

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Luis Americo Peres Pereira

Modelagem e otimização da soldagem por fricção (FSW) de uma junta similar de alumínio utilizando como técnica de busca o algoritmo genético.

Modeling and optimization of friction welding (FSW) of a similar aluminum joint using the genetic algorithm as a search technique.

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Professor José Roberto Moraes d'Almeida
Coorientador: MSc Ayrton Alef Castanheira Pereira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2020

AGRADECIMENTOS

A realização do sonho da graduação de longe é conquista apenas pessoal, trata-se de uma conquista familiar. Ao longo destes sete anos foram muitos os desafios enfrentados em conjunto, em parceria com as pessoas mais importantes da minha vida. Certamente não citarei todos que merecem estar aqui nestas poucas linhas de agradecimento.

Primeiramente agradeço a Deus por abençoar minha família e me permitir chegar até aqui.

Agradecimento mais que especial aos meus pais, Américo e Denise que sempre foram os pilares de sustentação para todas as realizações da minha vida.

Agradecimento ao incentivo e confiança de minha querida irmã, Chris, um exemplo de estudante universitária, mestranda e agora Doutora em História. Com certeza é um grande orgulho para a família.

Não poderia deixar de citar meu grande Tio Diamantino, que durante quatro anos e meio foi um grande parceiro, conselheiro, companhia nos momentos de maior tédio e impaciência, a pessoa que abriu as portas da sua casa e me recebeu como um filho.

Também não poderia deixar de citar as minhas avós Rosita e Glória, e ao meu avô Diamantino, que sempre foram meus exemplos de dignidade, respeito e fonte de inspiração.

Ao meu orientador, José Roberto d'Almeida, agradeço profundamente pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao meu coorientador, Ayrton Pereira, quero dizer que nada seria possível sem sua parceria e acompanhamento. Obrigado.

Para finalizar esta pequena homenagem, agradeço em especial minha namorada, Michelle, a pessoa que está ao meu lado dia e noite, seja fisicamente ou em pensamento, a grande fonte de energia para a concretização dos meus sonhos. Esteve comigo desde o início da carreira profissional, mesmo não fazendo ideia de como me ajudar, mas com a certeza de que suas palavras me acalmavam e colocavam no rumo novamente. Minha parceira para a vida toda.

RESUMO

Modelagem e otimização da soldagem por fricção (FSW) de uma junta similar de alumínio utilizando como técnica de busca o algoritmo genético.

Este trabalho teve por objetivo analisar os resultados de um experimento de soldagem por fricção, em inglês friction stir welding (FSW), e descrever um modelo otimizado e representativo das variáveis de saída de acordo com cada variável de entrada do processo de solda. A determinação da melhor combinação de parâmetros de entrada garante a boa qualidade da solda, atendendo às especificações técnicas do processo. Isso foi possível a partir da utilização da metodologia de superfície de resposta, amplamente usada no âmbito industrial e de pesquisa, quando os processos que envolvem mais de uma variável de entrada, demandam alta qualidade e confiabilidade dos resultados.

Para estimar o modelo de segunda ordem mais adequado, algoritmo genético foi usado para a busca da solução ótima, sendo este uma alternativa mais robusta quanto ao encontro do mínimo global. O desenvolvimento teve como base a utilização do MATLAB, versão R2020b, onde foram estimadas as equações dos modelos e construídos os gráficos de superfície e de contorno. A validação da modelagem e otimização passou pelo uso da análise de variância (ANOVA), sendo ainda verificados o coeficiente de determinação (R^2), os gráficos de regressão e de resíduo. Os resultados mostraram comportamentos interessantes relacionados à combinação das variáveis de entrada – rotação da ferramenta e velocidade de soldagem - principalmente quando analisadas no início do processo e ao longo de todo o percurso de soldagem.

Após estimar os modelos para as respostas de entrada e percurso da ferramenta, foi possível realizar a sobreposição das curvas de contorno e analisar em quais regiões ocorria a maximização dos esforços mecânicos. Dessa forma, podemos indicar como a intensidade da rotação e da velocidade influenciam em cada etapa, o que possibilita determinar a melhor faixa de trabalho para cada fase do processo de soldagem, reduzindo os efeitos das forças resultantes. Isso é importante para evitar

desgaste precoce da ferramenta, aumento da eficiência e também controlar os parâmetros da qualidade da solda.

Palavras-chave: Solda por fricção. Metodologia de superfície de resposta. Algoritmo genético.

ABSTRACT

Modeling and optimization of friction welding (FSW) of a similar aluminum joint using the genetic algorithm as a search technique.

This paper is aimed at analyzing the results of a friction welding experiment, in English friction stir welding (FSW), and to describe an optimized and representative model of the output variables according to each input variable of the welding process. The determination of the best combination of input parameters guarantees the good quality of the weld, meeting the technical specifications of the process. This was possible through the use of the response surface methodology, widely used in the industrial and research fields, when processes involving more than one input variable, demand high quality and reliability of the results.

To estimate the most appropriate second-order model, a genetic algorithm was used to search for the optimal solution, which is a more robust alternative in terms of meeting the global minimum. The development was based on the use of MATLAB, version R2020b, where the model equations were estimated, and the surface and contour graphics were constructed. The validation of the modeling and optimization went through the use of analysis of variance (ANOVA), and the determination coefficient (R^2), the regression and residue graphs were also verified. The results showed interesting behaviors related to the combination of input variables - tool rotation and welding speed - especially when analyzed at the beginning of the process and along the entire welding path.

After estimating the models for the tool's input and path responses, it was possible to superimpose the contour curves and analyze in which regions the maximum mechanical stress occurred. In this way, we can indicate how the intensity of rotation and speed influence each step, which makes it possible to determine the best working range for each phase of the welding process, reducing the effects of the resulting forces. This is important to avoid premature tool wear, increase efficiency and to control weld quality parameters.

Key-words: Friction Stir Welding. Response Surface Methodology. Genetic Algorithm.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Soldagem por fricção FSW	9
2.1.1 Descrição geral	9
2.1.2 Resultados anteriores	11
2.2 Modelagem e otimização de processos	12
2.2.1 Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)	12
2.2.2 Algoritmo Genético (AG)	13
2.2.3 Ferramentas estatísticas para a validação de modelos	14
3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 Material base	16
3.2 Equipamento e variáveis de estudo	16
3.3 Modelagem e otimização do processo de soldagem por fricção	18
3.4 Parâmetros do modelo estimado aplicados no MATLAB	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1 Torque de entrada	23
4.2 Torque no percurso	26
4.3 Força axial máxima (entrada)	29
4.4 Força axial no percurso	32
4.5 Força de soldagem na entrada	35
4.6 Força de soldagem no percurso	38
4.7 Força transversal na entrada	41
4.8 Força transversal no percurso	44
4.9 Sobreposição das curvas de contorno	47
5 CONCLUSÃO	49
Referências Bibliográficas	51
ANEXO A – TABELA TESTE F	53

Lista de figuras

Figura 1 – Curva de Regressão – T entrada	21
Figura 2 – Gráfico de Resíduo – T entrada	24
Figura 3 – Superfície de Resposta – T entrada	25
Figura 4 – Curvas de Contorno – T entrada	25
Figura 5 – Curva de Regressão – T percurso	27
Figura 6 – Gráfico de Resíduo – T percurso	27
Figura 7 – Superfície de Resposta – T percurso	28
Figura 8 – Curvas de Contorno – T percurso	28
Figura 9 – Curva de Regressão – F Axial Máx	29
Figura 10 – Gráfico de Resíduo – F Axial Máx	30
Figura 11 – Superfície de Resposta – F Axial Máx	31
Figura 12 – Curvas de Contorno – F Axial Máx	31
Figura 13 – Curva de Regressão – F Axial Percurso	32
Figura 14 – Gráfico de Resíduo – F Axial Percurso	33
Figura 15 – Superfície de Resposta – F Axial Percurso	34
Figura 16 – Curvas de Contorno – F Axial Percurso	34
Figura 17 – Curva de Regressão – Soldagem Entrada	35
Figura 18 – Gráfico de Resíduo – Soldagem Entrada	36
Figura 19 – Superfície de Resposta – Soldagem Entrada	37
Figura 20 – Curvas de Contorno – Soldagem Entrada	37
Figura 21 – Curva de Regressão – Soldagem Percurso	38
Figura 22 – Gráfico de Resíduo – Soldagem Percurso	39
Figura 23 – Superfície de Resposta – Soldagem Percurso	40
Figura 24 – Curvas de Contorno – Soldagem Percurso	40
Figura 25 – Curva de Regressão – F Transversal Entrada	41
Figura 26 – Gráfico de Resíduo – F Transversal Entrada	42
Figura 27 – Superfície de Resposta – F Transversal Entrada	43
Figura 28 – Curvas de Contorno – F Transversal Entrada	43
Figura 29 – Curva de Regressão – F Transversal Percurso	44
Figura 30 – Gráfico de Resíduo – F Transversal Percurso	45
Figura 31 – Superfície de Resposta – F Transversal Percurso	46
Figura 32 – Curvas de Contorno – F Transversal Percurso	46
Figura 33 – Sobreposição das curvas de contorno das respostas de entrada	47
Figura 34 – Sobreposição das curvas de contorno das respostas de percurso	48
Figura 35 – Sobreposição das curvas de contorno das respostas de percurso, (com exceção de F x percurso)	49

Lista de tabelas

Tabela 1. Composição química do alumínio série 5000, 5052-H34	16
Tabela 2. Propriedades mecânicas do alumínio série 5000, 5052-H34	16
Tabela 3. Valores experimentais e valores gerados por simulação (entrada)	22
Tabela 4. Valores experimentais e valores gerados por simulação (percurso)	22
Tabela 5. Análise de Variância para T entrada	23
Tabela 6. Análise de Variância para T percurso	26
Tabela 7. Análise de Variância para Força Axial Máxima	29
Tabela 8. Análise de Variância para Força Axial no Percurso	32
Tabela 9. Análise de Variância para Força de Soldagem na Entrada	35
Tabela 10. Análise de Variância para Força de Soldagem no Percurso	38
Tabela 11. Análise de Variância para Força Transversal de entrada	41
Tabela 12. Análise de Variância para Força Transversal de percurso	44
Tabela 13. F-teste para ANOVA	53

1 Introdução

A história da indústria da aviação é marcada pela busca incessante do desenvolvimento de materiais e técnicas que reduzam cada vez mais os custos relacionados ao consumo de combustível, e produção de peças ou estruturas cada vez mais leves e que garantam confiabilidade quanto às solicitações durante a operação. Da mesma forma, a busca por melhores materiais também ocorre na indústria da eletrônica, que exige cada vez mais as menores tolerâncias dimensionais das partes que compõem os aparelhos ou dispositivos. Dentro desse contexto, destacam-se a utilização de técnicas que garantam a fabricação de peças e estruturas que atendam às necessidades e, principalmente, a confiabilidade exigida por essas indústrias. Este presente trabalho trata de um desses processos, conhecido como Friction Stir Welding (FSW) ou soldagem por fricção (agitação). Nessa técnica, tanto para peças de alumínio (como o caso do presente trabalho), como para compósitos e outros materiais mais específicos para as indústrias citadas, a junção de duas peças é realizada por meio da soldagem por fricção, onde ocorre amolecimento local ao redor da ferramenta de soldagem, devido ao aumento da temperatura da peça (deformação plástica), provocada pela rotação. Ao passo que a ferramenta percorre a linha de junção, as peças se misturam e são forjadas, configurando a solda por FSW.

O problema da utilização em larga escala se dá pelas dificuldades encontradas durante a fabricação de materiais com uso de FSW. Isso ocorre porque existe uma limitação em garantir grande eficiência na confiabilidade dos processos de solda. Os principais desafios ocorrem durante o controle dos parâmetros e suas janelas de atuação, que levam em consideração o material, tais como: parâmetros de trabalho da máquina, tipo de ferramenta, dimensionamento das peças soldadas, dentre outros.

Assim, este trabalho visa aprimorar os processos que envolvam o método FSW, determinando como os principais parâmetros de processo

influenciam nas diferentes respostas colhidas durante a soldagem, possibilitando, portanto, maior controle sobre a qualidade da junta soldada. Os principais objetivos do presente trabalho perpassam pelo entendimento dos efeitos das principais variáveis de processo sobre as diferentes respostas colhidas durante a soldagem, da interação entre as variáveis de processo e da condição ótima para maximização/minimização de um conjunto de respostas desejado.

De forma a modelar e otimizar o processo de soldagem por fricção, a metodologia de superfície de resposta foi considerada. A rotação da ferramenta e a velocidade de soldagem foram estabelecidas como as principais variáveis de processo, sendo a força axial (F_z), força transversal (F_x), força de soldagem (F_y) e o torque, as principais respostas colhidas na entrada e durante o percurso da ferramenta ao longo do processo de soldagem. Um modelo quadrático completo, i. e., incluídos os coeficientes de interação, foi estimado para cada resposta colhida. Devido a sua robustez, o algoritmo genético foi usado como método de busca para a solução ótima. A validação dos modelos estimados foi feita por meio de conceitos estatísticos. A investigação da adequação dos modelos, assim como a análise dos resultados, foi embasada em ferramentas estatísticas, como a análise de variância (ANOVA), o coeficiente de determinação (R^2), o gráfico de regressão e o gráfico de resíduos.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Soldagem por Fricção FSW

2.1.1 Descrição geral

Desenvolvido na década de 1990, na Inglaterra, o processo de soldagem por fricção foi uma das inovações tecnológicas mais importantes na área da metalurgia da soldagem. Em contraste com as técnicas de soldagem convencionais, o processo FSW não requer material de enchimento, gás ou outros consumíveis, acontece a baixa temperatura, no estado sólido dos metais, abaixo do seu ponto de fusão [7].

Por não envolver fusão e solidificação, a solda resultante oferece diversas vantagens sobre àquelas obtidas por metodologias a arco tradicionais, tais como: melhor retenção das propriedades mecânicas, menores distorções e tensões residuais, bem como menor quantidade de defeitos. Não gera gases nocivos, sem escória, sem respingos e com pouco ruído. Assim, o processo contribui ativamente para um melhor ambiente de trabalho, ao mesmo tempo em que aumenta a produtividade.

A FSW abre novas áreas na tecnologia de soldagem. Soldas rápidas e de alta qualidade de ligas de alumínio, bem como cobre e magnésio que, tradicionalmente consideradas inviáveis, são agora possíveis.

O método foi utilizado comercialmente, pela primeira vez, no ano de 1997, pela indústria naval. Uma empresa norueguesa realizava soldas por fricção em painéis de alumínio com cerca de 6 m² de área superficial, com espessura de 3,15 mm. No ano de 1999, a empresa Boeing investiu 15 milhões de dólares na soldagem por FSW do tanque de combustível do foguete de lançamento Delta (POTOMATI, 2006).

O processo de soldagem por fricção (FSW) é baseado em uma ferramenta rotativa com perfil característico, não consumível, composta de uma base em formato cilíndrico denominada *shoulder* (ombro), que possui em sua extremidade um pino protuberante de perfil especial, o qual penetra lentamente na linha da junta realizando um furo na peça. O calor gerado pelo atrito da ferramenta devido à alta rotação faz com que o material base tenha sua ductilidade aumentada e escoe no sentido do centro da ferramenta causando, assim, a mistura mecânica, sendo o ombro da mesma responsável pelo forjamento final deste material já em resfriamento.

Durante a soldagem, três zonas diferentes são geradas: o cordão de solda ou *nugget*, a zona “termomecanicamente” afetada (*thermomechanically affected zone* - TMAZ) e a zona termicamente afetada (*heat affected zone* - HAZ). A primeira e a terceira são características de qualquer processo de soldagem envolvendo fluxo de calor, enquanto a segunda é criada na região de contato das peças com

o ombro rotatório da ferramenta que exerce a pressão de forjamento normal sobre elas, sem, no entanto, penetrá-las. Na FSW os aspectos que governam a qualidade da soldagem são a geração de calor no material amolecido e o fluxo de metal em torno do eixo do pino da ferramenta giratória [10].

O grande desafio do processo está em aperfeiçoar os parâmetros do equipamento que realiza a soldagem, juntamente com um perfil satisfatório da ferramenta. Estes fatores são dependentes uns dos outros, além de influenciarem na geração de calor no processo e, por conseguinte, no aparecimento ou não de defeitos ocasionados pelo escoamento do material aquecido.

2.1.2 Resultados anteriores

O presente trabalho representa uma extensão da dissertação de mestrado de Marcos Vinícius de Oliveira Martins [11], no qual pertence a um esforço maior de entendimento e controle sobre o processo de soldagem por fricção FSW em ligas de alumínio e magnésio

Dentre os metais, as ligas de alumínio e magnésio são aquelas que apresentam os maiores valores de resistência específica, ou seja, conseguem combinar baixa massa específica com alta resistência mecânica. Em diversas indústrias, como a automotiva e a aeronáutica, tais características são fundamentais, e por conseguinte torna-se essencial o conhecimento sobre possíveis processos de união. As ligas de magnésio e alumínio possuem intrinsecamente baixa solubilidade, o que dificulta a união por soldagem convencional. Assim, a soldagem por fricção FSW se mostra como uma alternativa viável para a união desses materiais [7].

Em sua dissertação, Marcos Vinícius de O. Martins avaliou parâmetros de soldagem variando a velocidade de soldagem (v) e velocidade de rotação da ferramenta (ω) utilizando uma ferramenta com rosca. Foram analisados o torque e as forças presentes no processo. Os resultados foram comparados com os resultados obtidos com uma ferramenta de soldagem sem rosca. A qualidade da solda foi

correlacionada com os parâmetros de soldagem utilizados por meio de ensaios de dureza e tomografia. Foi concluído que a ferramenta com rosca gera defeito de túnel e demanda maior energia do processo em relação ao torque e à força axial. O comportamento das forças envolvidas no processo foi o mesmo para ambas as geometrias de ferramenta. A microdureza ao longo do eixo neutro mostrou a mudança entre a zona de mistura, zona termicamente afetada e o metal de base.

Embora em seu estudo, Marcos Vinícius de O. Martins tenha conduzido uma análise dos efeitos das principais variáveis de processo - velocidade de soldagem (v) e velocidade de rotação da ferramenta (ω) - sobre os diferentes esforços presentes no processo de soldagem por fricção FSW, inclusive destacando para algumas respostas a presença de interações entre as variáveis de processo, faltou uma análise estatística sistêmica que modelasse e otimizasse tais resultados. Foram ajustadas funções lineares, quadráticas e exponenciais aos diferentes esforços mecânicos colhidos, entretanto não se avaliou o efeito combinado das variáveis de processo, sendo assim incapaz de definir uma combinação ótima das variáveis de processo, o que impossibilitou qualquer vislumbre do controle do processo de soldagem

2.2 Modelagem e otimização de processos

2.2.1 Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)

Em muitas situações tem-se interesse em avaliar as relações existentes entre os principais fatores que compõem um processo e uma variável resposta de interesse. Junto a este interesse, comumente também se deseja determinar qual é a condição de operação do processo que levará à obtenção de um valor ótimo para a variável resposta. Nestas situações a metodologia de superfície de resposta (MSR) é uma excelente ferramenta para a solução do problema.

A análise de uma superfície de resposta é feita em termos de uma superfície ajustada. Se tal superfície é adequada, sua análise será aproximadamente equivalente à análise da superfície real. De modo geral, pode-se representar o relacionamento existente entre uma variável

resposta de interesse y e k fatores do processo (x_1, x_2, \dots, x_k) por uma expressão de segunda ordem do tipo [2]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{eq.1})$$

em que ε representa um componente de erro aleatório, que leva em consideração a variação observada na variável resposta que não é explicada pelos fatores x_1, x_2, \dots, x_k . $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \dots, \beta_{ij}$, são os coeficientes a determinar em cada estimativa de modelo. Diz-se que a função $y(x_1, x_2, \dots, x_k)$ define uma superfície de resposta.

2.2.2 Algoritmo Genético (AG)

Com a crescente complexidade dos sistemas e custos computacionais menores, torna-se cada vez mais importante a utilização da modelagem e simulação para análise e otimização de problemas. Tradicionalmente, para se chegar ao “estado” otimizado, o procedimento consiste em realizar uma série de experimentos, alterando os parâmetros de entrada, de forma a cobrir todo o espaço amostral de estudo e assim, ao final, definir qual combinação de parâmetros resultou na melhor resposta desejada. O procedimento descrito é inteiramente iterativo e pode ser realizado por meio da implementação de algoritmos de otimização.

Para aumentar a robustez na análise e no ajuste dos modelos estimados por MSR pode-se usar do algoritmo genético (AG). A escolha do AG para aplicações de MSR é boa por quatro principais fatores: (i) trabalham com uma população, em vez de poucos pontos isolados; (ii) operam com conceito de custo e recompensa, que torna o método eficiente sob a ótica computacional; (iii) não levam a soluções determinísticas; e, por fim, (iv) são capazes de trabalhar com conjuntos de parâmetros.

O algoritmo genético (AG) é uma classe de algoritmo de busca: “[...] é uma variante de busca em feixe estocástica, na qual os estados sucessores são gerados pela combinação de dois estados pais, em vez de serem gerados pela modificação de um único estado [...]” (Russel &

Norvig, 2004). São denominados também de técnicas de busca heurísticas de otimização global (Linden, 2012). O AG é eficiente para a busca de soluções ótimas, indo além de limitações de técnicas convencionais. Isso é possível pois utiliza o conceito da teoria evolutiva das espécies, descrita por Charles Darwin, onde os princípios de cruzamentos genéticos, mutações e a ideia de o mais forte e adaptado ao meio sobreviver. Desta forma, o AG executa uma estratégia de busca múltipla, permitindo a emergência de soluções ótimas dentro do espaço de variáveis de um problema específico [8].

Resumidamente, AGs operam de forma iterativa selecionando a cada processamento uma fração da população chamada de elite, que são os mais prováveis como soluções ótimas. O restante da população segue o caminho do cruzamento ou da mutação. Nos cruzamentos, indivíduos são combinados para a formação de novos indivíduos (prováveis soluções). Na mutação ocorre a alteração completa da característica do indivíduo, o que permite que a otimização não venha a convergir para um ótimo local com características tendenciosas. As mutações são extremamente necessárias para dar o caráter estocástico do método.

Assim, existem três operadores básicos no código do AG: seleção, crossover e mutação. A influência de cada operador sobre o AG é comumente definida pelo programador, que determina os parâmetros e proporções de cada um, tendo influência sobre a aproximação da solução global para o problema. Na sessão 4.2, os parâmetros do AG empregados no presente trabalho são detalhados.

2.2.3 Ferramentas estatísticas para a validação de modelos

De forma a validar a capacidade de um modelo em descrever um processo real, algumas ferramentas estatísticas podem ser usadas para avaliar o ajuste e adequação do modelo aos dados experimentais. Entre estas pode-se destacar: (i) a análise de variância (ANOVA), (ii) o coeficiente de determinação (R^2), (iii) o gráfico de regressão e (iv) o gráfico de resíduos.

A Análise de Variância (ANOVA) é um método para testar a igualdade de três ou mais médias populacionais, baseado na análise das variâncias amostrais. Os dados amostrais são separados em grupos segundo uma característica que permite distinguir diferentes populações umas das outras [13]. A ANOVA é também uma forma de avaliar um modelo de regressão por meio da decomposição da soma dos quadrados para cada fonte de variação no modelo e, utilizando o teste F, testar a hipótese de que qualquer fonte de variação no modelo é igual a zero [13]. O F-valor é a representação do teste estatístico F para análise de variância entre médias de amostra. O F mede a variação entre as médias da amostra pela variação dentro das amostras [14]. De posse do F-valor para cada fonte de variação e do F crítico, considerando os graus de liberdade do problema, torna-se possível avaliar o ajuste do modelo e a significância da regressão.

O gráfico de regressão é utilizado para avaliar o quão distante está o conjunto de pontos de dados experimentais do modelo ajustado para sua distribuição. Este é um retrato qualitativo direto do ajuste do modelo. Quanto mais próximo o coeficiente angular da reta resultante estiver de 45°, melhor é o ajuste do modelo estimado.

O coeficiente de determinação (R^2) é a medida estatística quantitativa capaz de resumir o quão distante estão as respostas estimadas pelo modelo dos dados obtidos experimentalmente. Pode ser facilmente calculado pela razão entre a soma dos quadrados da fonte de variação da regressão e da soma dos quadrados da fonte de variação dos resíduos, considerando os respectivos graus de liberdade. O R^2 é uma medida quantitativa direta do ajuste do modelo. Quanto mais próximo estiver de 1, melhor o ajuste do modelo estimado aos dados experimentais.

É importante destacar que antes de tirar conclusões sobre o modelo estimado, é preciso analisar o gráfico de resíduos. Por meio deste se é capaz de verificar: (i) se os resíduos seguem uma distribuição normal, tornando assim possível a condução de testes estatísticos, como o teste F ou o teste t, considerando os dados experimentais, e (ii) se o conjunto

de dados experimentais contém valores indesejados, também chamados de outliers, que irão atrapalhar as análises realizadas a posteriori

3 Materiais e métodos

3.1 Material base

O experimento que possibilitou o desenvolvimento estatístico do presente trabalho foi realizado no Centro de Estudos em Fabricação e Comando Numérico, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRJ, e teve como objetivo analisar a qualidade da solda de um par de chapas de Alumínio da série 5000 de 5,0 mm de espessura cada, Al 5052-H34, que possuía como principal elemento de liga o magnésio. Essa liga apresenta boa ductilidade, alta resistência à corrosão (característica marcante de ligas de alumínio), além de boa resistência mecânica. A aplicação desta liga é comum em estruturas. As especificações fornecidas pelo fabricante da liga usada são apresentadas nas tabelas 1 e 2:

Tabela 1. Composição química do alumínio série 5000, 5052-H34 [12]

Composição Química Al 5052-H34									
Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Outros	Al
% em peso	0,25	0,40	0,10	0,10	2,2-2,8	0,15-0,35	0,10	0,00-0,15	restante

Tabela 2. Propriedades mecânicas do alumínio série 5000, 5052-H34 [12]

Propriedades Mecânicas Al 5052-H34			
Limite de resistência a tração (MPa)	Tensão do escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na fratura (%)
235-285	180	70	De 6 a 12

3.2 Equipamento e variáveis de estudo

O processo de solda foi realizado em um centro de usinagem CNC Polaris, modelo V400, do fabricante ROMI, cujas faixas de trabalho estão descritas a seguir:

- Rotação [RPM]: 600 – 6000;
- Velocidade de Avanço [mm/min]: até 2000;
- Torque [Nm]: até 95;
- Força Longitudinal [kN]: até 5;
- Força Transversal [kN]: até 5.

Um componente de extrema importância para a soldagem por fricção FSW é a ferramenta de soldagem. Esta pode possuir geometria específica para cada objetivo de solda distinto. No presente trabalho, fez-se uso de uma ferramenta de soldagem de aço ferramenta H13, com 50 HRC de dureza, sendo o pino cônico e com rosca de passo médio de 07 mm.

Três parâmetros puderam ser controlados durante o processo de soldagem: (i) velocidade de penetração da ferramenta, (ii) velocidade de rotação da ferramenta e (iii) velocidade de soldagem. Entretanto optou-se pelo estudo de apenas dois. Sendo assim, a velocidade de penetração da ferramenta foi fixada em 8 mm/min; a velocidade de rotação foi variada, assumindo os valores de 600, 900, 1200 e 1500 RPM; e, por fim, a velocidade de soldagem também foi variada, podendo assumir os valores de 100, 200 e 300 mm/min.

A fim de entender o efeito das variáveis de processo na qualidade da junta soldada e controlar o processo de soldagem, diferentes esforços mecânicos foram monitorados ao longo da soldagem e referenciados como resposta para a construção dos modelos e para a otimização dos parâmetros de soldagem. Para medir o comportamento do torque e forças resultantes durante o processo de soldagem foi utilizado um dinamômetro Kistler 9272, de capacidade de medição de até 5 kN para forças longitudinais e transversais, e de capacidade de 20 kN para a resultante axial. Para medição do torque, o dinamômetro foi capaz de medir até 200 Nm. A técnica de amplificação de sinal foi possível através da utilização do equipamento Kistler 5070.

A tabela resume todos os experimentos conduzidos, apresentando os diferentes níveis das variáveis de processo, assim como os valores dos diferentes esforços mecânicos obtidos para cada combinação. Para cada combinação de variáveis de processo estudada, quatro replicações foram realizadas.

3.3 Modelagem e otimização do processo de soldagem por fricção

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é uma coleção de técnicas estatísticas e matemáticas úteis para desenvolver, melhorar e otimizar processos [5]. principalmente tratando de problemas cujas respostas dependem de mais de uma variável de entrada, como é o caso da soldagem por fricção, em que é possível configurar diferentes setups para as variáveis de entrada/processo, como a velocidade de soldagem e a rotação da ferramenta. Muitas aplicações da modelagem a partir da MSR ocorrem em ambientes industriais, onde as medidas de desempenho e qualidade são essenciais para determinar a performance das atividades e processos.

A otimização dos problemas e modelagem das condições ótimas podem ocorrer de forma eficiente, convergindo sem dificuldade. No entanto, também podem apresentar dificuldades em localizar a região de ótimo global, que pode inviabilizar a utilização da função objetivo gerada.

A fim de evitar que algumas condições prejudiquem a otimização, existem etapas fundamentais antes do processamento dos dados. Tratam-se das fases de seleção das variáveis independentes, configuração do experimento e execução da atividade, que já foram planejadas preliminarmente. De todo modo, as validações estatísticas cumprem o papel de legitimar ou não o modelo gerado. Caso necessário, serão sugeridas novas adaptações para a execução.

A utilização do modelo de primeira ordem ou de ordem superior vai depender da quantidade de variáveis de entrada e o tamanho da região do espaço onde está localizada a convergência. Em resumo, quando o problema envolve mais de uma variável de entrada, o modelo de segunda ordem é sugerido [5]. Tudo vai depender da complexidade em encontrar pontos ótimos durante a construção das respostas de superfície. Quanto mais rico de informações for o modelo, melhor será a representação da função objetivo e a consequente eficiência da otimização. O importante é lembrar que o nível de complexidade de respostas depende da exigência e objetivo da otimização. Gasto computacional e tempo de execução também estão em pauta para a tomada de decisão. Levando em conta

todos os apontamentos descritos anteriormente, o modelo de segunda ordem, incluídas as interações, foi escolhido para representar a relação entre as principais variáveis de controle existentes no processo de soldagem e os esforços mecânicos envolvidos.

O algoritmo genético (AG) pode ser empregado junto a MSR com objetivo de otimizar a busca pela solução ótima, ou seja, a função objetivo. Dessa forma, no presente trabalho, o AG foi utilizado para construção das superfícies de resposta das quatro respostas (esforços mecânicos) monitorados durante o experimento: (i) força de soldagem (F_y), (ii) força transversal (F_x), (iii) torque resultante (T) e (iv) força axial (F_{Axial}). Um modelo foi criado para ser representativo a qualquer par de valores das variáveis de processo/entrada: (i) velocidade de soldagem e (ii) rotação da ferramenta. Para todas as respostas, foram construídos modelos para a entrada e o percurso da ferramenta, retratando o comportamento no início e ao longo do percurso de soldagem. Ao todo, oito modelos foram estimados ao final.

Antes da construção das superfícies de resposta e curvas de contorno, o modelo foi “validado”, i.e., o ajuste do modelo aos dados experimentais e significância da regressão foram avaliados, considerando quatro ferramentas estatísticas básicas: (i) a : ANOVA, (ii) o coeficiente de determinação (R^2), (iii) o gráfico de regressão e (iv) o gráfico de resíduos.. Após a “validação” do modelo, os efeitos das variáveis de processo – velocidade de soldagem e rotação da ferramenta – sobre os diferentes esforços mecânicos monitorados foram analisados, bem como a interação entre esses e a determinação da condição ótima.

3.4 Parâmetros do modelo estimado aplicados no MATLAB

Para a implementação do algoritmo genético (AG) a ferramenta Global Optimization Toolbox (MATLAB 2020) foi usada. Como se sabe, o problema envolveu duas variáveis independentes, que foram nomeadas de x_1 e x_2 , representando a rotação da ferramenta (ω) e a velocidade de soldagem (v), respectivamente. A resposta monitorada foi chamada de variável z .

Como estimativas iniciais para os parâmetros do modelo os valores de 3000 e -2000 foram usados como limites superior e inferior, respectivamente. Esses valores foram se adequando após várias tentativas de convergência para cada modelo estimado. A população da amostra, foi definida como 5000. As frações de elite e de cruzamento foram de 5% e 80%, respectivamente, sendo os a proporção de 15% restante destinada a mutação. A escolha das frações ideais para cada operador genético, é de extrema importância para o desempenho da otimização. Por isso foi necessário desenvolver variações dessas condições até chegar a uma condição ideal. O algoritmo foi interrompido quando a mudança relativa média da função objetivo entre os indivíduos da população foi menor ou igual a um valor pré-estabelecida de tolerância (1×10^{-10}) durante um valor pré-determinado de gerações (500). De forma ao algoritmo sempre obedecer a este critério de parada, o número máximo de gerações foi constantemente modificado a fim de otimizar o tempo entre tentativas e ajustes de parâmetros para cada estimativa de modelo para a resposta. Na maioria dos casos, o número máximo de gerações foi definido como 5000.

Vale ressaltar que os níveis das variáveis de processo/entrada foram normalizados, ou seja, os valores de velocidade de soldagem e rotação da ferramenta foram substituídos por números entre -1 e 1. Isso não interferiu negativamente no processo de modelagem e simulação. Pelo contrário, contribuiu, em grande medida, para a convergência dos modelos e redução do tempo e gasto computacionais. Para a velocidade de soldagem, os valores de 100, 200 e 300 mm/min foram normalizados para -1, 0, 1, respectivamente. Já para rotação da ferramenta, os valores de 300, 600, 900, 1200 e 1500 rpm foram normalizados para -1, -0,333, 0, 0.333 e 1, respectivamente.

4 Resultados e discussões

Abaixo segue cada modelo polinomial quadrático estimado considerando cada esforço mecânico monitorado (Equações 1) a (8):

$$F_{x_entrada}(\omega, v) = 614.0159 + 174.7193 * \omega + 154.9371 * v - 53.6165 * \omega * v + 63.5828 * \omega^2 - 31.5608 * v^2 \quad (\text{eq.3})$$

$$F_{x_percurso}(\omega, v) = 1065.6321 - 15.8599 * \omega + 54.2451 * v + 111.4279 * \omega * v + 9.9758 * \omega^2 - 17.3866 * v^2 \quad (\text{eq.4})$$

$$F_{y_entrada}(\omega, v) = 629.3866 + 224.1555 * \omega + 164.9615 * v + 45.4830 * \omega * v - 19.5667 * \omega^2 - 44.7467 * v^2 \quad (\text{eq.5})$$

$$F_{y_percurso}(\omega, v) = 466.0478 - 50.3688 * \omega + 158.7638 * v - 46.6299 * \omega * v + 45.6950 * \omega^2 - 53.3381 * v^2 \quad (\text{eq.6})$$

$$T_{entrada}(\omega, v) = 14.0670 - 7.1761 * \omega - 0.0779 * v - 0.0243 * \omega * v + 2.6513 * \omega^2 - 0.0267 * v^2 \quad (\text{eq.7})$$

$$T_{percurso}(\omega, v) = 12.9319 - 4.9695 * \omega + 1.8749 * v - 0.8252 * \omega * v + 1.7783 * \omega^2 - 0.8811 * v^2 \quad (\text{eq.8})$$

$$F_{Axial Max}(\omega, v) = 5166.0205 - 1738.3261 * \omega - 44.5904 * v - 2.3313 * \omega * v + 414.7916 * \omega^2 - 88.4433 * v^2 \quad (\text{eq.9})$$

$$F_{Axial Percurso}(\omega, v) = 4178.7319 - 541.4323 * \omega + 370.3619 * v - 96.5152 * \omega * v + 168.1783 * \omega^2 - 185.7801 * v^2 \quad (\text{eq.10})$$

As tabelas 3 e 4 apresentam os valores obtidos experimentalmente (Exp) e estimados com as equações polinomiais (AG) para cada resposta do problema, seja para as respostas monitoradas durante a entrada (tabela 3), seja para respostas monitoradas durante o percurso de soldagem (tabela 4):

Tabela 3. Valores experimentais e estimados para os esforços mecânicos monitorados durante a entrada da ferramenta no processo de soldagem.

ω (RPM)	v (mm/min)	T ent Exp (Nm)	T ent AG (Nm)	F Axial Max Exp (N)	F Axial Max AG (N)	Fx ent Exp (N)	Fx ent AG (N)	Fy ent Exp (N)	Fy ent AG (N)
600	100	24	24	7289	7273	339	263	183	221
900	100	16	17	5767	5747	444	358	433	358
1200	100	12	12	4557	4590	486	511	482	477
1500	100	10	10	3797	3801	583	719	538	579
600	200	24	24	7337	7319	512	503	362	386
900	200	16	17	5674	5791	512	563	534	553
1200	200	12	12	4734	4633	717	679	731	702
1500	200	10	10	3842	3842	856	852	847	834
600	300	24	24	7179	7188	619	680	534	460
900	300	17	17	5682	5659	594	704	567	658
1200	300	12	12	4505	4499	848	785	838	837
1500	300	9	9	3687	3707	1030	922	1016	1000

Tabela 4. Valores experimentais e estimados para os esforços mecânicos monitorados durante o percurso da ferramenta no processo de soldagem.

ω (RPM)	v (mm/min)	T per Exp (Nm)	T per AG (Nm)	F Axial Max Exp (N)	F Axial Max AG (N)	Fx per Exp (N)	Fx per AG (N)	Fy per Exp (N)	Fy per AG (N)
600	100	15	16	4167	4236	1114	1131	325	303
900	100	12	12	3901	3790	1061	1038	249	260
1200	100	9	9	3447	3493	990	953	277	258
1500	100	8	8	3349	3346	832	877	267	296
600	200	20	20	4890	4888	1072	1091	499	562
900	200	15	15	4483	4378	1021	1072	525	488
1200	200	11	11	3856	4017	1152	1061	449	454
1500	200	9	10	3859	3805	1039	1060	493	461
600	300	21	21	5164	5169	1118	1017	754	714
900	300	12	12	4162	4169	1202	1135	523	544
1200	300	11	10	3909	3894	1208	1208	520	520
1500	300	11	10	3909	3894	1208	1208	520	520

Nas seções seguintes serão apresentadas as análises estatísticas que foram conduzidas para cada modelo, ANOVA, valor do coeficiente de determinação (R^2). gráfico de Regressão e gráfico de resíduo, bem como a análise dos efeitos e possíveis interações das variáveis de processo ao

final, as diferentes condições de otimização dos esforços mecânicos são discutidas.

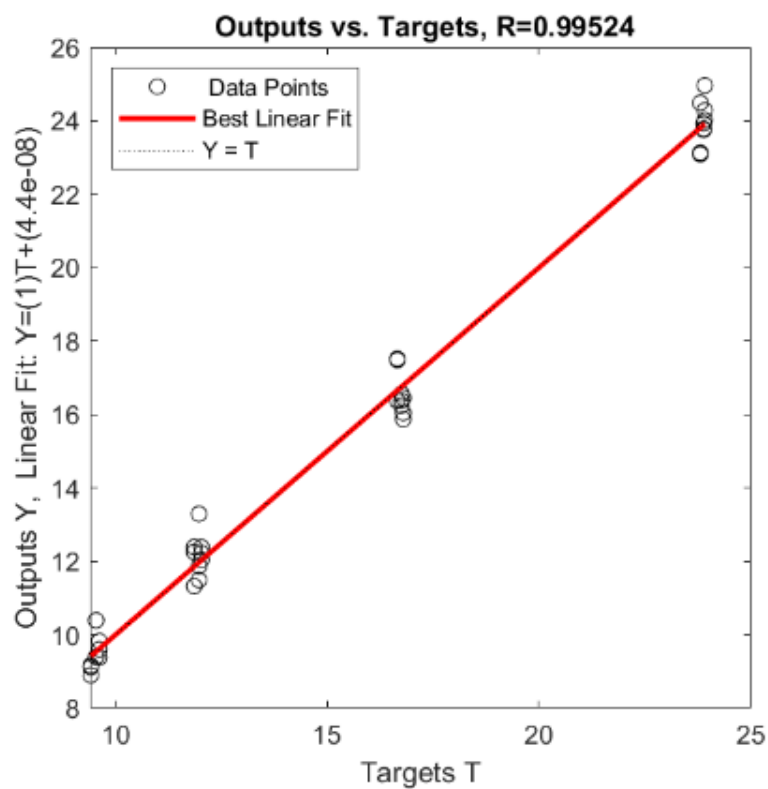
4.1 Torque de entrada

O torque de entrada provocado pela ação da ferramenta é resultado da variável de rotação.

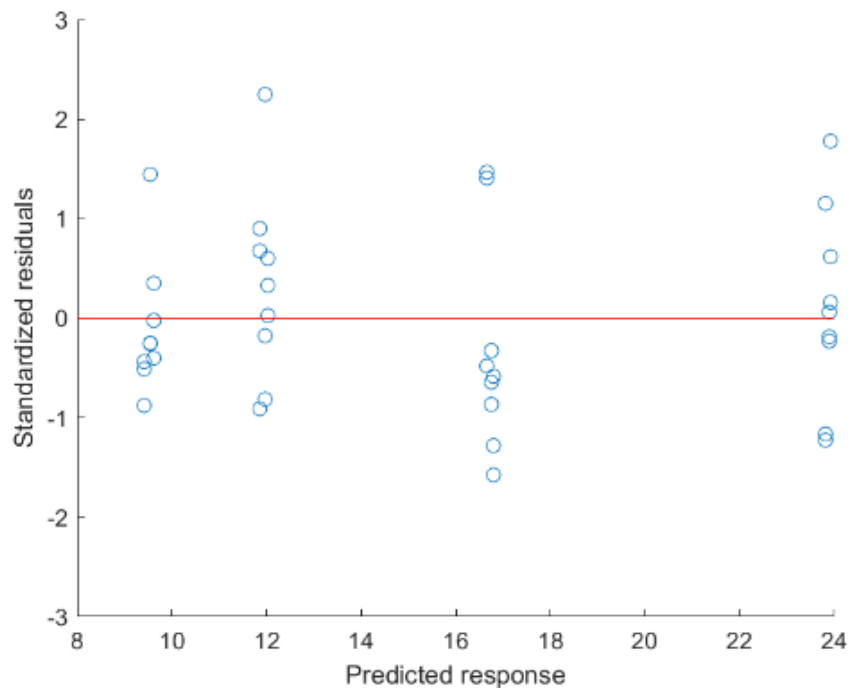
Tabela 5. Análise de Variância para T entrada.

Fonte T Entrada	Graus de liberdade	SQT	MQT	F-valor
Regressão	5	1080.1	216.02	125.2024
Resíduo	6	10.3522	1.7254	
Total	11	1090.4		

$$R_{T_{\text{entrada}}}: F_{\text{crit}}(5; 6; 0.05) = 4.39; R^2 = 0.99055$$

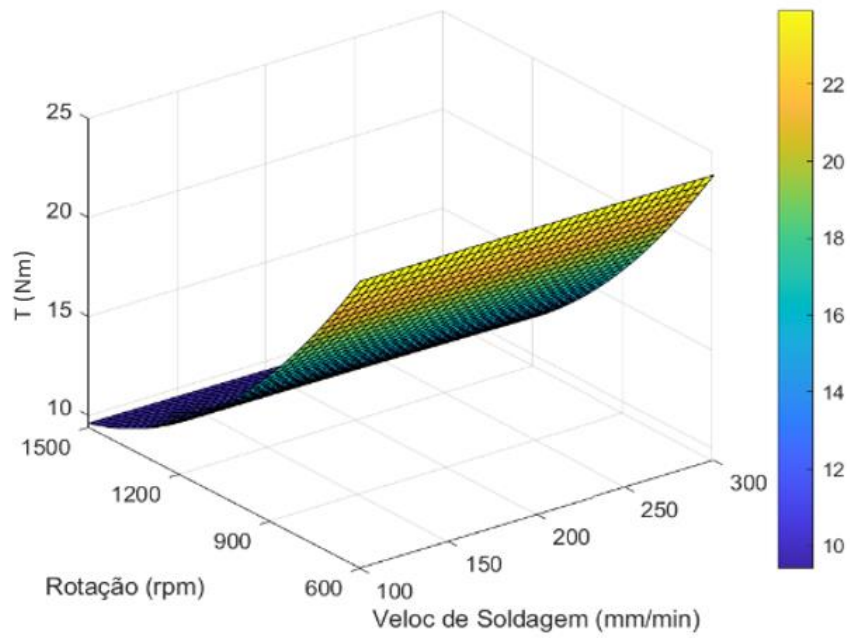


(fig.1) Curva de Regressão T entrada

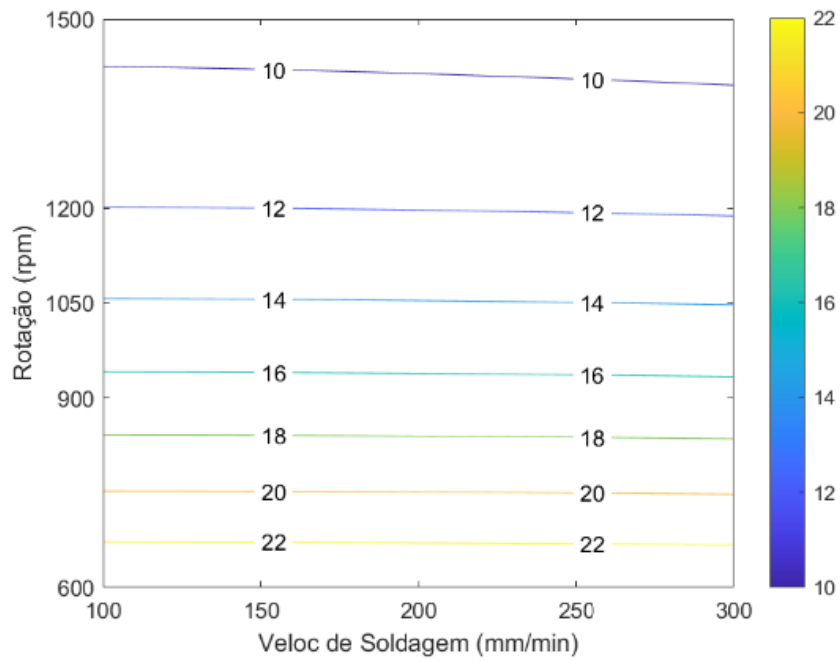


(fig.2) Gráfico de Resíduo T entrada

O resultado da ANOVA, tabela 5, indica significância estatística para o modelo polinomial estimado. O F-valor calculado é maior que o F-crítico tabelado para as condições de graus de liberdade de regressão e resíduo, considerando um intervalo de confiança de 95%. O gráfico de regressão (Figura 1) apresentou uma reta próxima de 45°, demonstrando um bom ajuste do modelo aos dados experimentais, que pode ser ratificado quantitativamente pelo valor obtido para o R^2 bem próximo de 1(0,99055). Olhando para o gráfico de resíduos (Figura 2), nenhum padrão de distribuição pode ser verificado, dando a entender que os resíduos se distribuíram normalmente, e os resíduos se encontraram distribuídos dentro do intervalo de -3 a 3, indicando a ausência de outliers. Dessa forma, é possível seguir com a construção dos gráficos de resposta de superfície e linhas de contorno, apresentadas nas figuras 3 e 4.



(fig.3) Superfície Resposta – $T_{entrada}$



(fig.4) Curvas de Contorno – $T_{entrada}$

Pode ser verificado que a influência da velocidade de soldagem na resposta do torque de entrada é mínima e que o comportamento do torque de entrada pode ser completamente descrito pela rotação da ferramenta. Ambos os gráficos demonstram o comportamento positivo para a tendência de aumento do torque com a redução da rotação.

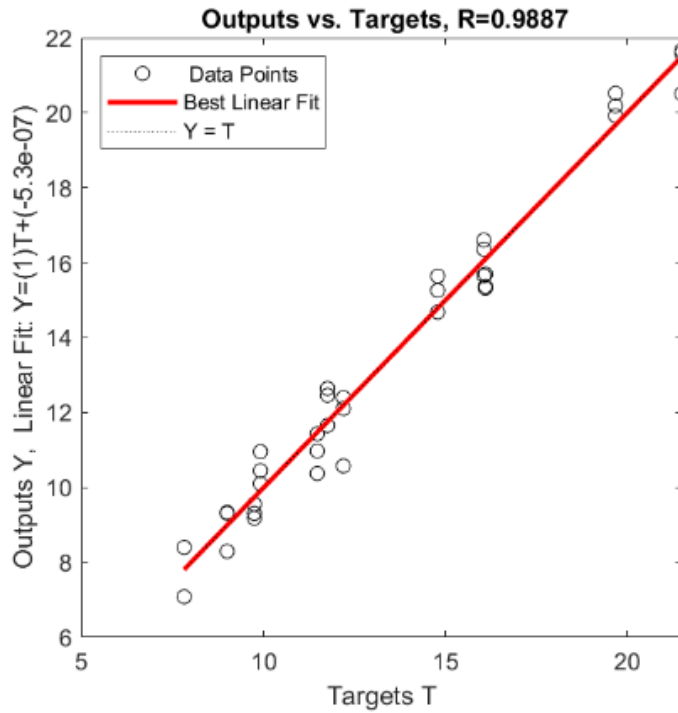
4.2 Torque no percurso

Durante o percurso da ferramenta também existe um torque resultante, que ocorre em função da velocidade de rotação da ferramenta, onde quanto maior a rotação, menor é o torque resultante. No entanto, a influência da velocidade de avanço da ferramenta desta vez é relevante. A relevância do efeito torque também se dá pela geometria da ferramenta utilizada. Segundo Marcus Vinícius de O. Martins [11], “Os esforços de torque desenvolvidos neste estudo foram superiores aos apresentados por Quintana [15] que utilizou ferramenta sem rosca e com dimensões semelhantes”. Martins explica que os esforços maiores se deram em decorrência do atrito provocado pela rosca contida na ferramenta.

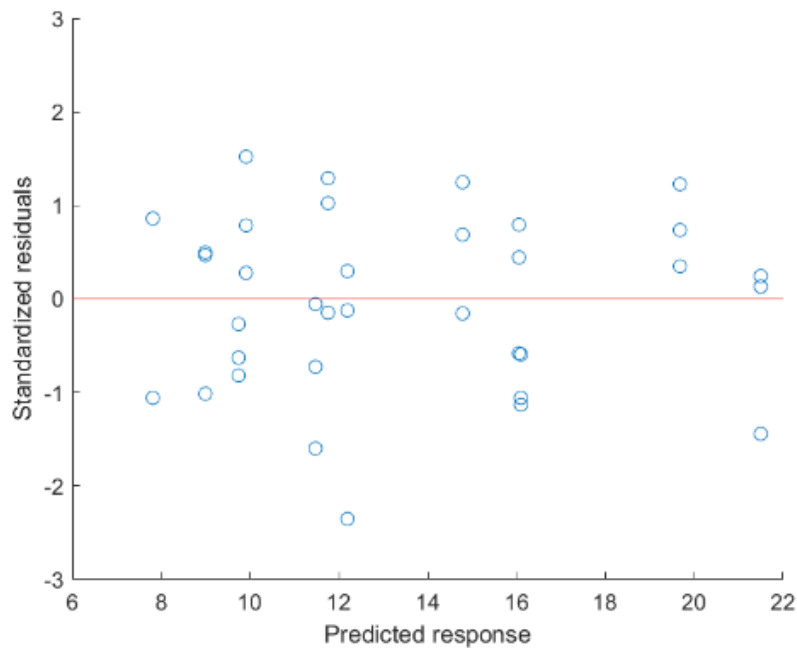
Tabela 6. Análise de Variância para T percurso.

Fonte T_Saída	Graus de liberdade	SQT	MQT	F-valor
Regressão	5	616.049	123.2098	52.1939
Resíduo	6	14.1635	2.360583	
Total	11	630.212		

$$R_{T_percurso}: F_{crit(5; 6; 0.05)} = 4.39; R^2 = 0.97751$$



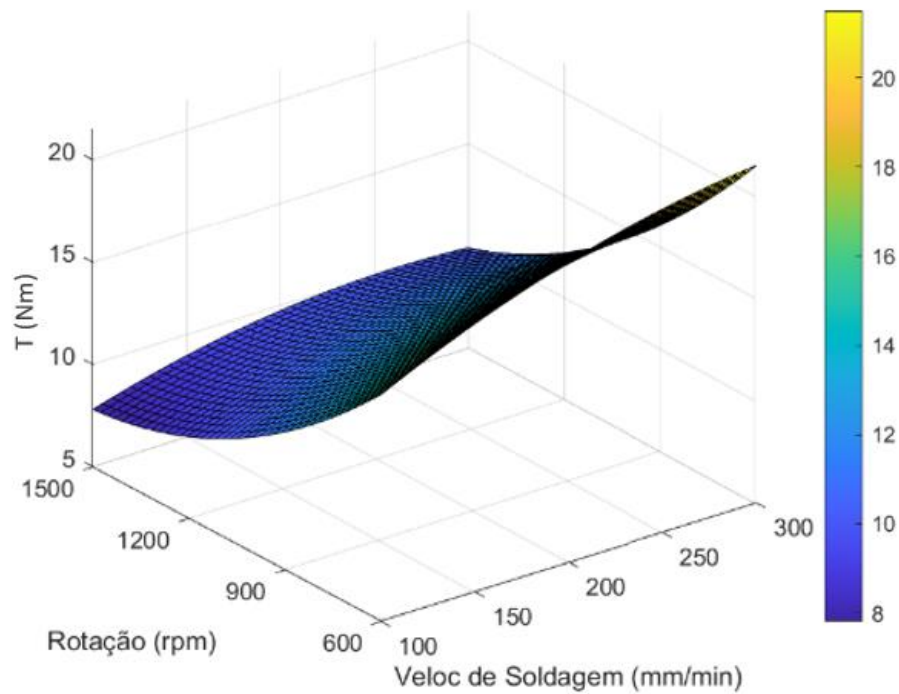
(fig.5) Curva de Regressão– T percurso



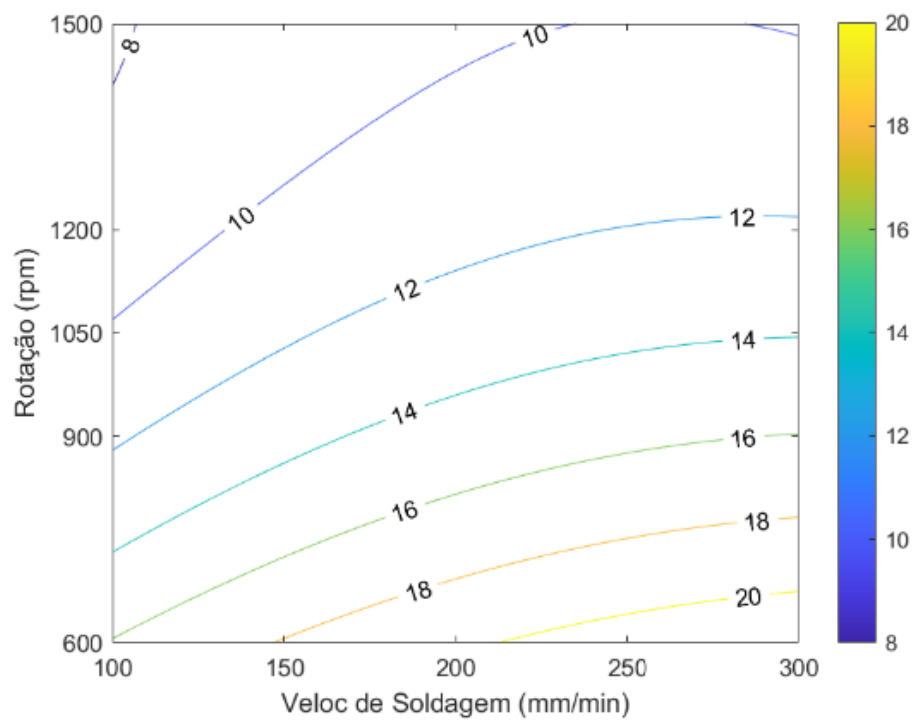
(fig.6) Gráfico de Resíduo – T percurso

O resultado da ANOVA, tabela 6, indica adequação e significância estatística para o modelo polinomial estimado, o mesmo valendo para as análises do gráfico de regressão, gráfico de resíduos e valor de R^2

(0.97751) Dessa forma, é possível seguir com a construção dos gráficos de resposta de superfície e linhas de contorno, figuras 7 e 8.



(fig.7) Superfície Resposta – T percurso



(fig.8) Curvas de Contorno – T percurso

Ambos os gráficos demonstram o comportamento positivo para a tendência de aumento do torque com a redução da rotação. Vale ressaltar que o torque no percurso sofre influência da velocidade de soldagem, diferente do torque de entrada.

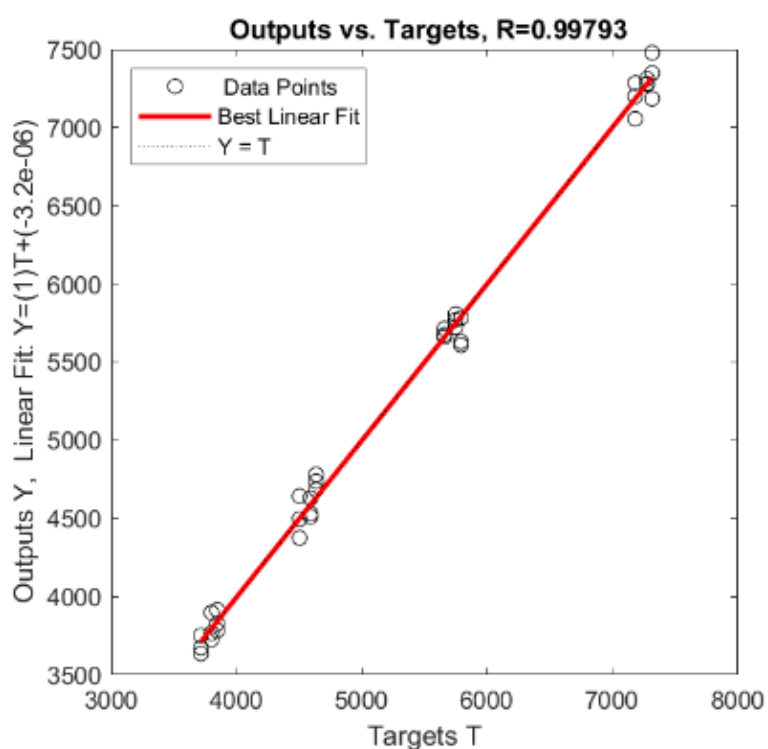
4.3 Força axial máxima (entrada)

A força axial máxima ocorre no início do processo, logo na descida da ferramenta na peça, onde a velocidade de avanço da ferramenta é nula e ocorre o início da rotação.

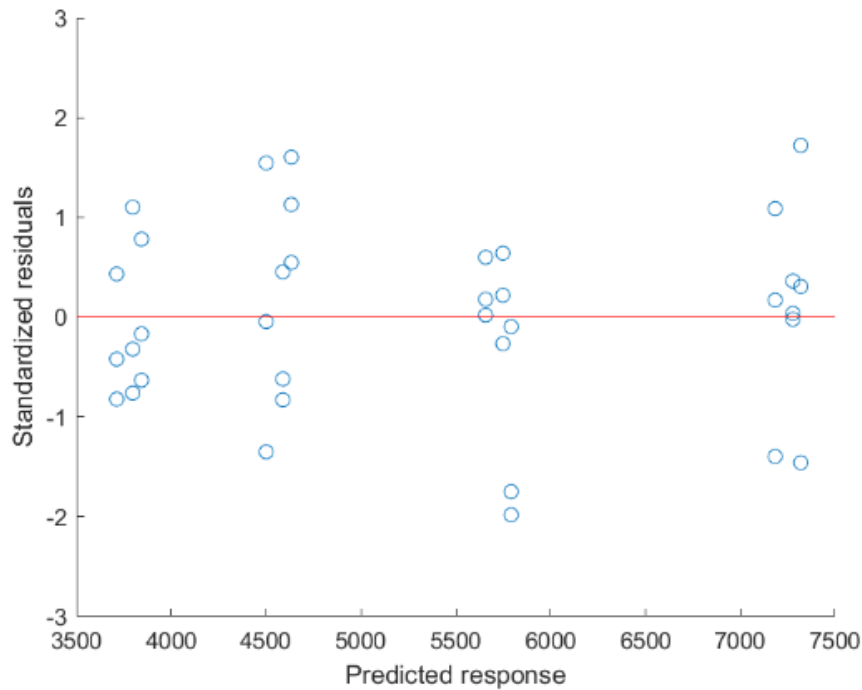
Tabela 7. Análise de Variância para Força Axial Máxima.

Fonte F Axial Max	Graus de liberdade	SQT	MQT	F-valor
Regressão	5	61764000	1235280	289.4057
Resíduo	6	256100	42683.33	
Total	11	62020000		

$$R_{F_Axial_max}: F_{crit}(5; 6; 0.05) = 4.39; R^2 = 0.99587$$

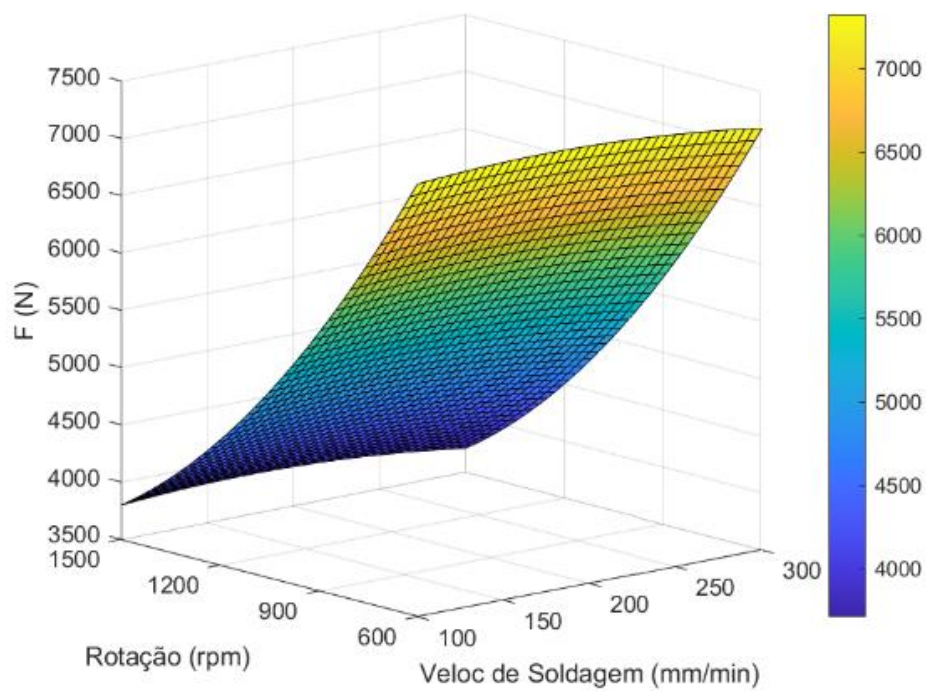


(fig.9) Curva de Regressão – F Axial Máx

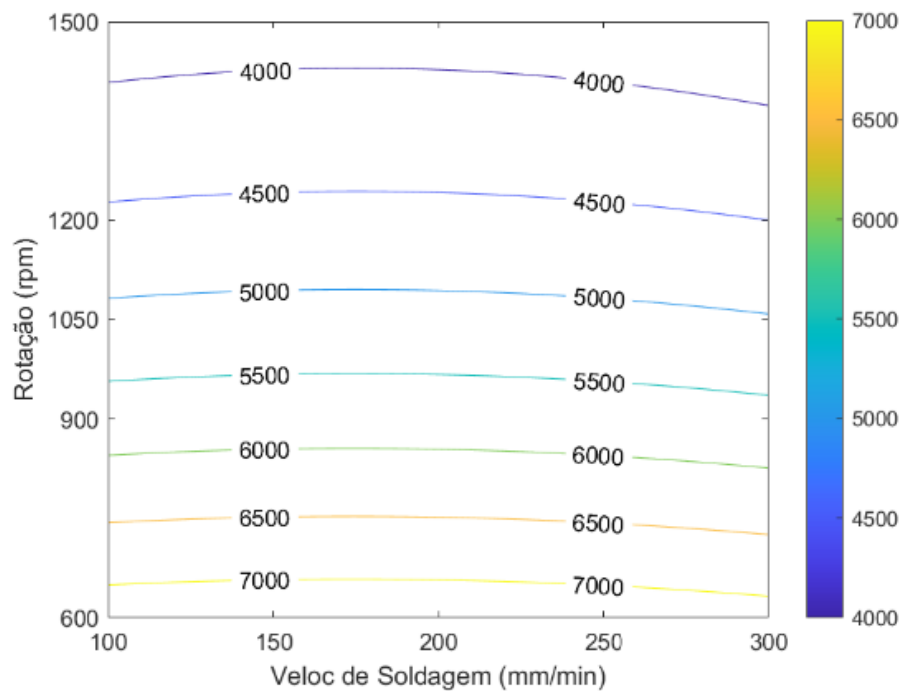


(fig.10) Curva de Resíduo – F Axial Máx

O resultado da ANOVA, tabela 7, indica significância estatística para o modelo polinomial estimado. O F-valor calculado é maior que o F-crítico estimado para as condições de graus de liberdade de regressão e resíduo, considerando um intervalo de confiança de 95%. O gráfico de regressão apresentou uma reta com coeficiente angular próximo de 45° e o valor calculado para R^2 foi de 0.99587, confirmando o bom ajuste do modelo. O gráfico de resíduo mostrou uma distribuição aleatória dos resíduos dentro do intervalo de -3 a 3, indicando a ausência de outliers. Seguiu-se com a construção dos gráficos de resposta de superfície e linhas de contorno, figuras 9 e 10.



(fig.11) Superfície de Resposta – F Axial Máx



(fig.12) Curvas de Contorno – F Axial Máx

É possível verificar que a força axial máxima independe da velocidade de soldagem, podendo ser descrita apenas por meio da

rotação da ferramenta. Maiores valores de força axial são encontrados para menores rotações. O comportamento visto na entrada da ferramenta é interpretado como o momento de maior esforço, onde ocorre a penetração da ferramenta.

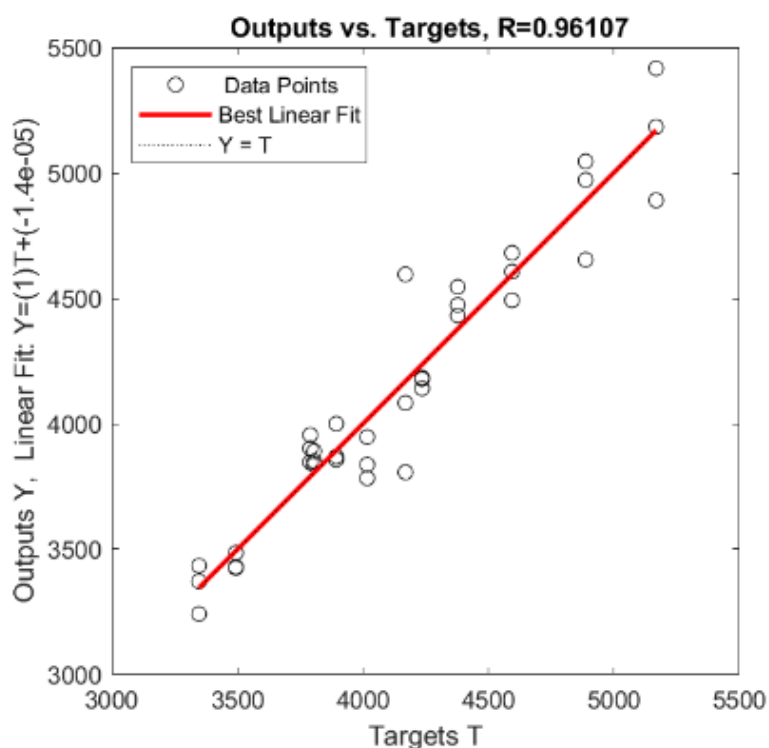
4.4 Força axial no percurso

Assim como no torque resultante, é durante o percurso da ferramenta que a força axial sofre influência da velocidade de avanço da ferramenta, o que não é difícil de prever, devido à necessidade de estabilizar a ferramenta durante processo de fricção.

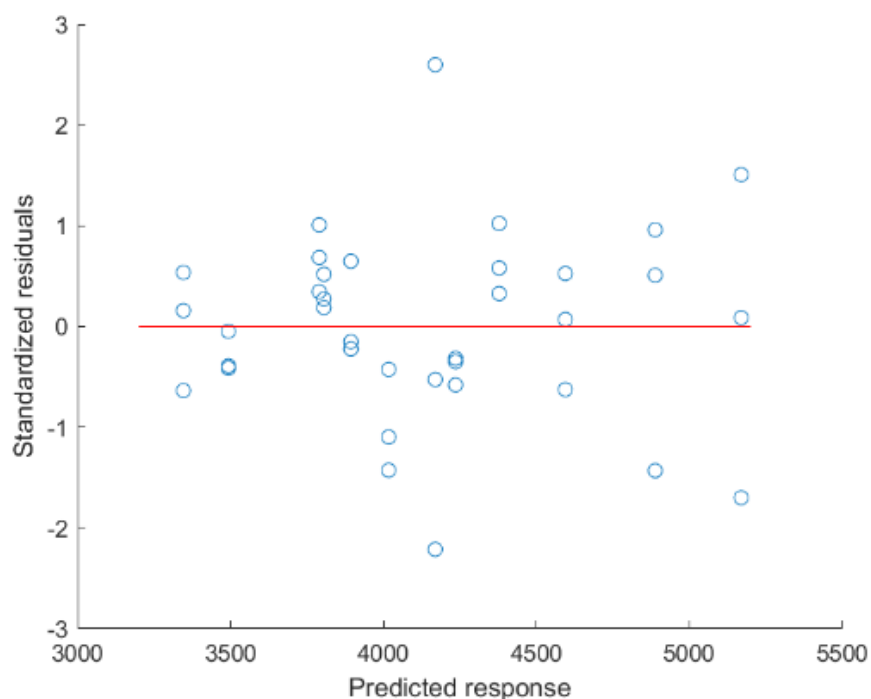
Tabela 8. Análise de Variância para Força Axial no Percurso.

Fonte F_Axial Percurso	Graus de liberdade	SQT	MQT	F-valor
Regressão	5	9754000	1950800	14.5172
Resíduo	6	806270	134378.3	
Total	11	10560000		

$$R_{F_Axial_percurso}: F_{crit}(5; 6; 0.05) = 4.39; R^2 = 0.92367$$

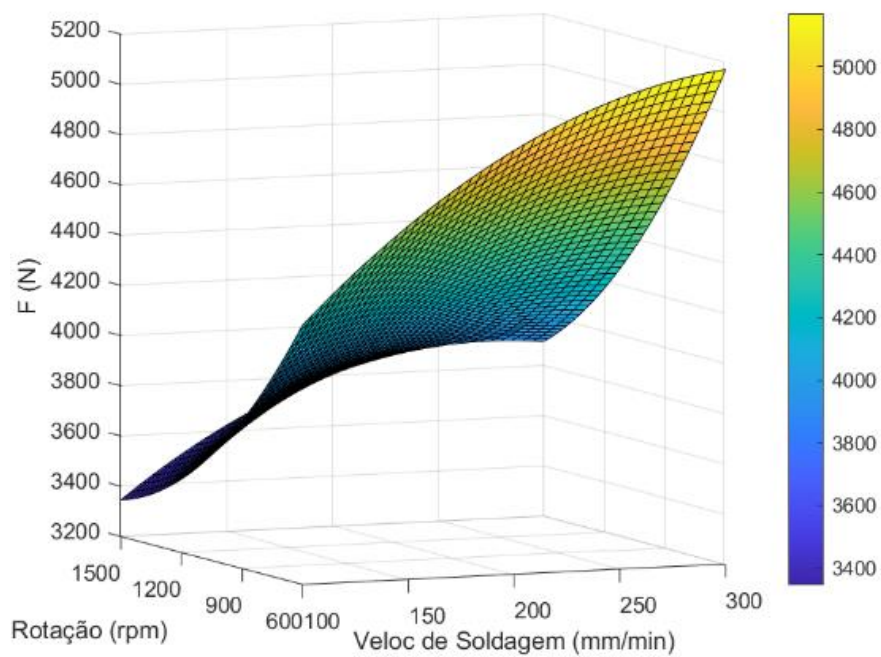


(fig.13) Curva de Regressão – F Axial Percurso

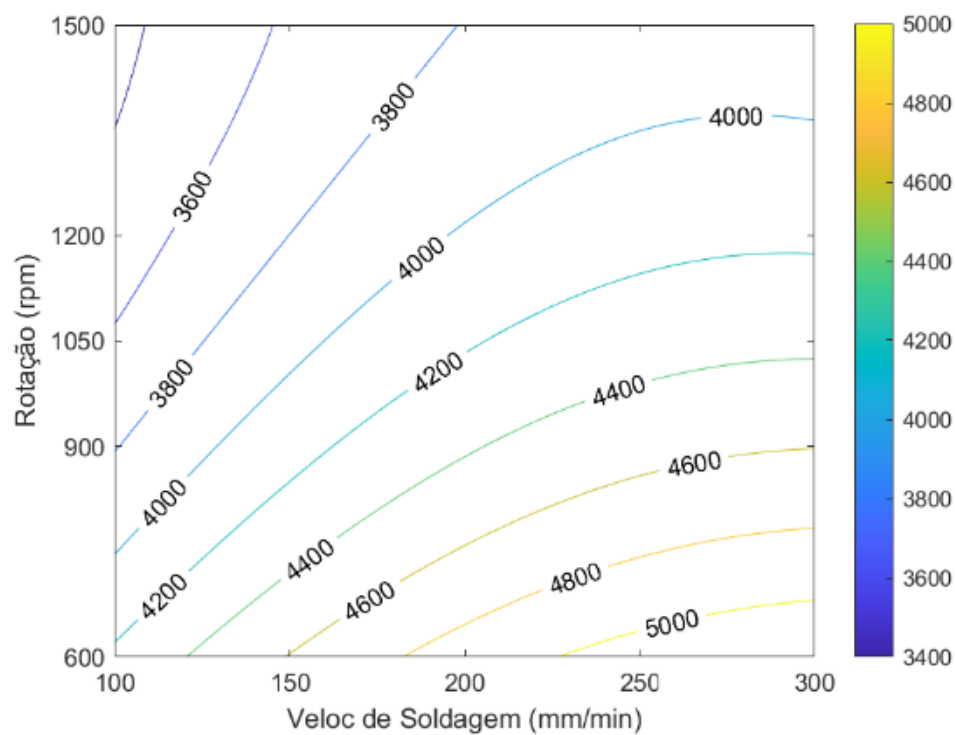


(fig.14) Curva de Regressão – F Axial Percurso

O resultado da ANOVA, tabela 8, indica significância estatística do modelo polinomial estimado. O F-valor é maior que o F-crítico estimado para as condições de graus de liberdade de regressão e resíduo, considerando um intervalo de confiança de 95%. A curva de regressão apresentou O R^2 calculado foi inferior aos demais modelos, com um valor de 0.92367, mas ainda assim o gráfico de regressão indicou uma reta com coeficiente angular bem próximo de 45° e com uma distribuição de dados experimentais bem próxima a ela, sugerindo um bom ajuste do modelo. O gráfico de resíduo mostrou que os resíduos se encontraram distribuídos aleatoriamente dentro do intervalo de -3 a 3, indicando a ausência de outliers e uma distribuição normal desses. Dessa forma, foi possível seguir com a construção dos gráficos de resposta de superfície e linhas de contorno, figuras 13 e 14.



(fig.15) Superfície Resposta – F Axial Percurso



(fig.16) Curvas de Contorno – F Axial Percurso

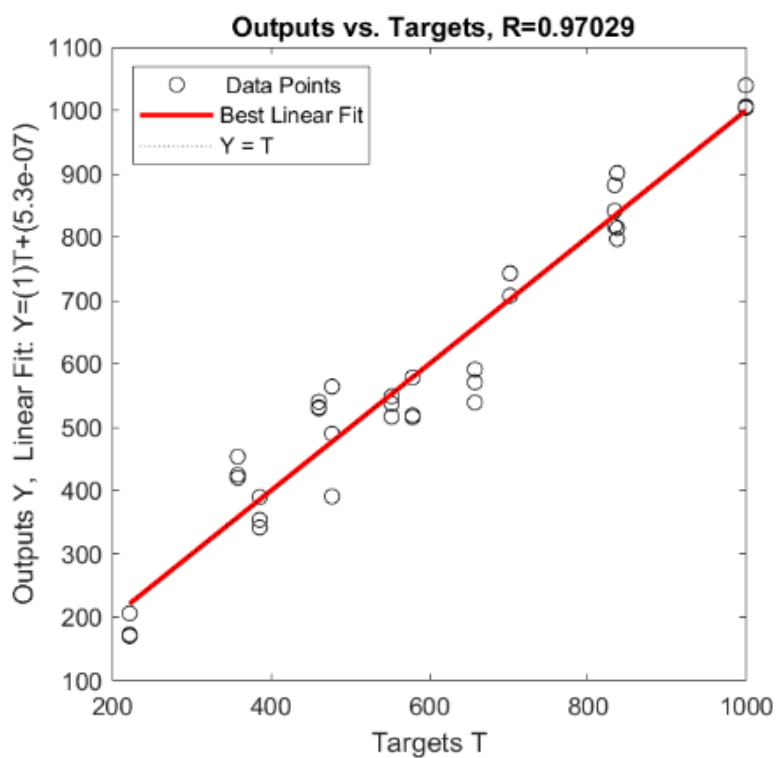
Ambos os gráficos que a força resultante cresce com o aumento da velocidade de soldagem e rotação, simultaneamente.

4.5 Força de soldagem na entrada

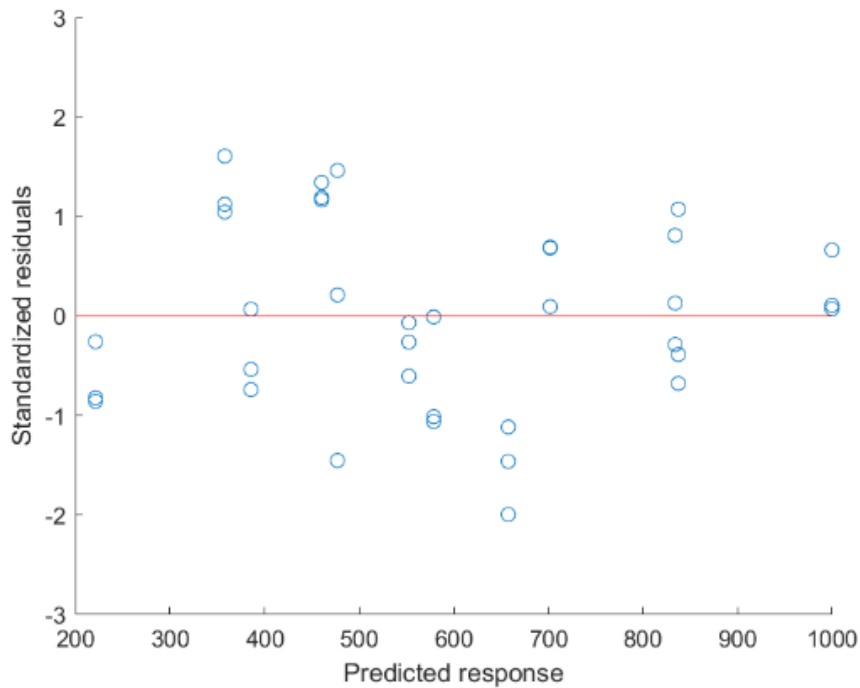
Tabela 9. Análise de Variância para Força de Soldagem na Entrada.

Fonte Fy_Entrada	Graus de liberdade	SQT	MQT	F-valor
Regressão	5	1261700	252340	19.13866
Resíduo	6	79109	13184.83	
Total	11	1340800		

$R_{Fy_entrada}$: $F_{crit}(5; 6; 0.05) = 4.39$; $R^2 = 0.94145$

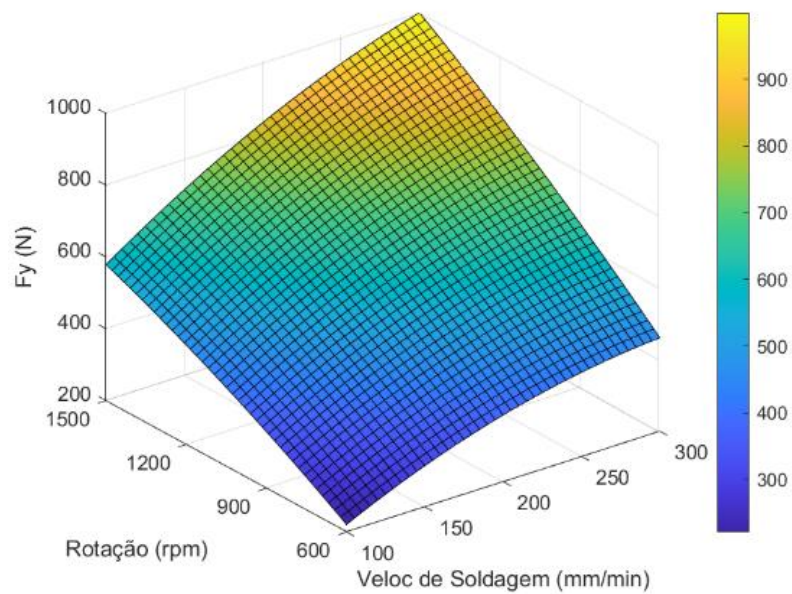


(fig.17) Curva de Regressão - Soldagem Entrada

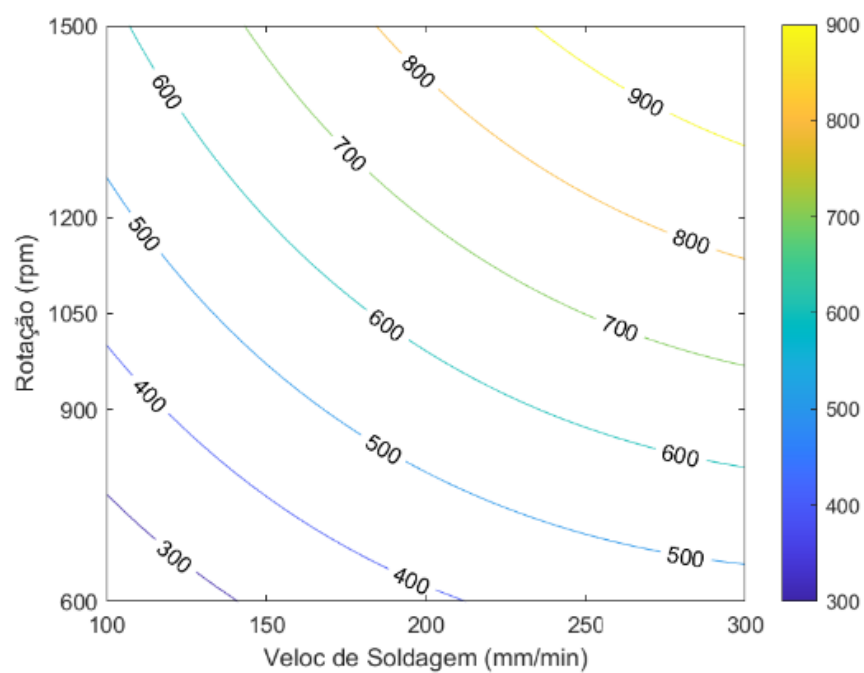


(fig.18) Gráfico de Resíduo - Soldagem Entrada

O resultado da ANOVA, tabela 9, indica significância estatística para o modelo polinomial estimado. O F teste foi conduzido para um intervalo de confiança de 95%. A gráfico de regressão apresentou uma reta próximo de 45°, sendo o bom ajuste do modelo ratificado pela obtenção de um R^2 satisfatório de 0.94145. O gráfico de resíduo mostrou que os resíduos se encontraram aleatoriamente distribuídos dentro do intervalo de -3 a 3, sem indicativos de outliers. Seguem, nas figuras 19 e 20, os gráficos de resposta de superfície e linhas de contorno.



(fig.19) Superfície Resposta – Soldagem Entrada



(fig.20) Curvas de Contorno – Soldagem Entrada

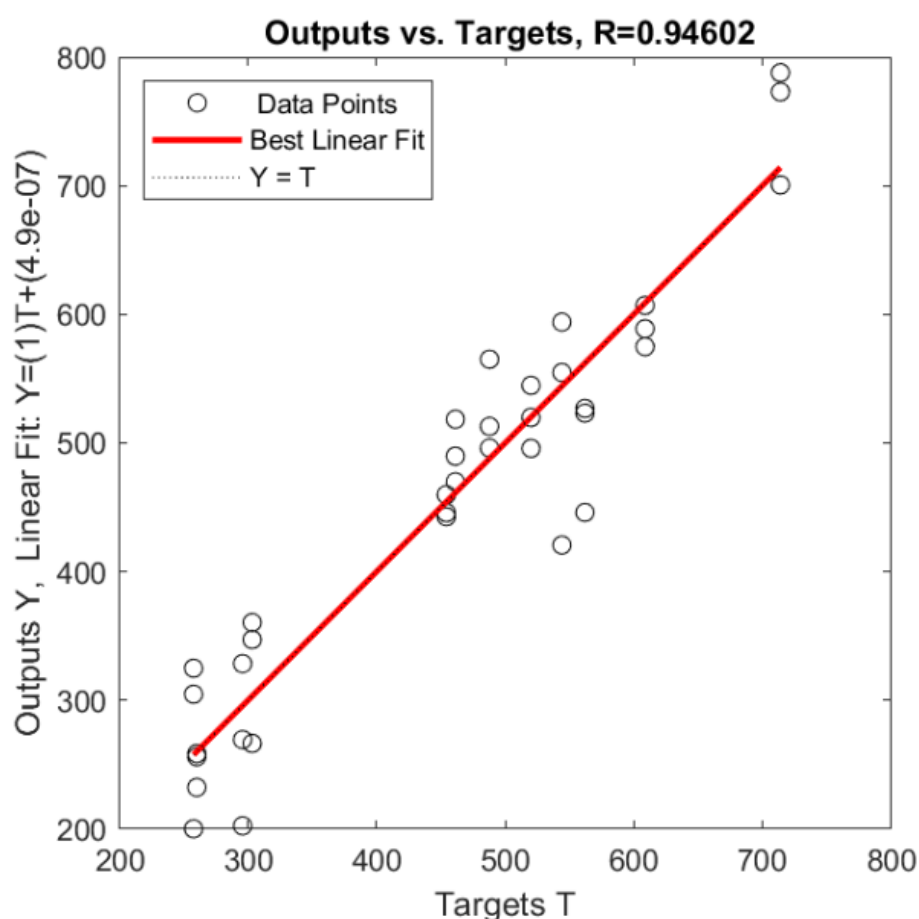
A força de soldagem na entrada da ferramenta, recebe influência direta no aumento da rotação em paralelo com o aumento da velocidade. Verifica-se que a 1200 RPM e 300 mm/min, a força resultante de soldagem foi máxima.

4.6 Força de soldagem no percurso

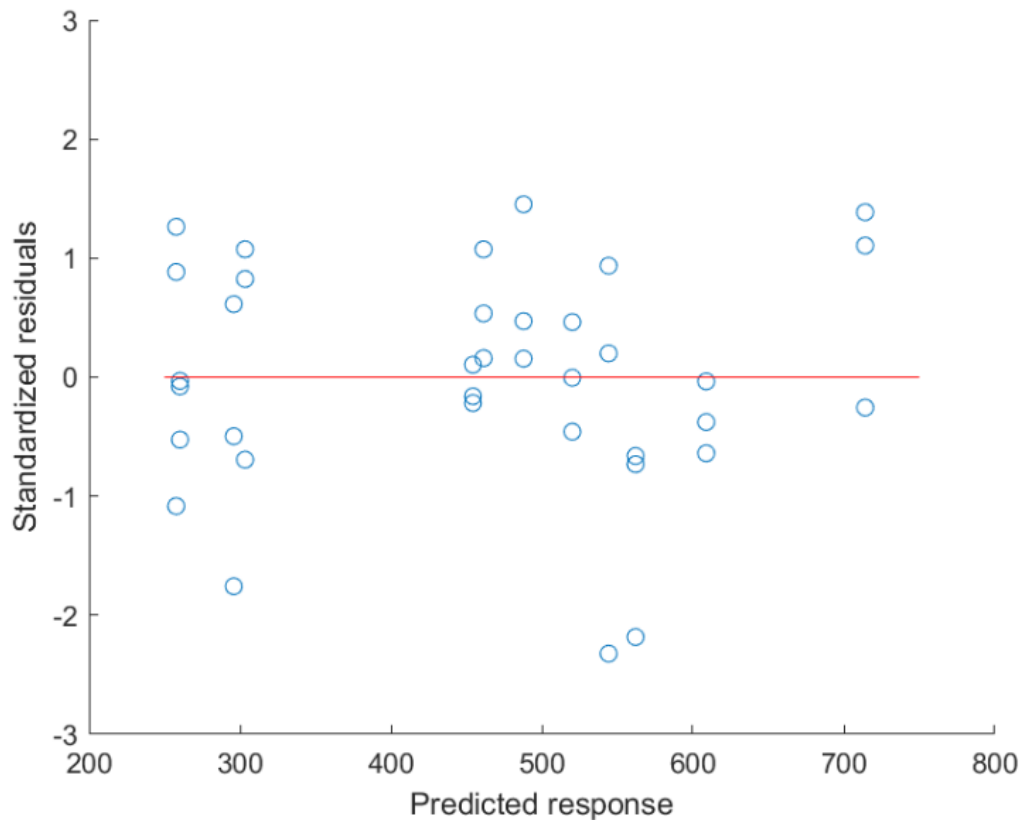
Tabela 10. Análise de Variância para Força de Soldagem no Percurso.

Fonte Fy_Percurso	Graus de liberdade	SQT	MQT	F-valor
Regressão	5	722280	144456	10.2242
Resíduo	6	84773	14128.83	
Total	11	807050		

$R_{Fy_percurso}: F_{crit}(5; 6; 0.05) = 4.39; R^2 = 0.894963$

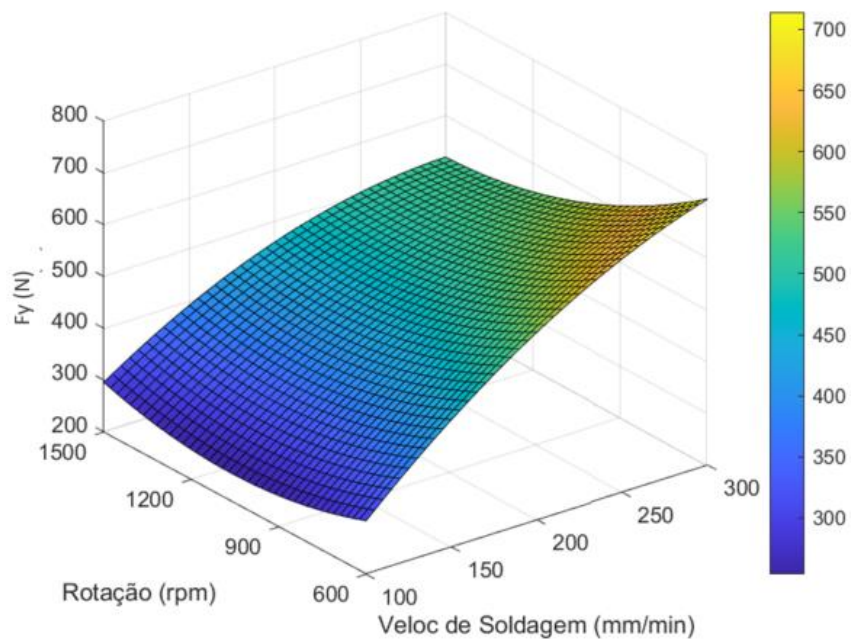


(fig.21) Curva de Regressão – Soldagem Percurso

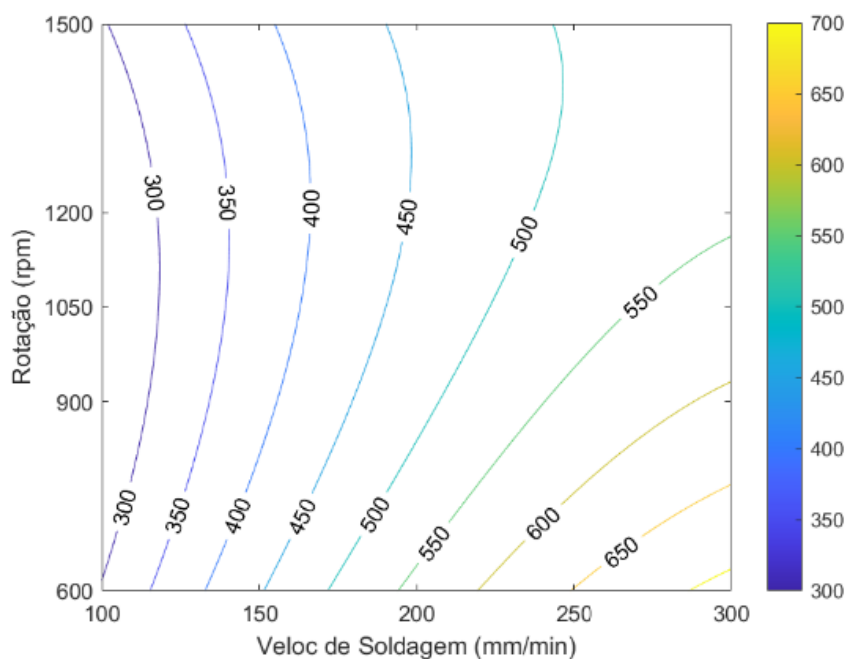


(fig.22) Gráfico de Resíduo – Soldagem Percurso

O resultado da ANOVA, tabela 10, indica significância estatística para o modelo polinomial estimado, pois o F-valor é maior que o F-crítico para as condições de graus de liberdade de regressão e resíduo, considerando um intervalo de confiança de 95%. Apesar do gráfico de regressão ter apresentado uma reta com coeficiente angular próximo de 45° , o valor calculado para R^2 foi de 0.894963, o que não é positivo para o ajuste do modelo. O gráfico de resíduo mostrou que os resíduos se encontraram distribuídos aleatoriamente dentro do intervalo de -3 a 3, indicando a ausência de outliers. De todo modo, os gráficos de superfície de resposta e curvas de contorno foram traçados e analisados, figuras 23 e 24.



(fig.23) Superfície Resposta - Soldagem Percurso



(fig.24) Curvas de Contorno - Soldagem Percurso

A força de soldagem no percurso pode ser explicada como a força resultante da tentativa de a ferramenta avançar sobre as placas a serem unidas, levando em conta a penetração da ponta da ferramenta e sua rotação. Diferente do que foi verificado para o caso da força de soldagem na entrada, a força de soldagem no percurso cresce quando o

par de entradas é menor, ou seja, para menores rotações e velocidades de soldagem, foi verificado uma maior força de soldagem resultante na direção contrária ao movimento.

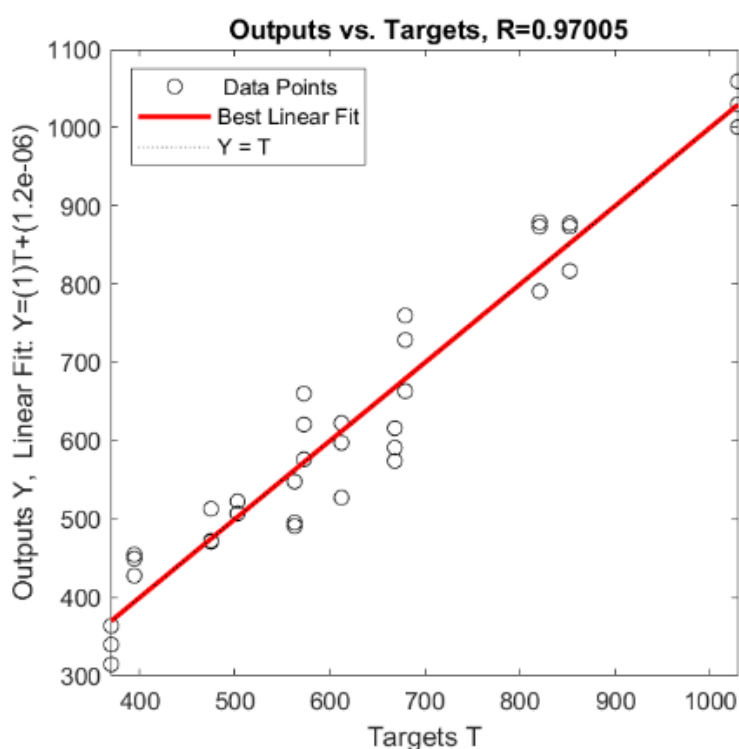
4.7 Força transversal na entrada

A força transversal provoca o cisalhamento do pino da ferramenta quando em contato com as peças a serem soldadas. Esta força, no início do processo, sofre influência da velocidade de soldagem, tendendo a crescer conforme as variáveis de entrada também crescem.

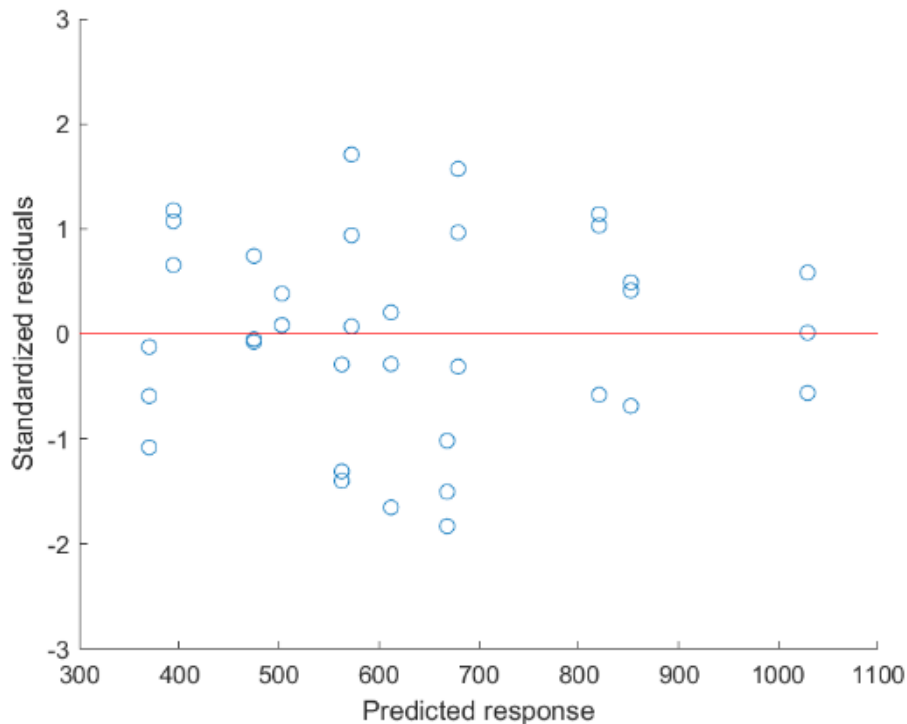
Tabela 11. Análise de Variância para Força Transversal de Entrada

Fonte Fy_Entrada	Graus de liberdade	SQT	MQT	F-valor
Regressão	5	1261700	252340	19.13866
Resíduo	6	79109	13184.8333	
Total	11	1340800		

$R_{Fy_entrada}$: $F_{crit(5; 6; 0.05)} = 4.39$; $R^2 = 0.94101$

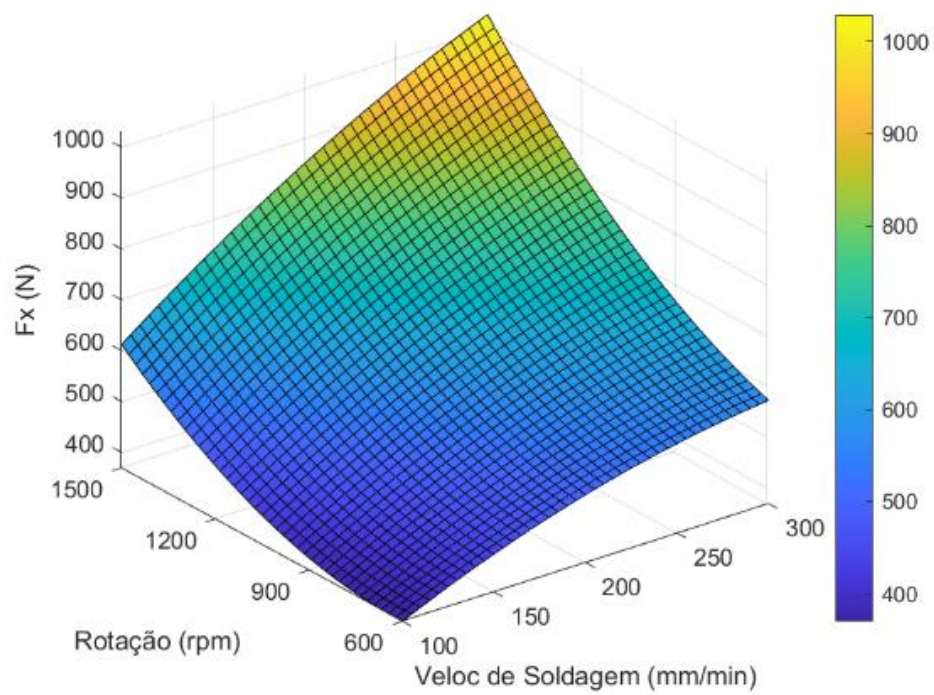


(fig.25) Curva de Regressão - F Transversal Entrada

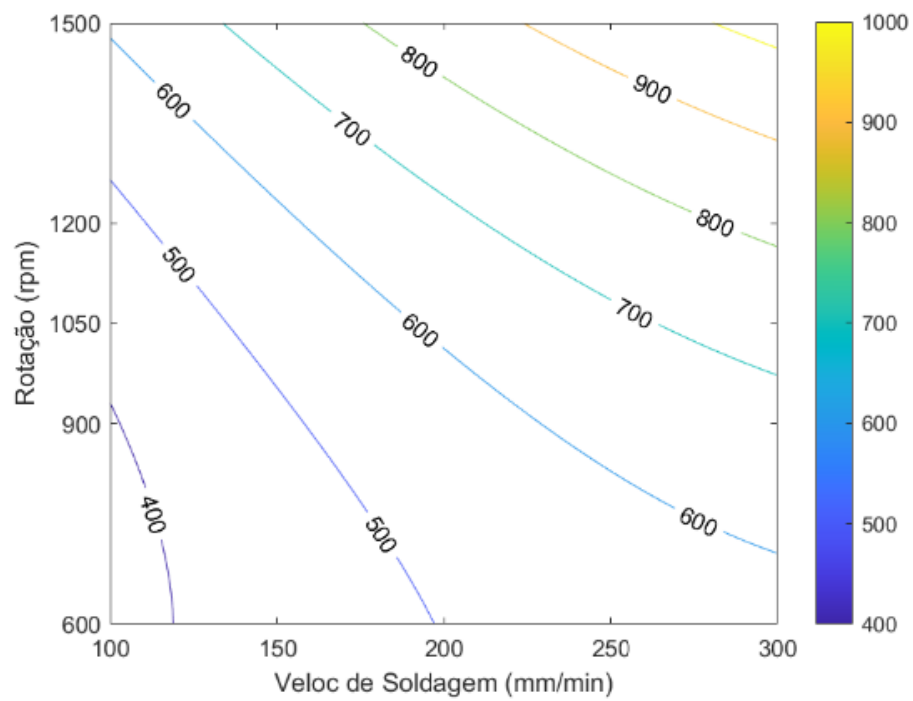


(fig.26) Gráfico de Resíduo - F Transversal Entrada

O resultado da ANOVA, tabela 11, indica significância estatística para o modelo polinomial estimado. O F-valor é maior que o F-crítico estimado para as condições de graus de liberdade de regressão e resíduo, considerando um intervalo de confiança de 95%. O gráfico de regressão apresentou uma reta com coeficiente angular próximo de 45° , sendo o bom ajuste do modelo ratificado pela obtenção de um R^2 satisfatório com valor de 0.94101. O gráfico de resíduo mostrou que os resíduos se encontraram distribuídos aleatoriamente dentro do intervalo de -3 a 3, ou seja, sem outliers. Seguem os gráficos de resposta de superfície e linhas de contorno, figuras 27 e 28.



(fig.27) Superfície de Resposta - F Transversal Entrada



(fig.28) Curvas de Contorno - F Transversal Entrada

Os gráficos possuem comportamento muito similar com os gráficos de força resultante para velocidade de soldagem, em que os valores convergem para a relação máxima velocidade de rotação com máxima velocidade de soldagem.

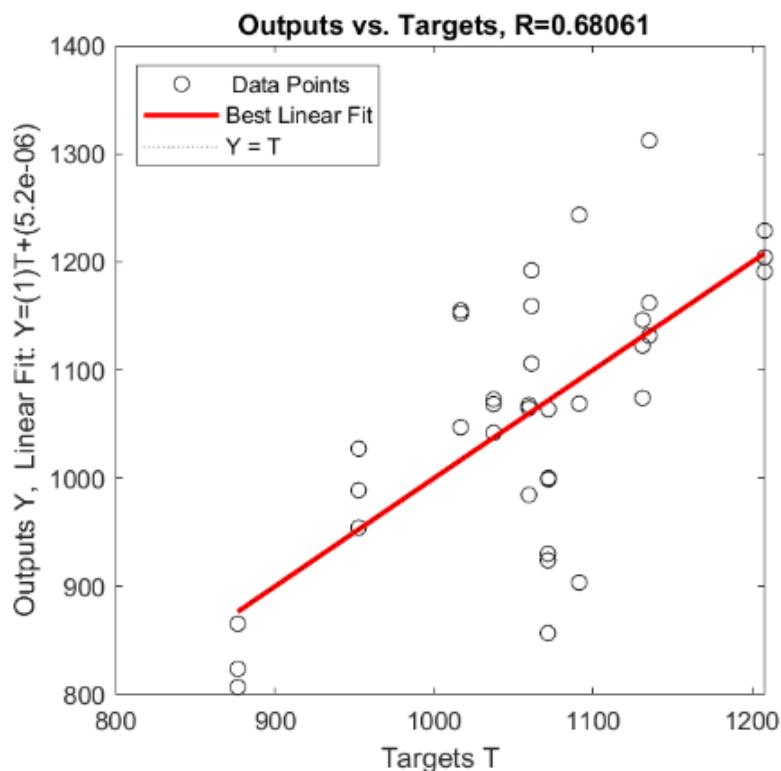
4.8 Força de transversal no percurso

Durante o percurso, assim como a força de soldagem, a força transversal deve crescer na proporção do aumento da velocidade de soldagem, mas a uma taxa inferior. Mas os resultados da simulação não foram satisfatórios em todos os aspectos de validação do modelo.

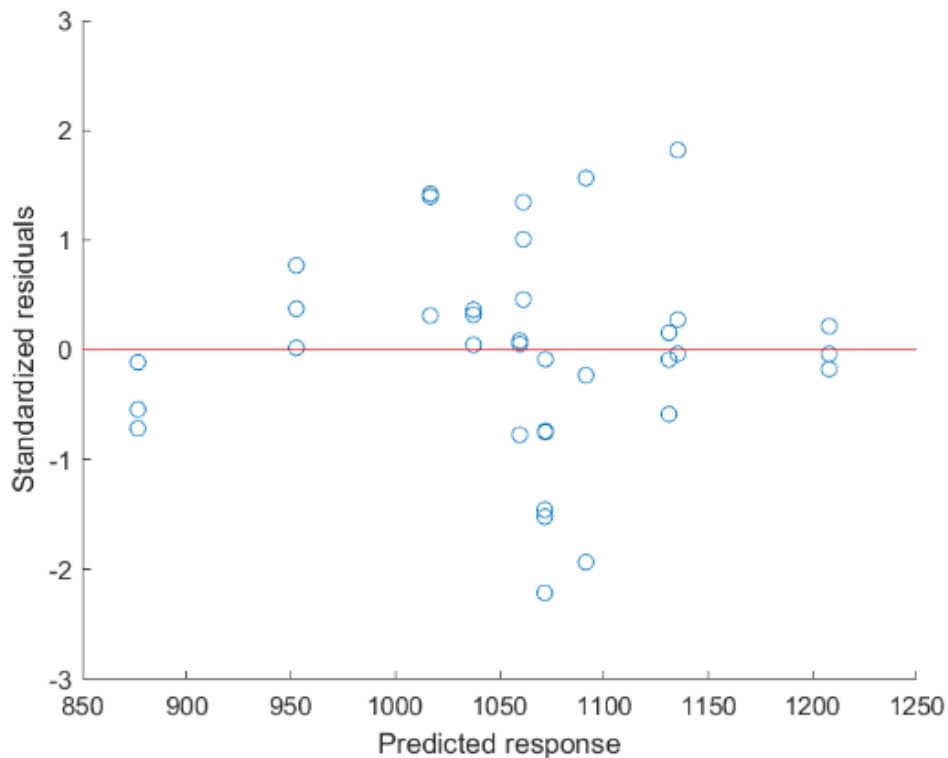
Tabela 12. Análise de Variância para Força Transversal de Percurso

Fonte Fx_Percurso	Graus de liberdade	SQT	MQT	F-valor
Regressão	5	244320	48864	1.03558
Resíduo	6	283110	47185	
Total	11	527430		

$R_{Fy_percurso}: F_{crit}(5; 6; 0.05) = 4.39; R^2 = 0.4632$

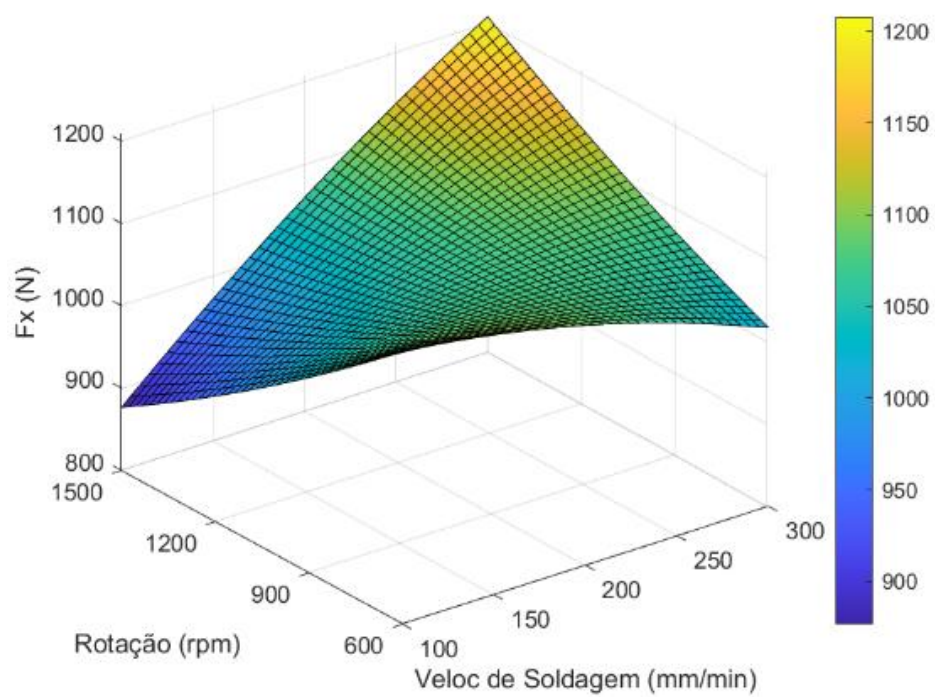


(fig.29) Curva de Regressão - F Transversal Percurso

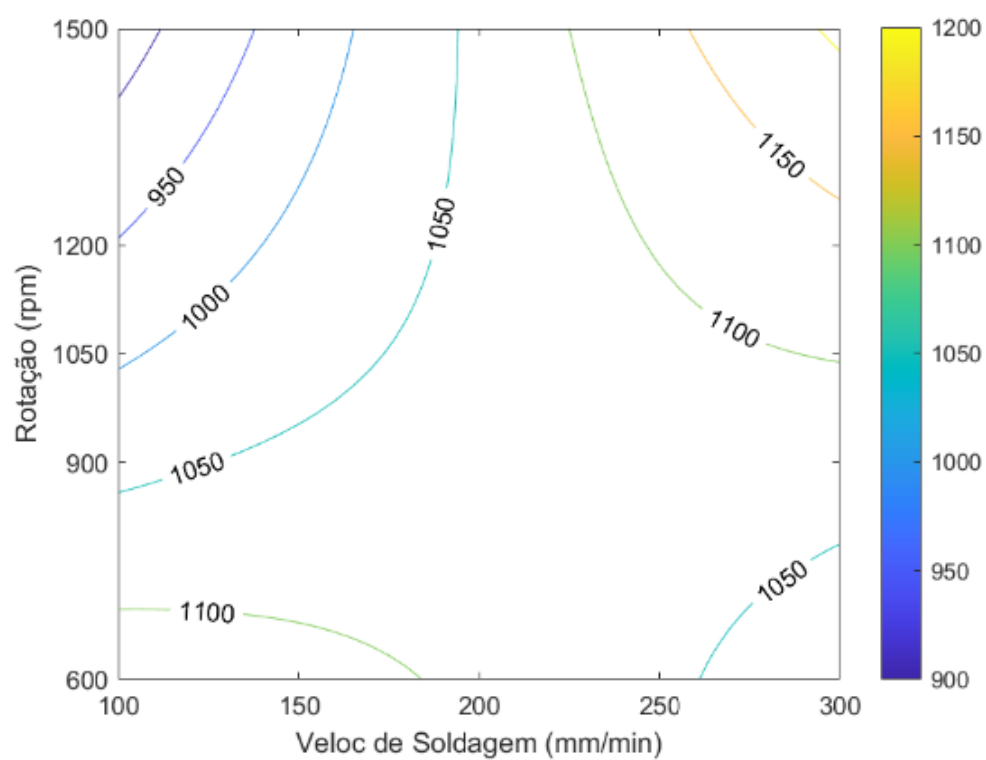


(fig.30) Gráfico de Resíduo - F Transversal Percurso

O resultado da ANOVA, tabela 12, indicou uma falta de significância estatística da regressão para o modelo polinomial estimado. O F-valor é menor que o F-crítico estimado para as condições de graus de liberdade de regressão e resíduo, considerando um intervalo de confiança de 95%. A reta obtida no gráfico de regressão ficou distante de 45°, encontrando-se os dados experimentais bastante dispersos ao redor dela. O mal ajuste do modelo aos dados experimentais também foi refletido em um R^2 insatisfatório, com valor calculado de 0.46320 confirmando a incapacidade do modelo em descrever os dados experimentais. O gráfico de resíduo mostrou que os resíduos se encontraram distribuídos aleatoriamente dentro do intervalo de -3 a 3, indicando a ausência de outliers. Mesmo o modelo não apresentando resultados satisfatórios, vale a construção e análise dos gráficos de resposta de superfície e linhas de contorno.



(fig.31) Superfície de Resposta - F Transversal Percursc

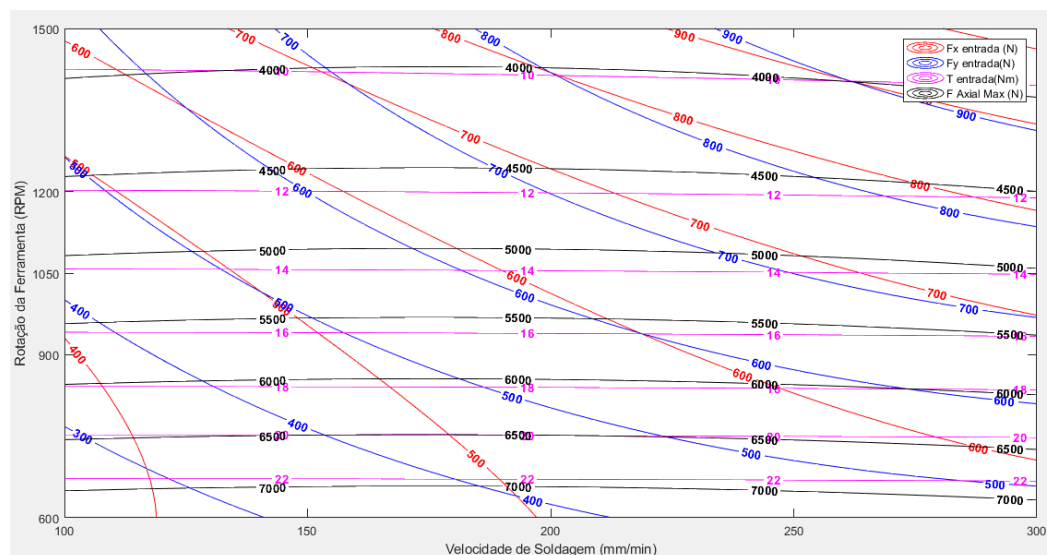


(fig.32) Curvas de Contorno - F Transversal Percurso

O gráfico de superfície de resposta aparenta convergir para mínimos valores de ambas as variáveis de entrada, mas as curvas de contorno não apresentam com clareza o comportamento ideal. É possível que o intervalo de dados analisados esteja fora de possíveis regiões ótimas, ou então algum parâmetro de controle durante o experimento pode não ter sido satisfatório.

4.9 Sobreposição das curvas de contorno

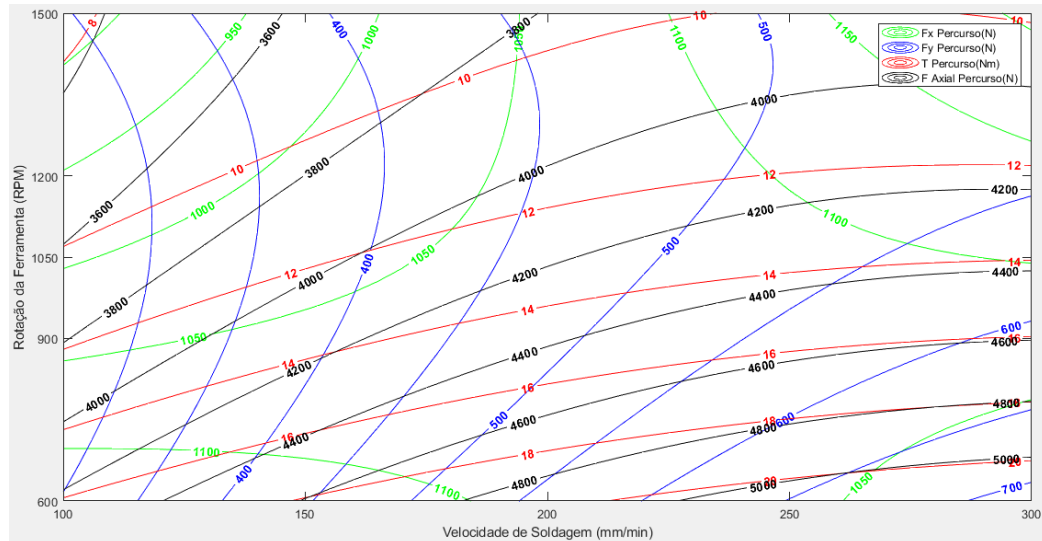
De forma a encontrar a condição ótima global, considerando todos os esforços mecânicos monitorados, as curvas de contorno construídas tendo como base os diversos modelos estimados foram sobrepostos. Segue, na figura 33, a sobreposição das curvas de contorno para Fx entrada, Fy entrada, F Axial Máxima e Torque de entrada:



(fig.33) Sobreposição das curvas de contorno das respostas de entrada

É observado que a região de convergência segue dois padrões distintos. Enquanto os esforços mecânicos transversais e de soldagem tendem para valores máximos de rotação da ferramenta e velocidade de soldagem, os esforços mecânicos resultantes do torque e da força axial máxima são maximizados em maiores velocidades de soldagem, mas em baixas rotações da ferramenta.

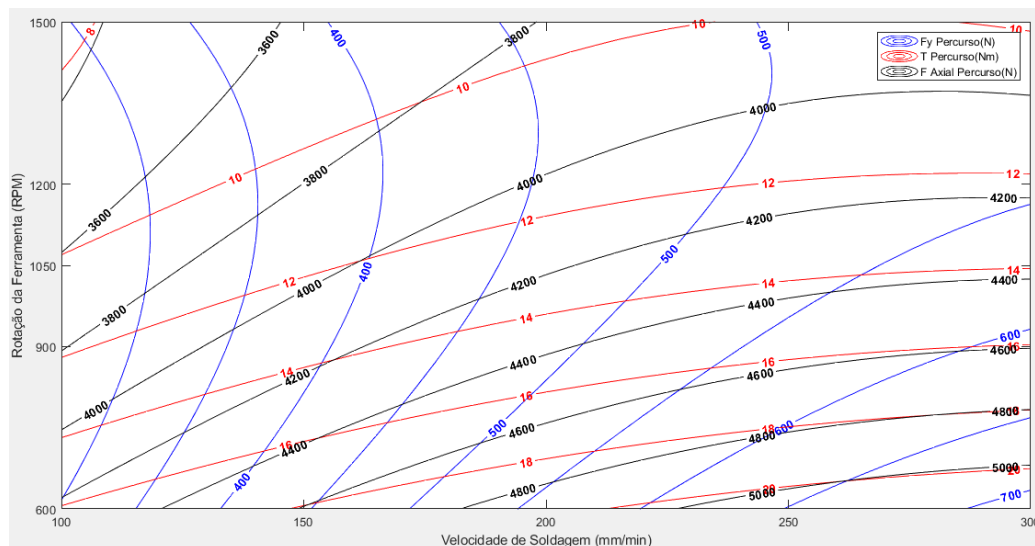
Na figura 34, é apresentada a sobreposição das curvas de contorno para F_x percurso, F_y percurso, F Axial percurso e torque de percurso:



(fig.34) Sobreposição das curvas de contorno das respostas de percurso

Dessa vez, é possível verificar uma tendência de maximização de todos os esforços mecânicos resultantes nas regiões de maiores velocidades de soldagem e menores rotações da ferramenta. Exceto para a resposta de força transversal, que não seguiu nenhum padrão de convergência.

Como foi verificado, a modelagem para a força transversal de percurso não foi significativa para representar a resposta, portanto segue na figura 35 a sobreposição das curvas sem essa variável:



(fig.35) Sobreposição das curvas de contorno das respostas de percurso (com exceção de F x percurso)

Dessa forma fica mais clara a visualização a convergência de maiores esforços mecânicos para velocidades de soldagem maiores, como de 300 mm/min e rotações da ferramenta menores, como de 600 rpm.

5 Conclusão

Com a estimativa do modelo polinomial de segunda ordem, foi possível descrever os esforços mecânicos. A partir da análise das superfícies de resposta e curvas de contorno estimadas para cada resposta, é possível verificar que os maiores esforços ocorrem para baixas rotações e altas velocidades. Nesse caso, é recomendado a entrada da ferramenta no início do processo com velocidade de soldagem reduzida e alta rotação da ferramenta. Essa combinação de variáveis de entrada minimizarão os efeitos dos esforços mecânicos resultantes no processo, otimizando essa etapa da produção.

A partir da análise das curvas de contorno sobrepostas, é possível inferir que os maiores esforços mecânicos resultantes do processo ocorrem durante o percurso da ferramenta, que é a região de maior desgaste da ferramenta e onde o processo de solda acontece. É importante analisar que a maximização dos esforços mecânicos ocorre

para maiores velocidades de soldagem e menores rotação da ferramenta. O que indica que se a operação ocorre nessas condições, existirão maiores esforços envolvidos, o que pode gerar superaquecimento, perda de performance do equipamento, além do desgaste da ferramenta. É indicado que se evitem velocidades de avanço da ferramenta muito altas em baixas rotações, ao passo que se for necessário o aumento da produtividade utilizando velocidades de soldagem maiores, é recomendado que o trabalho seja realizado a maiores rotações, com objetivo de minimizar os efeitos dos esforços mecânicos resultantes.

Referências bibliográficas

- [1] L.P. Khoo, C.H. Chen, Integration of response surface methodology with genetic algorithms, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 18 (2001) 483–489. <https://doi.org/10.1007/s0017010180483>.
- [2] M.J. Álvarez, L. Ilzarbe, E. Viles, M. Tanco, The Use of Genetic Algorithms in Response Surface Methodology, *Qual. Technol. Quant. Manag.* 6 (2009) 295–307. <https://doi.org/10.1080/16843703.2009.11673201>.
- [3] A. Witek-Krowiak, K. Chojnacka, D. Podstawczyk, A. Dawiec, K. Pokomeda, Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process, *Bioresour. Technol.* 160 (2014) 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.021>.
- [4] E. Hazir, T. Ozcan, Response Surface Methodology Integrated with Desirability Function and Genetic Algorithm Approach for the Optimization of CNC Machining Parameters, *Arab. J. Sci. Eng.* 44 (2019) 2795–2809. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3559-6>.
- [5] R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2016.
- [6] CAPELARI, T. V.; MAZZAFERRO, J. A. E. Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052. In: *SOLDAGEM & INSPEÇÃO*, 3, 2009, Brasil. São Paulo: v. 14, p. 215-227.
- [7] OLIVIECKI, N. J.; BESKOW, A. B. Análise dos parâmetros do processo de solda por fricção em uma liga de alumínio. In *PERSPECTIVA*, 138, 2013, Brasil. V, 37, p. 15-29.
- [8] MEDEIROS, L. F. Uso de algoritmos genéticos para definição de mix de produção em simulador de plano de negócios. In: *GEST. PROD.*, 3, 2015, Brasil. São Carlos: 22, p.624-635.
- [9] SILVA, J. C. A.; KIRNER, C. Algoritmo genético aplicado à simulação. Ano, 283p. Dissertação – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP.
- [10] AMARAL, F. F.; ALMEIDA, F. A.; COSTA, S.C.; LEME, R. C.; PAIVA, A. P. Aplicação da metodologia de superfície de resposta para otimização do processo de solda a ponto no aço galvanizado AISI 1006. In: *SOLDAGEM & INSPEÇÃO*, 23, 2018, Brasil. São Paulo, 2, p.129-142.
- [11] MARTINS, M. V. O. Análise dos parâmetros de soldagem por fricção (FSW) através das medidas de torque e forças envolvidas no processo.

2019. Dissertação (Mestrado Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos). – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

[12] ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, 1328p, 1990.

[13] Bussab, W. O. & Morettin, P. A., 1987, Estatística Básica, 4ª Edição, Atual, São Paulo.

[14] FISHER, R. A. Statistical Methods for Research Workers, 1925, Nova Iorque, NY.

[15] QUINTANA, K. J., et al., A study on internal defects in friction stir welding of aluminium alloys. 31st International Manufacturing Conference (IMC31), Cork (Ireland), pp. 69-74, 2014.

ANEXO A

Tabela F-teste para ANOVA.

VassarStats: Table of Critical F Values (p. 1)
[top entry for .05 level; bottom entry for .01 level]

		df numerator													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
df denominator	1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245
	2	4052	4999	5404	5624	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6083	6107	6126	6143
	3	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.42	19.42
	4	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9
	5	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71
	6	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.34	27.23	27.13	27.05	26.98	26.92
	7	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87
	8	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.55	14.45	14.37	14.31	14.25
	9	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64
	10	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.05	9.96	9.89	9.82	9.77
	11	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96
	12	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.79	7.72	7.66	7.60
	13	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53
	14	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.54	6.47	6.41	6.36
	15	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24
	16	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.73	5.67	5.61	5.56
	17	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03
	18	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.18	5.11	5.05	5.01
	19	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86
	20	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.77	4.71	4.65	4.60
	21	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74
	22	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.46	4.40	4.34	4.29
	23	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64
	24	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.22	4.16	4.10	4.05
	25	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55
	26	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	4.02	3.96	3.91	3.86
	27	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48
	28	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.86	3.80	3.75	3.70
	29	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42
	30	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.73	3.67	3.61	3.56