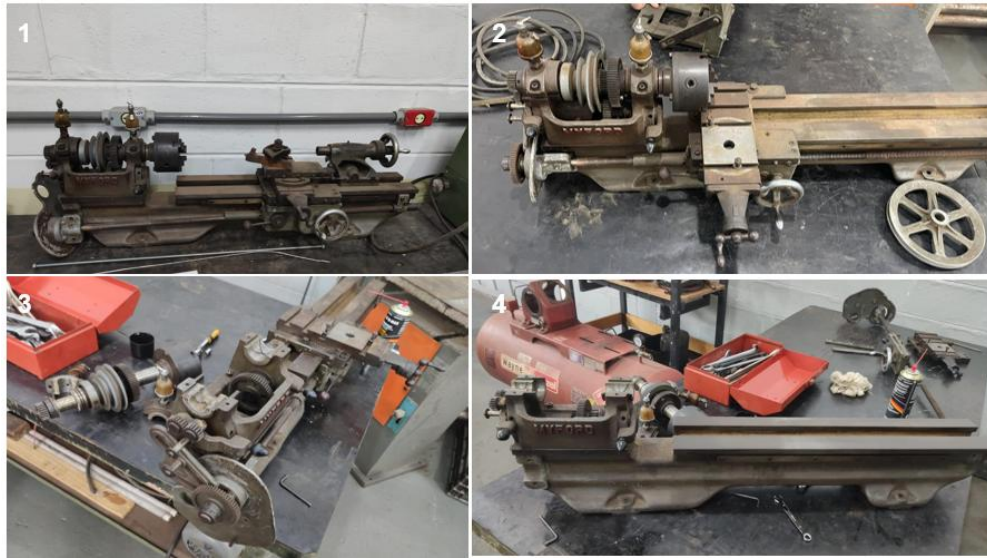
3.3 Processo de manutenção e adaptação do Torno

Foram necessárias algumas etapas para manutenção e adaptação do torno e montagem da bancada.

3.3.1 Etapas iniciais

O torno Myford ML7 passou por uma avaliação geral e desmontagem completa, com o objetivo de inspecionar o estado de conservação dos componentes, realizar limpeza e lubrificação, e identificar quais elementos poderiam ser mantidos ou substituídos. Durante essa etapa, foi consultado o manual técnico original do fabricante (Myford Engineering Co., 1952), garantindo o procedimento correto de montagem e desmontagem. A Figuras 9 a seguir ilustra o processo.

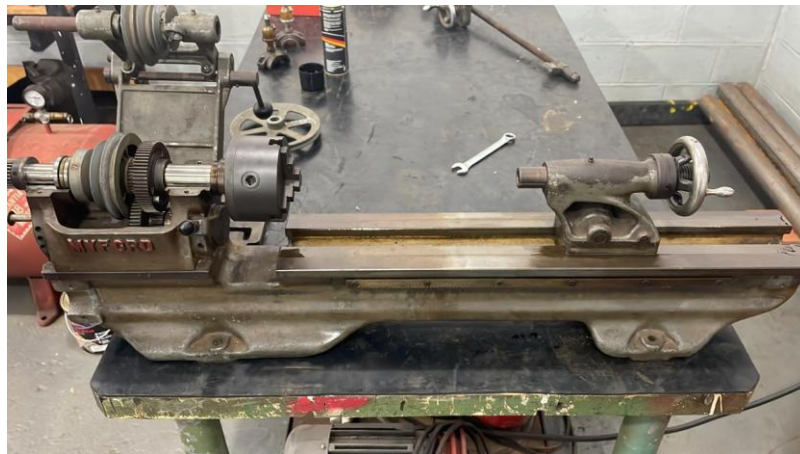
Figura 9 – Processo de desmontagem e manutenção



Fonte: Autor (2025).

Após a desmontagem, realizou-se a **limpeza e lubrificação** dos componentes aproveitáveis, remontando-se a estrutura principal com a base, trilho, castanha, sistema de polias e contraponto, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 - Base da bancada limpa e lubrificada



Fonte: Autor (2025).

Concluída a manutenção, iniciou-se a instalação e os testes de acionamento.

3.3.2 Instalação do motor

O motor escolhido para a máquina, mostrado na Figura 11, atendeu aos requisitos de potência e dimensões necessárias para o conjunto experimental.

Figura 11 - Placa Motor Weg



Fonte: Autor (2025).

Durante os primeiros testes, observou-se superaquecimento no motor, exigindo revisão elétrica e rebobinamento. Também foi necessário usinagem da polia motriz, conforme as etapas mostradas na Figura 12.

Figura 12 - Usinagem do furo para o diâmetro do eixo.



Fonte: Autor (2025).

Após usinagem, o motor foi instalado, acoplado ao sistema de polias fixando-o à base do torno, conforme ilustrado nas Figura 12. Para controle de acionamento e segurança, foi adicionado um **disjuntor elétrico**, substituindo o antigo sistema de ligação direta (Figura 13).

Figura 13 - Disjuntor de ligação da máquina



Fonte: Autor (2025).

3.3.3 Testes Iniciais

Com o conjunto montado e a rotação calibrada, realizaram-se os testes iniciais de soldagem a fim de verificar a funcionalidade do sistema e a viabilidade do processo. Os primeiros ensaios foram conduzidos manualmente, utilizando o volante do contraponto para aplicação da força axial, com o mandril acoplado. Foram testados corpos de prova de aço com 6 mm de diâmetro de 60 e 100 mm de comprimento, em versões maciça e vazada.

A força foi aplicada gradualmente, mantendo o contato sob fricção até a fusão superficial e posterior união das peças. As amostras maciças apresentaram boa coalescência e resistência mecânica, validando o funcionamento do sistema e confirmando a adequação dos parâmetros adotados.

Figura 14 - Testes iniciais de soldagem



Fonte: Autor (2025).

Os resultados preliminares confirmaram a viabilidade operacional da máquina adaptada, permitindo o avanço para o desenvolvimento do sistema de aplicação de carga.

3.3.4 Projeto do sistema de aplicação de carga

O sistema de aplicação de carga foi um dos principais pontos da adaptação. Inicialmente, avaliou-se a possibilidade de empregar um macaco hidráulico para a aplicação da força axial.

Foi desenvolvido um protótipo experimental, no qual o macaco seria acoplado ao trilho do torno, atuando diretamente sobre o contraponto. Para medir a carga aplicada, o pistão foi modificado com a instalação de um manômetro, exigindo a furação do corpo e adaptação da passagem de óleo. O processo é mostrado na Figuras 15.

Figura 15 - Desmontagem do cilindro e furo da passagem de óleo



Fonte: Autor (2025).

Com o a passagem de óleo usinada foi possível instalar o manômetro conforme a Figura 15. Para fixação do cilindro ao trilho do torno, foi confeccionada uma base metálica com perfil em U, resultando no sistema mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Sistema de travamento no trilho



Fonte: Autor (2025).

Assim foi montado o sistema inicial de aplicação de carga mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Sistema de aplicação de força hidráulico



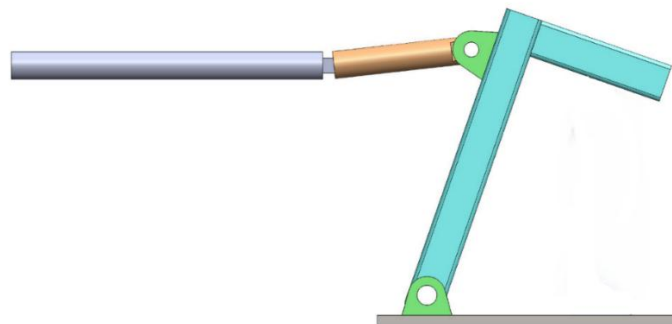
Fonte: Autor (2025).

Nota-se na Figura 18 que o sistema de rosqueamento do contraponto foi retirado, dessa forma o eixo corre livre na peça fazendo o sistema funcionar conforme projetado. Entretanto, nos testes iniciais, o sistema mostrou-se instável, pois o macaco hidráulico apresentava escoamento de fluido, comprometendo a precisão e o controle da força aplicada.

3.3.5 Desenvolvimento do sistema manual de compressão

Diante das limitações do sistema hidráulico, desenvolveu-se um mecanismo manual de compressão projetado no SolidWorks, capaz de aplicar força axial de maneira controlada. O modelo é apresentado na Figura 18.

Figura 18: Projeto de sistema de aplicação de carga



Fonte: Autor (2025).

Dessa forma foi possível fabricar o sistema da Figura 19.

Figura 19 - Sistema de aplicação de carga montado



Fonte: Autor (2025).

3.3.6 Montagem da bancada

Após a fabricação das peças projetadas, o sistema manual de aplicação de carga foi instalado no torno, substituindo o conjunto hidráulico anterior e proporcionando maior estabilidade, precisão e controle durante o processo de soldagem. Foram confeccionados dois acoplamentos metálicos para a fixação da célula de carga entre a haste e o contraponto, posicionando-a no ponto de maior compressão do sistema, de modo a garantir a medição eficiente da força aplicada durante os ensaios, o sistema pode ser verificado na Figura 20.

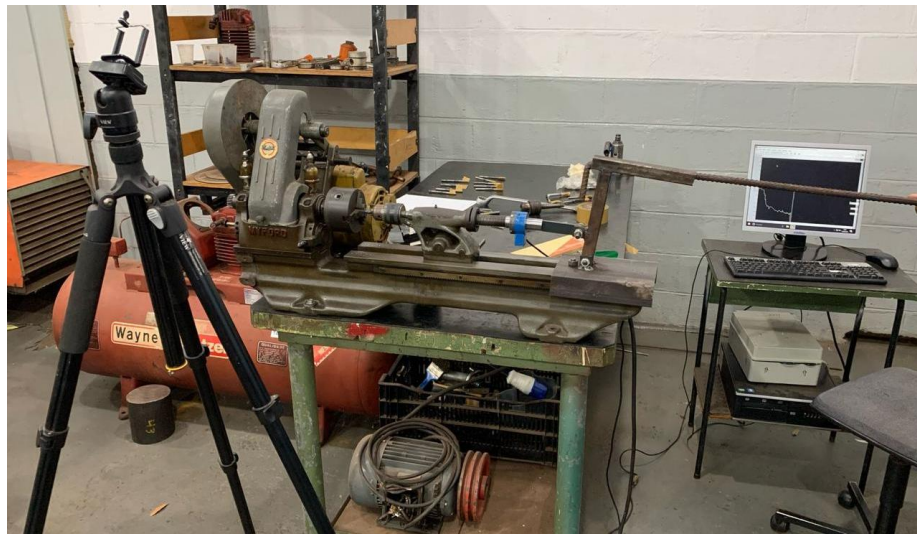
Figura 20 - Sistema de aplicação de carga e aquisição de dados



Fonte: Autor (2025).

Na montagem final da máquina, foi adicionado um vergalhão com extremidade dobrada, utilizado como alavanca de acionamento manual, permitindo maior amplitude e sensibilidade de controle do movimento de compressão. Com todos os componentes devidamente instalados, a máquina foi totalmente montada e configurada para a execução dos ensaios experimentais, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21: Máquina de Soldagem por atrito



Fonte: Autor (2025).

3.4 Execução dos Ensaios de Soldagem

Com o sistema completo e validado, foram realizados os ensaios experimentais de soldagem. As amostras foram fixadas no cabeçote e no mandril do contraponto, devidamente alinhadas, e submetidas a uma rotação de 1484 rpm. A força axial foi aplicada manualmente através do sistema de compressão, sendo monitorada em tempo real pela célula de carga e exibida no software LabVIEW. O processo foi conduzido até o aquecimento adequado da interface, seguido pela fase de forjamento sem rotação, assegurando a união completa das peças. Os resultados obtidos e a análise das juntas soldadas são apresentados no Capítulo 4.

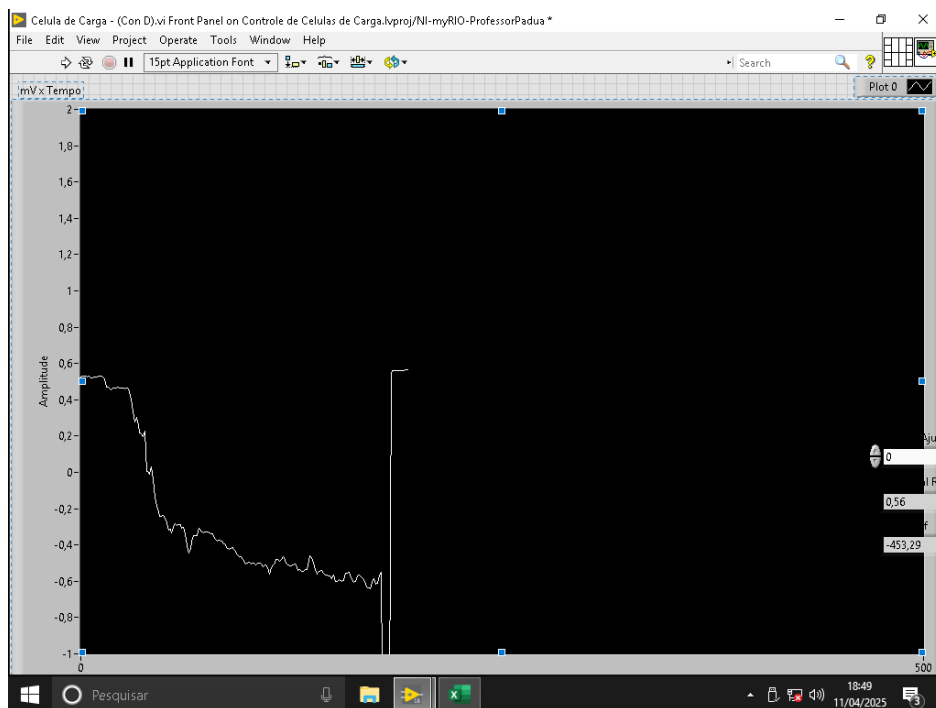
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a realização dos ensaios experimentais de soldagem por atrito rotativa. Os resultados abrangem o comportamento da máquina, o monitoramento das variáveis de processo, a qualidade das juntas produzidas e a comparação dos tipos de geometria de face (plana e cônica), além da análise de desempenho geral do equipamento.

4.1 Comportamento operacional da máquina

Após a conclusão da montagem e calibração do sistema, foram realizados ensaios de verificação funcional. A máquina apresentou operação estável, sem vibrações significativas, e atingiu rotações próximas a 1.484 rpm. O motor apresentou torque suficiente para sustentar a rotação sob carga durante o atrito. A aplicação de força por meio do braço manual projetado mostrou-se precisa e repetível. O uso da célula de carga de 250 kgf e o monitoramento em tempo real via LabVIEW 2018 possibilitaram a coleta confiável das curvas de força em cada soldagem, a Figura 22 exibe o monitoramento do software em tempo real em um dos ensaios.

Figura 22 - Software durante o ensaio plano 5



Fonte: Autor (2025).

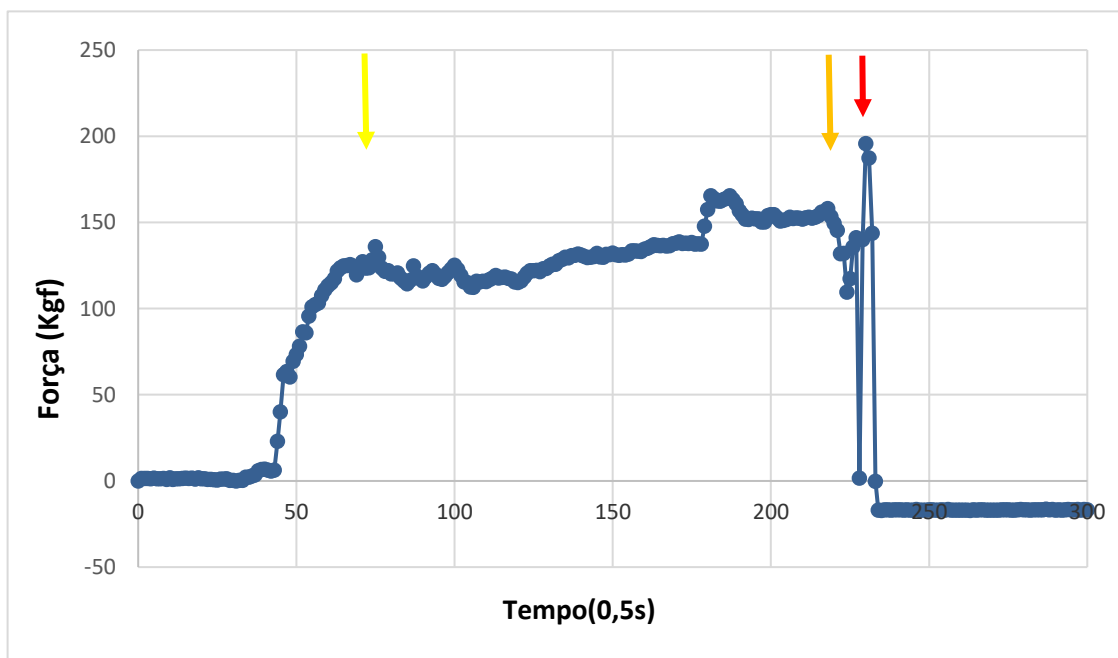
4.2 Comportamento dos ensaios

O sistema de aquisição de dados registrou as curvas de força \times tempo, permitindo observar o comportamento típico da soldagem por atrito em três etapas bem definidas:

- Fase de atrito (fricção) – a força aumenta rapidamente até atingir um valor de equilíbrio, enquanto o calor gerado eleva a temperatura nas superfícies;
- Fase de estabilidade térmica – a força se mantém aproximadamente constante e o material atinge o estado plástico, formando o flash;
- Fase de forjamento – a rotação é interrompida e ocorre o aumento súbito da força, promovendo a união definitiva.

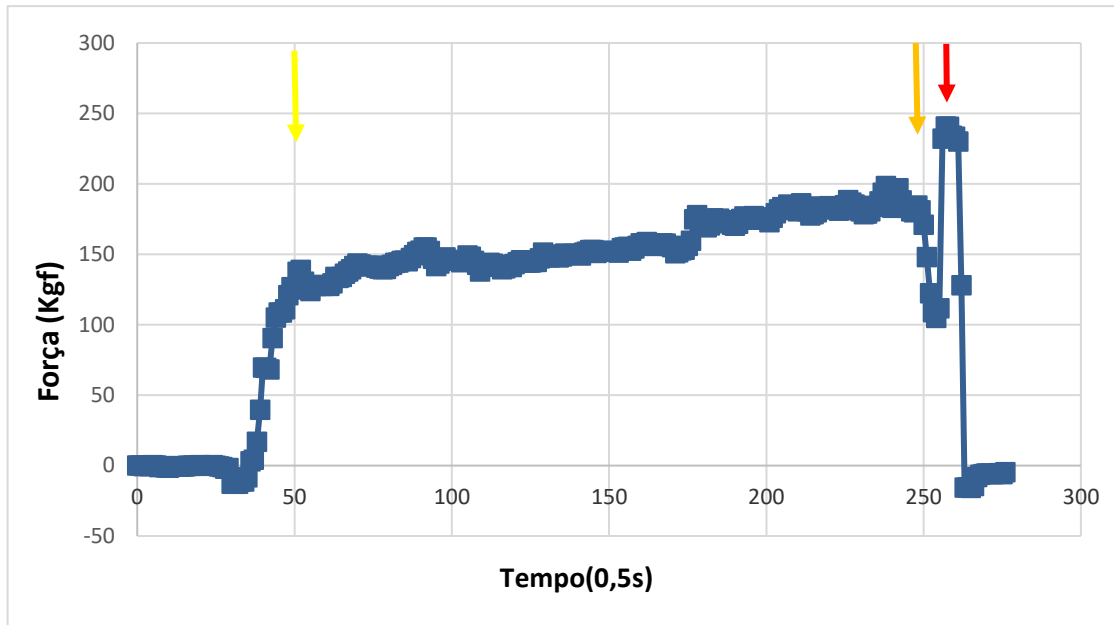
As Figuras 23 a 32 apresentam os gráficos correspondentes às dez soldagens realizadas, indicando a variação da força em função do tempo para cada ensaio.

Figura 23 - Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 1



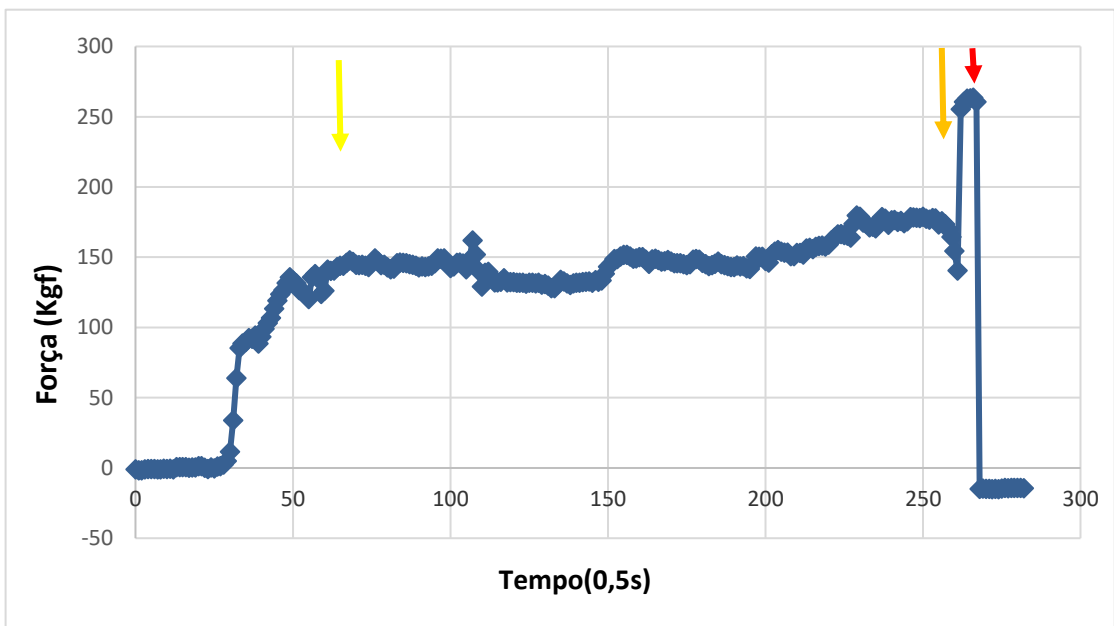
Fonte: Autor (2025).

Figura 24 - Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 2



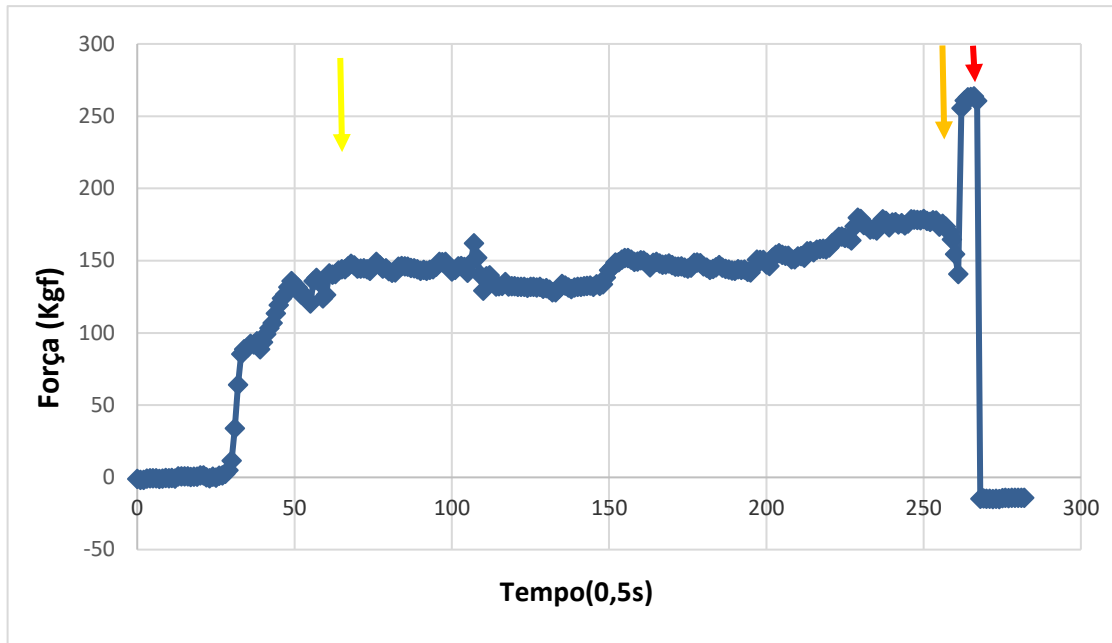
Fonte: Autor (2025).

Figura 25 - Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 3



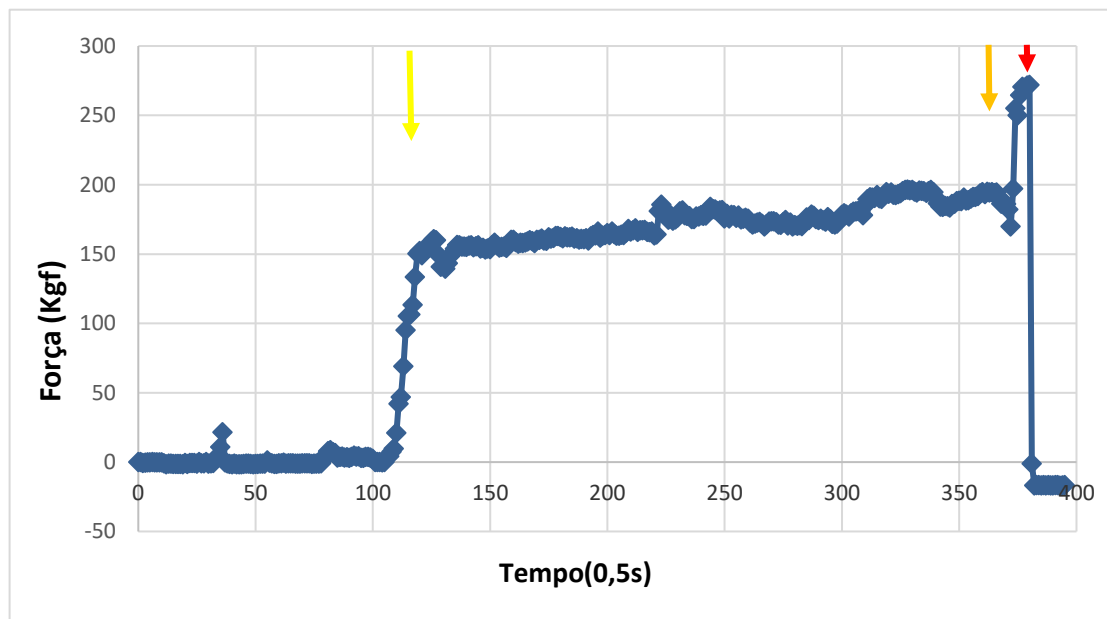
Fonte: Autor (2025).

Figura 26 - Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 4



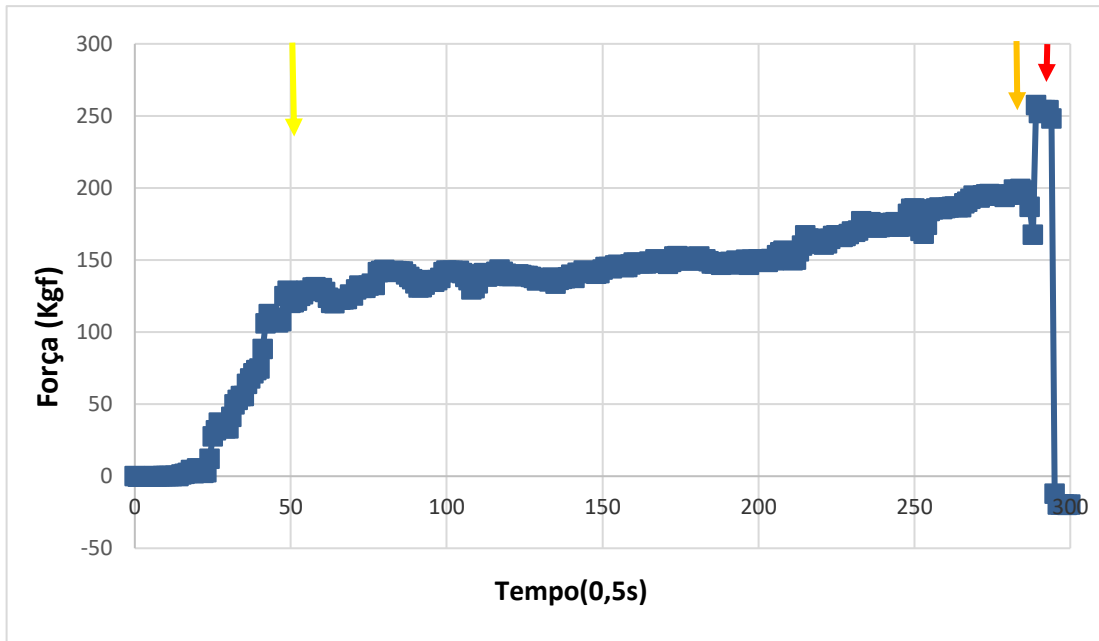
Fonte: Autor (2025).

Figura 27 - Gráfico da força pelo tempo para solda Cônico 5



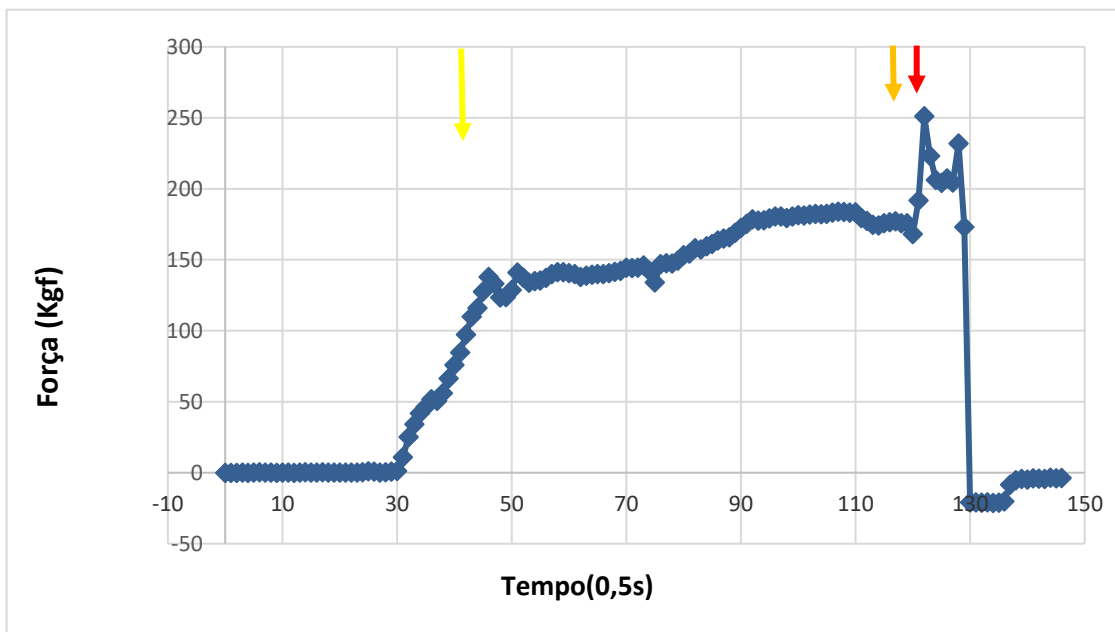
Fonte: Autor (2025).

Figura 28 - Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 1



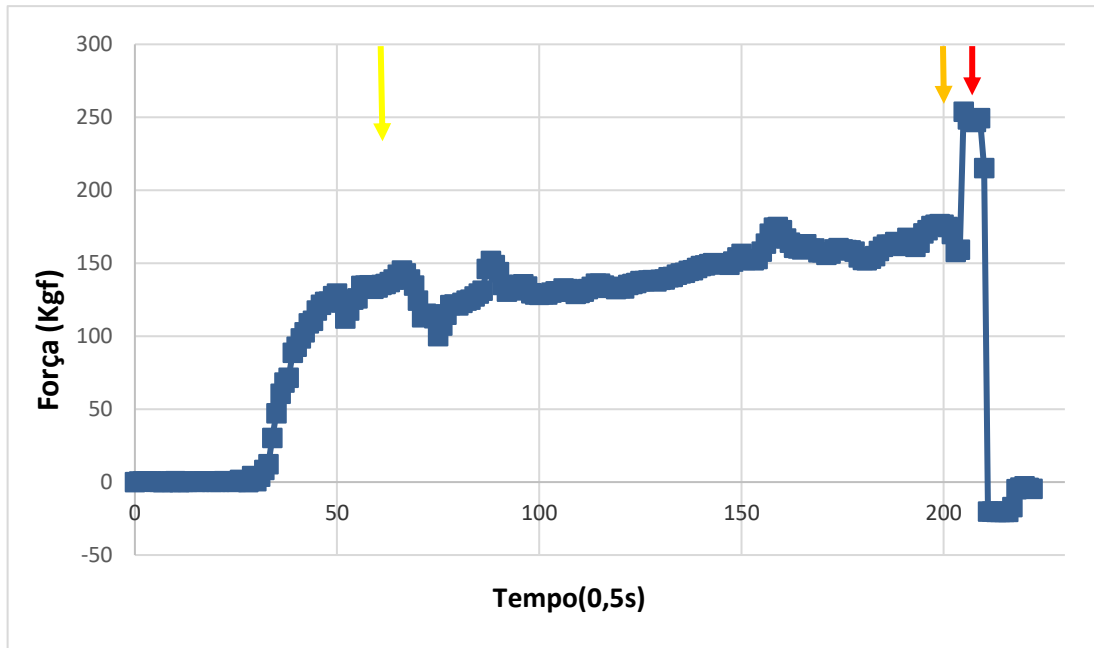
Fonte: Autor (2025).

Figura 29 - Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 2



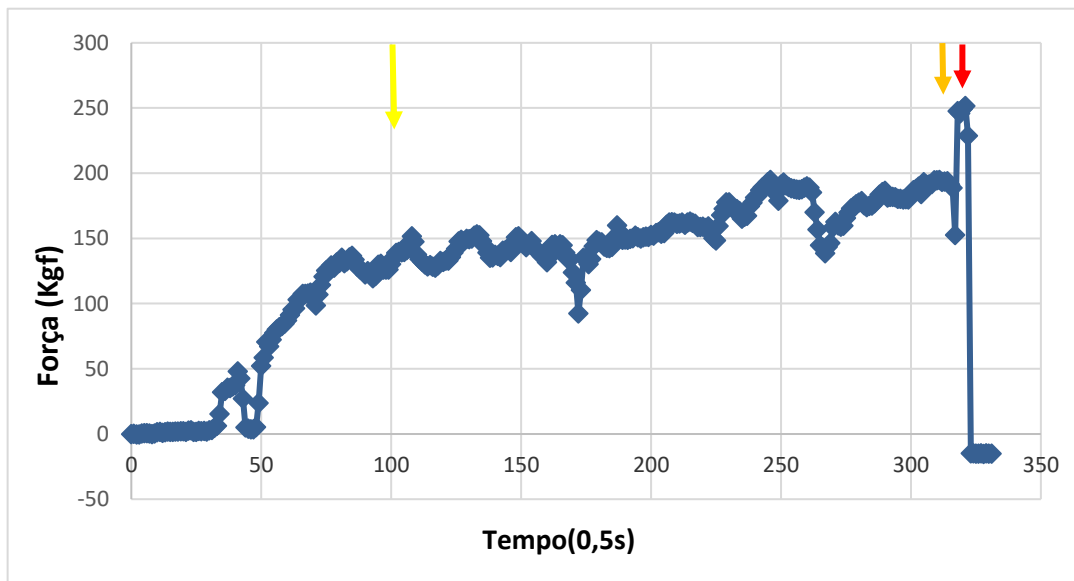
Fonte: Autor (2025).

Figura 30 - Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 3



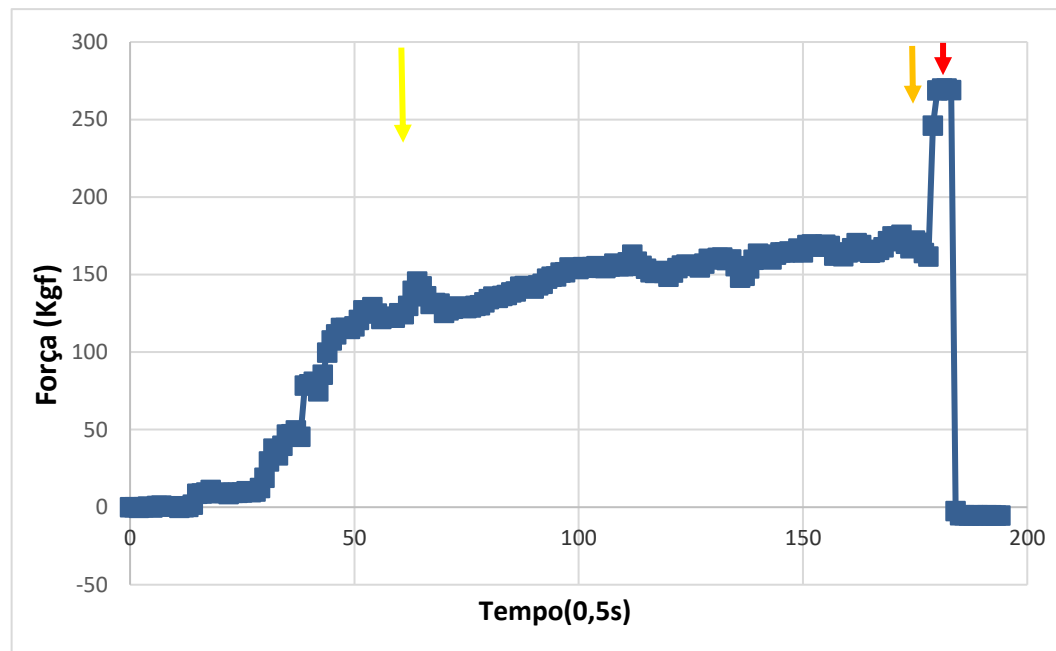
Fonte: Autor (2025).

Figura 31 - Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 4



Fonte: Autor (2025).

Figura 32 - Gráfico da força pelo tempo para solda Plano 5



Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, foi possível observar claramente as três etapas fundamentais do processo de união, registradas tanto nos gráficos de força versus tempo quanto nas imagens capturadas em tempo real. Essas etapas correspondem às transformações termomecânicas e microestruturais superficiais que ocorrem à medida que o calor por atrito é gerado e o material entra em regime de deformação plástica controlada.

a) Fase de atrito inicial (fase de aquecimento por atrito) - Seta amarela nos gráficos

Nesta etapa as superfícies dos corpos de prova entram em contato sob rotação e pressão axial crescente. A força aplicada aumenta rapidamente até atingir um patamar de estabilidade mecânica, enquanto a energia cinética de rotação é convertida em energia térmica devido ao atrito superficial. Nessa fase, a temperatura superficial das amostras aumenta, o suficiente para provocar a oxidação inicial e o aparecimento de coloração azulada, efeito conhecido como "*temper color*", resultante da formação de filmes de óxido de ferro ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$) na superfície do aço. Esse fenômeno indica o início do amolecimento térmico do material e o aumento gradual da ductilidade superficial.

b) Fase de estabilidade térmica e deformação plástica contínua - Seta laranja nos gráficos

Com a manutenção da rotação e da pressão constante, o processo entra em regime termicamente estável. Nessa etapa, o calor gerado por atrito é equilibrado pela dissipação térmica, e a temperatura na interface para aços carbono pode alcançar 700 °C a 850 °C, o que provoca fluência viscosa e escoamento plástico do material na região de contato. O aço passa a apresentar escoamento plástico visível pela formação de rebarbas e expulsão lateral de material plastificado, fenômeno conhecido como flash. Esse comportamento indica que a interface atingiu a faixa de coalescência metalúrgica, caracterizando o início do processo de união.

Visualmente, nessa fase, observa-se o aumento progressivo da coloração para tons alaranjados e avermelhados, indicando a proximidade do ponto de amolecimento total em que o material assume comportamento semissólido.

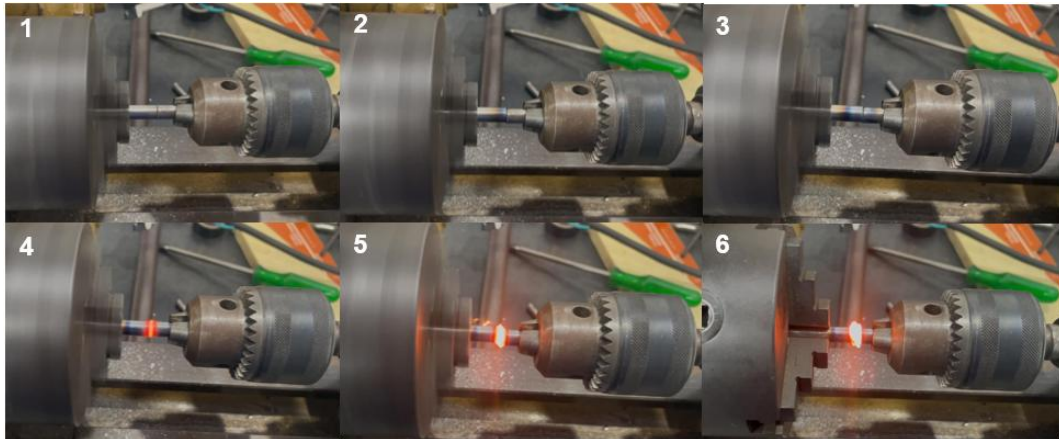
c) Fase de forjamento e consolidação da junta - Seta vermelha nos gráficos

Após a estabilização térmica, a rotação é interrompida, e aplica-se uma carga axial máxima de forjamento. Essa etapa tem duração média de 2 a 4 segundos, e é responsável pela expulsão completa dos óxidos remanescentes e soldagem metalúrgica definitiva entre os corpos de prova. Nessa fase, ocorre a coalescência total das superfícies, sob elevadas pressões e temperatura residual. A temperatura superficial pode atingir níveis entre 900 °C e 1100°C, caracterizando o estado de incandescência intensa, perceptível pelo brilho vermelho-alaranjado das amostras. Nesse ponto, o material encontra-se em regime altamente dúctil, possibilitando a consolidação da junta e garantindo alta integridade metalúrgica.

4.3 Aspectos visuais

Podemos observar na Figura 33 as etapas citadas anteriormente.

Figura 33 – Etapas da soldagem por atrito.



Fonte: Autor (2025).

- 1 - Início do contato e geração inicial de calor por atrito (fase de aquecimento);
- 2 - Fase de atrito contínuo e coloração azulada superficial;
- 3 - Fase de estabilidade térmica e início do escoamento plástico do material
- 4 - Regime de incandescência
- 5 - Regime de incandescência e condição de alta ductilidade
- 6 - Interrupção da rotação e aplicação da força de forjamento

As imagens do processo real corroboram as fases identificadas nos gráficos de força em função do tempo, evidenciando de forma clara as etapas de atrito, estabilidade térmica e forjamento. A correspondência entre os registros experimentais e as observações visuais demonstra a repetibilidade e consistência do processo de soldagem, validando o comportamento termomecânico previsto.

4.4 Análise visual dos corpos de prova

A análise visual dos corpos de prova soldados pode ser vista na Figura 34 a 43.

Figura 34 - Corpos de prova soldados de ponta cônica 1



Fonte: Autor (2025).

Figura 35 - Corpos de prova soldados de ponta cônica 2



Fonte: Autor (2025).

Figura 36 - Corpos de prova soldados de ponta cônica 3



Fonte: Autor (2025).

Figura 37 - Corpos de prova soldados de ponta cônica 4



Fonte: Autor (2025).

Figura 38 - Corpos de prova soldados de ponta cônica 5



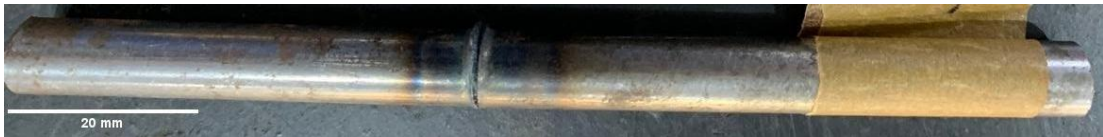
Fonte: Autor (2025).

Figura 39 - Corpos de prova soldados de ponta plana 1



Fonte: Autor (2025).

Figura 40 - Corpos de prova soldados de ponta plana 2



Fonte: Autor (2025).

Figura 41 - Corpos de prova soldados de ponta plana 3



Fonte: Autor (2025).

Figura 42 - Corpos de prova soldados de ponta plana 4



Fonte: Autor (2025).

Figura 43 - Corpos de prova soldados de ponta plana 5



Fonte: Autor (2025).

Observa-se que todas as soldas apresentaram formação clara de *flash*, característica típica da soldagem por fricção rotativa e indicativa de que houve escoamento plástico eficiente

do material aquecido, confirmando que a máquina desenvolvida foi capaz de gerar energia térmica e pressão suficientes para consolidar a junta.

Além disso, nota-se uma redução do comprimento final dos corpos soldados, fenômeno esperado em processos de atrito devido ao colapso progressivo do material na zona de união durante o forjamento. Essa diminuição pode ser confirmada quantitativamente pelos dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Diferença de comprimento

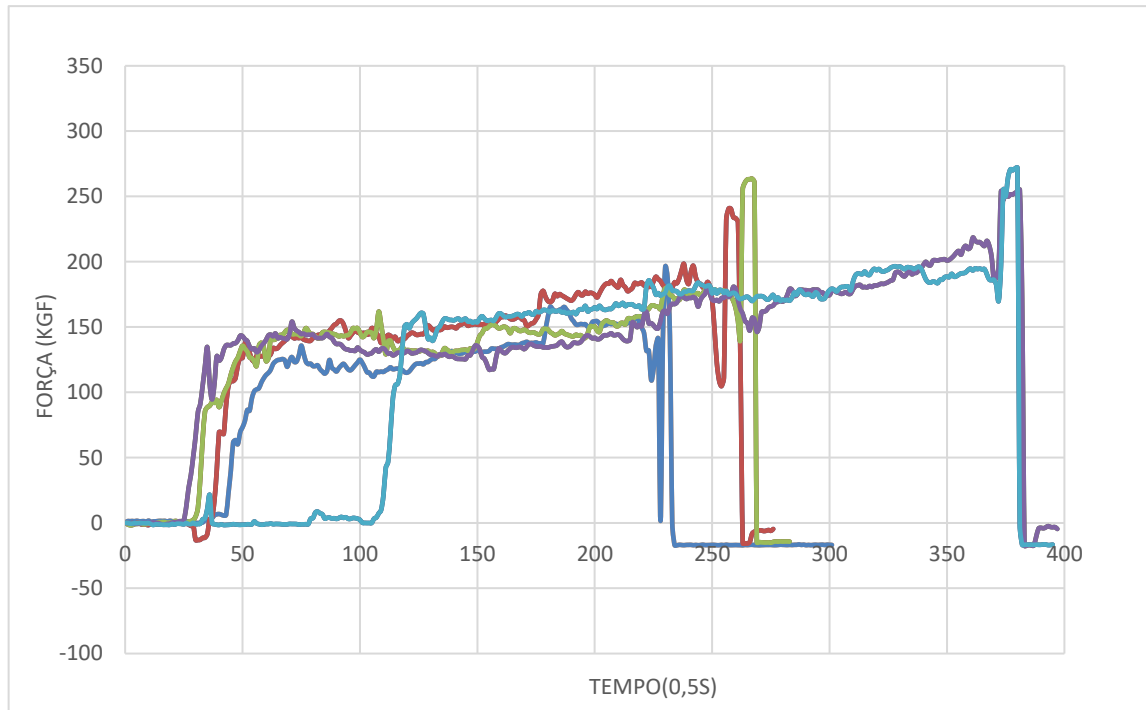
Cônico (mm)	Plano (mm)
107,65	113,75
110,25	113,8
109,4	113,2
108,8	113
109,3	112,85

Fonte: Autor (2025).

4.5 Parâmetros obtidos

Compilando todas as curvas obtidas nos ensaios cônicos, Figura 50, foi possível extrair os parâmetros médios necessários para a padronização do processo de soldagem por fricção na máquina desenvolvida. A partir da análise dos perfis de força ao longo do tempo, identificaram-se as três etapas fundamentais do processo, contato e pré-carga, fricção, e forjamento, permitindo determinar os tempos característicos e os níveis de força associados a cada fase. Os valores médios obtidos nos cinco testes cônicos são apresentados na Tabela 4.

Figura 44 - Curvas dos ensaios cônicos



Fonte: Autor (2025).

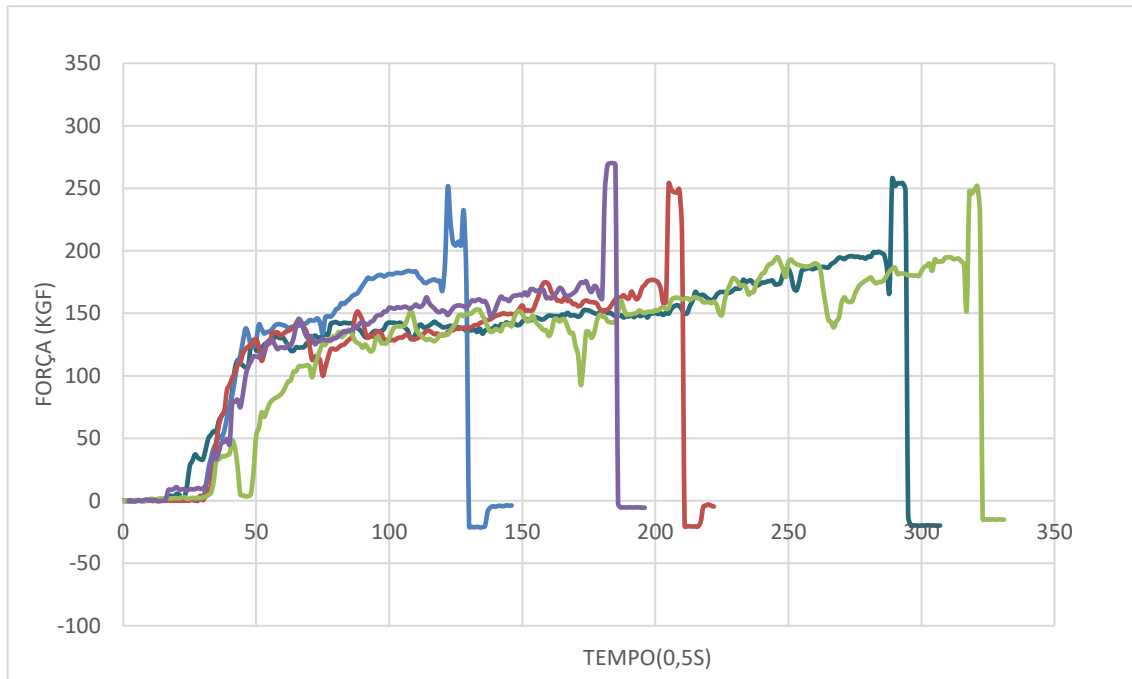
Tabela 4 - Valores médio extraídos ensaios cônicos

Tempo fricção (s)	Força de fricção (Kgf)	Força de forjamento (Kgf)	Tempo forjamento (s)
126,4	150,7	250	3

Fonte: Autor (2025).

Da mesma forma, todas as curvas referentes aos ensaios planos, Figura 51, foram tratadas e analisadas de forma equivalente, possibilitando a extração dos parâmetros médios para esse segundo tipo de geometria. Os resultados consolidados são apresentados na Tabela 5.

Figura 45 - Curvas ensaios planos



Fonte: Autor 2025.

Tabela 5 - Valores médio extraídos ensaios planos

Tempo fricção (s)	Força de fricção (Kgf)	Força de forjamento (Kgf)	Tempo forjamento (s)
73,2	123,04	250	2

Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, os valores médios obtidos representam uma referência confiável para a definição dos parâmetros operacionais da máquina, assegurando que futuras soldagens produzidas com esses ajustes tendam a apresentar boa qualidade e estabilidade dimensional.

4.6 Ensaios mecânicos de tração

Após a soldagem, as amostras foram usinadas em corpos de prova normalizados e submetidas a ensaio de tração conforme ASTM E8M (2004). Os resultados médios estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração

Tipo	Material	Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Observação
Ponta plana	SAE 1020/1045	380	9,2	Ruptura fora da zona de solda
Ponta cônica	SAE 1020/1045	345	8,4	Ruptura próxima à interface
Material base	SAE 1020	420	12	—

Fonte: Autor (2025).

Os resultados demonstram que as juntas soldadas atingiram aproximadamente 90% da resistência do material base, validando o desempenho da máquina. As soldas planas apresentaram ruptura fora da interface de soldagem, o que indica soldagem metalurgicamente coesa e bem consolidada.

4.7 Análise comparativa entre geometrias

A comparação entre os dois tipos de face evidencia que a geometria plana é mais adequada para o sistema desenvolvido, pois proporciona:

- Maior estabilidade na aplicação manual de carga;
- Menor dispersão das forças medidas;
- Rebarbas mais regulares;
- Resistência mecânica superior.

As juntas cônicas, embora apresentem maior área de contato no final da fricção, demandam controle axial mais rigoroso e podem gerar desalinhamentos durante o forjamento, o que justifica a leve queda de resistência observada, do maior tempo de fricção e maior perda de comprimento.

4.8 Avaliação geral do sistema de soldagem

O sistema de aplicação de carga manual, embora simples, demonstrou ser eficaz para estudos experimentais. O monitoramento via LabVIEW garantiu boa repetibilidade e permitiu a validação do projeto mecânico da máquina. O desempenho obtido demonstra que, mesmo com um sistema de força manual, é possível alcançar resultados consistentes e comparáveis aos reportados na literatura para sistemas automatizados de baixa potência.

4.9 Discussão técnica dos resultados

Os dados obtidos permitem concluir que o comportamento térmico e mecânico observado é compatível com o esperado para soldagem por atrito convencional em aços de baixa e média liga. A análise das curvas Força \times Tempo e dos resultados de tração indicam que:

- O torque aplicado é suficiente para gerar a energia necessária à plastificação local;
- O equilíbrio entre rotação e força de compressão foi atingido de forma adequada;
- As perdas térmicas foram minimizadas pela geometria do conjunto e pelo contato eficiente;
- A efetividade do equipamento foi validada não apenas pelos resultados mecânicos, mas também pela consistência dos parâmetros experimentais, consolidando o sucesso do projeto e a funcionalidade da máquina desenvolvida.

5 CONCLUSÃO

A adaptação do torno Myford ML7 foi tecnicamente viável e funcional, resultando em um equipamento capaz de realizar soldagens por atrito contínuas de maneira segura, reprodutível e com controle adequado das variáveis de processo. O sistema de aplicação de carga manual, composto por um braço mecânico, célula de carga de 250 kgf e monitoramento via LabVIEW, apresentou boa precisão e estabilidade, permitindo o registro confiável das curvas Força \times Tempo durante todo o processo.

As curvas experimentais obtidas evidenciaram o comportamento típico do processo de soldagem por atrito:

- Aumento progressivo da força na fase inicial de atrito;
- Estabilização durante a fase plástica;
- Pico de compressão no momento do forjamento.

Essas características confirmam que o sistema mecânico e de controle projetado funcionou conforme o esperado.

As juntas soldadas de ponta plana e ponta cônica apresentaram boa qualidade metalúrgica, com formação de flash simétrico e rebarba contínua, evidenciando que a energia de atrito foi suficiente para promover a coalescência dos materiais.

Nos ensaios de tração, as juntas planas alcançaram resistência média de 380 MPa, equivalente a 90% da resistência do material base, validando o desempenho da máquina e a efetividade do processo.

A comparação entre as geometrias demonstrou que as juntas planas apresentaram maior estabilidade e resistência mecânica, enquanto as cônicas, embora tenham favorecido melhor dissipação térmica, mostraram maior sensibilidade à variação de força axial e alinhamento.

A máquina construída demonstrou excelente custo-benefício e potencial acadêmico, podendo ser empregada como ferramenta experimental em estudos sobre processos de soldagem no estado sólido, controle térmico e instrumentação de ensaios.

O sistema de transmissão e rotação, composto pelo motor de 1 CV e 1.750 rpm e pela polia de 90 mm, foi suficiente para atingir a rotação ideal (≈ 1.400 rpm) e garantir torque adequado ao processo de atrito.

O sistema de aquisição de dados (LabVIEW 2018) possibilitou o registro contínuo e preciso da força axial, com variação inferior a 5% entre os ensaios, um desempenho excelente para um sistema manual.

O conjunto mecânico e elétrico da máquina mostrou-se seguro e estável, com temperatura do motor e vibração dentro de limites aceitáveis durante todo o processo.

Em comparação à literatura, os resultados obtidos estão em concordância com os valores apresentados por Pinheiro (2021) e Tavares (2017), tanto em termos de resistência quanto de comportamento das curvas de força. Esses dados reforçam que o equipamento projetado tem capacidade de reproduzir fenômenos reais do processo de soldagem por atrito convencional, o que o torna um protótipo validado.

Sugestões e trabalhos futuros

Com base na experiência adquirida e nos resultados obtidos, recomenda-se a continuidade do estudo com foco nos seguintes aprimoramentos:

- Automatização da aplicação de carga, substituindo o acionamento manual por um sistema eletromecânico (servo ou hidráulico) controlado via LabVIEW;
- Integração de sensores de temperatura na interface de soldagem, para correlação térmica entre o calor gerado e a força aplicada;
- Desenvolvimento de controle de rotação variável, possibilitando estudar regimes de fricção distintos e otimizar a eficiência energética;
- Análise metalográfica e microestrutural das zonas afetadas pelo calor, para validação metalúrgica completa;
- Testes com diferentes ligas e diâmetros de corpo de prova, ampliando o escopo de aplicação do equipamento.

REFERÊNCIAS

AKINLABI, E. T.; MAHAMOOD, R. M. **Solid state welding: friction and friction stir welding processes**. 1. ed. Cham: Springer International Publishing, 2020.

AMERICAN FRICTION WELDING. **The Friction Welding Process**. Disponível em: <https://teamafw.com/friction-welding-process/>. Acesso em: 2 set. 2025.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Welding Handbook: Welding Processes**. 8. ed. Miami: AWS, 1998.

ANDRADE, L. V. de. **Projeto e construção de máquina de solda por atrito e análise de soldas dissimilares**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia — Ciência e Tecnologia dos Materiais) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: volume 1: properties and selection irons, steels and high-performance alloys**. 10. ed. Materials Park: ASM International, 1990.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: volume 6: welding, brazing and soldering**. 10. ed. Materials Park: ASM International, 1993.

DAWOOD, A. B. *et al.* **Thermal Model of Rotary Friction Welding for Similar and Dissimilar Metals**. *Metals*, Basel, v. 7, n. 6, e224, 2017. DOI: 10.3390/met7060224.

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. **Teoria e projeto de medições mecânicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MAALEKIAN, M. Friction welding — Critical assessment of literature. **Science and Technology of Welding and Joining**, London, v. 12, n. 8, p. 738–759, 2007. DOI: 10.1179/174329307X249333.

MAALEKIAN, M.; KOZESCHNIK, E.; BRANTNER, H. P.; CERJAK, H. Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars. **Acta Materialia**, Oxford, v. 56, p. 2843-2855, 2008. DOI: 10.1016/j.actamat.2008.02.016.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P.; BRACARENSE, A. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, 2011. (Notas de aula).

MYFORD ENGINEERING CO. LTD. **Myford ML7 Instruction Manual**. Nottingham: Myford Ltd., 1952.

PINHEIRO, M. A. **Influência da forma de contato inicial e preaquecimento na camada intermetálica no processo de soldagem por fricção de materiais dissimilares**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

PIRES, R. R. **Efeitos da geometria, da força axial e da rotação no reparo por atrito**. 2007. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SAHIN, A. Z. *et al.* Analysis of the friction welding process in relation to the welding of copper and steel bars. **Journal of Materials Processing Technology**, Lausanne, v. 82, p. 127–136, 1998. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/710763022/Analysis-of-the-Friction-Welding-Process-in-Relation-to-the-Welding>. Acesso em: 2 set. 2025.

SOUSA, D. J. de. **Estudo da união de materiais similares e dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção (FW)**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

TAVARES, S. S. **Soldagem por fricção convencional entre a liga de alumínio 6351 T6 e o aço SAE 1020 assistida por indução.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

THE WELDING INSTITUTE (TWI). **Rotary Friction Welding – Job Knowledge 148.** Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/rotary-friction-welding-148>. Acesso em: 3 set. 2025.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia.** São Paulo: Edgard Blücher, 1992.