

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E GESTÃO

Nathália Fernandes de Barros

**Otimização dos parâmetros de soldagem a
ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5
para aplicação no setor automotivo**

Itajubá – MG, dezembro de 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E GESTÃO

Nathália Fernandes de Barros

**Otimização dos parâmetros de soldagem a
ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5
para aplicação no setor automotivo**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

Orientador: Prof. José Henrique de Freitas Gomes, Dr.

Coorientador: Prof. Sebastião Carlos da Costa, Dr.

Dezembro de 2018
Itajubá – MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E GESTÃO

Nathália Fernandes de Barros

**Otimização dos parâmetros de soldagem a
ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5
para aplicação no setor automotivo**

Dissertação aprovada por banca
examinadora em 06 de dezembro de
2018, conferindo à autora o título de
*Mestre em Ciências em Engenharia de
Produção.*

Banca examinadora:

Prof. José Henrique de Freitas Gomes, Dr. (Orientador)

Prof. Sebastião Carlos da Costa, Dr. (Coorientador)

Prof. João Roberto Ferreira, Dr.

Prof. Rogério Santana Peruchi, Dr.

Itajubá
2018

DEDICATÓRIA

Em memória dos meus tios Joaquim Fernandes Filho e Maria Aparecida Fernandes de Abreu, para sempre presentes em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família. Ao meu pai Pedro e a minha mãe Maria de Lourdes, pelo apoio em todos os momentos de minha vida, por serem meus exemplos de caráter e princípios e por sempre fazerem o possível e o impossível para que eu realizasse meus sonhos; ao meu irmão Pedro Henrique, por ser um grande amigo e sempre me dizer palavras de sabedoria quando eu mais preciso; aos meus cachorros Romeo, Lola, Théo e Glorinha, por serem meus companheiros fiéis e por serem meu suporte das horas de ansiedade, sempre me recebendo com seu amor incondicional.

Aos meus orientadores e amigos professor Sebastião e professor José Henrique, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho, por todo o conhecimento compartilhado e pelo suporte durante os anos de mestrado.

Ao professor e amigo Carlos Henrique Pereira Mello, meu orientador do Trabalho Final de Graduação e professor de várias disciplinas durante a graduação, por ter me incentivado a seguir na área acadêmica e por ser um grande exemplo como professor e como pessoa.

A minha professora de Português do ensino médio Nilza Chaves Pereira, por ter me incentivado a cursar Engenharia de Produção, por sempre me incentivar a crescer e a buscar novas oportunidades e por ser uma amiga presente e preocupada em todos os momentos de minha vida.

Aos meus queridos amigos Mateus Junqueira, Igor, Gabriela, Fabiana, Camilla, Vinícius, Júlia, Lara, Otávio, Gustavo, Afonso, Michelle, Rafaela, Guilherme, Valquíria, Lorena, Matheus Yuji, Carlos Alexandre, Amanda, Vanessa, Nicole e Robson, que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

Aos técnicos do laboratório de metalografia da Universidade Federal de Itajubá Claudemiro, Jonas e Marcos, por todo o suporte prestado durante a análise dos experimentos de soldagem.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À USIMINAS S/A, pela doação do material empregado neste trabalho.

*“Et même si c'est très loin, tant mieux
Ce qui compte c'est le trajet, pas le lieu.”*

(Fréro Delavega)

RESUMO

Para atingir padrões de redução da emissão de gases poluentes e eficiência no consumo de combustíveis sem prejudicar a segurança dos passageiros, os fabricantes de automóveis estão investindo no desenvolvimento de novos materiais que possam substituir os aços convencionais. Os Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) são alternativas promissoras, visto que podem ser trabalhados em chapas finas sem perder a alta resistência mecânica, a alta capacidade de absorção de energia e o bom desempenho em casos de colisão. Dentre eles, o aço 22MnB5 é o mais comumente utilizado no processo de estampagem a quente para a produção de componentes estruturais de geometria complexa; esse aço apresenta excelente aptidão à têmpera e pode atingir resistência à tração de cerca de 1500 MPa. Além disso, na indústria automotiva, o processo de soldagem mais empregado é a soldagem a ponto por resistência elétrica; cada veículo pode conter milhares de pontos de solda. Porém, o emprego dos AHSS constitui-se em um grande desafio para os processos de união, visto que estes materiais diferem bastante dos aços convencionais tanto em microestrutura quanto em propriedades mecânicas. Nesse contexto, o presente estudo propõe-se à otimização dos parâmetros de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5. Objetivou-se definir a combinação ótima de parâmetros que oferecessem os melhores resultados quanto à maximização da resistência ao cisalhamento, da largura da lentilha de solda e da penetração e à minimização da indentação e da Zona Termicamente Afetada (ZTA). Os parâmetros do processo selecionados foram tempo de soldagem, corrente de soldagem, tempo de pós-pressão e tempo de subida de corrente. Para o planejamento dos experimentos, a coleta de dados e a análise dos mesmos, seguiu-se a Metodologia de Superfície de resposta e, posteriormente, para a otimização, foram empregados dois métodos, o Método do Critério Global (MCG) e o Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP). A comparação entre os métodos mostrou que o EQMMP foi mais eficiente em se aproximar dos alvos estabelecidos e gerar maiores resistência e largura da lentilha, ressaltando a importância de se empregar um método que considere a estrutura de correlação quando as múltiplas respostas são fortemente correlacionadas.

Palavras-chave: Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica, Aços Avançados de Alta Resistência, 22MnB5, Planejamento e Análise de Experimentos, Metodologia de Superfície de Resposta, Otimização multi-objetivo, Método do Critério Global, Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado.

ABSTRACT

In the aim of achieving global standards for fuel economy and reduction of the greenhouse gases emissions, without prejudice for the vehicle safety, automobile manufacturers are making investments in the development of new materials to substitute the middle steel grades. The Advanced High-Strength Steels are promising materials to produce lightweight automobiles because they can be used in thinner sheets without losing the great properties of strength, energy absorption and great performance in case of collision. The boron steel 22MnB5 is the most extensively steel grade used in the hot stamping process to produce car anti-collision structure parts; this alloy achieves a fully martensitic microstructure and a tensile strength over 1500 MPa after the hot stamping. Furthermore, Resistance Spot Welding (RSW) is a broadly used and important welding process in automotive body construction; it contains about 90 % of car body assembly. However, the Advanced High-Strength Steels are a big challenge to the joining methods since their microstructure and mechanical properties differ from the middle steel grades. The aim of this research was to optimize the resistance spot welding parameters applied to the 22MnB5 steel. The objectives were: maximize the tensile shear strength, the nugget width and the penetration and minimize the indentation depth and the heat-affected zone (HAZ). The process parameters selected were the welding time, the welding current, the hold time and the upslope time. To design the experiments, collect the data and analyze them, it was used the Response Surface Methodology and, to optimize the process, it was used two optimization methods, the Global Criterion Method (GCM) and the Weighted Multivariate Mean Square Error (WMMSE). The comparison of these two methods indicated that the WMMSE method is more efficient in achieving the established targets and producing greater tensile shear strength and nugget width, emphasizing the importance of using a method that considers the correlation structure between the multiple responses when they are strongly correlated.

Keywords: *Resistance Spot Welding, RSW, Advanced High-Strength Steels, 22MnB5, Design of Experiments, Response Surface Methodology, Multi objective Optimization, Global Criterion Method, Weighted Multivariate Mean Square Error.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Taxa (%) de crescimento do último trimestre de 2017 em relação ao mesmo trimestre do ano anterior para o PIB e as atividades econômicas que o compõem..... | 3 |
| Figura 2.1 – Diagrama global de conformabilidade..... | 11 |
| Figura 2.2 – Componentes estruturais do Honda CR-Z..... | 12 |
| Figura 2.3 – Componentes estruturais do Porsche Cayenne..... | 12 |
| Figura 2.4 – Estrutura do Kia Sportage feita com 51% de AHSS..... | 13 |
| Figura 2.5 – Partes produzidas com AHSS estampados a quente em um carro popular..... | 14 |
| Figura 2.6 – Processos de estampagem a quente..... | 15 |
| Figura 2.7 (a) – Propriedades mecânicas do aço 22MnB5 antes e depois da estampagem a quente com têmpera..... | 17 |
| Figura 2.7 (b) – Transformação de fase durante o resfriamento do aço 22MnB..... | 17 |
| Figura 2.8 – Configuração da soldagem a ponto por resistência..... | 19 |
| Figura 2.9 – Resistência elétrica durante a soldagem a ponto..... | 21 |
| Figura 2.10 – Representação esquemática do ciclo de soldagem..... | 27 |
| Figura 2.11 – Dissipação de calor durante a soldagem a ponto por resistência elétrica..... | 29 |
| Figura 2.12 – Atributos da solda revelados pela análise metalográfica da seção transversal .. | 32 |
| Figura 2.13 – Técnica de medição do diâmetro do ponto de solda..... | 33 |
| Figura 2.14 – Representação do procedimento de cálculo do diâmetro do ponto de solda..... | 34 |
| Figura 2.15 – Procedimento para medição da indentação..... | 36 |
| Figura 2.16 (a) – Expulsão na superfície de contato eletrodo/peça..... | 38 |
| Figura 2.16 (b) – Expulsão na interface peça/peça..... | 38 |
| Figura 2.17 – Cavidade formada na lentilha de solda devido à expulsão de material..... | 39 |
| Figura 2.18 – Faixa aceitável de corrente na soldagem a ponto por resistência elétrica, comparando os aços AHSS, HSLA e convencionais..... | 40 |
| Figura 2.19 – Modelo geral de um processo ou sistema..... | 41 |
| Figura 2.20 – Arranjo Composto Central circunscrito para três fatores..... | 47 |
| Figura 2.21 – Estratégia de ponderação das respostas utilizada no EQMMP..... | 52 |
| Figura 3.1 – Classificação dos artigos sobre o aço 22MnB5 de acordo com o tema que abordam..... | 58 |
| Figura 3.2 – Classificação dos artigos sobre o aço 22MnB5 de acordo com o ano de publicação..... | 58 |
| Figura 4.1 – Esquematização do objeto de estudo..... | 68 |
| Figura 4.2 – Classificação do presente estudo..... | 70 |
| Figura 4.3 (a) – Etapas da pesquisa..... | 72 |
| Figura 4.3 (b) – Etapas da pesquisa..... | 73 |
| Figura 4.4 – Eletrodo de cobre, modelo TW 5/8, reto com ponta..... | 76 |
| Figura 4.5 – Equipamento de soldagem a ponto da marca Presol Transweld®, modelo TWPRV50..... | 77 |
| Figura 4.6 – Amostra padrão para ensaio de cisalhamento por tração em solda a ponto..... | 79 |
| Figura 4.7 – Acoplamento do sensor do sistema de medição ao cabeçote móvel da máquina de soldagem..... | 80 |
| Figura 4.8 – Gráficos de deslocamento do sensor para determinação da indentação..... | 81 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.9 – Imagem digitalizada da ZTA visível..... | 82 |
| Figura 4.10 (a) – Imagem digitalizada para análise metalográfica..... | 84 |
| Figura 4.10 (b) – Imagem digitalizada para análise metalográfica com as cotas das medições das respostas | 84 |
| Figura 5.1 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre a resistência ao cisalhamento | 92 |
| Figura 5.2 – Tabela de parâmetros para a resistência ao cisalhamento..... | 92 |
| Figura 5.3 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre o diâmetro do ponto de solda | 93 |
| Figura 5.4 – Tabela de parâmetros para o diâmetro do ponto de solda..... | 93 |
| Figura 5.5 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre a indentação | 94 |
| Figura 5.6 – Tabela de parâmetros para a indentação | 94 |
| Figura 5.7 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre a ZTA visível | 95 |
| Figura 5.8 – Tabela de parâmetros para a ZTA visível | 95 |
| Figura 5.9 – Gráfico da relação entre a resistência e o tamanho da solda para o primeiro Fatorial Completo | 100 |
| Figura 5.10 – Pontos F4 e F8 do primeiro Arranjo Fatorial Completo | 100 |
| Figura 5.11 – Gráfico de dispersão entre a separação das chapas e a indentação para o primeiro Fatorial Completo | 101 |
| Figura 5.12 (a) – Falha por pullout, com arrancamento do ponto das duas chapas, fratura iniciada na ZTA..... | 102 |
| Figura 5.12 (b) – Falha por pullout, com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA | 102 |
| Figura 5.12 (c) – Falha por pullout, com fratura iniciada na ZTA | 102 |
| Figura 5.12 (d) – Falha interfacial | 102 |
| Figura 5.13 (a) – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros para o primeiro Arranjo Fatorial Completo | 103 |
| Figura 5.13 (b) – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros para o primeiro Arranjo Fatorial Completo | 104 |
| Figura 5.14 (a) – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros para o segundo Arranjo Fatorial Completo | 108 |
| Figura 5.14 (b) – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros para o segundo Arranjo Fatorial Completo | 109 |
| Figura 5.15 – Gráfico de Pareto para a resistência ao cisalhamento | 110 |
| Figura 5.16 – Gráfico de Pareto para a largura da lentilha..... | 111 |
| Figura 5.17 – Gráfico de Pareto para a indentação..... | 111 |
| Figura 5.18 – Gráfico de Pareto para ZTA..... | 112 |
| Figura 5.19 – Gráfico de Pareto para a penetração..... | 112 |
| Figura 5.20 – Efeitos principais sobre a resistência ao cisalhamento | 121 |
| Figura 5.21 – Comparação entre o aumento da resistência ao cisalhamento e o aumento da largura da lentilha | 123 |
| Figura 5.22 – Gráfico de relação entre a resistência e o tamanho da solda para o Arranjo CCD | 124 |
| Figura 5.23 – Efeitos principais sobre a largura da lentilha | 125 |
| Figura 5.24 – Efeitos principais sobre a indentação | 126 |
| Figura 5.25 – Gráfico de dispersão entre a separação das chapas e a indentação para o Arranjo CCD | 127 |
| Figura 5.26 – Efeitos principais sobre a ZTA | 127 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.27 – Efeitos principais sobre a Penetração..... | 128 |
| Figura 5.28 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a resistência ao cisalhamento (Is = 85 kA; Isub = 14 ciclos) | 130 |
| Figura 5.28 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a resistência ao cisalhamento | 130 |
| Figura 5.29 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a resistência ao cisalhamento (Is = 85 kA; PósP = 35 ciclos) | 130 |
| Figura 5.29 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a resistência ao cisalhamento..... | 130 |
| Figura 5.30 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a largura da lentilha (Is = 85 kA; PósP = 35 ciclos) . | 131 |
| Figura 5.30 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a largura da lentilha | 131 |
| Figura 5.31 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a largura da lentilha (ts = 9 ciclos; Isub = 14 ciclos) | 132 |
| Figura 5.31 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a largura da lentilha..... | 132 |
| Figura 5.32 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de soldagem sobre a indentação (PósP = 35 ciclos ; Isub = 14 ciclos) . | 133 |
| Figura 5.32 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de soldagem sobre a indentação | 133 |
| Figura 5.33 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a indentação (Is = 85 kA; PósP = 35 ciclos) | 133 |
| Figura 5.33 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a indentação | 133 |
| Figura 5.34 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a indentação (ts = 9 ciclos; PósP = 35 ciclos) | 134 |
| Figura 5.34 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a indentação | 134 |
| Figura 5.35 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a indentação (ts = 9 ciclos; Isub = 14 ciclos) | 134 |
| Figura 5.35 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a indentação..... | 134 |
| Figura 5.36 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a ZTA (ts = 9 ciclos; Isub = 14 ciclos)..... | 135 |
| Figura 5.36 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a ZTA | 135 |
| Figura 5.37 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de subida de corrente e o tempo de pós-pressão sobre a ZTA (ts = 9ciclos; Is = 85%)..... | 136 |
| Figura 5.37 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de subida de corrente e o tempo de pós-pressão sobre a ZTA | 136 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.38 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a penetração ($t_s = 9$ ciclos; PósP = 35 ciclos) | 137 |
| Figura 5.38 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a penetração | 137 |
| Figura 5.39 – Planilha para a otimização do processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5, utilizando o MCG | 139 |
| Figura 5.40 – Estrutura de correlação entre as respostas | 140 |
| Figura 5.41 – Análise de Componentes Principais para as respostas ponderadas | 143 |
| Figura 5.42 – Planilha para a otimização do processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5, utilizando o EQMMP | 145 |
| Figura 5.43 – Geometrias de solda otimizadas pelo MCG e pelo EQMMP, respectivamente | 147 |
| Figura 5.44 – Pontos 1 e 4 dos experimentos de confirmação | 149 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 2.1 – Características das técnicas de planejamento experimental | 43 |
| Quadro 3.1 – Objetivos das pesquisas anteriores | 60 |
| Quadro 3.2 – Classificação das pesquisas anteriores quanto ao tipo de soldagem e ao emprego de técnicas de Planejamento e Análise Experimentos e de métodos de otimização | 61 |
| Quadro 4.1 – Etapas da metodologia de pesquisa | 69 |
| Quadro 4.2 – Parâmetros de regulagem do equipamento de soldagem a ponto | 77 |
| Quadro 5.1 – Nível dos parâmetros secundários | 87 |
| Quadro 5.2 – Envelopes operacionais para a próxima etapa | 88 |
| Quadro 5.3 – Quatro primeiros parâmetros mais significativos para cada resposta..... | 96 |
| Quadro 5.4 – Nível dos parâmetros fixos | 98 |
| Quadro 5.5 – Observações realizadas durante o processo de soldagem e após o ensaio de cisalhamento para os experimentos do primeiro Arranjo Fatorial Completo..... | 99 |
| Quadro 5.6 – Análise de curvatura para as respostas | 103 |
| Quadro 5.7 – Análise de curvatura para as respostas do novo Arranjo Fatorial Completo.... | 108 |
| Quadro 5.8 – Observações realizadas durante o processo de soldagem e após o ensaio de cisalhamento para os experimentos do Arranjo Composto Central | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1 – Faixas de corrente utilizadas pelas pesquisas anteriores que abordam a soldagem a ponto por resistência elétrica de um aço boro estampado a quente | 63 |
| Tabela 3.2 – Faixas de tempo utilizadas pelas pesquisas anteriores que abordam a soldagem a ponto por resistência elétrica de um aço boro estampado a quente | 64 |
| Tabela 4.1 – Composição química do aço 22MnB5..... | 76 |
| Tabela 4.2 – Dimensões dos corpos de prova | 79 |
| Tabela 5.1 – Testes iniciais para definição dos envelopes operacionais | 87 |
| Tabela 5.2 – Níveis dos parâmetros para o Arranjo de Taguchi | 90 |
| Tabela 5.3 (a) – Matriz experimental para o Arranjo de Taguchi com respostas de resistência e diâmetro | 90 |
| Tabela 5.3 (b) – Matriz experimental para o Arranjo de Taguchi com respostas de indentação e ZTA..... | 91 |
| Tabela 5.4 – Níveis dos parâmetros para o primeiro Arranjo Fatorial Completo | 97 |
| Tabela 5.5 – Matriz experimental para o primeiro Arranjo Fatorial Completo com respostas | 98 |
| Tabela 5.6 – Níveis dos parâmetros para o segundo Arranjo Fatorial Completo..... | 106 |
| Tabela 5.7 – Matriz experimental para o segundo Arranjo Fatorial Completo com respostas | 107 |
| Tabela 5.8 – Níveis dos parâmetros para o Arranjo Composto Central | 113 |
| Tabela 5.9 – Matriz experimental para o Arranjo Composto Central com respostas..... | 114 |
| Tabela 5.10 – Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos | 117 |
| Tabela 5.11 – Análise de Variância (ANOVA)..... | 118 |
| Tabela 5.12 – Comparação entre os ajustes dos modelos completos e dos modelos finais ... | 119 |
| Tabela 5.13 – Análise dos resíduos | 120 |
| Tabela 5.14 – Respostas padronizadas | 141 |
| Tabela 5.15 – Ponderação das respostas..... | 142 |
| Tabela 5.16 – Dados para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais | 144 |
| Tabela 5.17 – Parâmetros ótimos da soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5 | 146 |
| Tabela 5.18 – Experimentos de confirmação | 148 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Contextualização..... | 1 |
| 1.2. Relevância e Justificativa..... | 2 |
| 1.3. Objetivos | 5 |
| 1.3.1. Objetivo geral | 5 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 6 |
| 1.4. Questões e Proposições..... | 6 |
| 1.5. Delimitação do tema | 8 |
| 1.6. Estrutura do trabalho..... | 8 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 9 |
| 2.1. Considerações iniciais..... | 9 |
| 2.2. Aços Avançados de Alta Resistência – AHSS (<i>Advanced High-Strength Steels</i>)..... | 9 |
| 2.2.1. AHSS estampados a quente..... | 13 |
| 2.2.2. Estampagem a quente..... | 14 |
| 2.3. Aço manganês-boro 22MnB5 | 16 |
| 2.4. Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica | 17 |
| 2.4.1. Princípio de funcionamento | 18 |
| 2.4.1.1. Energia térmica..... | 19 |
| 2.4.1.2. Resistência elétrica | 21 |
| 2.4.1.3. Densidade de corrente | 22 |
| 2.4.2. Parâmetros de regulação do processo | 22 |
| 2.4.2.1. Corrente de soldagem | 23 |
| 2.4.2.2. Força exercida pelos eletrodos | 24 |
| 2.4.2.3. Tempo efetivo de soldagem..... | 24 |
| 2.4.2.4. Tempo de pré-pressão (<i>Squeeze time</i>) | 25 |
| 2.4.2.5. Tempo de subida de corrente (<i>Upslope time</i>)..... | 25 |
| 2.4.2.6. Tempo de descida de corrente (<i>Downslope time</i>)..... | 26 |
| 2.4.2.7. Tempo de pós-pressão (<i>Hold time</i>)..... | 26 |
| 2.4.3. Ciclo de soldagem a ponto por resistência elétrica | 26 |
| 2.4.4. Outros fatores que afetam a geração de calor | 27 |
| 2.4.4.1. Condições da superfície do material de base..... | 27 |
| 2.4.4.2. Influência dos eletrodos..... | 27 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.4.3. Influência da composição do metal de base | 28 |
| 2.4.4.4. Dissipação de calor | 28 |
| 2.4.5. Equipamentos de soldagem a ponto por resistência elétrica | 29 |
| 2.4.5.1. Eletrodos | 29 |
| 2.4.5.2. Máquinas | 30 |
| 2.5. Análise da qualidade da solda | 30 |
| 2.5.1. Atributos geométricos | 31 |
| 2.5.1.1. Tamanho da solda | 32 |
| 2.5.1.2. Modos de falha | 34 |
| 2.5.1.3. Indentação | 35 |
| 2.5.1.4. Penetração | 37 |
| 2.5.2. Desempenho da solda | 37 |
| 2.5.2.1. Ensaio de cisalhamento por tração | 37 |
| 2.5.3. Características do processo durante a execução da soldagem | 38 |
| 2.5.3.1. Expulsão de material | 38 |
| 2.6. Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica dos AHSS | 39 |
| 2.7. Planejamento e Análise de Experimentos | 40 |
| 2.7.1. Metodologia de Superfície de Resposta | 44 |
| 2.7.1.1. A estrutura de uma Metodologia de Superfície de Resposta | 45 |
| 2.8. Otimização de múltiplas respostas | 48 |
| 2.9. Método do Critério Global (MCG) | 49 |
| 2.10. Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP) | 50 |
| 2.11. Considerações finais | 55 |
| 3. PESQUISAS ANTERIORES QUE ABORDARAM O AÇO 22MnB5 COMO | |
| OBJETO DE ESTUDO | 57 |
| 3.1. Considerações iniciais | 57 |
| 3.2. Objetivos e critérios de busca | 57 |
| 3.3. Influência dos parâmetros principais e características da soldagem a ponto do aço 22MnB5 | 61 |
| 3.4. Microestrutura do aço 22MnB5 após a soldagem a ponto | 64 |
| 3.5. Microdureza do aço 22MnB5 após a soldagem a ponto | 65 |
| 3.6. Modos de falha da junta soldada por soldagem a ponto empregando o aço 22MnB5 | 66 |
| 3.7. Considerações finais | 67 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 68 |
| 4.1. Considerações iniciais | 68 |
| 4.2. Objeto de estudo e problema de pesquisa | 68 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3. Método de pesquisa | 69 |
| 4.4. Etapas da pesquisa | 71 |
| 4.4.1. Testes preliminares e definição das respostas de interesse | 74 |
| 4.4.2. Fase Zero – Experimentos de <i>Screening</i> (Arranjo de Taguchi) | 74 |
| 4.4.3. Fase Um – Análise de curvatura e adequação dos níveis de trabalho (Arranjo Fatorial Completo) | 74 |
| 4.4.4. Fase Dois – Modelagem da Superfície de Resposta (Arranjo Composto Central – CCD) | 75 |
| 4.4.5. Otimização | 75 |
| 4.5. Materiais e equipamentos | 76 |
| 4.5.1. Material | 76 |
| 4.5.2. Eletrodos..... | 76 |
| 4.5.3. Equipamento de soldagem | 77 |
| 4.6. Preparação dos corpos de prova..... | 78 |
| 4.6.1. Tratamento de têmpera..... | 78 |
| 4.6.2. Limpeza das chapas..... | 78 |
| 4.6.3. Confecção e montagem dos corpos de prova | 78 |
| 4.7. Ensaios e análises..... | 79 |
| 4.7.1. Inspeção visual | 79 |
| 4.7.2. Medição da indentação por deslocamento do eletrodo | 80 |
| 4.7.3. Medição da Zona Termicamente Afetada visível | 81 |
| 4.7.4. Ensaio de cisalhamento por tração | 82 |
| 4.7.5. Medição do diâmetro do ponto de solda em fratura..... | 82 |
| 4.7.6. Análise metalográfica..... | 83 |
| 4.8. Considerações finais | 84 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 85 |
| 5.1. Considerações iniciais..... | 85 |
| 5.2. Testes preliminares e definição das respostas de interesse..... | 85 |
| 5.2.1. Testes preliminares..... | 85 |
| 5.2.2. Definição das respostas de interesse | 88 |
| 5.3. Fase Zero – Experimentos de <i>Screening</i> (Arranjo de Taguchi)..... | 89 |
| 5.3.1. Resistência ao cisalhamento por tração..... | 92 |
| 5.3.2. Diâmetro do ponto de solda | 93 |
| 5.3.3. Indentação | 94 |
| 5.3.4. Zona Termicamente Afetada (ZTA) visível..... | 95 |

| | |
|--|-----|
| 5.4. Fase Um – Análise de curvatura e adequação dos níveis de trabalho (Arranjo Fatorial Completo) | 97 |
| 5.4.1. Primeiro Arranjo Fatorial Completo | 97 |
| 5.4.1.1. Análise da expulsão de material | 99 |
| 5.4.1.2. Análise da separação entre as chapas | 101 |
| 5.4.1.3. Análise dos modos de falha | 102 |
| 5.4.1.4. Análise da curvatura | 103 |
| 5.4.2. Segundo Arranjo Fatorial Completo | 106 |
| 5.4.2.1. Análise da curvatura | 107 |
| 5.4.2.2. Análise das variáveis significativas | 110 |
| 5.5. Fase Dois – Modelagem das Superfícies de Resposta (Arranjo Composto Central – CCD) | 113 |
| 5.5.1. Níveis de trabalho e matriz experimental | 113 |
| 5.5.2. Modelagem matemática das respostas | 116 |
| 5.5.3. Adequação e ajuste dos modelos | 117 |
| 5.5.4. Análise dos resíduos | 120 |
| 5.5.5. Efeitos principais dos parâmetros sobre a resistência ao cisalhamento | 121 |
| 5.5.5.1. Análise da expulsão de material | 122 |
| 5.5.5.2. Análise dos modos de falha | 123 |
| 5.5.6. Efeitos principais dos parâmetros sobre a largura da lentilha | 125 |
| 5.5.7. Efeitos principais dos parâmetros sobre a indentação | 126 |
| 5.5.7.1. Análise da separação entre as chapas | 126 |
| 5.5.8. Efeitos principais dos parâmetros sobre a ZTA | 127 |
| 5.5.9. Efeitos principais dos parâmetros sobre a penetração | 128 |
| 5.5.10. Efeitos das interações entre os parâmetros | 129 |
| 5.6. Otimização pelo MCG (Método do Critério Global) | 138 |
| 5.7. Otimização pelo EQMMP (Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado) | 140 |
| 5.7.1. Análise da correlação entre as respostas | 140 |
| 5.7.2. Padronização e ponderação das respostas | 140 |
| 5.7.3. Análise de Componentes Principais (ACP) | 142 |
| 5.7.4. Modelos matemáticos para os componentes principais | 143 |
| 5.7.5. Alvos em termos dos componentes principais | 144 |
| 5.7.6. Formulação do EQMMP | 144 |
| 5.8. Comparação entre os métodos de otimização | 146 |
| 5.9. Experimentos de confirmação | 147 |
| 5.10. Considerações finais | 149 |

| | |
|---|-----|
| 6. CONCLUSÕES | 150 |
| 6.1. Conclusões gerais | 150 |
| 6.2. Confirmação das proposições | 152 |
| 6.3. Contribuições do trabalho | 154 |
| 6.4. Sugestões para estudos futuros | 155 |
| REFERÊNCIAS | 156 |
| ANEXO A – Imagens digitalizadas para análise metalográfica dos pontos do Arranjo CCD | 162 |
| ANEXO B – Gráficos de interação para o segundo Arranjo Fatorial Completo | 164 |
| ANEXO C – Gráficos de resíduos para as respostas | 169 |
| ANEXO D – Modos de falha dos pontos do Arranjo CCD após o ensaio de cisalhamento por tração | 174 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Os padrões para segurança dos automóveis, eficiência no uso dos combustíveis e redução da emissão de gases poluentes estão cada vez mais rígidos; os veículos devem equilibrar desempenho, segurança, economia de combustível, acessibilidade econômica e questões ambientais, ao passo que também devem manter um *design* atraente para os clientes. Contudo, existe uma relação entre resistência e leveza difícil de ser equilibrada para os aços convencionais utilizados na indústria automotiva.

Projetos de aços inovadores vêm ganhando espaço no intuito de solucionar o desafio de atender aos requisitos conflitantes de resistência e leveza que não podem ser atingidos com o emprego dos aços convencionais, visto que aplicações estruturais exigem materiais de alta resistência e rigidez, o que é conseguido com a utilização de chapas mais espessas, mas, por outro lado, a economia de combustível e a diminuição das emissões de gases poluentes são alcançadas com o uso de chapas mais finas, que reduzem o peso do veículo.

Diante desse cenário, os Aços Avançados de Alta Resistência – AHSS (*Advanced High-Strength Steels*), têm-se tornado opções promissoras para reduzir o peso dos veículos sem comprometer a segurança de seus passageiros, dadas as suas grandes vantagens de poderem ser trabalhados em chapas finas sem perder a alta resistência, a alta capacidade de absorção de energia e o bom desempenho em casos de colisão.

De acordo com a WorldAutoSteel (2017), os AHSS apresentam composição química cuidadosamente selecionada e microestrutura multifásica complexa, proveniente de transformações térmicas precisamente controladas. Diversos mecanismos são empregados para que os AHSS atinjam boas propriedades de resistência à tração, ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga. As principais razões para se utilizar tais materiais são seu desempenho superior, em caso de colisão, a resistência elevada que podem atingir, utilizando chapas de espessuras mais finas e o fato de apresentarem custos acessíveis quando comparados às outras alternativas para os aços convencionais.

Dentre os AHSS, segundo So *et al.* (2012), os aços estampados a quente são excelentes para a fabricação de componentes com geometria complexa e interessantes para estruturas que devem apresentar elevada resistência em caso de colisão. Segundo Gorni (2010) e Karbasian e Tekkaya (2010), dentre os componentes geralmente fabricados com AHSS estampados a

quente, estão: proteção lateral e superior contra impacto, soleira de porta, colunas A e B, para-choque, trilhos para tetos, componentes de trilhos laterais, reforço do túnel, longarinas e reforço das portas.

O aço 22MnB5, pertencente à classe dos aços endurecidos ao boro, é o mais comumente utilizado em processos de estampagem a quente. Este material possui excelente aptidão à têmpera e, após tal tratamento térmico, consegue atingir resistência à tração de cerca de 1500 MPa (KARBASIAN & TEKKAYA, 2010; GÜLER, 2013; ELLER *et al.*, 2014).

A composição e a microestrutura diferenciadas dos AHSS constituem-se em um desafio para os processos de união de materiais. Na indústria automotiva, a soldagem a ponto por resistência elétrica é extensivamente empregada; esse tipo de soldagem é um processo em que as peças, pressionadas pela força exercida pelos eletrodos, são unidas através do calor gerado pela resistência ao fluxo de uma corrente elétrica. De acordo com Chao (2003), um automóvel pode conter de 2000 a 5000 pontos de solda.

Nesse contexto, o aprimoramento da soldagem a ponto por resistência elétrica dos AHSS torna-se primordial para que o emprego de materiais mais sofisticados na indústria automotiva continue evoluindo, visto que tais materiais trazem grandes vantagens para a resistência mecânica e a redução na emissão de gases poluentes e no uso de combustíveis sem causar prejuízo à segurança dos passageiros.

1.2. Relevância e Justificativa

A indústria automotiva tem extensa participação na estrutura industrial em escala global. No Brasil, o setor automotivo representa, aproximadamente, 22% do PIB industrial e, além disso, a produção nesse setor exerce influência significativa sobre vários outros setores industriais, como os de aços e derivados, máquinas e equipamentos, materiais eletrônicos, produtos de metal e artigos de borracha e plástico, sendo que o setor de aços e derivados representa um dos fornecedores mais importantes para a indústria automotiva (MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS, 2018).

No ano de 2016, a produção mundial de automóveis foi de 72,1 milhões de unidades, das quais 1,77 milhões foram produzidos no Brasil, colocando o país em 10º lugar entre os produtores mundiais. Também no ano de 2016, o Brasil foi o 8º maior mercado no ranking mundial, comercializando 2,05 milhões de veículos, atrás de China (28 milhões), Estados Unidos (17,8 milhões), Japão (4,9 milhões), Alemanha (3,7 milhões) Índia (3,6 milhões), Reino

Unido (3,1 milhões) e França (2,4 milhões) (MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS, 2018).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2018), em relação ao mesmo trimestre do ano anterior, no último trimestre de 2017, o PIB avançou 2,1%, enquanto que o setor industrial cresceu 2,7%, puxado pelas indústrias de transformação, que apresentaram expansão de 6,0%. Esse resultado foi atingido, principalmente, em função do avanço na produção de veículos, equipamentos de informática, produtos eletrônicos e óticos, móveis, metalurgia e produtos de borracha e plástico. Em relação às exportações de bens, os maiores crescimentos aconteceram nos seguintes setores: agropecuária, máquinas e tratores, veículos e siderurgia. A Figura 1.1 a seguir apresenta o gráfico da taxa de crescimento do PIB e das atividades econômicas que o compõem para o último trimestre de 2017, em relação ao mesmo trimestre do ano anterior.

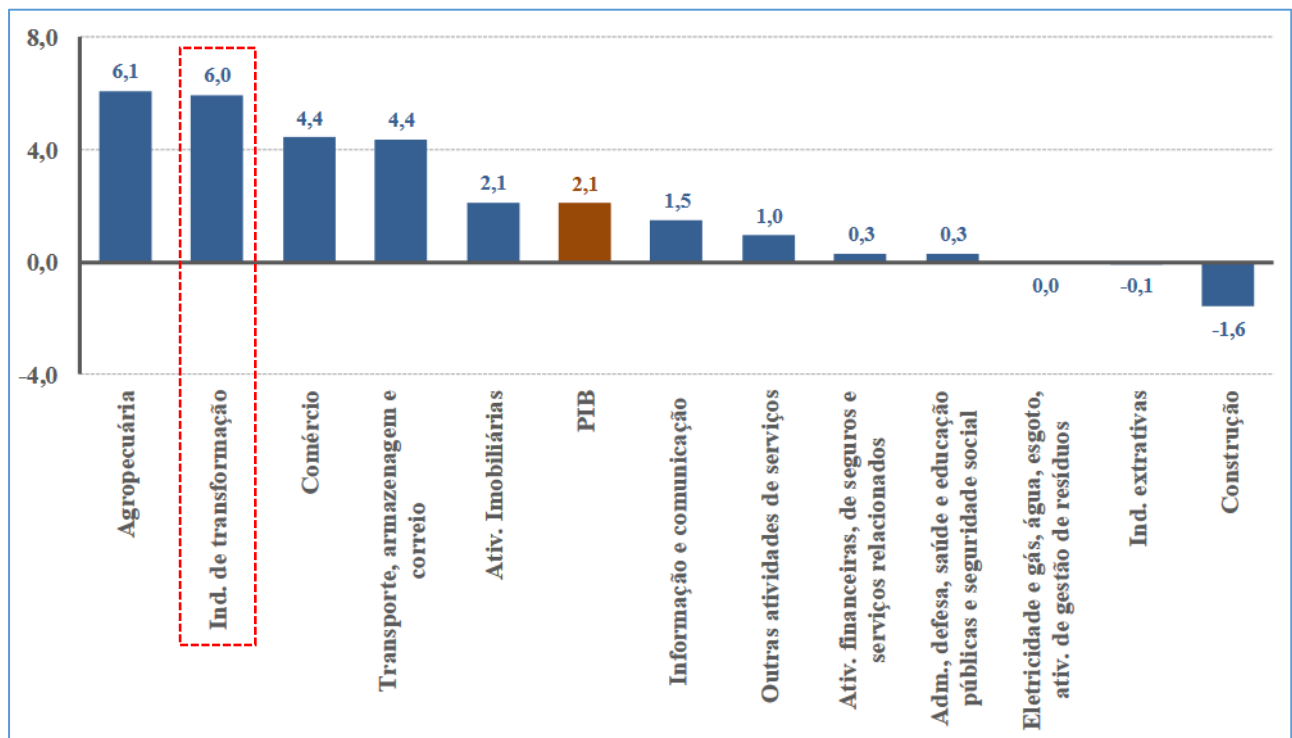


Figura 1.1 – Taxa (%) de crescimento do último trimestre de 2017 em relação ao mesmo trimestre do ano anterior para o PIB e as atividades econômicas que o compõem.

Fonte: IBGE (2018).

Nas últimas décadas, a indústria automotiva vem enfrentando regulamentações governamentais mais rígidas no que concerne à segurança, à redução do consumo de combustíveis e à redução da emissão de gases poluentes. Tais padrões têm incentivado as montadoras a buscarem soluções inovadoras para projetar veículos mais leves sem

comprometer a questão estrutural e, conseqüentemente, a segurança do passageiro (WORLDAUTOSTEEL, 2017).

Os Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) têm mostrado grande potencial como substitutos de qualidade para os aços convencionais na fabricação dos automóveis, pois são materiais que podem ser trabalhados em chapas finas sem perder a alta resistência, a boa absorção de energia e o bom desempenho em caso de colisão (LUO *et al.*, 2016).

Se os AHSS forem empregados na carroceria do veículo, esta pode ter seu peso reduzido em 15% a 20%. Na década de 1990, o famoso programa *UltraLight Steel Auto Body* (ULSAB) apresentou projetos de veículos com alta resistência sem aumentar significativamente os custos de produção, o que foi alcançado pelo uso extensivo dos AHSS (MATLOCK & SPEER, 2010; LUO *et al.*, 2016; WORLDAUTOSTEEL, 2017).

O AHSS 22MnB5 é a liga clássica para a fabricação de peças por estampagem a quente para a composição estrutural dos automóveis, possuindo excelente aptidão à têmpera e atingindo elevada resistência mecânica após esse tratamento térmico (1500 MPa) (KARBASIAN & TEKKAYA, 2010; PESSARD *et al.*, 2013).

Com a aplicação de novos materiais para a construção do corpo do veículo, torna-se essencial a adequação dos processos de união, pois esses aços diferem bastante dos aços convencionais, dada a sua microestrutura complexa e multifásica, apresentando um grande desafio para tais processos (WORLDAUTOSTEEL, 2017).

A soldagem a ponto por resistência elétrica tem grande importância para o setor automotivo, pois cerca de 90% da montagem do veículo envolve esse processo, devido a sua versatilidade, facilidade de automatização e requisitos mínimos de habilidade para sua operação. A boa qualidade da solda não só garante a segurança e a confiabilidade do corpo do carro, como também influencia na precisão de montagem do mesmo (MARQUES, MODENESI & BRACARENSE, 2011; LUO *et al.*, 2016; WORLDAUTOSTEEL, 2017).

Apesar de a soldagem a ponto por resistência elétrica ser um processo vital para a indústria automotiva, ainda existem poucos estudos acerca desse processo aplicado aos AHSS, sendo que os parâmetros desse processo para os AHSS ainda não estão satisfatoriamente padronizados. Uma pesquisa conduzida nas principais bases de dados da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e no Google Acadêmico encontrou apenas nove trabalhos que fossem relevantes para a soldagem a ponto do aço 22MnB5. Além disso, nenhuma dessas pesquisas empregou métodos de planejamento e análise de experimentos e/ou técnicas de otimização em seu desenvolvimento.

Dentre os estudos encontrados na análise de pesquisas anteriores sobre o aço 22MnB5, Choi *et al.* (2011), Jong *et al.* (2011), Huin *et al.* (2016) e Liang *et al.* (2016) concluíram que o tamanho da lentilha e a resistência ao cisalhamento são diretamente proporcionais e crescem com o aumento na corrente de soldagem, desde que não existam defeitos causados pela expulsão de material.

Ighodaro, Biro e Zhou (2016) concluíram que o tipo de revestimento não é um fator significativo para prever a carga de ruptura da junta soldada, pois a resistência de uma junta soldada a ponto por resistência, para um dado material, pode ser prevista pelo tamanho da zona fundida independentemente do tipo de revestimento.

Jong *et al.* (2011) e Liang *et al.* (2016) analisaram a junta de solda e mostraram que, na região da Zona Termicamente Afetada (ZTA) mais próxima ao metal de base, há queda na dureza devido à formação de martensita revenida e ferrita. Segundo Eller *et al.* (2016), esse fato está diretamente relacionado à concentração de deformações na ZTA e consequente início da fratura nessa área.

Por fim, os autores Choi, *et al.* (2011), Huin *et al.* (2016) e Ighodaro, Biro e Zhou (2016) mostraram que a previsibilidade da resistência ao cisalhamento é independente do modo de falha, visto que tanto a falha interfacial quanto a falha por *pullout* situam-se na mesma linha de tendência. Além disso, Ighodaro, Biro e Zhou (2016) explicam que, para os metais estampados a quente, a falha inicia-se na ZTA justamente devido à menor dureza da mesma em relação ao metal de base.

Diante do exposto anteriormente, esse trabalho justifica-se pela necessidade de desenvolvimento de estudos acerca do processo de soldagem a ponto aplicado ao aço 22MnB5, dada a sua grande importância para o setor automotivo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Otimizar o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5 para aplicação no setor automotivo, determinando as condições de soldagem que permitam maximizar a resistência ao cisalhamento, o tamanho da solda e a penetração, ao mesmo tempo em que permitam minimizar a Zona Termicamente Afetada e a indentação.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar os parâmetros significativos para a soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5;
- Avaliar a relação do tamanho da solda com a resistência ao cisalhamento;
- Avaliar a influência da expulsão de material sobre a resistência ao cisalhamento do aço 22MnB5;
- Relacionar os modos de falha das soldas de 22MnB5 com a resistência ao cisalhamento;
- Avaliar a relação da indentação excessiva com a separação entre as chapas e com a expulsão de material;
- Comparar métodos de otimização e avaliar a importância de se empregar um método que analise a correlação entre as respostas;
- Contribuir para a ampliação do conhecimento sobre a soldabilidade de chapas de aço 22MnB5 quando submetidas ao processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.

1.4. Questões e Proposições

Dados os objetivos expostos acima, foram formuladas algumas questões para serem respondidas com o desenvolvimento do presente estudo e hipóteses com as correspondentes explicações propostas sobre cada questão.

Questão 1: Existe vantagem na aplicação de um método de otimização que considere a correlação entre as respostas de interesse?

Comentários pertinentes à Questão 1: A maioria dos métodos de otimização ignora a possível correlação entre as múltiplas respostas, podendo acarretar em erros nos coeficientes do modelo matemático e, conseqüentemente, na determinação do ponto de ótimo (BOX *et al.*, 1973; CHIAO & HAMADA, 2001).

Proposição 1: Existe vantagem significativa na aplicação de um método que leve em consideração a estrutura de variância-covariância (correlação).

Questão 2: A expulsão de material diminui a resistência ao cisalhamento e o tamanho do ponto de solda?

Comentários pertinentes à Questão 2: A expulsão é o material em fusão ejetado durante a soldagem e, quando ocorre na superfície peça/peça, pode comprometer a resistência e o tamanho da solda por criar vazios e porosidades. Além disso, a expulsão está geralmente relacionada à excessiva indentação dos eletrodos na superfície das peças e consequente grande separação entre as chapas, que contribuem para diminuir a resistência da solda (ZHANG & SENKARA, 2006).

Proposição 2: A expulsão de material compromete o volume da lentilha e a resistência ao cisalhamento da solda.

Questão 3: A resistência ao cisalhamento e o tamanho da solda são diretamente proporcionais?

Comentários pertinentes à Questão 3: O tamanho da lentilha e a resistência ao cisalhamento crescem com a elevação na corrente de soldagem, desde que não haja defeitos causados pela expulsão de material (CHOI *et al.*, 2011; JONG *et al.*, 2011; HUIN *et al.*, 2016; LIANG *et al.*, 2016).

Proposição 3: Existe forte dependência da carga de ruptura em relação ao tamanho da solda até um certo nível de corrente, acima do qual a resistência ao cisalhamento começa a cair devido a defeitos causados pela expulsão de material.

Questão 4: O modo de falha interfacial está relacionado à obtenção de baixas resistências ao cisalhamento em pontos de solda do aço 22MnB5?

Comentários pertinentes à Questão 4: O modo de falha interfacial, considerado inaceitável para os aços convencionais, ocorre nas soldas de aço 22MnB5 pela alta temperabilidade do material, que resulta em microestrutura frágil com elevada dureza e baixa ductilidade (POURANVARI & MARASHI, 2013; DIALLO, DUPUY, KACZYNSKI, 2014; HOU, 2016).

Proposição 4: O aumento da carga de ruptura do aço 22MnB5 é independente do modo de falha.

1.5. Delimitação do tema

Essa pesquisa compreende o estudo e a otimização dos parâmetros da soldagem a ponto por resistência elétrica aplicada ao aço manganês-boro 22MnB5 e está relacionado à área PESQUISA OPERACIONAL e à subárea MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO (ABEPRO, 2008).

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi utilizada a experimentação como método de pesquisa e, especificamente, a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) para planejar e analisar os experimentos. Posteriormente, a otimização foi realizada por dois métodos diferentes, o Método do Critério Global (MCG) e o Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP). Tais etapas serão abordadas com mais detalhes no Capítulo 4.

As variáveis de entrada do processo selecionadas para a otimização foram o tempo de soldagem, a corrente de soldagem, o tempo de pós-pressão e o tempo de subida de corrente. As respostas escolhidas para serem otimizadas foram a resistência ao cisalhamento, a largura da lentilha de solda, a indentação, a Zona Termicamente Afetada (ZTA) e a penetração.

1.6. Estrutura do trabalho

Esse primeiro capítulo teve o objetivo de contextualizar a soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5, mostrando sua importância e explicando a relevância de se desenvolver um estudo acerca desse tema.

O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica com os conceitos necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta uma análise das pesquisas anteriores, mostrando o que tem sido estudado recentemente sobre a soldagem a ponto do aço 22MnB5 e as lacunas que ainda existem dentro desse tema.

O Capítulo 4 descreve os materiais e métodos que foram empregados para conduzir a pesquisa.

No Capítulo 5, são realizadas a análise e a discussão dos resultados obtidos.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões, as contribuições desse estudo e as sugestões para os trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Considerações iniciais

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos que compõem o embasamento teórico do presente trabalho. A soldagem a ponto por resistência elétrica é discutida com a finalidade de que as características do processo sejam bem conhecidas, assim como suas aplicações, vantagens e desafios, possibilitando avaliar e entender os resultados obtidos pelo desenvolvimento dessa pesquisa. Quanto aos Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS), em especial o aço utilizado neste trabalho, o 22MnB5, sua discussão mostra-se relevante no ponto em que é primordial conhecer suas peculiaridades e seu comportamento quando submetidos ao processo de soldagem. Por fim, ferramentas de Planejamento e Análise de Experimentos (DOE) e também de otimização são apresentadas nesse capítulo com o objetivo de definir com clareza o método experimental seguido e de mostrar a importância e a razão da escolha de tais ferramentas e técnicas, além de permitir a posterior comparação entre os métodos de otimização através dos resultados obtidos.

2.2. Aços Avançados de Alta Resistência – AHSS (*Advanced High-Strength Steels*)

Atualmente, eficiência no consumo de combustível, redução da emissão de gases poluentes e segurança dos passageiros são os principais impulsionadores no desenvolvimento e concepção de automóveis. A redução no peso dos veículos tem sido a chave para minimizar o consumo de combustível e, conseqüentemente, a redução da emissão de gases poluentes.

Entretanto, a redução no peso dos automóveis vai de encontro às regulamentações e critérios relativos às propriedades mecânicas dos materiais relacionadas aos esforços que estes suportam quando submetidos a situações de colisão; veículos mais leves garantem economia no consumo de combustível, mas, por outro lado, podem comprometer a segurança de seus ocupantes. Nesse contexto, os Aços Avançados de Alta Resistência – AHSS (*Advanced High-Strength Steels*) foram desenvolvidos para substituir os aços convencionais na indústria automotiva no que se refere à fabricação de componentes estruturais a fim de superar o desafio de reduzir o peso do veículo sem comprometer a segurança dos passageiros.

Em 1994, um consórcio de 35 fabricantes de chapas de aço deu início ao programa chamado de *UltraLight Steel Auto Body* (ULSAB), que tinha por objetivo projetar peças

estruturais para a fabricação de automóveis que fossem mais leves e também atingissem bom desempenho de suas propriedades mecânicas, atendendo aos critérios de segurança e desempenho. Um dos principais fatores que contribuíram para o sucesso do ULSAB foi o desenvolvimento dos AHSS, que, com microestrutura única obtida através de processos complexos de transformação de fase, conseguiram atingir uma combinação superior de resistência e ductilidade que não era possível com o uso dos aços convencionais (WORLDAUTOSTEEL, 2017).

Shome e Tumuluru (2015) afirmam que os AHSS são bastante utilizados na indústria automotiva para a fabricação das mais diversas peças estruturais que compõem os veículos. Segundo os autores, esses materiais vêm permitindo avanços importantes quanto ao objetivo de se atingir resistência mecânica e rigidez elevadas em chapas finas. Somando-se às excelentes resistência mecânica e rigidez, os AHSS possuem boa ductilidade e alta capacidade de absorção de energia.

Segundo a WorldAutoSteel (2017), os AHSS são materiais complexos e sofisticados, com composição química cuidadosamente selecionada e microestrutura multifásica (duas ou mais fases), a qual é resultante de processos termomecânicos precisamente controlados. A característica multifásica permitiu o aumento em resistência mecânica e ductilidade, o que não era alcançado com os aços de fase única, como os aços HSLA (*High-Strength, Low Alloy*).

A família AHSS engloba os seguintes grupos de aços: *Dual Phase (DP)*, *Complex-Phase (CP)*, *Ferritic-Bainitic (FB)*, *Martensitic (MS)*, *Transformation-Induced Plasticity (TRIP)*, *Hot-Formed (HF)* e *Twinning-Induced Plasticity (TWIP)*. Esses aços foram desenvolvidos para atingir bom desempenho mecânico em componentes estratégicos dos automóveis; por exemplo, os aços DP e TRIP são excelentes para aplicação em zonas de colisão do veículo devido a sua alta absorção de energia. Para elementos estruturais de proteção aos passageiros, aços de ultra alta resistência (UHSS - *Ultra High-Strength Steels*), tais como os aços endurecidos ao boro, resultam em alto desempenho de segurança (WORLDAUTOSTEEL, 2017). Na Figura 2.1 a seguir, encontra-se uma comparação entre o alongamento percentual e o limite de resistência à tração para diferentes grupos de aços.

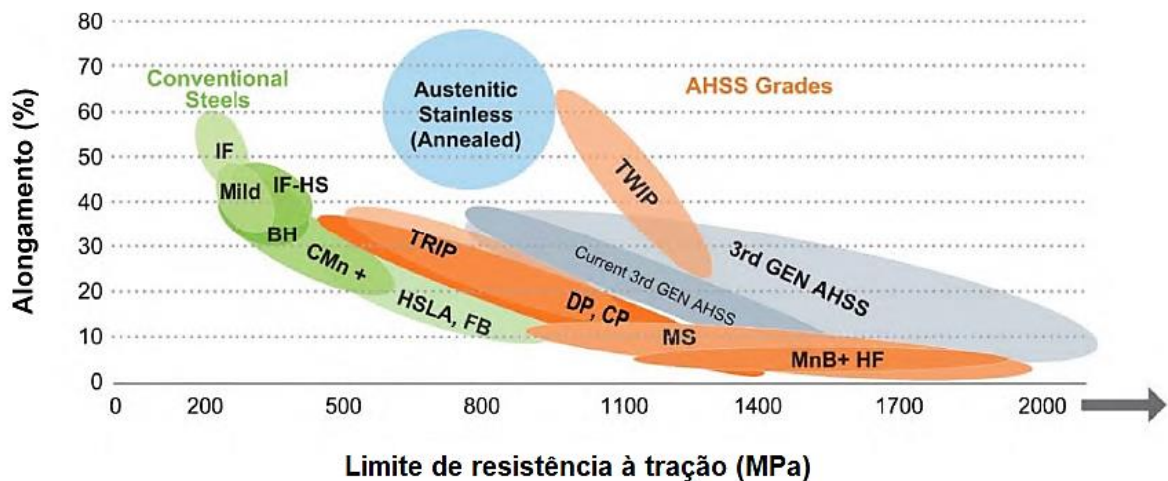


Figura 2.1 – Diagrama global de conformabilidade.
Fonte: Adaptado de WorldAutoSteel (2017).

A WorldAutoSteel (2017) salienta que, apesar de, usualmente, os aços com limite de resistência à tração de, no mínimo, 550 MPa serem chamados de AHSS e, muitas vezes, serem designados por UHSS (*Ultra High-Strength Steels*) quando apresentam limite de resistência à tração superior a 780 MPa, atualmente, essa classificação não se mostra mais satisfatória, visto que existem aços de fases múltiplas com tensão de ruptura abaixo de 500 MPa, tornando-se assim, inviável o princípio de classificar os aços apenas por sua resistência mecânica.

Alguns exemplos de veículos produzidos atualmente que utilizam os AHSS em seus componentes estruturais são o Honda CR-Z (Figura 2.2), o Porsche Cayenne (Figura 2.3) e o Kia Sportage (Figura 2.4).

A Honda foi uma das primeiras companhias a incorporar os AHSS à estrutura de seus automóveis. O Porsche Cayenne teve uma redução de 180 kg de seu peso total devido à utilização dos AHSS na fabricação de sua carroceria, apesar da introdução de 70 kg de novos componentes no veículo (WORLDAUTOSTEEL, 2014). Já o Kia Sportage teve sua estrutura significativamente melhorada através do uso extensivo dos AHSS; 51% de sua carroceria é atualmente fabricada com Aços Avançados de Alta Resistência (WORLDAUTOSTEEL, 2017).

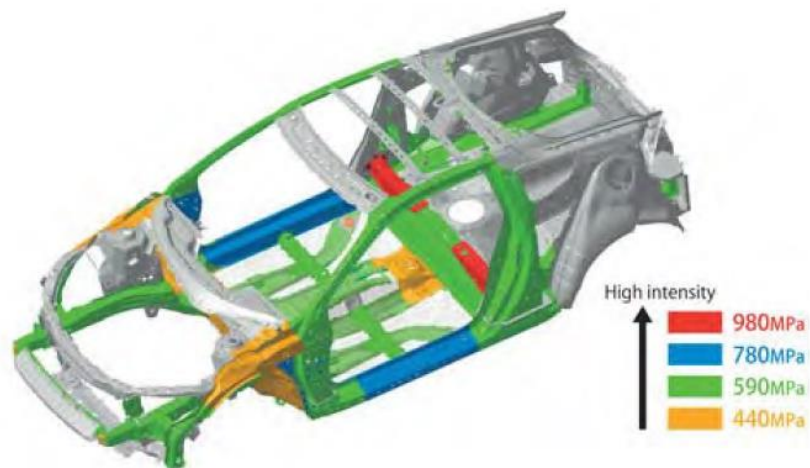


Figura 2.2 – Componentes estruturais do Honda CR-Z.
Fonte: WorldAutoSteel (2014).

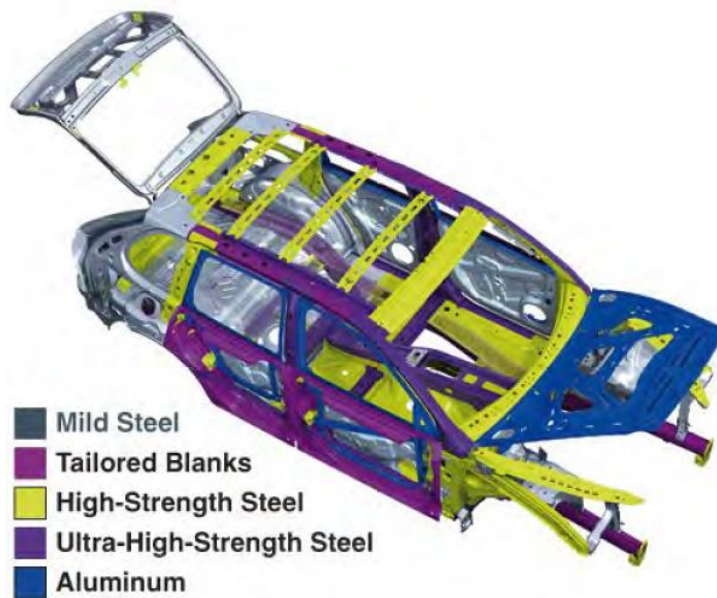


Figura 2.3 – Componentes estruturais do Porsche Cayenne.
Fonte: WorldAutoSteel (2014).



Figura 2.4 – Estrutura do Kia Sportage feita com 51% de AHSS.
Fonte: WorldAutoSteel (2017).

2.2.1. AHSS estampados a quente

Os AHSS estampados a quente (HF – *Hot-Formed*, PH – *Press Hardened* ou também chamados de HS – *Hot-Stamped*) são alternativas promissoras para a fabricação de componentes com geometria complexa.

Karbasian e Tekkaya (2010) e WorldAutoSteel (2017) relatam que a companhia Saab Automobile AB foi a primeira fabricante de automóveis a utilizar componentes estruturais feitos com aços estampados a quente, produzindo, em 1984, o Saab 9000. Desde então, a aplicação da técnica tem-se expandido; o número de peças estampadas produzidas cresceu de 3 milhões, em 1987, para 8 milhões, em 1997, e atingiu os 107 milhões, em 2007. Atualmente, esse número continua a aumentar; o peso das carrocerias de alguns modelos de veículos chega a ser composto por cerca de 25% de AHSS estampados a quente.

So *et al.* (2012) salientam que os AHSS estampados a quente são, particularmente, utilizados em estruturas que devem apresentar elevada resistência em caso de colisão, pois, além de permitirem a economia de combustível através da redução de peso do automóvel, aumentam a segurança dos passageiros devido a sua elevada resistência mecânica. Segundo Gorni (2010) e Karbasian e Tekkaya (2010), dentre os componentes geralmente fabricados com AHSS estampados a quente, estão: proteção lateral e superior contra impacto, soleira de porta, colunas A e B, para-choque, trilhos para tetos, componentes de trilhos laterais, reforço do túnel, longarinas e reforço das portas, como pode ser visto na Figura 2.5.

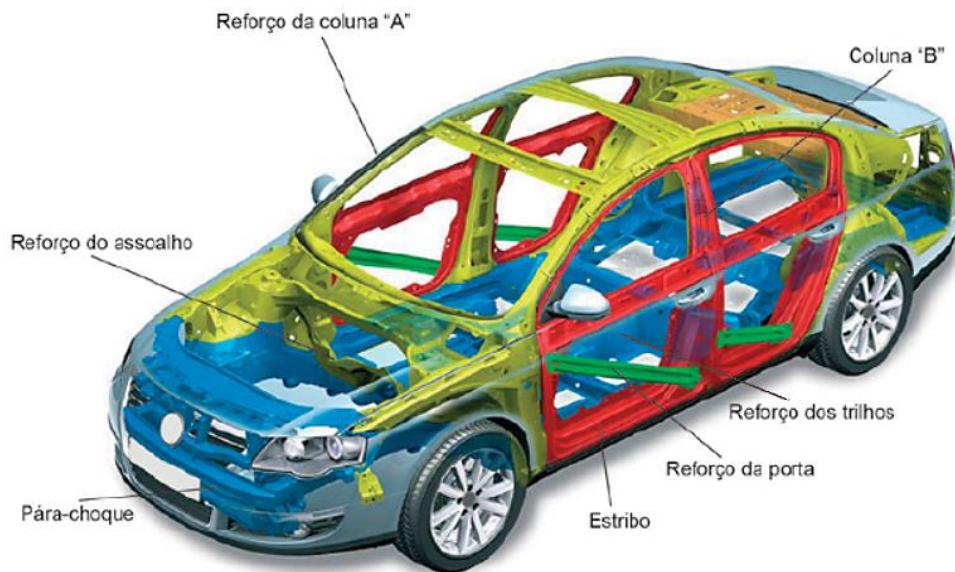


Figura 2.5 – Partes produzidas com AHSS estampados a quente em um carro popular.
Fonte: Adaptado de Karbasian e Tekkaya (2010).

2.2.2. Estampagem a quente

Estampagem a quente, em inglês chamada de *Hot Stamping*, *Hot Forming* ou também *Press Hardening*, é, segundo Merklein e Lechler (2006) e Güler (2013), um processo de conformação a quente não isotérmico em que a chapa é aquecida até cerca de 900 °C a 950 °C, mantida nessa temperatura por tempo suficiente para que a microestrutura seja austenitizada e depois posicionada na prensa para ser, simultaneamente, conformada e temperada dentro de matrizes arrefecidas. A WorldAutoSteel (2017) complementa que a taxa de resfriamento deve ser superior a 50 °C/s para se obter uma microestrutura totalmente martensítica após o resfriamento. Deste modo, os aços estampados a quente podem atingir um limite de resistência à tração de aproximadamente 1500 MPa.

Embora componentes com microestrutura puramente martensítica sejam desejáveis pela alta resistência mecânica que oferecem, alguns componentes específicos podem se beneficiar de regiões com menor resistência e maior ductilidade, que apresentam melhor desempenho em casos de colisão; essa variação de propriedades mecânicas pode ser alcançada através da modificação da taxa de resfriamento durante o processo de estampagem a quente. Uma taxa de resfriamento abaixo da taxa crítica resultará em uma estrutura mista que conterá, além de martensita, fases mais dúcteis como bainita, ferrita e perlita (BARDELICK *et al.*, 2010).

Existem dois tipos de estampagem a quente (KARBASIAN & TEKKAYA, 2010; WORLDAUTOSTEEL, 2017):

- Estampagem a quente no modo direto;
- Estampagem a quente no modo indireto.

No modo direto, a chapa é aquecida em um forno até sua completa austenitização e, em sequência, transferida para a prensa, onde é conformada e, simultaneamente, temperada pelo resfriamento das matrizes. Já no processo indireto, a pré-forma obtida pela estampagem a frio é austenitizada e, em seguida, transferida para a prensa apenas para ser temperada e calibrada (KARBASIAN & TEKKAYA, 2010; WORLDAUTOSTEEL, 2017). Os dois métodos podem ser vistos na Figura 2.6 a seguir.

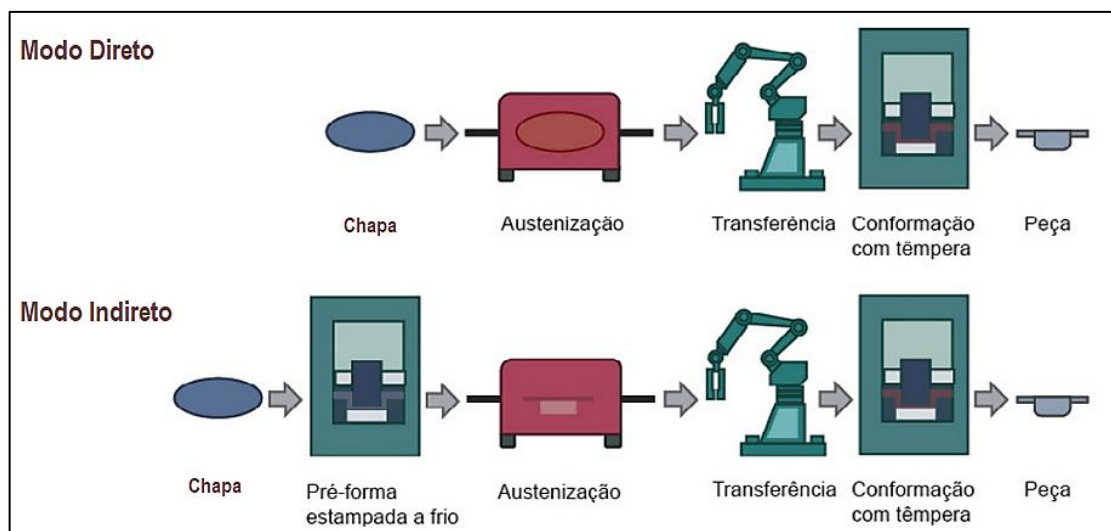


Figura 2.6 – Processos de estampagem a quente.
Fonte: Adaptado de Karbasian e Tekkaya (2010).

A estampagem a quente é, geralmente, realizada em aços endurecidos ao boro (de 0,001% a 0,005% de boro em sua composição), pois estes, além de permitirem a obtenção dos mais diversos perfis de componentes automotivos, possibilitam atingir elevada resistência à tração após tal processo de conformação (NADERI, 2007; WORLDAUTOSTEEL, 2017).

O boro atua como um forte agente de endurecimento; Naderi (2007), em seu trabalho sobre a estampagem a quente de aços de ultra alta resistência, identificou que as ligas de 22MnB5, 27MnCrB5 e 37MnB4, que contêm boro em sua composição, são os únicos tipos de AHSS que conseguem produzir microestrutura totalmente martensítica após a estampagem a quente quando matrizes arrefecidas a água são utilizadas.

Segundo Karbasian e Tekkaya (2010), dentre as classes de aços endurecidos ao boro, o 22MnB5 é o mais comumente utilizado em processos de estampagem a quente.

2.3. Aço manganês-boro 22MnB5

Gorni (2010), So *et al.* (2012) e Güler (2013) reforçam a informação de Karbasian e Tekkaya (2010) de que a liga de 22MnB5 é clássica para a fabricação de peças por estampagem a quente.

Segundo Pessard *et al.* (2013), o aço 22MnB5 foi desenvolvido no intuito de reduzir o peso da estrutura dos automóveis. É um material que possui excelente aptidão à têmpera e, após tal tratamento térmico, consegue atingir elevada resistência mecânica.

Inicialmente, o aço 22MnB5 apresenta uma microestrutura ferrítica-perlítica, com limite resistência à tração em torno de 600 MPa e alongamento de 22%. Após o processo de estampagem a quente com têmpera, o material passa a apresentar uma microestrutura martensítica, com limite de resistência à tração em torno de 1500 MPa e alongamento de 6% (ELLER *et al.*, 2014).

Karbasian e Tekkaya (2010) explicam que, para atingir essa microestrutura martensítica e consequente elevada resistência à tração, a chapa de aço de 22MnB5 deve ser austenitizada em forno por pelo menos 5 minutos a 950 °C; posteriormente, a chapa é conformada e temperada dentro de matrizes refrigeradas a água. Min *et al.* (2012) salientam que a microestrutura obtida pode ser apenas martensítica ou multifásica, dependendo da taxa de resfriamento utilizada, e que essas transformações de fase, durante a estampagem a quente, são críticas para a qualidade das características mecânicas dos componentes.

As propriedades mecânicas do aço 22MnB5 antes e após a estampagem a quente e as transformações de fase que ocorrem durante a têmpera do mesmo são mostradas, respectivamente, nas Figuras 2.7 (a) e 2.7 (b).

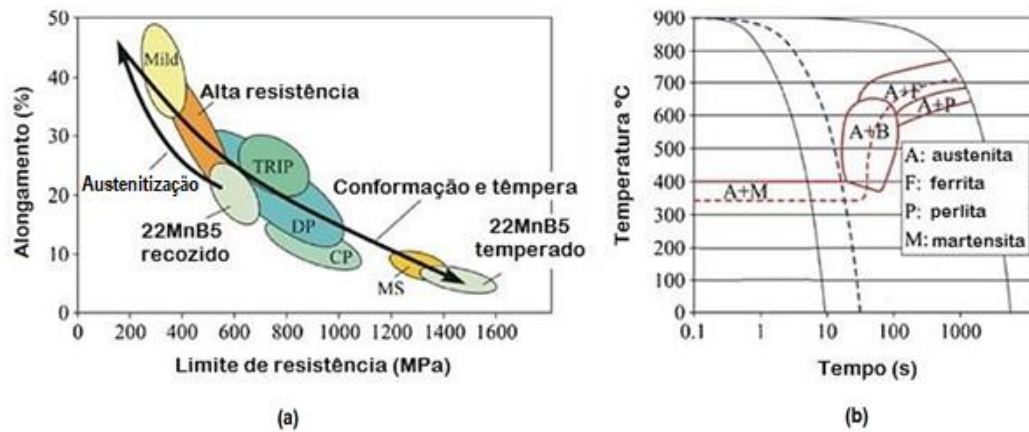


Figura 2.7 (a) – Propriedades mecânicas do aço 22MnB5 antes e depois da estampagem a quente com têmpera.

Figura 2.7 (b) – Transformação de fase durante o resfriamento do aço 22MnB5.

Fonte: Adaptado de Garcia-Aranda *et al.* (2002).

O desenvolvimento dos AHSS, nas últimas décadas, trouxe novos desafios não só quanto à combinação redução de peso e aumento da resistência mecânica como também quanto aos processos de união desses aços. Muitos estudos têm-se desenvolvido acerca dos processos de soldagem dos AHSS, porém ainda existe uma lacuna extensa a ser preenchida, pois a utilização desses materiais é bastante recente. Atenção especial é dada à soldagem a ponto por resistência elétrica, pois esse processo é um dos mais amplamente utilizados na fabricação dos automóveis.

2.4. Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica

A soldagem é atualmente o principal processo empregado na indústria para união permanente de metais, sendo utilizada para unir desde estruturas simples a estruturas complexas e de grande responsabilidade. Há uma grande variedade de processos de soldagem, permitindo trabalhar com diversos tipos de ligas metálicas e diferentes espessuras (MARQUES, MODENESI & BRACARENSE, 2011).

Dentre os processos de soldagem por resistência, a soldagem a ponto por resistência elétrica, também chamada de soldagem por resistência por pontos (*Resistance Spot Welding – RSW*), é o mais comumente utilizado, além de ser o processo mais amplamente aplicado na montagem de produtos feitos a partir de chapas de metal como na indústria automotiva (ASM, 1993; AWS, 2007).

RWMA (1989), ASM (1993), AWS (2007) e Marques, Modenesi e Bracarense (2011) destacam que esse é um dos métodos de união mais versáteis, devido tanto à flexibilidade de seus equipamentos quanto à diversidade de espessuras, formas e materiais que podem ser soldados. Além disso, é de relativa fácil automatização e, conseqüentemente, apresenta elevadas taxas de produção (alta velocidade de operação), o que permite sua inclusão em linhas industriais que operam com grandes volumes. Outra vantagem é a economia de material, quando comparada a outros processos, visto que não utiliza metais de adição ou outros meios auxiliares de união, como parafusos, e de usinagem, como furação, e também não necessita de fluxos ou gases de proteção. Por fim, os autores afirmam que esse processo pode apresentar excelentes acabamento e propriedades mecânicas, além de ser mais rápido que os processos de soldagem a arco e não exigir operadores tão especializados para executá-lo.

Machado (1996) ressalta a grande aplicação da soldagem a ponto por resistência elétrica em chapas relativamente finas utilizadas na indústria em geral e, especificamente, na indústria automotiva.

Karagoulis (1994) afirma que a indústria automotiva é a principal usuária desse processo e, tipicamente, cada automóvel pode conter mais de 3000 pontos de solda. Segundo Chao (2003), um veículo moderno pode apresentar de 2000 a 5000 pontos de solda.

Tumuluru (2006), assim como Karagoulis (1994), reconhece que a soldagem a ponto por resistência elétrica é o método de união mais usado no setor automotivo e que cada veículo pode conter milhares de pontos de solda. Além disso, Shome e Tumuluru (2015) salientam que os investimentos recentes em tecnologia e equipamentos nas linhas de montagem da indústria automotiva sugerem que esse processo de soldagem continuará a ser predominante no setor.

2.4.1. Princípio de funcionamento

Segundo a ASM (1993), a soldagem a ponto por resistência é um processo em que peças sobrepostas, pressionadas uma contra a outra por meio da pressão exercida pelos eletrodos, são unidas através do calor gerado pela resistência ao fluxo de uma corrente elétrica. As superfícies em contato são aquecidas por um curto pulso de baixa voltagem e alta corrente para formar uma região de fusão do metal de base que recebe o nome de lentilha de solda, em torno da qual forma-se a ZTA (Zona Termicamente Afetada). Quando a passagem de corrente cessa, a força dos eletrodos é mantida enquanto o metal fundido se resfria e solidifica rapidamente. Os

eletrodos são retraídos após cada ponto de solda, o que geralmente ocorre em uma fração de segundo. A configuração da soldagem a ponto por resistência é ilustrada na Figura 2.8 abaixo.

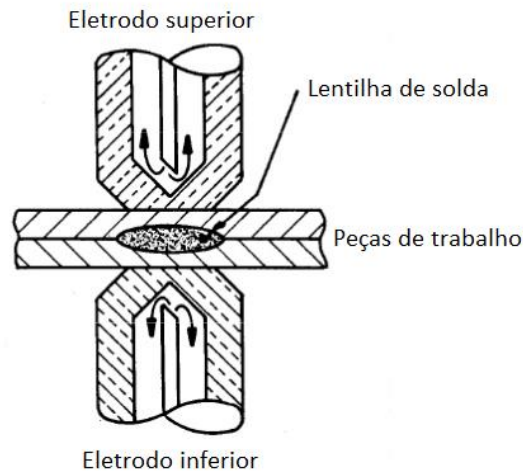


Figura 2.8 – Configuração da soldagem a ponto por resistência.
Fonte: Adaptado de ASM (1993).

O diâmetro e o formato do ponto de solda são limitados pelo tamanho e contorno das faces do eletrodo que entram em contato com as peças. Por outro lado, a lentilha de solda se forma na interface de união entre as chapas e não se estende completamente às superfícies externas, visto que as superfícies externas do material de base não alcançam a temperatura de fusão durante a passagem da corrente devido à alta condutividade dos eletrodos e ao fato destes serem, geralmente, refrigerados a água (ASM, 1993; AWS, 2007).

2.4.1.1. Energia térmica

O calor gerado pela resistência à passagem da corrente elétrica durante o processo pode ser calculado pela Lei de Joule, cuja fórmula é expressa pela Equação 2.1, considerando que a passagem de corrente ou a resistência não sejam constantes em relação ao tempo (WAINER, BRANDI & MELLO, 1992; MACHADO, 1996).

$$Q = \frac{1}{J} \int_0^t I^2 R dt \quad (2.1)$$

Em que:

Q = energia térmica total gerada durante a soldagem (J);

J = constante (4,185);

I = intensidade da corrente elétrica (A);

R = resistência elétrica do circuito (Ω);

dt = intervalo de tempo de passagem da corrente (s).

Considerando a corrente e a resistência constantes em relação ao tempo, essa fórmula pode ser simplificada, como mostrado na Equação 2.2 (ZHANG & SENKARA, 2006; MARQUES, MODENESI & BRACARENSE, 2011).

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.2)$$

Em que:

Q = energia térmica total gerada durante a soldagem (J);

I = intensidade da corrente elétrica (A);

R = resistência elétrica do circuito (Ω);

t = intervalo de tempo de passagem da corrente (s).

Da Equação 2.2 acima, depreende-se que a corrente de soldagem necessária para formar uma solda é, aproximadamente, inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo. Deste modo, um tempo de soldagem extremamente curto, exigirá uma corrente muito elevada. Além disso, apesar de a corrente de soldagem ser a mesma em todas as partes do circuito, o calor gerado é diretamente proporcional à resistência em um dado ponto (AWS, 2007).

O calor na soldagem por resistência elétrica é produzido através da passagem do fluxo de corrente pela resistência do circuito. Dada a relativa baixa resistência dos metais, a corrente deve ser elevada para produzir o calor suficiente a fim de se atingir as temperaturas de soldagem adequadas que possibilitem a fusão concentrada de material, levando em consideração as perdas de calor por condução térmica no metal de base e as perdas de calor para os eletrodos, que estão em temperaturas mais baixas devido à constante refrigeração (AWS, 2007).

2.4.1.2. Resistência elétrica

Zhang e Senkara (2006) explicam que quando as peças a serem soldadas já estão unidas mecanicamente através da pressão exercida pelos eletrodos, a resistência elétrica total é dada pela soma de cinco resistências parciais: resistências de contato nas interfaces eletrodo/peça (R1 e R5); resistência de contato na interface entre as peças (R3); e resistências dos materiais das peças (R2 e R4). Tais resistências estão esquematizadas na Figura 2.9 abaixo.

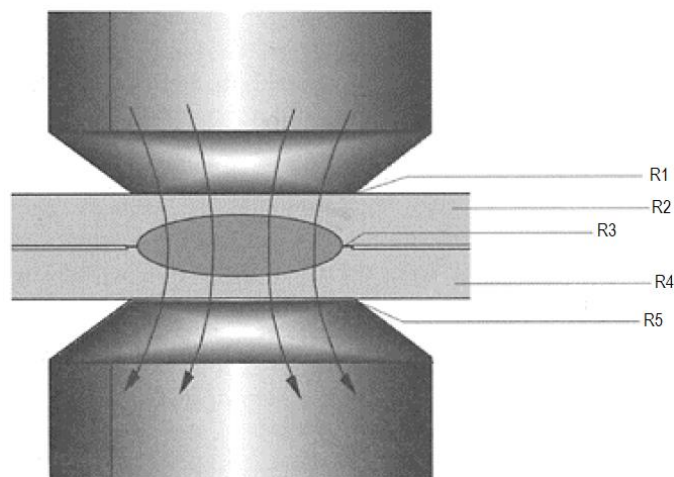


Figura 2.9 – Resistência elétrica durante a soldagem a ponto.
Fonte: Zhang e Senkara (2006).

A resistência R3 é considerada a mais importante e a que deve ser mais elevada, pois é nesse local que se formará o ponto de solda e, por consequência, é a região que necessita de maior geração de calor para que ocorra a fusão localizada. As resistências R1 e R5 ganham bastante importância quando se trata de metais com baixa resistividade elétrica. Além disso, os valores de R1 e R5 devem ser mantidos o mais baixo possível, a fim de se evitar a excessiva geração de calor na interface eletrodo/peça e reduzir o desgaste do eletrodo, aumentando sua vida útil. As resistências R2 e R4 apresentam influência quase insignificante nos estágios iniciais da soldagem, tornando-se importantes, todavia, nos estágios finais. Desta maneira, as resistências de contato se mostram muito mais influentes na geração de calor, durante o processo de soldagem a ponto por resistência, do que as resistências das peças a serem soldadas (WAINER, BRANDI & MELLO, 1992).

Sobre a resistência dos eletrodos, Zhang e Senkara (2006) explicam que estes são fabricados com materiais de baixa resistividade, como o cobre, o qual possui resistividade significativamente mais baixa que a dos metais de base; sendo assim, quando uma corrente elétrica é aplicada, a geração de calor é maior nas chapas de metal de base do que nos eletrodos.

Além disso, segundo a AWS (2007), os eletrodos são fabricados de materiais mais facilmente deformáveis, de menor dureza que os metais de base, o que gera uma menor resistência de contato na interface eletrodo/peça quando comparada à resistência gerada na interface peça/peça.

Apesar do fato de que há geração de calor em cada uma das interfaces e também nas peças e nos eletrodos, para que ocorra a solda, é necessário apenas energia térmica na interface peça/peça, sendo assim, o calor gerado em todos os outros pontos deve ser minimizado (AWS, 2007).

De acordo com Zhang e Senkara (2006), as resistências parciais geralmente não são constantes; enquanto as resistências de contato peça/peça e eletrodo/peça estão fortemente relacionadas à temperatura e à pressão, a resistência da maioria dos metais pode ser considerada independente da pressão, sendo influenciada apenas pela temperatura. Os autores ainda reforçam que a resistência de contato é muito sensível à distribuição de pressão e às condições das superfícies em contato, como a presença de sujeira, óleo, pintura e também de revestimentos.

2.4.1.3. Densidade de corrente

Segundo Whelan e Hodgson (1978), a densidade de corrente é definida como a quantidade de carga elétrica por unidade de tempo que passa por uma dada área transversal. Especificamente, para a soldagem a ponto, a densidade de corrente é a quantidade de corrente de soldagem que passa pela área de contato eletrodo/peça (AWS, 1997).

Machado (1996) e AWS (2007) explicam que, apesar de tempos de soldagem de menor duração levarem a um maior rendimento térmico, existem limites para a densidade de corrente, os quais dependem da intensidade de corrente e da espessura e tipo dos materiais do metal de base. A pressão exercida pelos eletrodos e a densidade de corrente devem ser elevadas o suficiente para formar a solda, porém não tão elevadas a ponto de causar expulsão de material.

2.4.2. Parâmetros de regulagem do processo

Como mostrado na Equação 2.2 ($Q = I^2 \cdot R \cdot t$), o calor necessário para gerar uma fusão concentrada e formar a lentilha de solda é diretamente proporcional ao quadrado da corrente de soldagem, à resistência do circuito e ao tempo de soldagem; além disso, a resistência de contato é dependente da força aplicada pelos eletrodos. Tendo em vista essas considerações, depreende-se que a força (pressão) exercida pelos eletrodos, o tempo de soldagem e a corrente de soldagem

são os parâmetros principais de regulagem do processo na soldagem a ponto por resistência elétrica.

Wainer, Brandi e Mello (1992) e Marques, Modenesi e Bracarense (2011) corroboram a ideia de que força dos eletrodos, intensidade da corrente e tempo de soldagem são as variáveis mais importantes na soldagem a ponto por resistência elétrica.

Todavia, existem parâmetros secundários de regulagem que também influenciam na qualidade da solda; são eles: tempo de pré-pressão, tempo de subida de corrente, tempo de descida de corrente e tempo de pós-pressão.

2.4.2.1. Corrente de soldagem

A corrente atua elevada ao quadrado na fórmula apresentada na Equação 2.2 ($Q = I^2 \cdot R \cdot t$); deste modo, seu efeito sobre a geração de calor é maior do que o efeito da resistência elétrica e do tempo de soldagem, o que a torna um fator crítico a ser controlado para a formação da solda (MACHADO, 1996).

As variações na magnitude da corrente podem afetar a densidade de corrente na interface de soldagem. Uma maior área de contato eletrodo/peça acarretará em diminuição da densidade de corrente e do calor gerado, o que pode causar uma diminuição considerável no tamanho do ponto de solda (AWS, 2007).

Ainda de acordo com a AWS (2007), existe um limite inferior de corrente (uma corrente mínima) necessário para gerar calor suficiente que consiga superar as perdas para o metal adjacente e para os eletrodos e produzir a fusão na interface peça/peça, formando-se a lentilha de solda; se a intensidade de corrente for insuficiente, a fusão não ocorrerá, mesmo que o intervalo de tempo seja longo. Além disso, o tamanho da lentilha e a resistência mecânica da solda aumentam com o aumento da corrente. Por outro lado, uma corrente de soldagem excessiva causará expulsão de material fundido, o que, normalmente, resulta em vazios, fraturas e resistência mecânica mais baixa no ponto de solda. Somado a este fato, correntes muito elevadas superaquecem o metal de base e fazem os eletrodos penetrarem profundamente nas peças, além de superaquecer os eletrodos e provocar uma rápida deterioração dos mesmos. Desta forma, existe também um limite superior de corrente, para uma determinada força aplicada pelos eletrodos, acima do qual há expulsão de material e produção de soldas de baixa qualidade.

2.4.2.2. Força exercida pelos eletrodos

De acordo com a AWS (2007), a força exercida pelos eletrodos sobre a junta de solda produz uma pressão que afeta a resistência de contato, ou seja, a resistência R da fórmula apresentada na Equação 2.2 ($Q = I^2 \cdot R \cdot t$) é fortemente influenciada pela pressão de soldagem através de seus efeitos sobre a resistência de contato. Tal força é aplicada antes, durante e após a passagem de corrente com o objetivo de produzir pontos de solda livres de defeitos.

As peças a serem soldadas devem estar devidamente pressionadas uma contra a outra no local em que ocorrerá a soldagem a fim de permitir que a corrente flua de maneira adequada. Para uma dada configuração de um conjunto de soldagem, como geometria do eletrodo, equipamento de soldagem e condições superficiais dos metais de base, ao passo que a força (pressão) exercida pelos eletrodos é aumentada, a resistência de contato das interfaces diminui e, conseqüentemente, o calor gerado também diminui; deste modo, para elevar a geração de calor, a corrente ou o tempo de soldagem terão de ser aumentados a fim de se compensar a redução da resistência (AWS, 2007).

Geralmente, como as superfícies são irregulares, formadas por picos e vales, apenas uma porção delas está realmente em contato, o que diminui a seção transversal por onde flui a corrente elétrica; durante a soldagem a ponto por resistência, a pressão feita pelos eletrodos deforma as irregularidades, fazendo com que picos e vales se toquem e, deste modo, aumente a área de contato na interface peça/peça, o que causa uma queda na resistência elétrica de contato. Sendo assim, uma pequena força dos eletrodos pode não ser suficiente para criar o contato elétrico necessário nas interfaces e pode produzir uma geração de calor concentrada, com possível fusão localizada ou vaporização. Todavia, o aumento da pressão dos eletrodos, que leva a uma redução na resistência de contato e conseqüente diminuição do calor gerado, faz com que seja necessário aumentar a intensidade de corrente e/ou o tempo de sua aplicação (MACHADO, 1996; ZHANG & SENKARA, 2006).

Sendo assim, a pressão exerce as seguintes funções (AWS, 2007):

- Criar um maior contato entre as interfaces, reduzindo a resistência de contato entre elas;
- Evitar a expulsão de material fundido da junta de solda;
- Permitir a formação e consolidação adequadas da lentilha de solda.

2.4.2.3. Tempo efetivo de soldagem

Segundo Machado (1996), o tempo efetivo de soldagem é a duração da passagem do fluxo de corrente elétrica através das peças, fornecendo o calor necessário para que se forme o ponto de solda.

A taxa de geração de calor deve ser ajustada a fim de se alcançar soldas com resistência mecânica adequada sem que se produza calor em excesso, o qual desgasta os eletrodos e reduz sua vida útil. De acordo com a fórmula mostrada na Equação 2.2 ($Q = I^2 \cdot R \cdot t$), o calor produzido é proporcional ao tempo de soldagem (AWS, 2007).

Dada uma densidade de corrente adequada, um tempo de soldagem mínimo é necessário para que se atinja uma temperatura suficiente para fundir localmente o metal de base. A corrente e o tempo de soldagem estão intimamente ligados; o calor total gerado pode ser mudado por ajustes tanto na corrente quanto no tempo. Todavia, no intuito de acelerar o processo através do aumento da corrente e diminuição do tempo, poderá ocorrer um aumento excessivo de temperatura na interface de contato peça/peça acompanhado por brusca expulsão de material; o calor deve ser aplicado por tempo suficiente para que ocorra a formação da lentilha de solda com tamanho e resistência adequados (AWS, 2007).

2.4.2.4. Tempo de pré-pressão (*Squeeze time*)

Segundo Machado (1996), Zhang e Senkara (2006) e AWS (2007), o tempo de pré-pressão (*Squeeze time*), também chamado de tempo de compressão, compreende o intervalo entre o início da operação de soldagem e o início da aplicação de corrente, com a movimentação dos eletrodos em direção às peças de trabalho, pressionando-as; tem por função adiar a passagem de corrente elétrica até que os eletrodos entrem em contato com as chapas e a força desejada seja atingida e se estabilize.

Se o tempo de pré-pressão for insuficiente, a força previamente programada não será atingida antes do início da passagem do fluxo de corrente, podendo gerar calor em excesso nas interfaces devido à elevada resistência inicial de contato, causando expulsão de material e desgaste prematuro dos eletrodos (ZHANG & SENKARA, 2006).

O tempo de pré-pressão pode ser dividido em tempo de pré-pressão 1, ou também chamado tempo de pré-compressão, e tempo de pré-pressão 2, ou tempo de compressão efetiva. O tempo de pré-pressão 1 é definido como o tempo que os eletrodos levam desde sua posição inicial até tocarem as peças. O tempo de pré-pressão 2 é o tempo que o sistema demora desde o encostamento nas peças até a força determinada ser atingida e se estabilizar (AWS, 2007).

2.4.2.5. Tempo de subida de corrente (*Upslope time*)

Tempo de subida de corrente (*Upslope time*) é o intervalo de tempo no qual a corrente sobe, ou aumenta, de forma gradual, até o valor programado para, assim, iniciar efetivamente a formação do ponto de solda; é geralmente usado para que não ocorra o aumento brusco na

corrente e conseqüente superaquecimento das peças de trabalho, evitando a expulsão de material (MACHADO, 1996; AWS, 2007).

2.4.2.6. Tempo de descida de corrente (*Downslope time*)

O período durante o qual a corrente diminui, ou cai, gradualmente, é chamado de tempo de descida de corrente (*Downslope time*); é utilizado para reduzir a taxa de resfriamento da solda e, assim, controlar a solidificação da lentilha, evitando a formação de rachaduras (MACHADO, 1996; AWS, 2007).

2.4.2.7. Tempo de pós-pressão (*Hold time*)

Também chamado de tempo de manutenção ou tempo de resfriamento, o tempo de pós-pressão (*Hold time*) se inicia após o término da passagem do fluxo de corrente e dura até o início do afastamento dos eletrodos; é o período em que a força exercida pelos eletrodos ainda é mantida a fim de permitir o resfriamento e a solidificação adequados da lentilha de solda até que esta tenha resistência mecânica suficiente para manter as chapas de trabalho unidas (MACHADO, 1996; ZHANG & SENKARA, 2006; AWS, 2007).

2.4.3. Ciclo de soldagem a ponto por resistência elétrica

O ciclo de soldagem a ponto por resistência elétrica compreende quatro fases básicas: tempo de pré-pressão, tempo efetivo de soldagem, tempo de pós-pressão e tempo de intervalo, também chamado de tempo de pausa (*Off time*). O tempo de intervalo é definido como o período entre uma solda e a próxima, do momento em que os eletrodos se afastam das peças até as tocarem novamente no próximo ponto a ser soldado; essa fase é utilizada geralmente quando o ciclo de solda é repetitivo. Algumas outras fases podem ser adicionadas ao ciclo básico de soldagem, como, por exemplo, o tempo de subida e o tempo de descida de corrente (MACHADO, 1996; AWS, 2007). A Figura 2.10 a seguir ilustra um ciclo de soldagem por pontos, incluindo subida e descida de corrente.

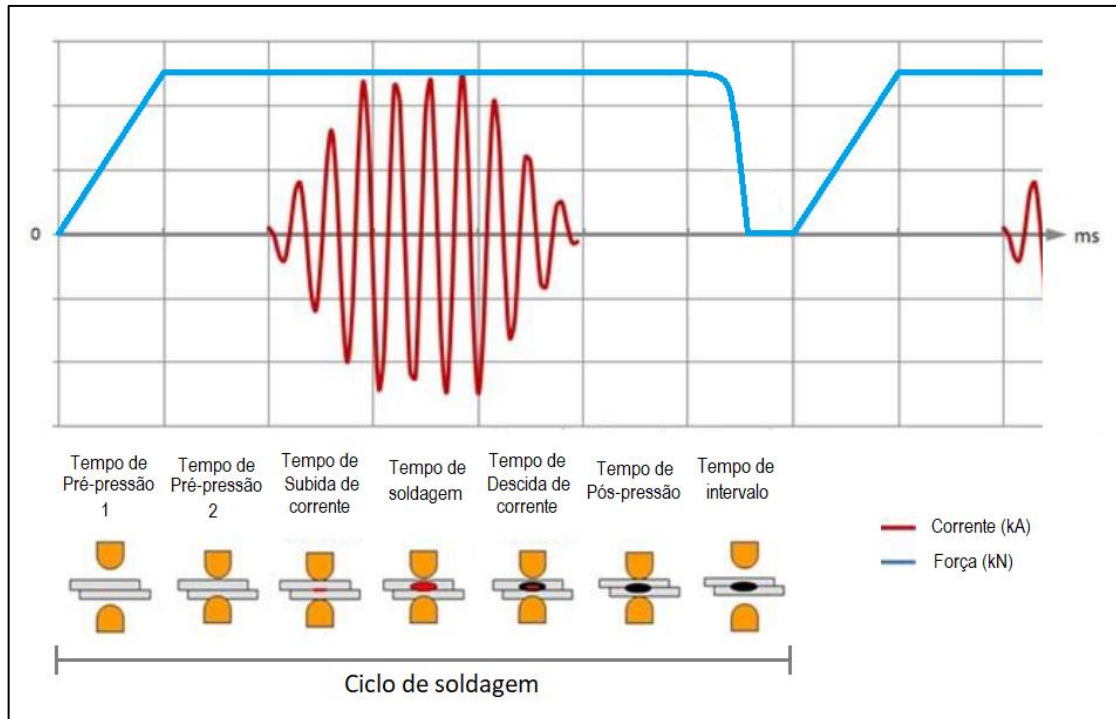


Figura 2.10 – Representação esquemática do ciclo de soldagem.
Fonte: Adaptado de AWS (2007).

2.4.4. Outros fatores que afetam a geração de calor

2.4.4.1. Condições da superfície do material de base

A resistência de contato é afetada pela existência de óxidos, sujeira, óleo ou qualquer outro material estranho presente na superfície das peças. Por conseguinte, as condições superficiais dos materiais de base afetam a geração de calor. É de fundamental importância que as superfícies a serem trabalhadas estejam livres de carepas, óleos, pinturas e outras impurezas a fim de se evitar variações na resistência de contato que possam gerar calor de forma inconsistente. Deste modo, a limpeza e a preparação superficial das chapas é extremamente importante para a obtenção de soldas uniformes e de qualidade. Somado a este fato, os contaminantes aderem à face dos eletrodos, causando sua deterioração e reduzindo sua vida útil (MACHADO, 1996; AWS, 2007).

2.4.4.2. Influência dos eletrodos

Os eletrodos são vitais na geração de calor devido ao fato de que conduzem a corrente elétrica que passará pelas peças. A área de contato deles tem grande influência sobre a densidade de corrente e o tamanho da solda resultante (AWS, 2007).

Com a deformação do eletrodo, o diâmetro da face aumenta, o que ocasiona um aumento da área de contato, e, conseqüentemente, faz com que tanto a densidade de corrente quanto a

pressão diminuam; aliado a este fato, a qualidade da solda também diminui com o aumento da deformação na face dos eletrodos. Portanto, os eles devem ser trocados ou afiados periodicamente a fim de se manter uma geração de calor adequada que permita obter uma solda com boas propriedades. Há que se atentar, porém, ao fato de que o eletrodo não deve ser demasiadamente afiado ao ponto de ter uma superfície de contato muito pequena, pois a diminuição da face dos eletrodos causa aumento na densidade de corrente, acarretando em aquecimento excessivo dos mesmos e diminuição de sua vida útil (WAINER, BRANDI & MELLO, 1992; AWS, 2007).

2.4.4.3. Influência da composição do metal de base

A resistividade elétrica de um material influencia diretamente o aquecimento por resistência da soldagem. Em metais altamente condutivos, como o cobre e prata, pouco calor é produzido mesmo quando submetidos a elevadas densidades de corrente; a pequena quantidade de calor gerada é rapidamente dissipada pelas peças de trabalho e para os eletrodos. Sendo assim, a composição de um metal determina suas propriedades, como temperatura de fusão e condutividade, que governam a quantidade de calor requerida para fundir o material e produzir a solda (AWS, 2007).

2.4.4.4. Dissipação de calor

A AWS (2007) explica que durante o processo de soldagem, há perdas de calor por condução para o metal de base adjacente ao ponto de solda e para os eletrodos. A dissipação de calor se estende até o momento em que a solda atinge a temperatura ambiente e se dá em taxas variáveis durante a aplicação de corrente. O calor gerado pela corrente de soldagem é inversamente proporcional à condutividade elétrica do metal de base. Quando o material é muito condutivo, como cobre e prata, correntes mais elevadas são necessárias para produzir uma solda adequada e compensar as perdas de calor, tornando, assim, mais difícil o processo de soldagem a ponto desses materiais.

Se os eletrodos permanecem em contato com as chapas após o término da passagem do fluxo de corrente, eles irão resfriar rapidamente o ponto de solda. Todavia, a taxa de resfriamento diminui com o aumento no tempo de soldagem devido ao fato de que um volume maior de metal de base será aquecido (AWS, 2007).

A Figura 2.11 a seguir mostra um esquema de dissipação de calor para o material adjacente e para os eletrodos durante a soldagem a ponto por resistência elétrica.

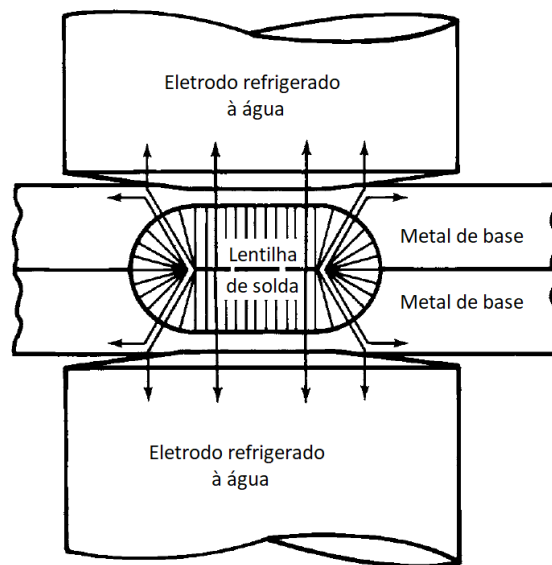


Figura 2.11 – Dissipação de calor durante a soldagem a ponto por resistência elétrica.
Fonte: Adaptado de AWS (2007).

2.4.5. Equipamentos de soldagem a ponto por resistência elétrica

2.4.5.1. Eletrodos

Os eletrodos são os componentes que mantêm as peças pressionadas durante o processo de soldagem a ponto; eles devem: ser fabricados de material de altas condutividade térmica e elétrica, geralmente ligas à base de cobre; possuir baixa resistência de contato; e apresentar grande resistência mecânica e ao desgaste para resistir à deformação causada por aplicações repetidas e altas solicitações térmicas. Os eletrodos possuem as seguintes funções (WAINER, BRANDI & MELLO 1992; ASM, 1993; MACHADO, 1996; AWS, 2007; MARQUES, MODENESI & BRACARENSE, 2011):

- Conduzir a corrente elétrica que passará pelas peças de trabalho, além de estabelecer uma área de contato estável na zona fundida;
- Transmitir a força mecânica às chapas, mantendo-as devidamente pressionadas;
- Dissipar parte do calor da zona fundida;
- Manter o alinhamento e a posição das peças de trabalho;
- Apresentar fraca tendência para formar ligas com o material a soldar.

Os eletrodos devem ser refrigerados adequadamente tanto para permitir a obtenção de uma solda de qualidade quanto para evitar a redução de sua vida útil. A água deve ser conduzida tão perto quanto possível da ponta dos eletrodos (MARQUES, MODENESI & BRACARENSE, 2011).

A ASM (1993) define que, para a soldagem de chapas com até 3 milímetros de espessura, o diâmetro da ponta do eletrodo, no caso dos eletrodos tipo cone truncado, deve ser determinado pela fórmula apresentada na Equação 2.3.

$$D = 5\sqrt{t} \quad (2.3)$$

Em que:

D = diâmetro da ponta do eletrodo (mm);

t = espessura da chapa (mm).

2.4.5.2. Máquinas

Wainer, Brandi e Mello (1992), AWS (2007) e Marques, Modenesi e Bracarense (2011) elucidam que as máquinas de soldagem a ponto por resistência são compostas, basicamente, por três sistemas fundamentais: mecânico, elétrico e de controle.

O sistema elétrico é formado por conexões, eletrodos e uma fonte de energia elétrica; esta pode ser do tipo energia direta ou armazenada, e fornecer corrente contínua ou alternada. O sistema mecânico tem por função fixar a peça e aplicar a força dos eletrodos; além disso, suporta a fonte de energia e outros componentes dos sistemas elétrico e de controle. Por fim, o sistema de controle pode atuar apenas sobre o tempo de soldagem ou também sobre a ação mecânica da aplicação da força do eletrodo. Os três componentes regulam as variáveis mais importantes na soldagem a ponto por resistência elétrica (WAINER, BRANDI & MELLO 1992; MARQUES, MODENESI & BRACARENSE, 2011).

2.5. Análise da qualidade da solda

A norma AWS A3.0:2001 (2001) define uma solda aceitável como aquela que “atende aos requisitos apropriados”. Por consequência, a determinação do que é uma solda de qualidade depende muito dos critérios e necessidades de cada fabricante.

Spinella (1994) define soldas de boa qualidade como aquelas com grande diâmetro e elevada resistência mecânica, sem a presença de expulsão de material e de falha interfacial parcial.

Para Newton *et al.* (1994), uma solda aceitável é aquela que apresenta um diâmetro mínimo especificado e resistência mecânica superior à resistência mínima necessária para determinada aplicação, além de ser livre de rachaduras, porosidade e expulsão.

A qualidade da solda pode ser descrita de três maneiras: através de suas características geométricas; por seu desempenho ou resistência mecânica; e também pelas características do processo durante a execução da soldagem (ZHANG & SENKARA, 2006).

2.5.1. Atributos geométricos

Segundo Zhang e Senkara (2006), as características geométricas da solda podem ser vistas diretamente após a soldagem ou reveladas através de ensaios destrutivos, como metalografia da seção transversal, ou não destrutivos, como o uso de dispositivos de ultrassom.

Os atributos comumente avaliados são:

- Tamanho da lentilha/ponto de solda;
- Penetração;
- Indentação;
- Tamanho da ZTA;
- Rachaduras (internas e superficiais);
- Porosidades e vazios;
- Modo de falha da fratura;
- Aparência superficial.

Zhang e Senkara (2006) explicam que a solda e a lentilha de solda são, muitas vezes, consideradas como sendo a mesma coisa; todavia, embora estejam estreitamente relacionadas, existem diferenças entre elas tanto em termos de definição quanto em termos de medidas. A solda compreende, na verdade, a Zona Termicamente Afetada (ZTA) e a lentilha de solda.

Outro engano bastante cometido é em relação ao uso dos termos “diâmetro do ponto” e “diâmetro da lentilha” de solda. Como a lentilha e seu tamanho são geralmente revelados através da metalografia da seção transversal, sua medida é expressa em forma de largura e não de diâmetro (ZHANG & SENKARA, 2006).

A Figura 2.12 a seguir mostra as características reveladas através da metalografia da seção transversal da solda. O teste metalográfico consiste em cortar as amostras em seções transversais, lixá-las, poli-las e atacá-las quimicamente a fim de se revelar a microestrutura que, em seguida, é examinada com o auxílio de instrumentos de ampliação óptica. Além de largura

da lentilha de solda, penetração, indentação e ZTA, a análise metalográfica pode ser usada para detectar rachaduras, porosidades e vazios (ZHANG & SENKARA, 2006).

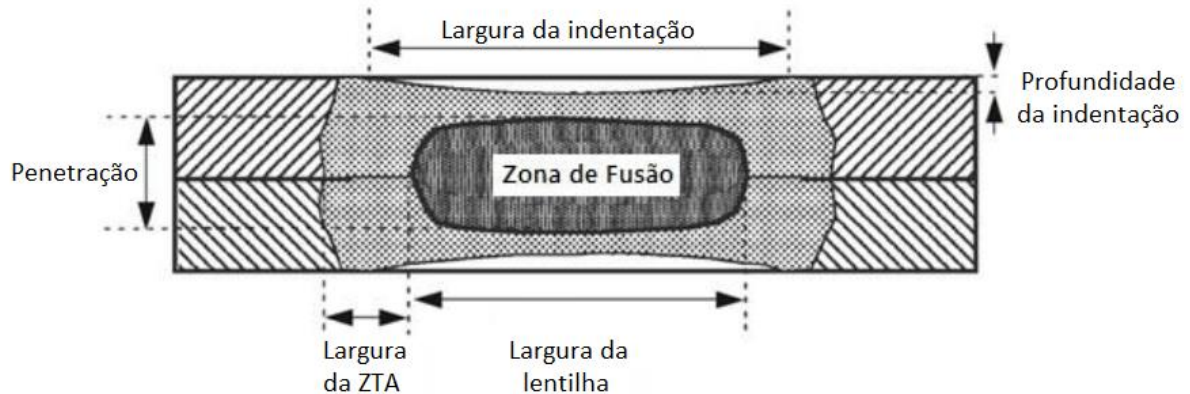


Figura 2.12 – Atributos da solda revelados pela análise metalográfica da seção transversal.

Fonte: Adaptado de Zhang e Senkara (2006).

2.5.1.1. Tamanho da solda

Dentre as características geométricas, o tamanho da solda, medido em termos de largura da lentilha ou o diâmetro do ponto, é o atributo mais significativo e mais utilizado para se determinar a resistência mecânica da solda. Quando duas chapas são unidas através da soldagem por um ponto, o tamanho do mesmo determina a área de adesão e sua capacidade de carga. Contudo, o tamanho da lentilha/ponto por si só é insuficiente para descrever a qualidade da solda, devido ao fato de que tal medida não necessariamente implica na integridade estrutural da união; outras características devem complementar a informação fornecida pelo tamanho da lentilha/ponto e prover mais informações sobre o grau de adesão entre chapas (ZHANG & SENKARA, 2006).

Devido às grandes diferenças relacionadas às especificações de cada processo, a indústria automotiva e outros setores possuem requisitos distintos sobre a qualidade das soldas. As exigências sobre o tamanho da solda diferem muito de um fabricante para outro, porém, em geral, elas se encaixam em uma faixa entre $3\sqrt{t}$ e $6\sqrt{t}$, em que t é a espessura da chapa. Além disso, a maioria das especificações mínimas encontra-se entre $4\sqrt{t}$ e $5\sqrt{t}$. Os requisitos acerca do tamanho da solda são, provavelmente, o critério mais comum de avaliação da qualidade da mesma (ZHANG & SENKARA, 2006).

A norma AWS D8.9M:2012 (2012), que trata sobre métodos de avaliação do comportamento da soldagem a ponto por resistência elétrica aplicada ao setor automotivo,

recomenda que o diâmetro mínimo da solda seja $4\sqrt{t}$, em que t é a espessura média das chapas, dada em milímetros.

Na prática, tanto o diâmetro do ponto quanto a largura da lentilha são usados como medidas do tamanho da solda, dependendo da necessidade específica de cada aplicação. Contudo, podem-se encontrar valores diferentes quando se comparam as medidas dos dois; a lentilha pode ser menor, similar ou maior que o ponto de solda. Além disso, o diâmetro do ponto é mais variável do que a largura da lentilha, quando se comparam vários pontos de solda feitos com a mesma seleção de parâmetros; a maior variação na medida do ponto pode se dar devido ao tipo de ensaio executado, ao modo de falha da fratura, entre outros fatores, que podem causar uma diferença significativa no tamanho dos pontos. Por esse motivo, o uso da largura da lentilha é mais consistente para se comparar diversas réplicas de uma solda. Ainda assim, o meio mais comum de se mensurar o tamanho da solda na indústria é o diâmetro do ponto, pois este pode ser obtido utilizando-se instrumentos simples e de baixo custo; portanto, os critérios para o tamanho da solda geralmente se referem ao diâmetro do ponto (ZHANG & SENKARA, 2006).

Kong *et al.* (2014), em seu trabalho sobre o efeito da adição de boro e da corrente sobre as propriedades mecânicas da soldagem por resistência elétrica de um aço de elevada resistência, concluem que tanto o tamanho da lentilha de solda quanto o diâmetro do ponto são diretamente proporcionais à corrente de soldagem. Além disso, os autores afirmam que a resistência da solda fraturada aumentou com o aumento no diâmetro do ponto.

Segundo a norma AWS D8.9M:2012 (2012), a medição do diâmetro do ponto de solda, apresentada na Figura 2.13, deve ser feita através da média aritmética entre o diâmetro máximo e o diâmetro mínimo, medidos com um paquímetro.

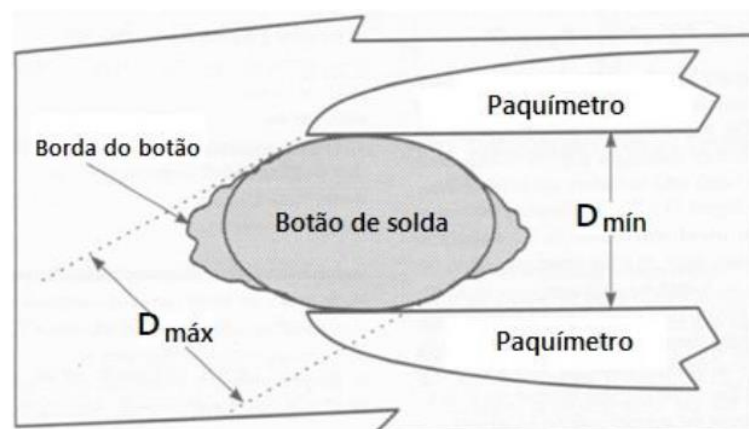


Figura 2.13 – Técnica de medição do diâmetro do ponto de solda.
Fonte: Adaptado de AWS D8.9M:2012 (2012).

A norma ISO 14273:2001 (2001) sugere que o diâmetro do ponto de solda seja a média aritmética resultante de duas medidas de diâmetro (d_1 e d_2), feitas com defasagem de 90° de uma medida em relação à outra, como mostrado na Figura 2.14 a seguir.

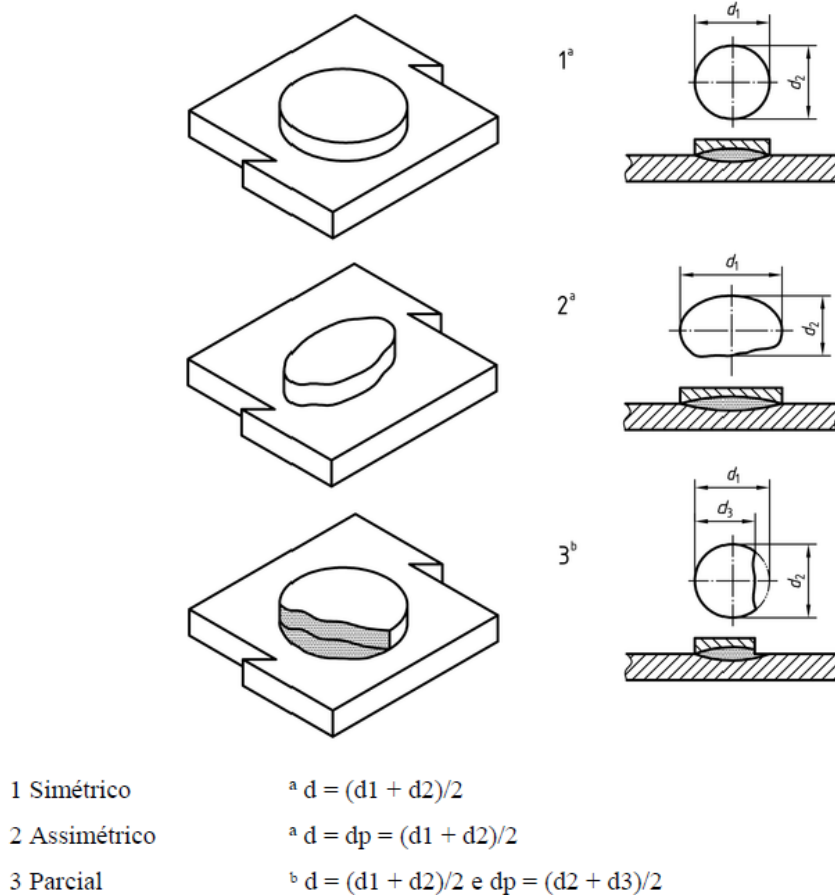


Figura 2.14 – Representação do procedimento de cálculo do diâmetro do ponto de solda.
Fonte: Adaptado de ISO 14273:2001 (2001).

2.5.1.2. Modos de falha

Existem diferentes classificações dos modos de falha para a soldagem a ponto por resistência elétrica; para efeito de simplificação, o presente trabalho considera dois modos de falha, falha por *pullout* e falha interfacial.

Zhang e Senkara (2006) apresentam os modos de falha das fraturas de solda como uma medida qualitativa de qualidade; a morfologia da fratura pode ser examinada após a realização de ensaios estáticos de cisalhamento por tração, que separam as peças soldadas e permitem verificar se o modo de falha da fratura é por arrancamento (*pullout*) ou interfacial.

Como exposto por Chao (2003), as soldas a ponto podem falhar de duas maneiras marcadamente diferentes. A falha que se dá por propagação de trincas através da lentilha de solda é conhecida como falha interfacial. Por outro lado, quando a falha ocorre por meio do

arrancamento completo do ponto de solda de uma das chapas, deixando um furo circular na mesma, ela é chamada de falha por arrancamento ou falha por *pullout*.

Experimentos conduzidos por Zhang e Senkara (2006) mostram de forma clara que o modo de falha está fortemente relacionado ao tamanho da solda. Pontos de solda pequenos tendem a falhar de modo interfacial, enquanto que pontos de solda de maior dimensão têm a tendência de falhar por *pullout*.

As falhas interfaciais podem ser resultado de uma baixa resistência ao cisalhamento, todavia, de modo geral, tais falhas podem ser observadas tanto em soldas boas quanto naquelas consideradas não conformes. As soldas que apresentam modo de falha interfacial são consideradas aceitáveis se possuírem uma marca de fusão nítida na área de solda e se seu tamanho for maior ou igual ao mínimo especificado; tais solda geralmente apresentam boa resistência mecânica e não devem ser consideradas discrepantes (ZHANG & SENKARA, 2006).

Devido às características de alta temperabilidade do aço 22MnB5, as soldas feitas nesse material estão propensas a apresentar falha interfacial, mesmo quando atingem elevada resistência mecânica. Esse modo de falha é normalmente associado à baixa absorção de energia (CHAO, 2003; SHI & WESGATE, 2003; POURANVARI & MARASHI, 2013; DIALLO, DUPUY, KACZYNSKI, 2014; HOU, 2016).

A alta temperabilidade resulta em microestruturas com elevada dureza e baixa ductilidade na ZTA; A região da ZTA mais próxima ao metal de base é geralmente submetida a temperaturas de aquecimento subcríticas, formando martensita revenida, o que lhe confere uma menor dureza; em contrapartida, tal região é cercada por material de alta dureza. Deste modo, ocorre formação de pontos frágeis com concentração de tensão, podendo promover a propagação de trincas e, conseqüentemente, a fratura por falha interfacial (HOU, 2016).

Kong *et al.* (2014) acrescentam que a fratura por *pullout* pode ocorrer na zona de menor dureza da solda, na fronteira entre a ZTA e o metal de base.

2.5.1.3. Indentação

A indentação é uma marca formada na superfície externa das peças de trabalho. É um efeito indesejável causado por deformações que ocorrem nas chapas devido ao calor gerado durante a soldagem somadas à penetração do eletrodo na superfície das peças (AWS, 2007).

Conforme a norma AWS D8.1M:2013 (2013) explica, a indentação é dada pela razão entre profundidade de indentação e espessura da chapa. Não obstante as diferentes especificações e necessidades de cada fabricante, normalmente, no setor automotivo, adota-se

a especificação de que uma indentação de até 30% da espessura da chapa é aceitável. Além disso, a norma salienta o cuidado que deve ser tomado para que distorções nas superfícies das peças, as quais são causadas pelo processo de soldagem, não sejam consideradas nas medidas de indentação. A Figura 2.15 mostra como se deve proceder a medição da indentação, considerando sempre o ponto de maior profundidade e desconsiderando as deformações ocasionadas na superfície das chapas.

De acordo com Aslanlar (2006) e Zhang *et al.* (2014), quando se deseja obter um acabamento superficial de alta qualidade e uma solda de boa resistência mecânica, a indentação não deve exceder 20% da espessura da chapa.

Shome e Tumuluru (2015) consideram que, como regra geral para os Aços Avançados de Alta Resistência, a indentação não deve exceder 25% da espessura da chapa.

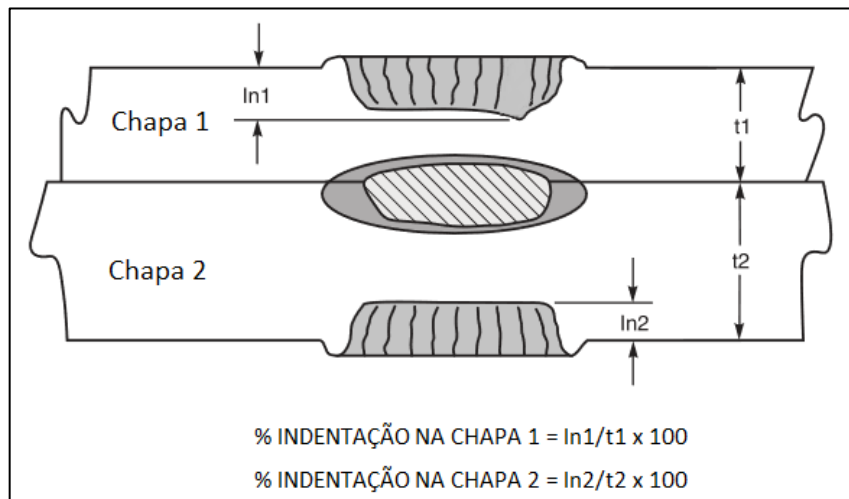


Figura 2.15 – Procedimento para medição da indentação.
Fonte: Adaptado AWS D8.1M:2013 (2013).

Zhang e Senkara (2006), em concordância com Aslanlar (2006), elucidam que a indentação excessiva não é aceitável devido a dois fatores: qualidade do acabamento superficial da estrutura que está sendo montada e capacidade de carga da solda. A indentação demasiada, na maioria das vezes, é resultado de uma excessiva aplicação de calor e normalmente está associada a outras descontinuidades. Por exemplo, a expulsão de material, a qual pode gerar porosidades e rachaduras, frequentemente, está associada a uma grande indentação. Além disso, excessiva indentação pode induzir a uma excessiva separação entre as chapas. Por outro lado, uma indentação demasiadamente rasa pode ser resultado de uma fusão incompleta na interface peça/peça, o que ocasiona a formação de uma junta frágil, que pode ser rompida facilmente.

A separação entre as chapas ocorre nas superfícies de contato como resultado do fenômeno de expansão e contração sofrido pelo metal durante o processo de soldagem a ponto e, se excessiva, reduz a resistência da solda (AWS, 2007).

2.5.1.4. Penetração

A penetração descreve a quantidade de material de base que é fundido durante a soldagem e é dada em termos de sua espessura. Uma penetração pequena pode estar relacionada à aplicação de calor insuficiente para gerar o ponto de solda, portanto, em geral, uma penetração grande é preferida. Contudo, como esse atributo está diretamente ligado à quantidade de calor produzida durante o processo de soldagem, uma penetração muito grande pode levar à redução da dureza da chapa e à indentação excessiva (ZHANG & SENKARA, 2006).

As especificações acerca da espessura da penetração são bastante amplas; via de regra, uma penetração espessa é aceita desde que não crie demasiada indentação.

2.5.2. Desempenho da solda

A qualidade das soldas a ponto é avaliada, principalmente, através de seu desempenho, que geralmente se refere às resistências estática e dinâmica da solda. Para o contexto industrial, as resistências mais relevantes de se avaliar são: resistência ao cisalhamento por tração; resistência à tração; resistência à fadiga; resistência ao impacto; e resistência à corrosão. A resistência mais comumente medida é a resistência ao cisalhamento por tração, devido a sua relativa facilidade de medição e ao fato de que diversas estruturas são projetadas para suportar esforços de cisalhamento (ZHANG & SENKARA, 2006).

2.5.2.1. Ensaio de cisalhamento por tração

A amostra a ser ensaiada deve ser formada por duas chapas com dimensões dentro dos padrões normatizados e unidas por um ponto único de solda. Ocasionalmente, dois ou mais pontos de solda podem ser feitos. O ensaio de cisalhamento por tração consiste em fixar o corpo de prova em uma máquina de testes padrão e aplicar uma tensão de tração até que ocorra a ruptura do mesmo (ZHANG & SENKARA, 2006).

2.5.3. Características do processo durante a execução da soldagem

Segundo Zhang e Senkara (2006), a característica mais utilizada para avaliação da qualidade da solda durante a execução do processo é a expulsão de material. A expulsão é um indicador de possível enfraquecimento da solda.

2.5.3.1. Expulsão de material

Os autores Zhang e Senkara (2006) definem expulsão como sendo o material em fusão ejetado durante a soldagem. A expulsão é um fenômeno recorrente em soldagem a ponto por resistência elétrica e pode ocorrer tanto na superfície de contato eletrodo/peça quanto na interface peça/peça. Quando acontece no contato eletrodo/peça, pode desgastar bastante o eletrodo e comprometer a qualidade superficial da solda, entretanto, não afeta a resistência mecânica do ponto caso se limite apenas à superfície. Já quando a ocorrência de expulsão se dá no contato peça/peça, a resistência mecânica da solda pode ser comprometida, visto que há perda de metal líquido na zona fundida. As interfaces em que ocorrem expulsão são mostradas nas Figuras 2.16 (a) e 2.16 (b) abaixo.

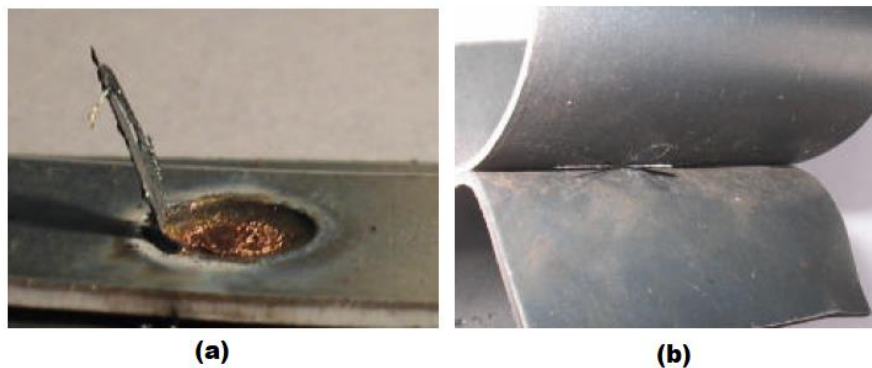


Figura 2.16 (a) – Expulsão na superfície de contato eletrodo/peça.

Figura 2.16 (b) – Expulsão na interface peça/peça.

Fonte: Branco (2004).

Ainda segundo Zhang e Senkara (2006), a expulsão pode acontecer tanto por falha humana quanto por falha técnica e é frequentemente utilizada como um indicador visual da qualidade da solda. Devido à perda de material durante o fenômeno, a solda pode apresentar defeitos como vazios e porosidades, que reduzem a resistência mecânica. Além disso, a expulsão está geralmente relacionada à excessiva indentação dos eletrodos na superfície das peças, desgaste e rápida deterioração dos eletrodos, distorção das chapas e defeitos na formação do volume da lentilha, como pode ser observado na Figura 2.17. Diante desses fatores que

comprometem a qualidade do ponto e produzem soldas com defeito, há uma grande necessidade na indústria de se reduzir a expulsão na soldagem a ponto por resistência elétrica.

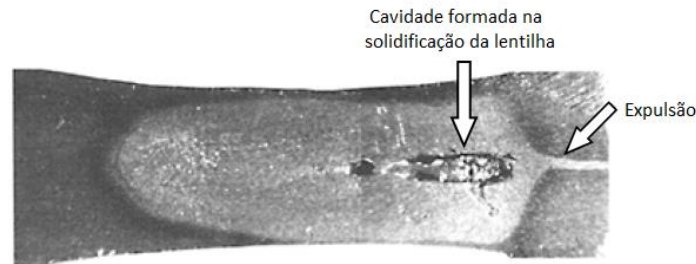


Figura 2.17 – Cavidade formada na lentilha de solda devido à expulsão de material.
Fonte: Adaptado de Zhang e Senkara (2006).

2.6. Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica dos AHSS

A microestrutura e as propriedades mecânicas dos Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) são bastante diferentes dos aços convencionais, o que impacta diretamente nos processos de união desses materiais, como a soldagem. Sendo a soldagem a ponto por resistência elétrica o principal método de união utilizado na indústria automotiva, torna-se vital o entendimento desse processo aplicado aos AHSS, visto que estes estão sendo amplamente introduzidos no setor automotivo com a finalidade de melhorar o desempenho dos automóveis tanto em relação à segurança dos passageiros quanto em relação ao consumo de combustível.

Shome e Tumuluru (2015) explicam que, quando comparados aos aços convencionais, os AHSS apresentam alto teor de elementos de liga, o que aumenta sua resistividade e, conseqüentemente, aumenta a geração de calor na interface peça/peça, podendo levar à expulsão de material. Uma maneira de controlar os efeitos da alta resistividade dos AHSS é aplicar uma maior força dos eletrodos. Somado a esse conceito, a WorldAutoSteel (2017) afirma que os AHSS podem exigir uma força dos eletrodos maior que os aços convencionais devido ao fato de a força dos eletrodos depender da resistência mecânica do material.

A WorldAutoSteel (2017) explica também que, devido à alta resistividade elétrica dos AHSS, estes aços necessitam de menos intensidade de corrente que os aços convencionais e os aços HSLA (*High Strength Low Alloy*), como pode ser visto na Figura 2.18.

De acordo com Scotchmer (2007), Choi, C. Y. *et al.* (2011) e WorldAutoSteel (2017), os AHSS geralmente apresentam uma faixa aceitável de corrente de soldagem (janela de trabalho) mais estreita quando comparados aos aços convencionais e aos aços HSLA, devido a sua elevada geração de calor e a sua microestrutura frágil no ponto de solda, resultantes das

altas porcentagens de elementos de liga em sua composição. Além disso, tendem a gerar maior expulsão de material, desgastar mais os eletrodos e a exibir elevada dureza na região de soldagem, o que pode levar à formação de trincas bem como à redução da resistência à fadiga.

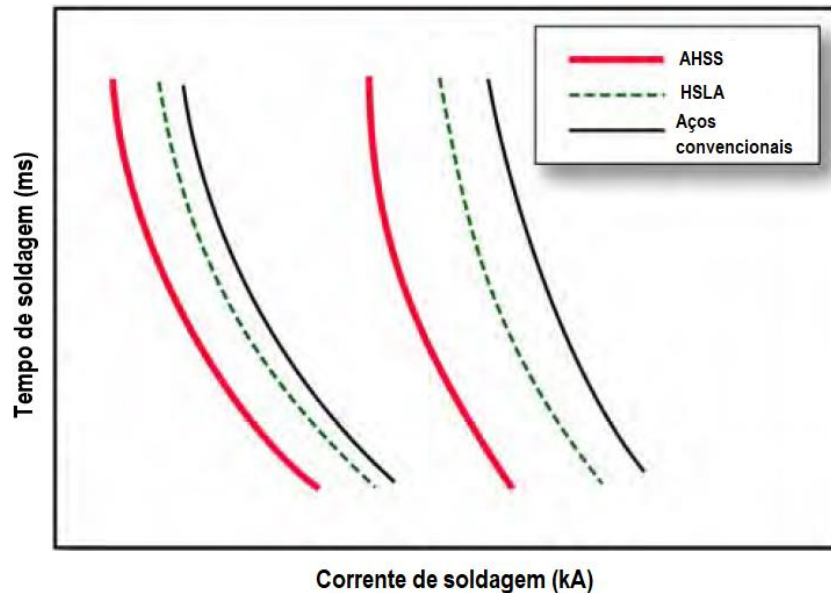


Figura 2.18 – Faixa aceitável de corrente na soldagem a ponto por resistência elétrica, comparando os aços AHSS, HSLA e convencionais.
Fonte: Adaptado de WorldAutoSteel (2017).

2.7. Planejamento e Análise de Experimentos

Um experimento é definido como um teste ou um conjunto de testes em que mudanças propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema a fim de se observar e identificar como as respostas são afetadas em função dessas mudanças provocadas nas variáveis de entrada. Isso significa que, para entender as relações de causa e efeito em um sistema, devem-se executar mudanças nos *inputs* para que seja possível observar o comportamento dos *outputs* (MONTGOMERY, 2013).

Montgomery (2013) salienta que experimentos são vitais para formular questões e obter respostas que compõem o método científico, possibilitando, assim, a análise das mais diversas aplicações de engenharia. De maneira geral, os experimentos são usados com a finalidade de se estudar o desempenho de processos e sistemas. Por processo ou sistema entende-se o conjunto formado por recursos (máquinas, operações, métodos, pessoas, entre outros) que transformam as entradas em saídas, as quais possuem uma ou mais respostas (*y*'s). Algumas variáveis do

processo são controláveis (x's) e outras incontroláveis (z's). A Figura 2.19 é uma representação esquemática de um processo ou sistema.

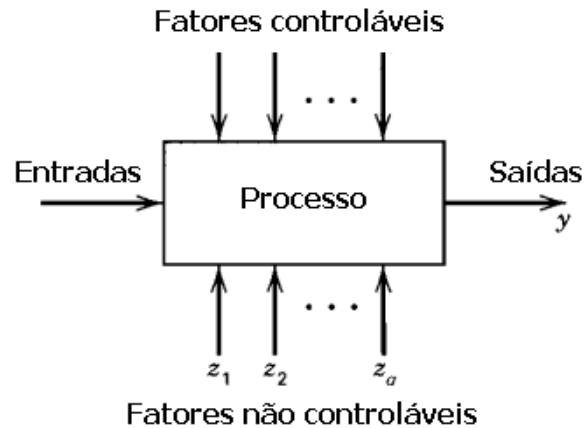


Figura 2.19 – Modelo geral de um processo ou sistema.
Fonte: Adaptado de Montgomery (2013).

Montgomery (2013) também destaca que os objetivos dos experimentos podem incluir:

- Determinar quais variáveis são mais influentes sobre uma determinada resposta;
- Determinar quais os valores dos x's que tornam os valores de y o mais próximo do desejado;
- Determinar quais valores dos x's que reduzem a variabilidade;
- Determinar quais os valores dos x's que minimizam os efeitos das variáveis incontroláveis.

O Planejamento e Análise de Experimentos – DOE (*Design of Experiments*) é o processo de planejamento de experimentos de forma que dados apropriados possam ser coletados e, posteriormente, analisados através de métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas. Deste modo, existem dois elementos fundamentais para qualquer problema experimental, o planejamento do experimento e a análise dos dados; estes estão intimamente relacionados, visto que o método de análise depende diretamente do projeto utilizado (MONTGOMERY, 2013).

O autor acima ainda explica que a aplicação do DOE pode trazer os seguintes benefícios:

- Melhoria do rendimento dos processos;
- Redução da variabilidade e maior conformidade em relação às especificações;
- Redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos;
- Redução dos custos totais.

Os três princípios básicos do planejamento de experimentos são aleatorização, replicação e blocagem. A aleatorização consiste em realizar os testes individuais em ordem aleatória, permitindo assim, que os efeitos desconhecidos dos fenômenos sejam distribuídos entre os fatores, aumentando a validade da investigação (MONTGOMERY, 2013).

A replicação é uma nova rodada independente de testes para cada combinação de fatores, tornando possível a introdução de uma variação na variável de resposta, variação esta que é utilizada para avaliar o erro experimental. Neste ponto, é importante salientar que replicação de testes e repetição de medidas são completamente diferentes; enquanto a replicação é realizar novamente um mesmo teste, repetição consiste em fazer várias medições de uma mesma resposta (MONTGOMERY, 2013).

Por fim, blocagem é uma técnica usada para melhorar a precisão com que as comparações entre os fatores de interesse são feitas; deve ser utilizada quando não for possível manter a homogeneidade das condições experimentais, pois permite avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados (MONTGOMERY, 2013).

Para planejar e analisar um experimento dentro da abordagem estatística, é necessário que as pessoas envolvidas tenham uma ideia clara a respeito do que será estudado e de como os dados serão coletados; além disso, também é preciso que essas pessoas tenham um entendimento básico acerca das ferramentas estatísticas que serão utilizadas para analisar os dados. Montgomery (2013) propõe que o Planejamento e Análise de Experimentos deve seguir as seguintes etapas:

1. Definição do problema;
2. Seleção das variáveis de resposta;
3. Escolha dos fatores e definição dos níveis e faixas de trabalho;
4. Escolha do projeto experimental;
5. Realização dos experimentos;
6. Análise estatística dos dados;
7. Conclusões e Recomendações.

As técnicas mais utilizadas no planejamento experimental compreendem: Arranjo de Taguchi, Arranjo Fatorial Fracionado, Arranjo Fatorial Completo e Arranjo de Superfície de Resposta. Diante disso, Nilo Júnior (2003), baseado nos autores Box, Hunter e Hunter (1978), Montgomery (1991) e Barros Neto, Scarmínio e Bruns (1995), resumiu as características dessas técnicas principais, como pode ser visto no Quadro 2.1 a seguir.

Quadro 2.1 – Características das técnicas de planejamento experimental.

| Arranjo experimental | Vantagens | Desvantagens | Aplicações |
|-------------------------------|---|---|---|
| Taguchi | Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos. | Fornecer uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis. | Processos em que há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento; Processos com alta dispersão ou aqueles em que as corridas demandem alto custo ou tempo. |
| Fatorial Fracionado | Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas. | Não promove a varredura completa da região experimental. | Processos em que se deseja um pré-conhecimento e em que a literatura é limitada; Corridas que demandam maior tempo ou custo. |
| Fatorial Completo | Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis. | Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis; Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis. | Processos em que já se tem um prévio domínio e em que a realização das corridas não demanda maior tempo ou custo. |
| Superfície de Resposta | Permite a verificação de variações intermediárias do processo. | Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos axiais, já que são realizadas poucas corridas nesses níveis. | Otimização de processos, principalmente, bem conhecidos e com baixa dispersão. |

Fonte: Adaptado de Nilo Júnior (2003).

Dentre os arranjos experimentais apresentados acima, o presente trabalho utilizou o Arranjo de Taguchi, o Arranjo Fatorial Completo e Arranjo de Superfície de Resposta. O Arranjo de Taguchi foi o primeiro a ser utilizado com o intuito de investigar o processo e

selecionar os fatores significativos, visto que existiam muitos parâmetros de regulação do processo. Posteriormente, foi realizado um Arranjo Fatorial Completo, que, além de confirmar os fatores significativos selecionados na etapa anterior, possibilitou a análise da região de curvatura, através da inclusão de pontos centrais, para que fosse possível a posterior otimização. Por fim, foi realizada uma superfície de resposta, considerando os fatores significativos encontrados nas etapas anteriores, e, com os resultados decorrentes dos experimentos realizados com esse arranjo, foi possível realizar a otimização das variáveis de resposta selecionadas.

2.7.1. Metodologia de Superfície de Resposta

Metodologia de Superfície de Resposta - MSR (RSM – *Response Surface Methodology*) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizado para desenvolver, melhorar e otimizar processos, especialmente, em situações em que a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis de entrada (MYERS, MONTGOMERY & ANDERSON-COOK, 2009).

De acordo com Montgomery (2013), na maioria dos problemas analisados, a relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Sendo assim, o primeiro passo é encontrar uma aproximação adequada para representar a resposta de interesse em função do conjunto de variáveis independentes. Geralmente, uma função polinomial de ordem mais baixa é apropriada para descrever tais relações; se a resposta for devidamente modelada por uma função linear, então a relação aproximada pode ser representada por um modelo de primeira ordem, dado na Equação 2.4 abaixo.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.4)$$

Em que:

y = Resposta de interesse;

x_i = Variáveis independentes;

β_i = Coeficientes a serem estimados;

k = Número de variáveis independentes;

ε = Erro experimental.

Com frequência, o sistema apresenta curvatura tal que o modelo de primeira ordem se torna inadequado. Deste modo, um polinômio de maior grau é necessário para representar a

relação entre a resposta e as variáveis independentes, como o modelo de segunda ordem apresentado pela Equação 2.5 (MYERS, MONTGOMERY & ANDERSON-COOK, 2009).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.5)$$

Quase todos os problemas de superfície de resposta utilizam um ou ambos os modelos apresentados anteriormente. É improvável que um modelo polinomial se constitua em uma aproximação adequada para todo o espaço experimental coberto pelas variáveis independentes; todavia, para uma região específica, estes modelos funcionam muito bem (MONTGOMERY, 2013).

O método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares – OLS*) é geralmente empregado para a estimação dos coeficientes definidos pelos modelos das Equações 2.4 e 2.5 (MONTGOMERY, 2013). A análise da superfície de resposta é então feita através de uma superfície ajustada; se a superfície ajustada for uma aproximação adequada do modelo real, a análise dessa superfície será aproximadamente equivalente à análise da superfície real. É necessário utilizar um arranjo experimental adequado para coletar os dados a fim de se estimar os coeficientes do modelo da melhor maneira.

Quando se está em uma região experimental distante do ponto de ótimo, a curvatura do sistema é bem pequena, sendo o modelo de primeira ordem adequado para representar a relação entre a resposta e as variáveis independentes. Deve-se, portanto, caminhar em direção à região de ótimo e, uma vez encontrada tal região, um modelo quadrático deve ser utilizado (MONTGOMERY, 2013).

2.7.1.1. A estrutura de uma Metodologia de Superfície de Resposta

O objetivo primordial de uma MSR é determinar as condições ótimas de operação para um sistema ou determinar a região na qual os requisitos operacionais são satisfeitos.

Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009) explicam que, em um primeiro momento, geralmente se tem pouco conhecimento acerca do processo que está sendo modelado; sendo assim, é necessário conduzir experimentos exploratórios, chamados de experimentos de *Screening*, com a finalidade de investigar quais são as variáveis que influenciam a resposta e eliminar aquelas que não são consideradas importantes; deste modo, reduz-se a lista de variáveis que podem ser significativas para que os experimentos subsequentes possam ser mais eficientes

e exigir menos testes. Os autores se referem aos experimentos de *Screening* como a Fase Zero de um estudo de superfície de resposta.

O presente trabalho utilizou o Arranjo de Taguchi para conduzir os experimentos de *Screening* a fim de se executar o menor número possível de testes, visto que inicialmente havia muitas variáveis independentes a serem analisadas.

Uma vez que as variáveis independentes de maior importância são identificadas, avança-se para a Fase Um. Nesta fase, objetiva-se adequar os níveis de trabalho para que a região experimental estudada englobe o ponto ótimo. Se as configurações atuais não são consistentes com a região do ponto ótimo, então deve-se determinar o conjunto de ajustes necessários para mover o processo em direção a esse ponto. Esta fase usualmente emprega um modelo de primeira ordem (MYERS, MONTGOMERY & ANDERSON-COOK, 2009).

Na Fase Um, este trabalho utilizou o Arranjo Fatorial Completo tanto para confirmar as variáveis independentes importantes quanto para, através da adição de pontos centrais, investigar a região de curvatura em que se encontra o ponto ótimo. De acordo com Box, Hunter e Hunter (1978), os pontos centrais são pontos intermediários aos níveis dos fatores e são utilizados para avaliar a existência de curvatura.

A Fase Dois de um estudo de superfície de resposta começa quando o processo está configurado para ser executado na região de ótimo. Objetiva-se a obtenção de um modelo que será uma aproximação precisa do modelo real dentro de uma região relativamente pequena em torno do ponto de ótimo. Devido ao fato de que a superfície de resposta real apresenta curvatura próximo ao ponto de ótimo, um modelo de segunda ordem (ou, dificilmente, algum modelo de ordem mais elevada) será usado. Uma vez definido um modelo polinomial adequado, este deve ser analisado para determinar a condição ótima para a operação do processo (MYERS, MONTGOMERY & ANDERSON-COOK, 2009).

Para a obtenção da superfície de resposta propriamente dita, na Fase Dois deste trabalho, foi empregado um Arranjo Composto Central (*Central Composite Design – CCD*), especificamente, o CCD circunscrito. De acordo com Montgomery (2013), este é o arranjo mais amplamente utilizado para ajustar uma superfície de resposta. Geralmente, o CCD para k fatores é uma matriz composta por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo (2^k) ou fracionado (2^{k-p} , sendo p a fração desejada do experimento); um grupo de pontos axiais ($2k$); e um conjunto de pontos centrais (m). O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representa seus valores extremos. De acordo com o posicionamento dos pontos axiais, o CCD pode ser circunscrito, inscrito ou de face centrada. Na Figura 2.20, encontra-se um exemplo de um arranjo Composto Central circunscrito.

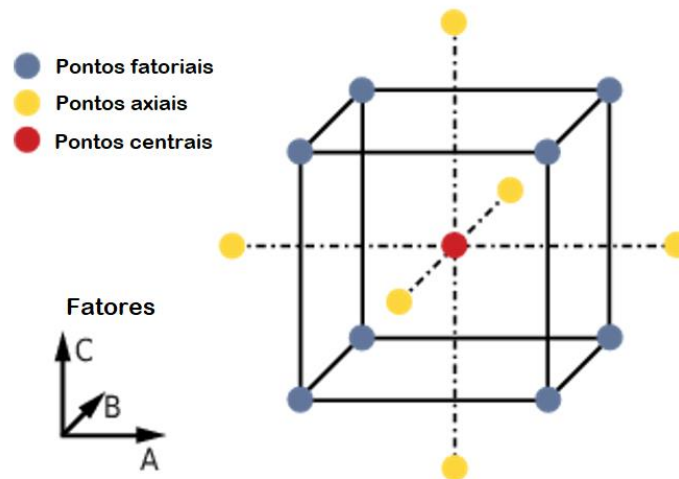


Figura 2.20 – Arranjo Composto Central circunscrito para três fatores.
 Fonte: Adaptado de Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009).

O Arranjo Composto Central circunscrito corresponde ao CCD original; é aquele em que os pontos axiais se encontram a uma distância α dos centrais. Este tipo de arranjo explora o maior espaço experimental possível. Segundo Montgomery (2013), o valor de α depende do número de experimentos da porção fatorial do CCD; por conseguinte, $\alpha = (2^k)^{1/4}$, em que k é o número de fatores analisados.

Após a obtenção do modelo, deve-se proceder a avaliação da adequação do mesmo ao sistema real através de uma Análise de Variância (ANOVA). A ANOVA, além de avaliar se o modelo é estatisticamente significativo, permite verificar quais os termos deste modelo são significativos e quais podem ser removidos. Para testar a significância do modelo e de seus termos, pode-se utilizar a abordagem do *P-value* para se fazer testes de hipóteses; rejeita-se a hipótese nula de que o modelo ou termos específicos não são significantes caso *P-value* seja menor que o nível de significância escolhido (geralmente, $\alpha = 0,05$). Além disso, o ajuste dos modelos é dado através do coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta que é explicado pelo modelo conceitual. Entretanto, um alto valor de R^2 não implica necessariamente em um bom modelo, visto que a adição de variáveis ao modelo sempre irá aumentar tal coeficiente de determinação, independentemente de a variável adicionada ser ou não estatisticamente significativa. Devido a esse fato, na maioria das vezes, opta-se pelo uso do coeficiente R^2 ajustado (R^2 (adj.)), que não aumenta sempre que uma variável é adicionada ao modelo; se um termo desnecessário é adicionado, o valor de R^2 (adj.) diminui (MYERS, MONTGOMERY & ANDERSON-COOK, 2009).

Com o modelo de superfície de resposta ajustado, é possível prosseguir para a otimização do processo e validação dos resultados.

2.8. Otimização de múltiplas respostas

A Metodologia de Superfície de Resposta tem como seu objetivo principal encontrar uma condição ótima para a operação de um processo. Deste modo, para alcançar tais resultados, diversos métodos de otimização podem ser empregados.

Na maioria dos processos, sua operação não pode ser avaliada por apenas uma característica funcional do produto, sendo que a análise individual de cada saída em um experimento com múltiplas respostas pode conduzir a resultados sem sentido; análises separadas podem gerar recomendações conflitantes sobre o nível de trabalho de cada fator, pois um nível de um dado fator pode melhorar o desempenho de uma saída enquanto piora o de outra (CHIAO & HAMADA, 2001).

A análise simultânea de múltiplas respostas envolve, primeiramente, a construção de um modelo apropriado para cada uma delas e, em sequência, a determinação de um conjunto de condições de operação que otimize todas as respostas ou pelo menos as mantenha dentro de uma faixa desejável (KHURI & CORNELL, 1996; MYERS, MONTGOMERY & ANDERSON-COOK, 2009).

Vários métodos de otimização multi-objetivo são apresentados na literatura. Geralmente, tais estratégias podem ser divididas em dois grupos, os métodos de priorização e os métodos de aglutinação (BUSACCA, MARSEGUERRA & ZIO, 2001; OZEL & KARPAT, 2005).

Nos métodos de priorização, ocorre a eleição da resposta mais importante como a função objetivo que será otimizada, e as outras respostas são tratadas como restrições. Exemplos dessa abordagem são a Programação Lexicográfica e o Método de Restrição ϵ .

Já para os métodos de aglutinação, a estratégia adotada consiste em combinar funções objetivo individuais em uma única função, que passa a ser tratada como a função objetivo da otimização global do problema; a otimização desta função global garante que as respostas individuais também sejam otimizadas. Exemplos de métodos pertencentes a esse grupo são o Método do Critério Global, o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM), o Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP) e o *Desirability*.

As abordagens escolhidas para o presente trabalho foram dois métodos de somas ponderadas, o Método do Critério Global (MCG) e o Método do Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado, visto que estes permitem a otimização multi-objetivo de respostas com diferentes graus de importância. Além disso, o princípio de somas ponderadas constitui-se em uma das estratégias mais empregadas para a resolução de problemas de otimização de

múltiplas respostas, dada sua relativa simplicidade e capacidade de interpretação física a respeito dos processos (ZHANG & YANG, 2001).

Nas formulações apresentadas, tanto para o MCG quanto para o EQMMP, a identificação dos pontos de ótimo é obtida pela aplicação de algoritmos de otimização nas respectivas equações. Neste estudo, foi utilizado o Algoritmo Genético pelo fato deste ser um método de otimização global, ao contrário dos métodos gradientes, que podem estacionar em pontos de ótimos locais. Busacca, Marseguerra e Zio (2001) explicam que o Algoritmo Genético é uma técnica de otimização que utiliza uma população de soluções (ou pontos), ao contrário dos métodos gradientes, que utilizam um único ponto. A solução que melhor atender à função objetivo é a que sobreviverá às mutações e combinações.

2.9. Método do Critério Global (MCG)

Rao (2009) caracterizou o Método do Critério Global (MCG) como uma técnica de programação de múltiplos objetivos em que a solução ótima é encontrada pela minimização de um critério global pré-selecionado $G(x)$, definido como a soma dos quadrados dos desvios relativos das funções objetivo individuais em relação à solução ideal. A formulação do MCG é apresentada na Equação 2.6 abaixo.

$$\text{Minimizar } G(x) = \sum_{i=1}^m \left[\frac{T_i - f_i(x)}{T_i} \right]^2 \quad (2.6)$$

$$\text{sujeito a: } g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (2.7)$$

Em que:

$G(x)$ = Critério global;

T_i = Alvos definidos para as funções objetivo;

$f_i(x)$ = Funções objetivo;

m = Número de objetivos;

$g_j(x) \leq 0$ = Restrições.

No caso de as múltiplas respostas apresentarem diferentes graus de importância, a formulação trazida por Rao (2009) permite a inserção de pesos para a ponderação das funções objetivo. Deste modo, o problema de otimização passa a ser escrito como na Equação 2.8 a seguir.

$$\text{Minimizar } G(x) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot \left[\frac{T_i - f_i(x)}{T_i} \right]^2 \quad (2.8)$$

$$\text{sujeito a: } g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (2.9)$$

Em que:

$G(x)$ = Critério global;

$$w_i = \text{Pesos atribuídos para as funções objetivo, com } \sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \quad (2.10)$$

T_i = Alvos definidos para as funções objetivo;

$f_i(x)$ = Funções objetivo;

m = Número de objetivos;

$g_j(x) \leq 0$ = Restrições.

O MCG trata as funções objetivo como funções independentes. Já o EQMMP (Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado), apresentado no item a seguir, tenta avaliar a influência das correlações entre as respostas de interesse nos resultados dos métodos de otimização.

2.10. Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP)

A maioria dos métodos de otimização não leva em consideração a possível correlação entre as múltiplas respostas. Box *et al.* (1973) explicam que a presença de tal correlação pode influenciar a otimização dos resultados, acarretando em erros nos coeficientes do modelo matemático. Ou seja, se a estrutura de variância-covariância (correlação) for ignorada, as

equações da regressão podem não representar adequadamente as funções objetivo e as funções de restrição (CHIAO & HAMADA, 2001).

Nesse contexto, Paiva *et al.* (2009) desenvolveram uma abordagem de otimização que combina Análise de Componentes Principais (ACP), Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e o conceito de Erro Quadrático Médio (EQM), e a denominaram de Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM). O método EQMM faz a transformação de um conjunto de respostas originais correlacionadas em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas dadas em termos de componentes principais.

Contudo, uma dada característica pode ser mais relevante ao processo do que as demais, sendo sua otimização prejudicada em favor da otimização das respostas menos importantes, visto que o método EQMM considera-as igualmente importantes. Dessa forma, para solucionar o problema da otimização de múltiplas respostas correlacionadas com graus de importância diferentes, Gomes *et al.* (2013) propuseram o Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP). Para modelar e otimizar o problema, o EQMMP combina, da mesma forma que o EQMM, a Análise de Componentes Principais (ACP), a Metodologia de Superfície de Resposta e o conceito de Erro Quadrático Médio.

O Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP), segundo Gomes *et al.* (2013), traz a proposta de atribuição dos pesos às respostas antes da Análise de Componentes Principais (ACP); além disso, a ACP deve ser desenvolvida levando em consideração a matriz de variância-covariância, diferentemente do EQMM, que faz a ACP baseada na matriz de correlação. Outro ponto importante é que as respostas devem ser padronizadas antes da ponderação, visando à unificação dos dados.

A atribuição de pesos às respostas feita diretamente nas funções objetivo, como ocorre nos métodos tradicionais de otimização, não pode ser feita para o Erro Quadrático Médio Multivariado, visto que para, o EQMM, esse procedimento não significa que as respostas estão sendo ponderadas. Isso se deve ao fato de que a função objetivo do EQMM é dada em termos dos componentes principais e estes são uma combinação linear das respostas a serem otimizadas; deste modo, a atribuição de pesos diretamente na função objetivo fará com que os pesos sejam atribuídos aos componentes principais utilizados, o que não garante a ponderação das respostas de interesse (GOMES, 2010). A Figura 2.21 a seguir mostra os passos da estratégia de ponderação das respostas utilizada no EQMMP.

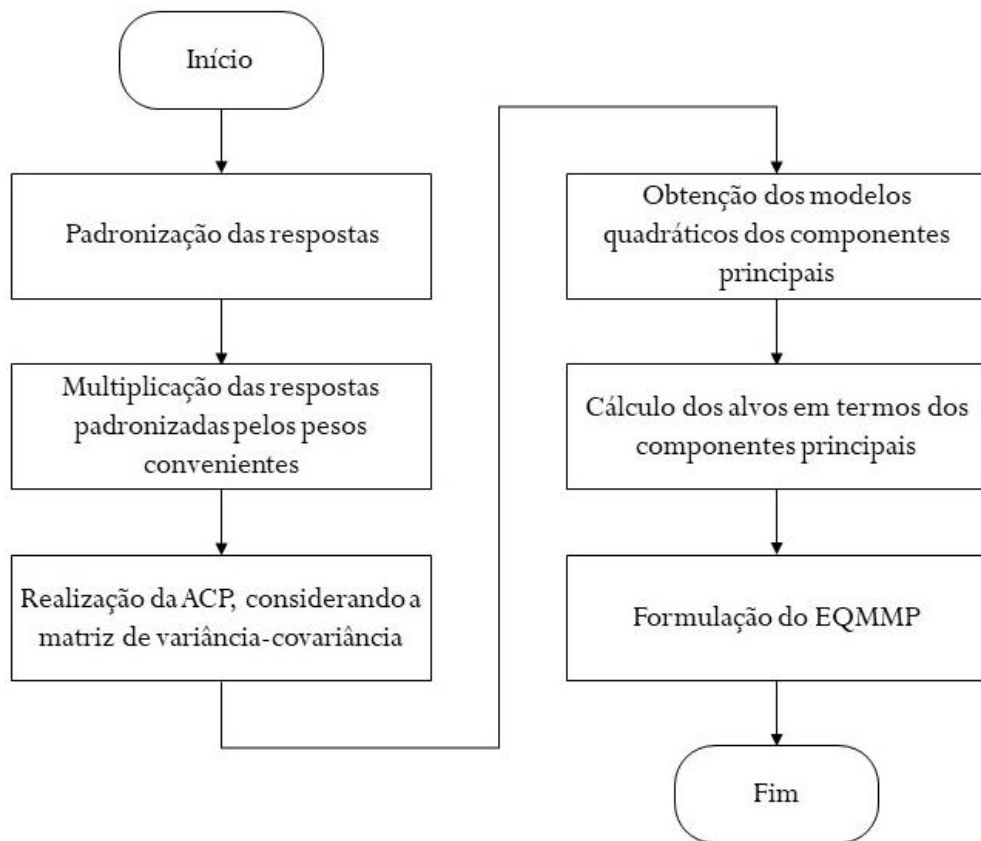


Figura 2.21 – Estratégia de ponderação das respostas utilizada no EQMMP.
Fonte: Gomes (2010).

A padronização das respostas é obtida através da fórmula apresentada na Equação 2.11 abaixo.

$$Z(y) = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \quad (2.11)$$

Em que:

$Z(y)$ = Valores padronizados da resposta;

y = Valores experimentais obtidos para a resposta;

μ_y = Média experimental da resposta;

σ_y = Desvio-padrão experimental da resposta.

Depois de padronizadas, as respostas são multiplicadas pelas respectivas ponderações. Diversas formas de ponderação podem ser utilizadas; Ch'ng, Quah e Low (2005) sugerem que os pesos sejam atribuídos de forma que a soma entre eles seja igual a um, como pode ser visto na Equação 2.12.

$$\sum_{i=1}^k \omega_i = 1 \quad (2.12)$$

Em que:

ω_i = Pesos atribuídos para as respostas;

k = Número de respostas consideradas.

Após a padronização e ponderação das respostas, é feita a Análise de Componentes Principais (ACP), de forma que os componentes sejam extraídos levando em consideração a matriz de variância-covariância.

A Análise de Componentes Principais (ACP), conforme apresentado por Paiva (2006), é uma técnica estatística multivariada que explica a estrutura de variância-covariância existente em um conjunto de dados, utilizando combinações lineares das variáveis originais.

Segundo Johnson e Wichern (2007), os objetivos principais da ACP são redução de dimensionalidade e interpretação de dados. Embora p componentes sejam necessários para se reproduzir a variabilidade total de um sistema de interesse, geralmente, a maior parte desta variabilidade pode ser representada por um pequeno número k de componentes principais, o que significa que existe quase tanta informação em k componentes principais quanto nas p variáveis originais. Desta forma, a ideia da ACP é que k componentes principais podem substituir, sem perda considerável de informação, as p variáveis originais. O conjunto original de dados, que consiste de n medições das p variáveis, é reduzido para um conjunto posterior formado por n medições de k componentes principais.

Johnson e Wichern (2007) afirmam que a ACP geralmente revela relacionamentos que não seriam previamente identificados com o conjunto original, resultando em uma melhor interpretação do fenômeno.

Os passos seguintes à ACP consistem no desenvolvimento de modelos quadráticos para os componentes principais e cálculo dos alvos em termos dos componentes. Os alvos são calculados a partir de uma combinação linear entre os autovetores dos componentes principais e os valores padronizados das respostas em relação aos seus alvos, como pode ser observado nas Equações 2.13 e 2.14 abaixo.

$$T_{CP} = \sum_{j=1}^k c_j \cdot Z(y_j | \zeta_{y_j}) \quad (2.13)$$

Em que:

T_{CP} = Alvo em termos do componente principal;

k = Número de respostas consideradas;

c_j = Coeficientes dos autovetores do componente principal;

$Z(y_j | \zeta_{y_j})$ = Valores padronizados das respostas em relação aos alvos, calculados por:

$$Z(y_j | \zeta_{y_j}) = \frac{\zeta_{y_j} - \mu_{y_j}}{\sigma_{y_j}} \quad (2.14)$$

Em que:

ζ_{y_j} = Alvos definidos para as respostas;

μ_{y_j} = Média experimental das respostas;

σ_{y_j} = Desvio-padrão experimental das respostas.

Por fim, chega-se à formulação para o EQMMP, como apresentado na Equação 2.15 a seguir. Os componentes principais utilizados são ponderados, considerando as porcentagens de explicação das variáveis oferecidas por eles.

$$\text{Minimizar } EQMMP = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{\rho_T} [(CP_i^* - T_{CP_i}^*)^2 + \lambda_{CP_i}^*] \quad (2.15)$$

$$\text{sujeito a: } x^T x \leq \rho^2 \quad (2.16)$$

Em que:

$EQMMP$ = Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado;

n = Número de componentes principais utilizados;

ρ_i = Porcentagens de explicação dos componentes principais;

$$\rho_T = \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (2.17)$$

CP_i^* = Modelos de superfície de resposta desenvolvidos para os escores dos componentes principais das respostas ponderadas extraídos da matriz de variância-covariância;

$T_{CP_i}^*$ = Alvos em termos dos componentes principais das respostas ponderadas extraídos da matriz de variância-covariância;

$\lambda_{CP_i}^*$ = Autovalores dos componentes principais das respostas ponderadas extraídos da matriz de variância-covariância;

$x^T x \leq \rho^2$ = Restrição do espaço experimental para regiões esféricas (no caso de se utilizar um arranjo CCD), $\rho = \alpha$.

2.11. Considerações finais

Apresentaram-se, neste capítulo, os conceitos que formam todo o suporte teórico necessário para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A partir da discussão da soldagem a ponto por resistência elétrica, verificou-se que esse processo é amplamente utilizado na indústria automotiva, podendo, cada veículo, conter milhares de pontos de solda. Além disso, é um processo versátil e que apresenta elevadas taxas de produção. Seu princípio de funcionamento consiste na passagem de uma corrente elétrica através de dois eletrodos, os quais mantêm as peças pressionadas, gerando o calor necessário para que a união aconteça. Assim, de acordo com a Lei de Joule, que rege a geração de calor

no processo, mostrou-se que os três parâmetros principais na soldagem a ponto por resistência elétrica são corrente, tempo e força exercida pelos eletrodos.

Quanto aos Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS), foi mostrado que estes se constituem, atualmente, em opções para substituir os aços convencionais na indústria automotiva no que se refere à fabricação de componentes estruturais com o propósito de superar o desafio de reduzir o peso do veículo sem comprometer a segurança dos passageiros. As peculiaridades dos AHSS, quando submetidos ao processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, também foram apresentadas; esses materiais, devido ao alto teor de elementos de liga, possuem elevada resistividade e, conseqüentemente, a geração de calor é maior na interface peça/peça, o que aumenta a tendência de gerar expulsão de material e também desgasta mais os eletrodos.

Em seguida, foram apresentados os conceitos que envolvem o Planejamento e Análise de Experimentos e, especificamente, a Metodologia de Superfície de resposta (MSR), que se constitui em um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizado para desenvolver, melhorar e otimizar processos. A MSR foi utilizada no presente trabalho devido a sua efetividade em analisar processos em que a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis de entrada.

Por fim, a otimização de múltiplas respostas foi discutida com enfoque nos dois métodos utilizados nessa pesquisa, o Método do Critério Global e o Método do Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado. Tal discussão permitiu a posterior comparação entre os métodos para se definir qual dos dois mais se adequa para otimizar os dados obtidos.

3. PESQUISAS ANTERIORES QUE ABORDARAM O AÇO 22MnB5 COMO OBJETO DE ESTUDO

3.1. Considerações iniciais

Objetiva-se, neste capítulo, identificar como o aço 22MnB5 vem sendo abordado na literatura e, principalmente, analisar as pesquisas anteriores acerca desse material quando submetido à soldagem a ponto por resistência elétrica, o que permitirá explicar os resultados obtidos no presente estudo, baseando-se no conhecimento científico apresentado nos trabalhos anteriores. Além disso, essa análise é fundamental para a compreensão do que já existe em relação ao tema e quais as contribuições ainda podem ser feitas.

3.2. Objetivos e critérios de busca

Uma pesquisa inicial foi conduzida, em abril de 2017, no Portal de Periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) com o objetivo de conhecer os principais estudos e temas desenvolvidos sobre o aço 22MnB5. A busca foi feita por artigos que contivessem em seu assunto o termo “22MnB5”. Foram encontrados 110 artigos que datam de 2006 adiante. A maior parte dos artigos (62%) trabalha o processo de Estampagem a Quente do aço 22MnB5 e as características micro estruturais do material em questão ao passar por tal processo de conformação. 20% dos artigos encontrados nessa busca tratam sobre a soldagem desse aço e, especificamente, 8% tratam sobre soldagem a ponto por resistência elétrica. A Figura 3.1 mostra a classificação dos artigos quanto ao tema geral de que tratam.

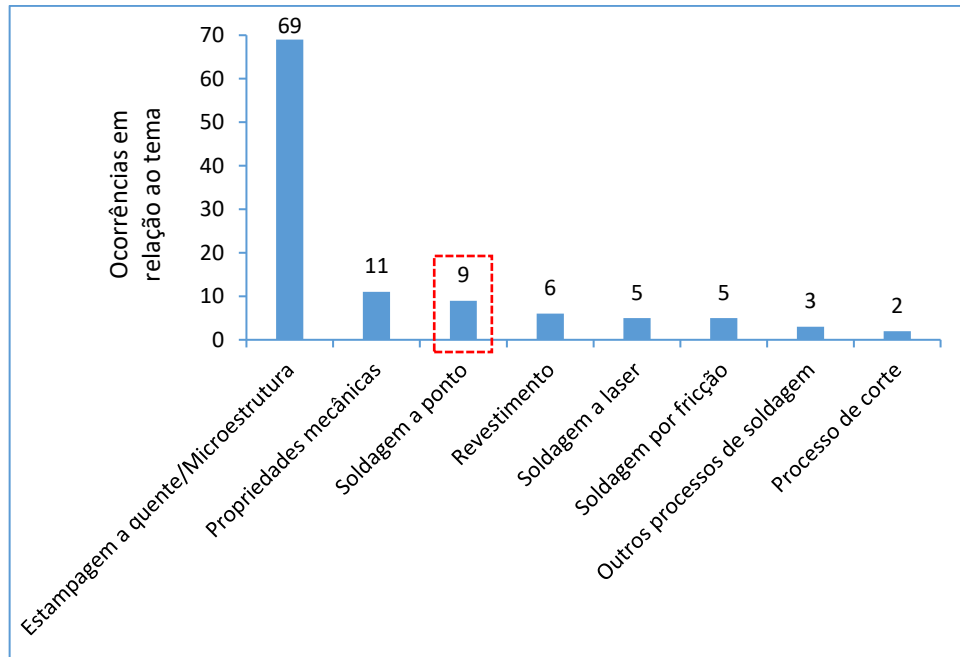


Figura 3.1 – Classificação dos artigos sobre o aço 22MnB5 de acordo com o tema que abordam.
Fonte: A autora.

Os artigos também foram classificados quanto ao ano de publicação, como pode ser visto na Figura 3.2 a seguir. Como a busca foi feita no início de 2017, os três artigos desse ano não foram incluídos no gráfico, pois optou-se por mostrar apenas os anos anteriores a fim de se comparar a quantidade de artigos produzida por ano.

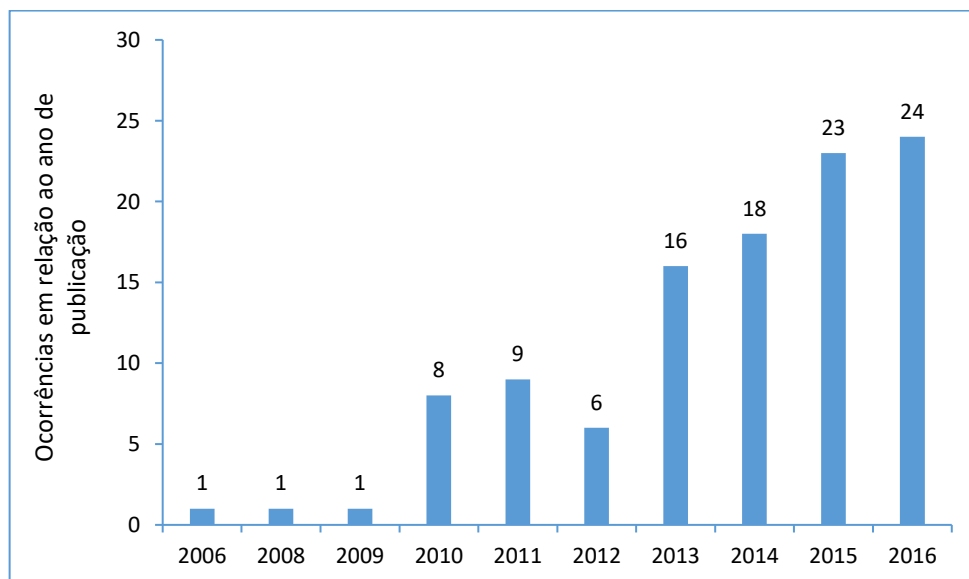


Figura 3.2 – Classificação dos artigos sobre o aço 22MnB5 de acordo com o ano de publicação.
Fonte: A autora.

Observa-se um crescente interesse pelas pesquisas acerca do aço 22MnB5; além disso, nota-se que o maior número de publicações foi nos anos de 2015 (23 artigos) e 2016 (24 artigos), mostrando que os trabalhos sobre esse material são ainda muito recentes, e indicando a relevância de novos estudos e desenvolvimentos que possibilitem a melhor utilização desse material, em especial no que se refere ao processo de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5, visto que ainda há muito pouco publicado sobre o tema.

Posteriormente, também em abril de 2017, foi realizada uma pesquisa no Portal de Periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e nas principais bases de dados (*Scopus, Science Direct, Web of Science, Springer*) a fim de se compreender como a soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5 vem sendo estudada e aplicada. Utilizaram-se os termos de busca “*Resistance Spot Welding*” e “22MnB5”, adotando-se como critério a aceitação de qualquer documento que contivesse “*Resistance Spot Welding*” e “22MnB5”; os resultados foram refinados pelos tópicos “*Resistance Spot Welding*” e “22MnB5”. Uma nova pesquisa, utilizando o Portal de Periódicos CAPES e os mesmos critérios, foi feita em abril de 2018 para encontrar os artigos mais recentes e atualizar a busca feita anteriormente. Deste modo, foram obtidos 24 artigos, dos quais, após leitura e análise, 8 foram considerados relevantes para a pesquisa em desenvolvimento.

Além disso, foram realizadas buscas, em abril de 2018, no Portal de Periódicos CAPES, com os seguintes pares de termos: “22MnB5” e “*Optimizing*”; “22MnB5” e “*Optimization*”; “22MnB5” e “*Response Surface Methodology*”. Não foram encontrados, todavia, artigos referentes à otimização da soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5.

Uma pesquisa também foi realizada, em abril de 2017, no Google Acadêmico, e foram encontrados 4 documentos, dos quais 1 se mostrou relevante para o presente estudo.

Portanto, foram encontrados 9 documentos relevantes, dos quais 8 são artigos e 1 é uma dissertação de mestrado. A análise de tais trabalhos é feita a seguir.

O Quadro 3.1 traz os objetivos de cada uma das pesquisas anteriores selecionadas.

Quadro 3.1 – Objetivos das pesquisas anteriores.

| Referência | Objetivo do estudo |
|-------------------------------------|--|
| Choi et al. (2011) | Se dedicaram ao estudo da soldabilidade entre os aços 22MnB5 estampado a quente e GA780DP, empregando a soldagem a ponto por resistência elétrica. Foi avaliado o efeito da corrente sobre o crescimento da lentilha de solda e sobre a capacidade de carga. Além disso, o comportamento da fratura também foi estudado. |
| Jong et al. (2011) | Estudaram as características da junta de solda de um aço boro de alta resistência (USIBOR 1500) após a soldagem a ponto por resistência elétrica. Foram avaliados a resistência ao cisalhamento, o tamanho da lentilha, a microestrutura e a microdureza da solda. |
| Ji et al. (2014) | Investigaram os efeitos de dois revestimentos metálicos diferentes sobre a geração de calor, a expulsão de material e o crescimento da lentilha durante a soldagem a ponto por resistência elétrica de um aço boro estampado a quente. |
| Bacic Junior (2016) | Fez um estudo da soldabilidade do aço 22MnB5 no processo de solda a ponto por resistência elétrica e avaliou propriedades mecânicas, modos de falha, microestrutura e microdureza das juntas de solda. |
| Eller et al. (2016) | Se dedicaram ao estudo da zona termicamente afetada formada na soldagem a ponto do aço boro 22MnB5. |
| Huin et al. (2016) | Avaliaram os mecanismos de fratura e a capacidade de carga na soldagem a ponto por resistência elétrica de dois aços dissimilares, 22MnB5 estampado a quente e DP600. |
| Ighodaro, Biro e Zhou (2016) | Compararam corrente de soldagem, propriedades mecânicas e desempenho de juntas soldadas a ponto por resistência elétrica de dois aços estampados a quente com revestimentos diferentes. |
| Liang et al. (2016) | Avaliaram a microestrutura, as propriedades mecânicas e os modos de falha da soldagem a ponto por resistência elétrica entre dois aços dissimilares, o aço boro 22MnB5 e o aço galvanizado HSLA350. |
| Luo et al. (2016) | Investigaram as macro características da junta de solda em termos de tamanho da lentilha, deslocamento da lentilha, taxa de penetração, profundidade da indentação, diâmetro da indentação e taxa de redução da espessura. A soldagem a ponto por resistência elétrica foi feita entre dois aços dissimilares, o AHSS B1500HS, que é muito similar ao 22MnB5 e o aço B250P1. |

Fonte: A autora.

O Quadro 3.2 apresenta uma classificação das pesquisas anteriores quanto ao tipo de soldagem, homogênea ou dissimilar; à aplicação do Planejamento e Análise de Experimentos; e à aplicação de métodos de otimização.

Quadro 3.2 – Classificação das pesquisas anteriores quanto ao tipo de soldagem e ao emprego de técnicas de Planejamento e Análise Experimentos e de métodos de otimização.

| Referência | Soldagem dissimilar | Soldagem homogênea | Planejamento e Análise de Experimentos | Métodos de otimização |
|------------------------------|---------------------|--------------------|--|-----------------------|
| Choi <i>et al.</i> (2011) | * | | Não | Não |
| Jong <i>et al.</i> (2011) | | * | Não | Não |
| Ji <i>et al.</i> (2014) | | * | Não | Não |
| Bacic Junior (2016) | | * | Não | Não |
| Eller <i>et al.</i> (2016) | | * | Não | Não |
| Huin <i>et al.</i> (2016) | * | | Não | Não |
| Ighodaro, Biro e Zhou (2016) | * | * | Não | Não |
| Liang <i>et al.</i> (2016) | * | | Não | Não |
| Luo <i>et al.</i> (2016) | * | | Não | Não |

Fonte: A autora.

3.3. Influência dos parâmetros principais e características da soldagem a ponto do aço 22MnB5

Choi *et al.* (2011) mostram que o tamanho da lentilha e a resistência ao cisalhamento crescem com o aumento na corrente de soldagem, desde que não haja expulsão de material. A expulsão de material, resultante da excessiva geração de calor, levou a uma diminuição no volume da lentilha e também da carga de ruptura, portanto, acredita-se que o aumento na resistência ao cisalhamento, obtido com o aumento na corrente, é resultante do aumento do tamanho da lentilha.

Jong *et al.* (2011) afirmam que a corrente e o tempo de soldagem são os fatores mais importantes na geração de calor durante a soldagem a ponto por resistência elétrica; a largura da lentilha varia com a quantidade de calor produzida e a resistência ao cisalhamento é proporcional a esse tamanho da lentilha, ou seja, uma maior resistência pode ser obtida pelo aumento do tamanho da solda. Entretanto, sob elevados valores de corrente, apesar de ser observado aumento no tamanho da solda, a resistência ao cisalhamento diminuiu, o que se deve à expulsão de material.

Huin *et al.* (2016) concluíram que existe uma forte dependência da carga de ruptura em relação ao diâmetro do ponto e à espessura das chapas, sugerindo que o tamanho da solda e a penetração são dois dos principais fatores para se avaliar a resistência ao cisalhamento. A carga

de ruptura aumentou com o aumento do tamanho da solda, independentemente do modo de falha, desde que não houvesse defeitos causados pela expulsão de material.

Liang *et al.* (2016) mostram que o aumento da corrente de soldagem, que aumenta a geração de calor, leva ao aumento do diâmetro da solda. Porém a carga de ruptura não aumenta sempre que o diâmetro da solda aumenta, há um limite de corrente de soldagem após o qual o diâmetro continua a crescer, mas a carga de ruptura começa a cair; isso se deve à expulsão, o que causa indentação excessiva, reduzindo muito a espessura da junta e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento da mesma.

Bacic Junior (2016) corrobora os estudos anteriormente apresentados no ponto em que conclui que o diâmetro do ponto cresce com a intensidade de corrente e que, quando não há expulsão, a resistência ao cisalhamento e o tamanho da solda são diretamente proporcionais à corrente. O autor também concluiu que a resistência ao cisalhamento e o diâmetro do ponto normalmente diminuíram com o aumento do tempo de soldagem, pois o aumento da intensidade de corrente em conjunto com o aumento do tempo provocou expulsão, gerando perda de material da zona fundida. Desta forma, a combinação de tempos menores de soldagem com maiores níveis de correntes se mostraram melhores quanto ao tamanho da solda e aos resultados dos ensaios de cisalhamento por tração.

Luo *et al.* (2016) mostram que a taxa de penetração caiu com o aumento do tempo de soldagem e da força exercida pelos eletrodos, ou seja, o tempo de soldagem e a força dos eletrodos exercem influência negativa na taxa de fusão. Quando a força dos eletrodos aumenta, o calor perdido pelos mesmos também aumenta, o que leva a uma diminuição do calor disponível para fundir o material e, assim, a taxa de penetração diminui; esse fato explica porque a maior taxa de penetração foi obtida com a menor força dos eletrodos. Enquanto isso, o calor produzido aumenta com o tempo de soldagem; porém, o calor perdido também aumenta com o prolongamento desse tempo. Além disso, os autores explicam que a penetração aumentou até uma certa intensidade de corrente depois da qual observou-se queda na taxa de penetração devido ao crescimento acelerado da lentilha, que se dá quando a corrente é muito alta.

Ighodaro, Biro e Zhou (2016) concluíram que o tipo de revestimento (AlSi e *Galvannealed*) não é um fator significativo para prever a carga de ruptura da junta soldada. Os resultados também mostraram que a carga de ruptura de uma junta soldada a ponto por resistência, para um dado material, pode ser prevista pelo tamanho da zona fundida independentemente do tipo de revestimento, desde que a zona fundida seja livre de outras fases influenciadas pelo revestimento. Vale ressaltar que a microestrutura da zona fundida dos dois materiais estudados, nas condições sem e com estampagem a quente, é idêntica, totalmente

martensítica e sem quaisquer elementos provenientes do revestimento ou outras fases. Desta maneira, concluiu-se que o revestimento não influenciou a carga de ruptura da junta quando a soldagem foi feita com materiais homogêneos, pois a resistência da junta depende apenas do tamanho da Zona Fundida (ZF) e as ZFs de ambos os materiais desenvolveram tamanho e microestrutura similares.

As faixas de trabalho das pesquisas anteriores com relação aos parâmetros principais de soldagem foram comparadas com a finalidade de se ter uma ideia do espaço experimental analisado na soldagem a ponto do aço 22MnB5. Esta análise foi de grande relevância para a definição dos níveis de trabalho das variáveis de entrada consideradas pelo presente estudo. As Tabelas 3.1 e 3.2 mostram a faixa de trabalho das pesquisas anteriores com relação à corrente e tempo de soldagem, respectivamente. Alguns autores não constam nessa comparação, pois não apresentaram os parâmetros utilizados. Além disso, não foi feita uma comparação para os valores de pressão dos eletrodos visto que a maioria das pesquisas anteriores utilizou a variável de entrada força dos eletrodos enquanto que o presente estudo utilizou a variável de entrada pressão dos eletrodos.

Tabela 3.1 – Faixas de corrente utilizadas pelas pesquisas anteriores que abordam a soldagem a ponto por resistência elétrica de um aço boro estampado a quente.

| Referência | Corrente de soldagem (kA) | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|---|---|---|---|---|---|----|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Choi <i>et al.</i> (2011) | | | | | | | ■ | |
| Jong <i>et al.</i> (2011) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Ji <i>et al.</i> (2014) | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Bacic Junior (2016) | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Ighodaro, Biro e Zhou (2016) | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Liang <i>et al.</i> (2016) | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Luo <i>et al.</i> (2016) | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

Fonte: A autora.

Tabela 3.2 – Faixas de tempo utilizadas pelas pesquisas anteriores que abordam a soldagem a ponto por resistência elétrica de um aço boro estampado a quente.

| Referência | Tempo de soldagem (ciclos) | | | | | | | | | |
|----------------------------|----------------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |
| Choi <i>et al.</i> (2011) | | | | | | | | ■ | | |
| Jong <i>et al.</i> (2011) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Ji <i>et al.</i> (2014) | | | | | | | ■ | | | |
| Bacic Junior (2016) | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |
| Liang <i>et al.</i> (2016) | | | | ■ | | | | | | |

Fonte: A autora.

3.4. Microestrutura do aço 22MnB5 após a soldagem a ponto

Jong *et al.* (2011) e Liang *et al.* (2016) analisaram a junta de solda e dividiram-na em três partes: metal de base, Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Zona Fundida (ZF). Para o aço 22MnB5 totalmente endurecido, o metal de base é composto inteiramente de martensita. A ZTA foi dividida em ZTA 1, ZTA 2 e ZTA 3. Os autores encontraram que a ZTA 1, região mais próxima ao metal de base, é composta por martensita revenida e ferrita; devido ao pico de temperatura alcançado nessa região ser inferior à temperatura de austenitização, a martensita pré-existente passa por um processo de revenimento. Na ZTA 2, região intermediária da ZTA, foi encontrada uma fase dupla de ferrita e martensita; a temperatura atingida nessa área causa uma transformação austenítica incompleta de parte do metal de base e a formação de ferrita no metal de base restante. A austenita é transformada novamente em martensita devido à alta taxa de resfriamento. Os autores também observaram que a ZTA 3, região mais próxima à zona fundida, é formada por martensita bastante fina; a martensita pré-existente passa por uma transformação austenítica completa e os grãos de austenita têm um tempo muito curto para crescerem, ou seja, martensita refinada é formada a partir da austenita devido à rápida taxa de resfriamento durante a soldagem a ponto.

Liang *et al.* (2016) também observaram que, na zona fundida, a temperatura fica acima da linha *liquidus* (só existe líquido no sistema) durante a soldagem. Deste modo, nesta área, o aço 22MnB5 apresenta estrutura totalmente martensítica, o que, segundo Jong *et al.* (2011) e Bacic Junior (2016), é devido à rápida velocidade de resfriamento a que a região é submetida e também aos elementos de liga.

3.5. Microdureza do aço 22MnB5 após a soldagem a ponto

Liang *et al.* (2016) observaram que o aço 22MnB5 apresentou tanto para o metal de base quanto para a zona fundida (ZF) elevados valores de dureza devido à presença de martensita. A dureza no metal de base foi ligeiramente maior comparando-se com a zona fundida devido ao tamanho de grão de martensita ser menor na ZF do que no metal de base.

Ainda de acordo com Liang *et al.* (2016), a ZTA apresentou, na região composta por martensita revenida e ferrita, dureza significativamente menor do que a ZF e o metal de base. Ighodaro, Biro e Zhou (2016) também concluíram que a zona da ZTA mais próxima ao metal de base apresentou os menores valores de dureza devido ao revenimento da martensita durante a soldagem.

Além disso, Choi *et al.* (2011) e Bacic Junior (2016) observaram a presença de ferrita e bainita na região da ZTA próxima ao metal de base; essas estruturas levam à diminuição na dureza e são devidas à transformação de fase causada pelas diferentes taxas de resfriamento durante a soldagem.

Jong *et al.* (2011) explicam que a região intermediária da ZTA, composta por ferrita e martensita, apresenta dureza um pouco menor do que o metal de base e a Zona Fundida, pois estes são compostos inteiramente por martensita.

Liang *et al.* (2016) concluíram que, próximo à ZF, a ZTA apresentou dureza superior à da ZF, o que contrasta com a informação apresentada por Jong *et al.* (2011), que encontraram durezas similares para a ZF e a região da ZTA mais próxima à ZF. Huin *et al.* (2016) explicam essa contradição afirmando que, segundo Pouranvari e Marashi (2010), a soldagem a ponto de aços dissimilares origina o fenômeno de homogeneização na lentilha de solda e, algumas vezes, também pode acontecer um deslocamento da posição da lentilha em direção a uma chapa ou a outra. Os autores também destacam que a composição química da lentilha depende das espessuras das chapas a serem soldadas. Desta forma, na soldagem de aços dissimilares, a ZF apresenta dureza intermediária entre a zona temperada (ZTA próxima ao metal de base) e a ZTA próxima à ZF, devido à homogeneização química.

Eller *et al.* (2016) concluíram que a severidade da queda de dureza na ZTA depende da dureza do material de base; quanto menos duro o material de base for, menor será o efeito de deterioração nas propriedades mecânicas; nos metais de base com dureza abaixo de 250 Hv, aproximadamente, não houve um aumento na probabilidade de a fratura ocorrer em função do amolecimento da ZTA.

Além disso, Eller *et al.* (2016) mostram, quanto às análises da concentração de deformações, que o campo de deformação para o material totalmente endurecido dificilmente apresentou alguma deformação no metal de base, praticamente todas as deformações foram localizadas na ZTA. Ao passo que a dureza do metal de base diminuía, a quantidade de deformações no mesmo aumentava. Para os metais de base mais duros, a fratura se iniciou na ZTA. Já para o metal de base menos endurecido, devido à relativa alta dureza do ponto de solda, as deformações não se localizaram na ZTA, mas sim no metal de base, relativamente distante do ponto de solda e não afetado pela solda; como resultado, praticamente nenhuma influência negativa da soldagem a ponto sobre a ductilidade global foi observada. O mesmo foi encontrado para o material sem estampagem a quente. Os autores concluíram que os materiais mais duros, quando submetidos a um esforço de carga, apresentaram deformações localizadas na zona com diminuição de dureza da ZTA, o que leva a um início precoce da fratura.

3.6. Modos de falha da junta soldada por soldagem a ponto empregando o aço 22MnB5

Choi, *et al.* (2011) observaram a ocorrência predominante de falha interfacial nas amostras soldadas, o que é considerado inaceitável para os aços convencionais; contudo, a capacidade de carga ainda se mostrou suficientemente alta, ou seja, uma boa resistência ao cisalhamento foi obtida, mesmo quando falhas interfaciais ocorreram. Os autores acreditam que esse tipo de falha é causado pela presença de entalhes afiados na fronteira da lentilha assim como pela alta dureza e microestrutura frágil da solda, sendo esta causada pelo elevado carbono equivalente. Huin *et al.* (2016) verificaram, principalmente, falha interfacial completa, para baixas correntes de soldagem, e falha por *pullout*, para correntes mais elevadas.

Ighodaro, Biro e Zhou (2016) concluíram que a falha por *pullout* se inicia no metal de base para os materiais sem estampagem a quente, resultando em rasgamento da chapa; já para os materiais estampados a quente, a falha se inicia na ZTA, devido à menor dureza da mesma em relação ao metal de base, resultando na combinação clara de botão e furo, sem rasgamento da chapa. Os autores também encontraram que a previsibilidade da resistência ao cisalhamento é independente do modo de falha, visto que tanto a falha interfacial quanto a falha por *pullout* situam-se na mesma linha de tendência. Huin *et al.* (2016) confirmam esse fato ao mostrarem que o aumento da carga de ruptura e do tamanho da solda são independentes do modo de falha.

3.7. Considerações finais

Observa-se que todas as pesquisas anteriores que abordam a soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5 datam de 2011 em diante, o que mostra que os estudos sobre esse tema ainda são muito recentes. Tendo em vista a pequena quantidade de trabalhos encontrada em relação a esse tema, somada ao fato de que os estudos ainda são muito recentes, e ao fato de que muitos deles tratam da soldagem de aços dissimilares e não da soldagem homogênea do aço 22MnB5, encontra-se uma lacuna de pesquisa que necessita ser preenchida, devido à importância da soldagem a ponto desse aço para a aplicação na indústria automotiva.

É importante notar que nenhum dos 9 trabalhos encontrados utilizou Planejamento e Análise de Experimentos e/ou métodos de otimização. Dada a relevância dessas técnicas para analisar os processos e encontrar os parâmetros de operação mais adequados, tem-se mais um ponto importante a ser estudado e que ainda não foi abordado pelas pesquisas anteriores relacionadas à soldagem a ponto do aço 22MnB5.

Notou-se que o tamanho da lentilha e a resistência ao cisalhamento são diretamente proporcionais e crescem com o aumento na corrente de soldagem, independentemente do modo de falha, desde que não haja defeitos causados pela expulsão de material. Sob elevados valores de corrente, apesar de o tamanho da solda ter aumentado, a resistência ao cisalhamento diminuiu, o que se deve à expulsão de material.

Foi observado também que a ZTA 1, região mais próxima ao metal de base, é composta por martensita revenida e ferrita, o que diminuiu significativamente sua dureza quando comparada à dureza da Zona Fundida e à dureza do metal de base, induzindo à propagação de trincas e início da fratura nessa área.

Por fim, concluiu-se que resistência ao cisalhamento é independente do modo de falha, visto que tanto a falha interfacial quanto a falha por *pullout* situam-se na mesma linha de tendência.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo, são apresentados, respectivamente, o problema e a metodologia de pesquisa, o procedimento experimental, os materiais e equipamentos utilizados, a preparação dos corpos de prova e os ensaios e análises realizados. A definição do procedimento experimental a ser seguido é importante para que o processo estudado seja tratado de forma sistemática, possibilitando a obtenção de informações objetivas e de relevância científica.

4.2. Objeto de estudo e problema de pesquisa

O presente trabalho tem como objeto de estudo o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço manganês-boro 22MnB5 temperado (a têmpera foi realizada para se atingir microestrutura idêntica à do material 22MnB5 quando submetido ao processo de estampagem a quente com têmpera na indústria automotiva). O problema de pesquisa constitui-se da busca pela combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permitam a maximização da resistência ao cisalhamento, da largura da lentilha de solda e da penetração, e, em contrapartida, a minimização da indentação e da Zona Termicamente Afetada.

Dessa maneira, a descrição anterior caracteriza o objeto de estudo como um problema complexo de otimização, visto que se deseja otimizar múltiplas respostas, além de que o processo de soldagem empregado apresenta muitas variáveis de entrada (Figura 4.1).

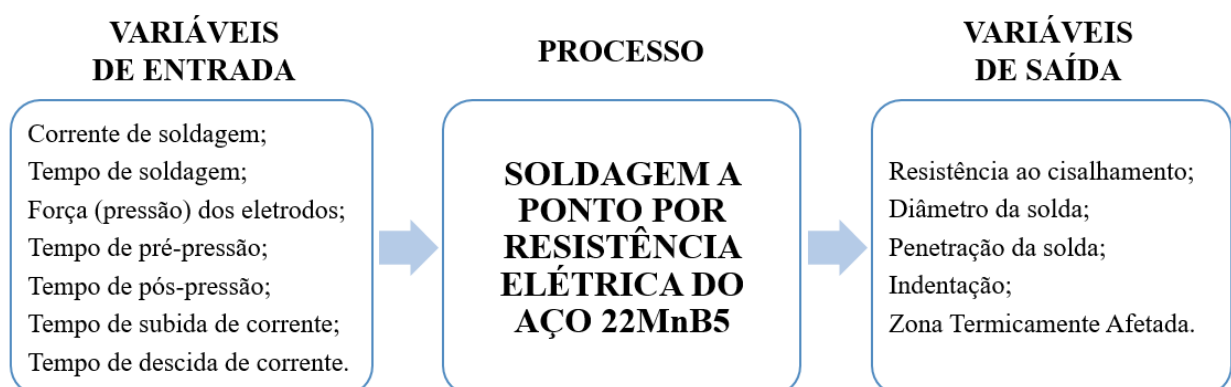


Figura 4.1 – Esquematização do objeto de estudo.
Fonte: A autora.

4.3. Método de pesquisa

Marconi e Lakatos (2008) explicam que o método científico pode ser considerado uma teoria de investigação que cumpre determinadas etapas. Tais etapas são descritas abaixo no Quadro 4.1 e relacionadas às etapas seguidas neste estudo.

Quadro 4.1 – Etapas do método de pesquisa.

| Etapas | Descrição | Aplicação no presente estudo |
|--------------------------------------|---|---|
| (1) Observação | Busca por compreensão de um dado fenômeno. | Busca por compreensão do objeto de estudo: processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5. |
| (2) Problema | Após uma observação para a qual não se encontra explicação imediata, é formulado um problema. | Problema de pesquisa complexo, que envolve muitos parâmetros de entrada e múltiplas respostas de interesse a serem otimizadas. |
| (3) Coleta de dados | A seguir, recolhem-se informações relacionadas ao problema. | Elaboração de um referencial teórico e análise das pesquisas mais recentes relacionadas ao tema. |
| (4) Hipótese | Com base nos dados coletados, formula-se uma explicação provisória para o problema. | Elaboração de hipóteses acerca do processo com base na etapa anterior. |
| (5) Experiência | São feitas investigações acerca do processo que podem envolver a realização de experimentos. | Utilização do DOE para sistematizar e realizar os experimentos, seguindo a MSR. |
| (6) Observação | Análise dos resultados obtidos com as experiências. | Utilização de técnicas e ferramentas estatísticas e de programação matemática para analisar e otimizar os resultados obtidos na etapa anterior. |
| (7) Confirmação das hipóteses | Os resultados levarão a uma conclusão que provará se a hipótese está ou não correta. | Aceitação ou não das hipóteses propostas anteriormente para o processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5. |

Fonte: Adaptado de Marconi e Lakatos (2008).

Segundo Gil (2008), os estudos científicos são classificados quanto à natureza, ao objetivo, à abordagem e ao método. O presente trabalho foi classificado como sendo de natureza aplicada, com objetivo explicativo e abordagem quantitativa e, além disso, utilizou, como método de pesquisa, a experimentação. Essa classificação pode ser observada na Figura 4.2 a seguir.

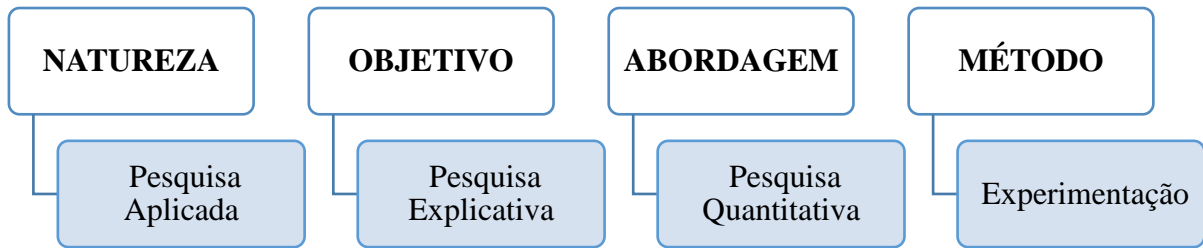


Figura 4.2 – Classificação do presente estudo.
Fonte: A autora.

Um estudo de natureza aplicada gera conhecimentos para aplicações práticas na solução de problemas específicos, enquanto que, quando de natureza básica, o trabalho gera novos conhecimentos, mas sem aplicação prática prevista.

Quanto ao objetivo, a pesquisa explicativa busca identificar os fatores que influenciam na ocorrência dos fenômenos. Além disso, visa aprofundar o conhecimento da realidade, pois relaciona os efeitos às suas causas e é feita, frequentemente, na forma de pesquisa experimental. Já a pesquisa exploratória proporciona familiaridade com o problema para torná-lo explícito e envolve levantamento bibliográfico ou entrevistas com pessoas que vivenciaram o problema estudado, enquanto que a pesquisa descritiva objetiva descrever as características de determinada população ou fenômeno, mas não busca suas causas e se utiliza de técnicas padronizadas de coleta de dados como questionário e observação.

A abordagem quantitativa investiga tudo o que é possível ser quantificado e requer o uso de recursos e técnicas estatísticas para analisar os dados coletados. Por outro lado, a abordagem qualitativa considera que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, que não pode ser traduzida em números; o pesquisador aprofunda-se em questões subjetivas do fenômeno.

Dadas as classificações acima, o método que melhor se adequa ao presente estudo sobre o processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5 é a experimentação, uma vez que, de acordo com Gil (2008), tal método permite verificar, de forma sistemática, a influência de variáveis independentes sobre as variáveis de saída. Além disso, a otimização do objeto de estudo baseia-se em funções objetivo as quais são obtidas a partir de dados coletados pela realização de experimentos.

Como apresentado no item 2.7, Montgomery (2013) define um experimento como um teste ou um conjunto de testes em que mudanças propositais são feitas nas variáveis de entrada

de um processo ou sistema a fim de se observar e identificar como as respostas são afetadas em função dessas mudanças provocadas nas variáveis de entrada.

Para os estudo e otimização do processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5, dentre as técnicas de experimentação existentes, o Planejamento e Análise de Experimentos (DOE) foi utilizado, visto que, segundo Montgomery (2013), é um processo de planejamento de experimentos de forma que dados apropriados possam ser coletados e, posteriormente, analisados através de métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas.

4.4. Etapas da pesquisa

O presente trabalho seguiu a estrutura de uma Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), apresentada no item 2.7.1.1, e, posteriormente, realizou-se a otimização por dois métodos diferentes, permitindo a comparação entre os resultados ótimos obtidos por tais métodos.

A MSR foi utilizada para o planejamento dos experimentos, a coleta dos dados, a modelagem matemática das respostas e a análise das influências dos parâmetros e de suas interações. A otimização foi empregada para obter a combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permitam a maximização dos resultados do processo.

As Figuras 4.3 (a) e 4.3 (b) a seguir apresentam as etapas dessa pesquisa.

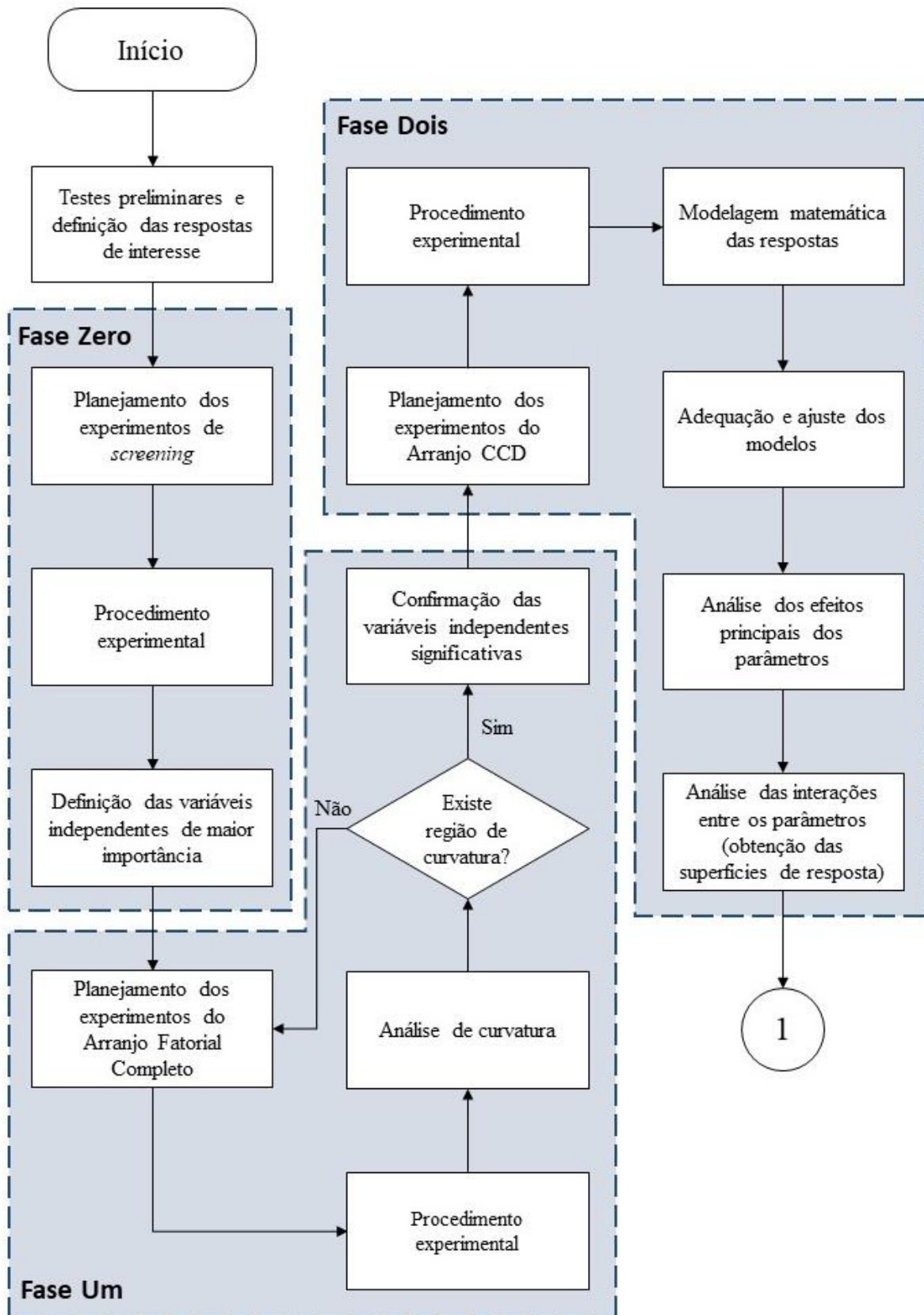


Figura 4.3 (a) – Etapas da pesquisa.
Fonte: A autora.

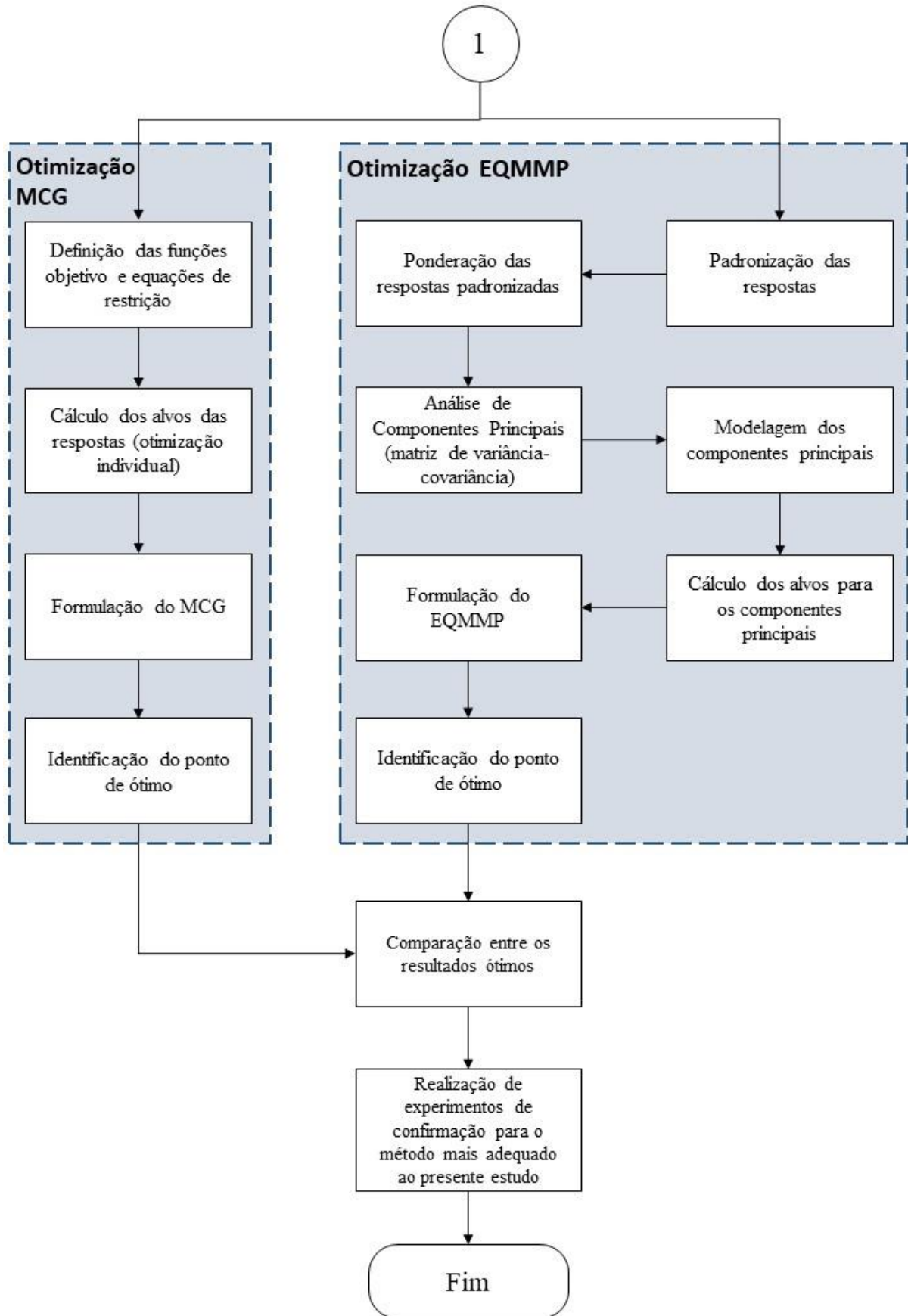


Figura 4.3 (b) – Etapas da pesquisa.
Fonte: A autora.

4.4.1. Testes preliminares e definição das respostas de interesse

Por ser um processo de soldagem ainda pouco explorado no que se refere ao aço 22MnB5, foi indispensável a realização de testes preliminares para conhecer o comportamento desse material quando submetido à soldagem a ponto por resistência elétrica. Deste modo, antes de iniciar a Metodologia de Superfície de Resposta, alguns testes foram realizados para se definir os envelopes operacionais, ou seja, os intervalos admissíveis para os parâmetros de soldagem.

Os parâmetros testados, assim como a faixa de valores utilizada para os mesmos e também as respostas de interesse, foram escolhidos com base nos conceitos apresentados no referencial teórico e na análise de pesquisas anteriores.

A partir dos resultados dos testes preliminares, definiram-se os envelopes operacionais que foram utilizados na etapa seguinte, a Fase Zero da Metodologia de Superfície de Resposta.

4.4.2. Fase Zero – Experimentos de *Screening* (Arranjo de Taguchi)

Os parâmetros utilizados nessa etapa e seus respectivos envelopes operacionais foram definidos na etapa anterior. Na Fase Zero, como explicado no item 2.7.1.1, objetivou-se conhecer melhor o processo. Experimentos de *Screening* (experimentos exploratórios) foram conduzidos a fim de se investigar quais são as variáveis que influenciam significativamente as respostas de interesse e eliminar aquelas que não são consideradas importantes.

Nessa etapa, foi empregado o Arranjo de Taguchi, visto que esse este tipo de arranjo permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada, utilizando um número extremamente reduzido de experimentos.

4.4.3. Fase Um – Análise de curvatura e adequação dos níveis de trabalho (Arranjo Fatorial Completo)

Depois que as variáveis independentes de maior importância foram identificadas na Fase Zero, prosseguiu-se para a Fase Um, em que, como mostrado no item 2.7.1.1, objetivou-se adequar os níveis de trabalho para que a região experimental estudada englobasse o ponto de ótimo.

Nessa fase, foi utilizado o Arranjo Fatorial Completo tanto para confirmar as variáveis independentes significativas quanto para, pela adição de pontos centrais, investigar a região de curvatura em que se encontra o ponto ótimo.

4.4.4. Fase Dois – Modelagem da Superfície de Resposta (Arranjo Composto Central – CCD)

Como apresentado no item 2.7.1.1, a Fase Dois desse estudo de superfície de resposta teve início após o processo estar configurado para ser executado na região de ótimo, o que foi feito na fase anterior. Objetivou-se, na Fase Dois, a obtenção de um modelo que fosse uma aproximação precisa do modelo real dentro de uma região relativamente pequena em torno do ponto de ótimo. Devido ao fato de que a superfície de resposta real apresenta curvatura próximo ao ponto de ótimo, um modelo de segunda ordem foi utilizado.

Para a modelagem da superfície de resposta, foi empregado um Arranjo Composto Central (CCD). Após a obtenção do modelo, procedeu-se a avaliação da adequação do mesmo ao sistema real através de uma Análise de Variância (ANOVA), que, além de avaliar se o modelo é estatisticamente significativo, permite verificar quais os termos deste modelo são significativos e quais podem ser removidos.

4.4.5. Otimização

Com o modelo de superfície de resposta ajustado na etapa anterior, foi possível prosseguir para a otimização do processo. Foram empregados dois métodos de otimização, o Método do Critério Global (MCG) e o Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP).

O MCG é um método de otimização proposto por Rao (2000) que considera as funções objetivo como funções independentes. Já o EQMMP, proposto por Gomes *et al.* (2013), apresenta uma proposta para a otimização de múltiplas respostas correlacionadas com graus de importância diferentes. Os resultados dos dois métodos foram comparados e, posteriormente, experimentos de confirmação foram conduzidos para os resultados do método que mais se adequou ao presente estudo.

4.5. Materiais e equipamentos

4.5.1. Material

O presente estudo utilizou chapas de 1 mm de espessura do aço manganês-boro 22MnB5. A composição química desse material é mostrada na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1 – Composição química do aço 22MnB5.

| C (%) | Si (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) | Al (%) | Cu (%) | Nb (%) | V (%) |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 0,24 | 0,23 | 1,24 | 0,021 | 0,002 | 0,047 | 0,01 | 0,003 | 0,003 |
| Ti (%) | Cr (%) | Ni (%) | Mo (%) | Sn (%) | N (%) | B (%) | Pb (%) | |
| 0,048 | 0,20 | 0,01 | 0,01 | 0,001 | 0,0052 | 0,0036 | 0,004 | |

Fonte: Adaptado de Usiminas (2014).

4.5.2. Eletrodos

Os eletrodos utilizados nessa pesquisa são fabricados em cobre, cromo e zircônio e, segundo a RWMA (1989), são classificados como sendo do grupo A, classe 2. Ambos os eletrodos são do tipo “cap” fêmea, com formato cone truncado a 15°, diâmetro do corpo de 15,8 mm (5/8”) e comprimento total de 70 mm. A Figura 4.4 apresenta um exemplar desses eletrodos.

De acordo com a definição da ASM (1993) apresentada no item 2.4.5.1, o diâmetro da ponta do eletrodo, para a soldagem de chapas com até 3 milímetros de espessura, é determinado por $D = 5\sqrt{t}$ (em que D é o diâmetro da ponta do eletrodo e t é a espessura da chapa em mm). Desta forma, o diâmetro da ponta dos eletrodos empregados no presente estudo é de 5 mm.



Figura 4.4 – Eletrodo de cobre, modelo TW 5/8, reto com ponta.

Fonte: Bacic (2016).

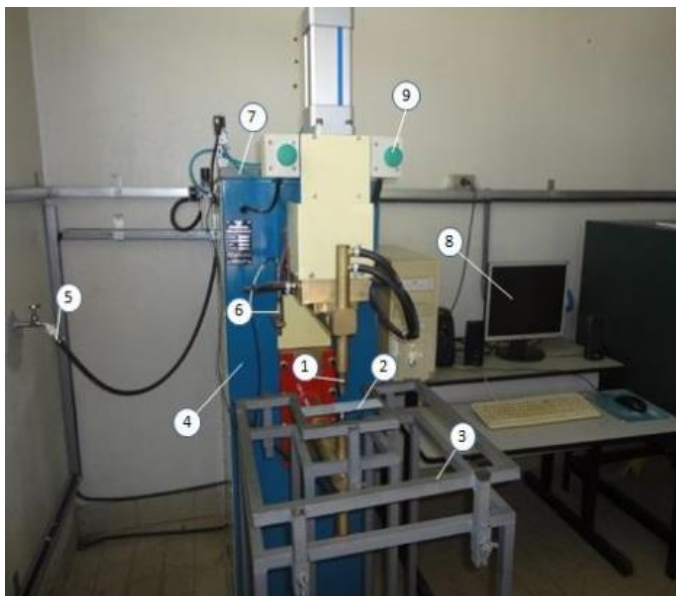
4.5.3. Equipamento de soldagem

O equipamento de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizado nesse trabalho foi uma máquina estacionária da marca Presol Transweld®, modelo TWPRV50, com potência nominal de 50 kVA, CA, alimentação de 220 V, corrente máxima de 6 kA e possui uma capacidade de ajuste de 15 parâmetros, os quais são detalhados no Quadro 4.2; A Figura 4.5 mostra alguns detalhes do equipamento, que está instalado no Laboratório de Soldagem – LSO da Universidade Federal de Itajubá.

Quadro 4.2 – Parâmetros de regulagem do equipamento de soldagem a ponto.

| | | |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Pré-pressão 1 | Corrente de solda | Pós-pressão |
| Pré-pressão 2 | Intervalo | Impulsos |
| Ciclo de pré-aquecimento | Resfriamento | Subida de corrente |
| Corrente de pré-aquecimento | Ciclo de revenimento | Descida de corrente |
| Solda ciclo | Corrente de revenimento | Pressão de ar comprimido da rede |

Fonte: A autora.



1. Eletrodo
2. Corpo de prova
3. Dispositivo para fixar o corpo de prova
4. Estacionária Presol TWPRV50 6kA
5. Água de refrigeração
6. Sensor LVDT Metrolog
7. Condicionador digital Metrolog SD 20
8. Interface
9. Comando de acionamento bimanual

Figura 4.5 – Equipamento de soldagem a ponto da marca Presol Transweld®, modelo TWPRV50.

Fonte: A autora.

4.6. Preparação dos corpos de prova

4.6.1. Tratamento de têmpera

As chapas de aço 22MnB5, sem tratamento térmico, possuem microestrutura ferrítica/perlítica com limite de resistência à tração de, aproximadamente, 600 MPa. No estado totalmente endurecido, a microestrutura é martensítica e o limite de resistência à tração aumenta para cerca de 1500 MPa (ELLER *et al.*, 2016).

Para atingir o estado totalmente endurecido, o material foi submetido ao tratamento térmico de têmpera antes da aplicação do processo de soldagem. Este procedimento faz-se necessário para simular aplicações industriais no setor automotivo, visto que esse material passa por estampagem a quente antes de ser soldado, o que proporciona ao aço uma melhor combinação de resistência, alongamento e dureza.

Para tanto, as chapas de 22MnB5 foram aquecidas em um forno até 950 °C a fim de atingir uma completa austenitização, permanecendo a essa temperatura por cinco minutos e, posteriormente, foram resfriadas em água a temperatura ambiente. O resfriamento rápido faz com que a austenita se transformasse totalmente em martensita. Os parâmetros de temperatura e tempo para a têmpera foram baseados em pesquisas como as dos autores Karbasian e Tekkaya (2010), Eller *et al.* (2016) e WorldAutoSteel (2017).

4.6.2. Limpeza das chapas

Antes de realizar a soldagem, é necessário que se faça a correta limpeza das chapas. As superfícies inferior e superior de cada chapa foram lixadas na região a ser soldada a fim de remover toda a carepa e as incrustações de óxidos. As carepas são formadas no processo de austenitização no ambiente do forno e os produtos estampados a quente necessariamente têm que passar por uma limpeza de sua superfície para total remoção dos óxidos.

4.6.3. Confecção e montagem dos corpos de prova

Os corpos de prova para ensaio de cisalhamento por tração nas soldas a ponto foram produzidos com as dimensões especificadas na norma BS EN ISO 14273:2001 (2001), conforme mostrado na Figura 4.6 e na Tabela 4.2.

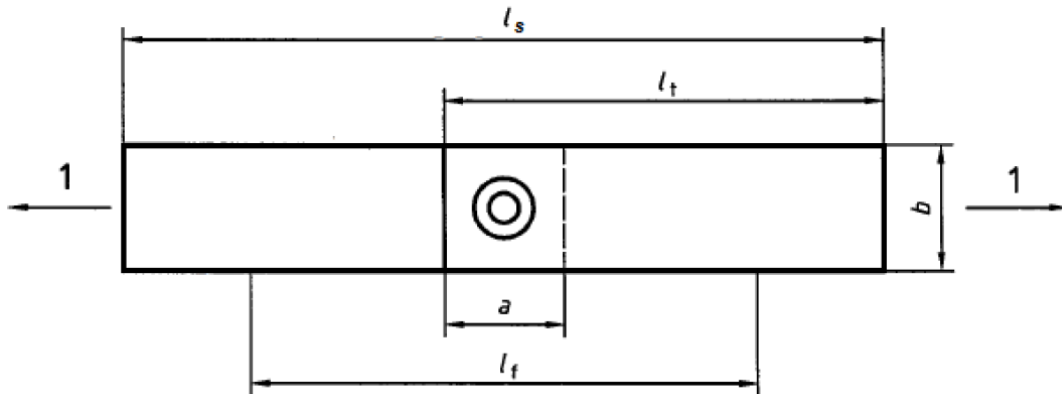


Figura 4.6 – Amostra padrão para ensaio de cisalhamento por tração em solda a ponto.
Fonte: BS EN ISO 14273:2001 (2001).

Tabela 4.2 – Dimensões dos corpos de prova.

| Espessura (mm) | Sobreposição (mm) | Largura (mm) | Comprimento (mm) | Comprimento livre entre os grampos (mm) | Comprimento individual (mm) |
|-----------------------|-------------------|--------------|------------------|---|-----------------------------|
| t | a | b | l_s | l_f | l_t |
| $0,5 \leq t \leq 1,5$ | 35 | 45 | 175 | 95 | 105 |

Fonte: Adaptado de BS EN ISO 14273:2001 (2001).

4.7. Ensaios e análises

4.7.1. Inspeção visual

A inspeção visual foi realizada com o objetivo de observar a ocorrência de expulsão de material durante a formação do ponto de solda e, posteriormente ao ensaio de cisalhamento por tração, identificar o modo de falha da fratura ocorrida nas amostras, de acordo com a classificação apresentada no item 2.5.1.2 (falha interfacial ou falha por *pullout*).

Além disso, a inspeção visual foi empregada, principalmente, na definição dos envelopes operacionais pela observação da indentação, da expulsão e da geometria dos pontos de solda. Os critérios de avaliação foram observar se a superfície do ponto de solda estava uniforme e relativamente plana, se apresentava indentação muito profunda ou extremamente rasa, e se estava livre de trincas e outros fatores que indicassem a fragilização do ponto.

4.7.2. Medição da indentação por deslocamento do eletrodo

Para as medições de indentação na Fase Zero (Arranjo de Taguchi), acoplado ao equipamento de soldagem, foi utilizado um transdutor diferencial de deslocamento linear (LVDT), modelo GA-HD LBB315PA-100-M, fabricante Metrolog®, com suporte do eixo por rolamento linear de precisão, avanço do êmbolo por mola e apalpador de carbono-tungstênio com repetibilidade de 0,0001mm e campo de medição de +/- 2,5 mm.

O sensor do sistema de medição foi adaptado ao cabeçote móvel da máquina de solda; este, por sua vez, está conectado ao cilindro pneumático, que efetua o movimento do eletrodo superior. O ajuste da referência do sensor se dá por um parafuso sextavado de cabeça chata que está fixado em uma base parafusada na parte fixa da carcaça da máquina de soldagem, como é mostrado na Figura 4.7. O deslocamento linear do transdutor é medido por meio de uma interface composta por um sistema de aquisição de dados, que contém um condicionador digital Metrolog®, modelo SD20, com saída USB para aplicação com sensores LVDT e conversor A/D 24-bits.



Figura 4.7 – Acoplamento do sensor do sistema de medição ao cabeçote móvel da máquina de soldagem.
Fonte: A autora.

Dessa forma, o sistema aquisita os dados de deslocamento do eletrodo durante a realização do ponto de solda e a indentação é determinada pela diferença entre o ponto mais profundo e o primeiro vale do gráfico formado com os dados de deslocamento. Foram gerados gráficos para cada um dos 54 experimentos do Arranjo de Taguchi (Matriz experimental L18 com 3 réplicas) com o auxílio do *software* Microsoft Excel®. Os gráficos para as três réplicas do ponto T18 são apresentados como exemplo na Figura 4.8 a seguir.

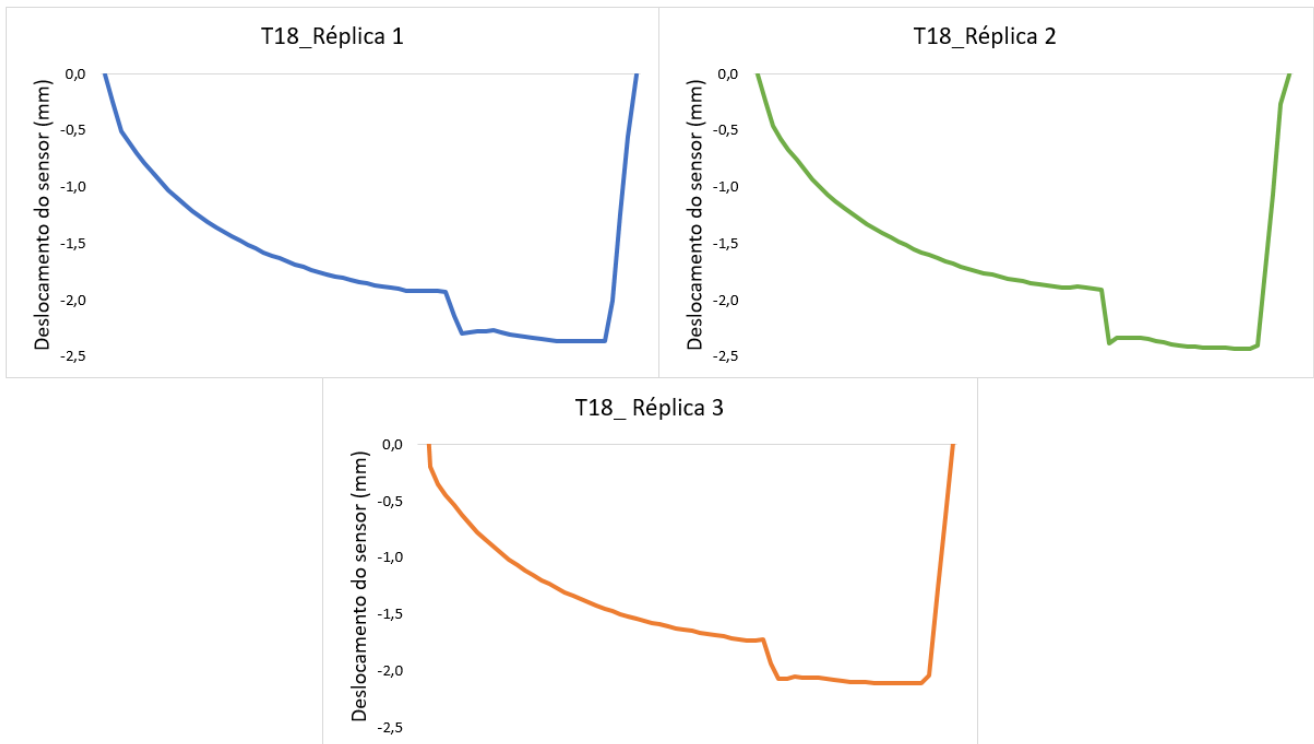


Figura 4.8 – Gráficos de deslocamento do sensor para determinação da indentação.
Fonte: A autora.

4.7.3. Medição da Zona Termicamente Afetada visível

Na Fase Zero (Arranjo de Taguchi), a Zona Termicamente Afetada (ZTA) foi medida pela área da ZTA visível, formada na superfície da amostra após o processo de soldagem. Os valores da ZTA visível são determinados pela média entre a medida da ZTA visível da superfície superior e da superfície inferior. Para tanto, foi utilizado o estereoscópio Olympus, modelo SZ61, com uma câmera digital (Infinity 1) acoplada para aquisição de imagem e transferência desta para o computador. As dimensões geométricas da ZTA visível foram determinadas pela análise das imagens digitalizadas, utilizando o *software* Analysis Five. A imagem digitalizada da superfície superior do ponto T3, réplica 1 (Arranjo de Taguchi), é mostrada como exemplo na Figura 4.9.

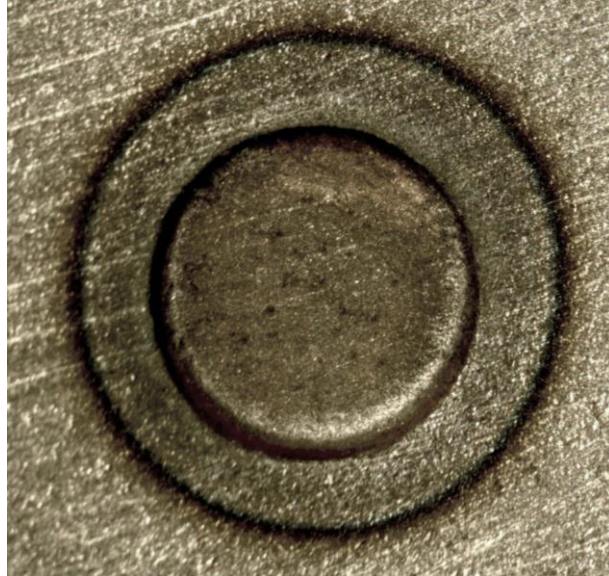


Figura 4.9 – Imagem digitalizada da ZTA visível.
Fonte: A autora.

4.7.4. Ensaio de cisalhamento por tração

A resistência mecânica das soldas, em todas as etapas da Metodologia de Superfície de Resposta, foi avaliada segundo a norma AWS D8.9M:2012 (2012) por meio da realização de testes de cisalhamento por tração, utilizando a máquina de tração INSTRON 8801. O ensaio foi realizado com a aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente no corpo de prova até a ruptura, medindo com isso, a variação do comprimento em função da carga.

O corpo de prova foi colocado em um equipamento universal de ensaios que, por meio de um movimento de tração, solicita o ponto de solda a esforços de cisalhamento. Após os ensaios, obteve-se a carga de ruptura da solda juntamente com o gráfico de tensão por deformação. A velocidade de ensaio foi de 5 mm/min.

4.7.5. Medição do diâmetro do ponto de solda em fratura

Na Fase Zero (Arranjo de Taguchi), para a avaliação do tamanho da solda, foi utilizado o diâmetro do ponto em fratura após o ensaio de cisalhamento por tração, visto que, segundo Zhang e Senkara (2006), este é o meio mais comum de se mensurar o tamanho da solda na indústria, devido à utilização de instrumentos simples e de baixo custo.

As medições de diâmetro do ponto foram feitas com base nas normas ISO 14273:2001 (2001) e AWS D8.9M:2012 (2012), como apresentado no item 2.5.1.1. Para cada ponto de solda após a fratura, o diâmetro foi a média aritmética resultante de duas medidas de diâmetro feitas

com 90° de defasagem de uma medida em relação à outra e sempre tentando considerar o diâmetro máximo e o diâmetro mínimo. Para tais medições, foi utilizado um paquímetro Mitutoyo de resolução 0,02.

4.7.6. Análise metalográfica

A análise metalográfica foi realizada nas Fases Um (Arranjo Fatorial) e Dois (Arranjo Composto Central) com o objetivo de se obter medições mais precisas do tamanho do ponto de solda, da indentação e da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e também medições da penetração da solda e da separação entre as chapas.

Os valores de ZTA são dados pela média entre a largura da ZTA esquerda e a largura da ZTA direita; o mesmo é feito para a separação entre as chapas. Os valores de indentação são dados pela média entre a profundidade da indentação na superfície superior e a profundidade da indentação na superfície inferior.

O procedimento de preparação das amostras foi realizado segundo a norma ASTM E3:2011 (2011). Foram utilizados corpos de prova que não passaram pelo ensaio de cisalhamento por tração; essas amostras foram cortadas perpendicularmente às superfícies das chapas na região central do ponto de solda. Os cortes foram refrigerados a água para evitar possíveis alterações na microestrutura do material causadas pelo aquecimento.

Na sequência, as amostras foram embutidas a quente em uma matriz de baquelite entre 150 °C e 180 °C. Posteriormente, todas elas foram lixadas com lixas subsequentes de granulometria 400, 600 e 800 micras, refrigeradas a água. Por fim, as amostras foram polidas com alumina de 1 µm, lavadas em álcool etílico e secas com o auxílio de um secador.

O ataque químico foi realizado com um reativo de iodo, composto por 10 g de iodeto sublimado, 20 g de iodeto de potássio e 100 ml de água destilada. O tempo de ataque foi de 30 segundos a 3 minutos e o objetivo do ataque foi revelar macroestruturas, como ZTA, lentilha de solda e porosidades.

O equipamento utilizado para a análise metalográfica foi o estereoscópio Olympus, modelo SZ61, com uma câmera digital (Infinity 1) acoplada para aquisição de imagem e transferência desta para o computador. A análise das imagens digitalizadas foi feita com o *software* Analysis Five. As Figuras 4.10 (a) e 4.10 (b) a seguir apresentam a imagem digitalizada do ponto CCD6 (Arranjo Composto Central) para exemplificar a análise metalográfica feita neste trabalho. Todas as imagens geradas para os experimentos do Arranjo Composto Central são apresentadas no Anexo A.

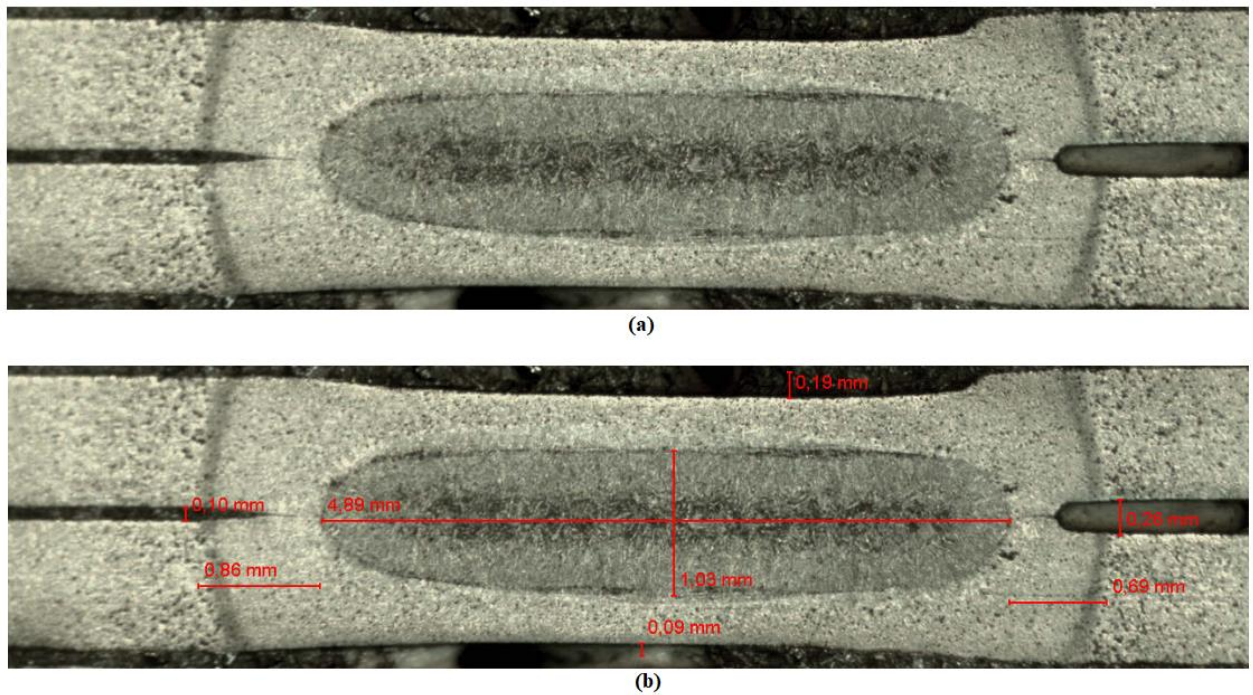


Figura 4.10 (a) – Imagem digitalizada para análise metalográfica.
 Figura 4.10 (b) – Imagem digitalizada para análise metalográfica com as cotas das medições das respostas.
 Fonte: A autora.

4.8. Considerações finais

O objeto de estudo foi definido como um problema de otimização complexo, pois envolve vários parâmetros de entrada e de saída. O método de pesquisa escolhido foi a experimentação dada a necessidade de se realizar experimentos para entender como as variáveis de entrada influenciam as respostas de interesse. Dentre as técnicas de experimentação existentes, o Planejamento e Análise de Experimentos (DOE) foi utilizado, visto que permite a análise dos efeitos das variáveis independentes e das interações entre elas, além de possibilitar a coleta adequada de dados, resultando em conclusões válidas e objetivas.

As etapas da pesquisa seguiram a estrutura de uma Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e subsequente otimização, realizada por dois métodos diferentes para posterior comparação entre eles, o Método do Critério Global e o Método do Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Considerações iniciais

Neste capítulo, os procedimentos experimentais para a coleta de dados e as técnicas empregadas para a análise dos resultados são apresentados em conjunto e sequencialmente, visando manter a ordem das etapas definidas para a condução da pesquisa.

As análises foram realizadas com o auxílio do *software* estatístico MINITAB® e do *software* Microsoft Excel®.

5.2. Testes preliminares e definição das respostas de interesse

5.2.1. Testes preliminares

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica possui vários parâmetros de ajuste; deste modo, aqueles de maior influência na formação do ponto de solda foram selecionados para serem testados em diferentes níveis de trabalho, enquanto que os demais foram tratados como parâmetros fixos.

Foi mostrado na revisão de literatura (WAINER, BRANDI & MELLO, 1992; MACHADO, 1996; MARQUES, MODENESI & BRACARENSE, 2011) que, de acordo com a Lei de Joule ($Q = I^2 \cdot R \cdot t$), os parâmetros principais da soldagem a ponto por resistência elétrica são corrente de soldagem, tempo de soldagem e força (pressão) dos eletrodos. Os resultados das pesquisas anteriores também apresentam estes como os parâmetros principais do processo (CHOI *et al.*, 2011; JONG *et al.*, 2011; BACIC JUNIOR, 2016; LIANG *et al.*, 2016; LUO *et al.*, 2016).

A força dos eletrodos no equipamento utilizado no presente estudo é controlada pela regulagem de pressão no manômetro da máquina. Os valores de pressão selecionados foram baseados no trabalho de BACIC JUNIOR (2016), que utilizou o mesmo equipamento de solda. O autor sugere que as pressões de 3 e 4 bar não são eficientes em manter o contato entre as chapas a serem soldadas e que a pressão de 5 bar foi satisfatória para manter esse contato entre as chapas. Foram selecionadas, para os testes iniciais, as pressões de 4 e 5 bar. Não foram empregadas pressões mais elevadas, porque, como explicado no item 2.4.2.2, estas exigem correntes mais altas para produzir a solda, e o equipamento de soldagem utilizado apresenta corrente máxima de 6 kA, sendo que, durante o desenvolvimento desta pesquisa, foram testadas correntes de até 5,7 kA, o que equivale a quase total capacidade da máquina (95%).

A análise de pesquisas anteriores mostrou que a faixa de corrente de soldagem empregada nos trabalhos abordados vai de 3 kA a 10 kA. A máquina utilizada neste trabalho tem corrente de soldagem máxima de 6 kA. Já para o tempo de soldagem, as pesquisas anteriores utilizaram uma faixa de 6 ciclos a 24 ciclos.

Os testes iniciais foram conduzidos variando-se a corrente de 3,6 kA a 5,4 kA (60% a 90% da corrente máxima do equipamento). O tempo de soldagem, para efeito de simplificação nesta primeira etapa, foi mantido fixo em 8 ciclos para os experimentos de 1 a 8 (P1 a P8), valor sugerido como ótimo por Bacic Junior (2016). Para os experimentos 9 e 10 (P9 e P10), variou-se o tempo para 12 e 16 ciclos, respectivamente.

A utilização de pré-aquecimento, fase anterior à soldagem propriamente dita, segundo Bacic Junior (2016), não se mostrou vantajosa, visto que ocasionou expulsão de material durante o processo. Além disso, o pré-aquecimento aumenta o tempo de produção das soldas e é mais indicado para materiais com revestimento, o que não é o caso das chapas de aço de 22MnB5 empregadas no presente estudo. Desta forma, esse parâmetro não foi considerado.

De acordo com Bacic Junior (2016), o tempo de subida de corrente foi eficiente para amenizar o efeito de expulsão de material por meio da imposição de uma rampa de subida gradativa da corrente, evitando o aquecimento brusco do ponto de solda. O autor sugere um valor ótimo de 20 ciclos de tempo de subida de corrente para o material em estudo; tal valor foi adotado nos testes iniciais.

Bacic Junior (2016) também avaliou a influência do tempo de descida de corrente e concluiu que não houve nenhuma vantagem significativa em relação a não utilização desse tempo de subida para o aço 22MnB5, portanto, esse parâmetro não foi considerado no presente trabalho.

Os outros parâmetros (secundários) foram mantidos fixos nesta primeira etapa e os valores foram baseados no trabalho de Bacic Junior (2016), conforme apresentado no Quadro 5.1 a seguir.

Quadro 5.1 – Nível dos parâmetros secundários.

| Parâmetro | Nível |
|-----------------------------|--------------|
| Tempo de pré-pressão 1 | 50 ciclos |
| Tempo de pré-pressão 2 | 50 ciclos |
| Tempo de subida de corrente | 20 ciclos |
| Tempo de pós-pressão | 60 ciclos |
| Impulso | 1 |
| Intervalo/Resfriamento | 0 |

Fonte: A autora.

Os valores testados inicialmente para pressão, tempo e corrente, juntamente com observações visuais acerca do respectivo ponto de solda, são apresentados na Tabela 5.1 a seguir.

Tabela 5.1 – Testes iniciais para definição dos envelopes operacionais.

| Experimento | Tempo (ciclos) | Pressão (bar) | Corrente (kA) | Observações |
|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---|
| P1 | 8 | 4 | 3,6 (60%) | União fraca entre as chapas |
| P2 | 8 | 4 | 4,2 (70%) | Indentação bastante rasa e ponto pequeno |
| P3 | 8 | 4 | 4,8 (80%) | Indentação de profundidade adequada |
| P4 | 8 | 4 | 5,4 (90%) | Bastante expulsão de material |
| P5 | 8 | 5 | 3,6 (60%) | União fraca entre as chapas |
| P6 | 8 | 5 | 4,2 (70%) | Indentação rasa e diâmetro maior do que do ponto P2 |
| P7 | 8 | 5 | 4,8 (80%) | Indentação de profundidade adequada, porém ZTA maior do que a do ponto P3 |
| P8 | 8 | 5 | 5,4 (90%) | Indentação mais profunda e pouca expulsão de material |
| P9 | 12 | 5 | 4,8 (80%) | Indentação e ZTA maiores do que as do ponto P7 |
| P10 | 16 | 5 | 4,8 (80%) | Bastante expulsão de material |

Fonte: A autora.

Os experimentos preliminares mostraram que as pressões de 4 e 5 bar conseguiram manter contato adequado entre as peças, sendo que, sob a pressão de 5 bar, o processo gerou pontos de solda de melhor tamanho para os parâmetros de tempo e corrente iguais. Por outro lado, o tamanho da ZTA e a profundidade da indentação também aumentaram com o aumento na pressão.

A corrente de 3,6 kA não se mostrou eficiente para produzir união adequada entre as chapas, enquanto que a corrente de 5,4 kA gerou expulsão de material nas duas configurações testadas.

O aumento do tempo de soldagem ocasionou aumento na indentação e também no tamanho da Zona Termicamente Afetada (ZTA) visível, além de que, com o tempo de 16 ciclos, houve expulsão de material já para a corrente de 4,8 kA, o que não aconteceu com o tempo de 8 ciclos.

Após a análise dos testes iniciais, foram definidos os envelopes de trabalho dos parâmetros principais (corrente, tempo e pressão) para a próxima etapa, como pode ser observado no Quadro 5.2 abaixo.

Quadro 5.2 – Envelopes operacionais para a próxima etapa.

| Parâmetro | Faixa de trabalho |
|------------------|-----------------------------|
| Pressão | 4 e 5 bar |
| Tempo | De 8 a 16 ciclos |
| Corrente | De 4,2 a 5,1 kA (70% a 85%) |

Fonte: A autora.

5.2.2. Definição das respostas de interesse

As respostas de interesse foram definidas com base na revisão de literatura e na análise das pesquisas anteriores sobre o aço 22MnB5. Foram selecionadas cinco respostas: resistência ao cisalhamento por tração, diâmetro/largura do ponto de solda, indentação, penetração e Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Zhang e Senkara (2006) afirmam que a qualidade das soldas a ponto é avaliada, principalmente, através de seu desempenho, que se refere às resistências estática e dinâmica da solda. A resistência mais comumente medida é a resistência ao cisalhamento por tração. Os autores também afirmam que, dentre as características geométricas, o tamanho da solda, medido

em termos de largura da lentilha ou o diâmetro do ponto, é o atributo mais significativo e mais utilizado para se determinar a resistência mecânica da solda.

Huin *et al.* (2016) sugerem que o tamanho da solda e a penetração são dois dos principais fatores para se avaliar a resistência ao cisalhamento.

Zhang e Senkara (2006) e Aslanlar (2006) mostram a importância de se avaliar a indentação, pois uma indentação excessiva não é aceitável tanto porque reduz a capacidade de carga da solda quanto porque afeta a qualidade do acabamento superficial da estrutura.

A análise da Zonta Termicamente Afetada (ZTA) mostra-se essencial, pois é uma região em que as transformações de fase, devido à geração de calor, afetam diretamente a estrutura e a resistência da solda.

Deste modo, objetiva-se, neste trabalho, maximizar a resistência ao cisalhamento, o tamanho da solda e a penetração, ao mesmo tempo em que se deseja minimizar a indentação e a ZTA.

5.3. Fase Zero – Experimentos de *Screening* (Arranjo de Taguchi)

Definidos os níveis de trabalho dos parâmetros principais, prosseguiu-se para a realização dos experimentos exploratórios, utilizando um Arranjo de Taguchi para definir a matriz experimental. Nesta etapa, medições mais simples foram realizadas para as respostas de interesse, pois o objetivo era apenas de se conhecer os parâmetros do processo que fossem realmente significativos para as repostas. A resposta penetração da solda não foi medida nessa fase, pois não foi realizada a análise metalográfica.

Foi empregado um Arranjo de Taguchi L18, *Mixed Level Design*, para sete parâmetros, e foram feitas três réplicas. Os níveis dos parâmetros são dados na Tabela 5.2 e a matriz experimental, com as respectivas respostas, é apresentada nas Tabelas 5.3 (a) e 5.3 (b). A coleta dos dados e a análise dos mesmos foram feitas de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 4.

Tabela 5.2 – Níveis dos parâmetros para o Arranjo de Taguchi.

| Parâmetro | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 | Unidade |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Pressão | 4 | 5 | - | Bar |
| Pré-pressão1 (Pré-P1) | 30 | 40 | 50 | ciclos |
| Pré-pressão2 (Pré-P2) | 30 | 40 | 50 | ciclos |
| Subida de corrente (Isub) | 0 | 10 | 20 | ciclos |
| Pós-pressão (Pós-P) | 30 | 45 | 60 | ciclos |
| Tempo de soldagem (ts) | 8 | 12 | 16 | ciclos |
| Corrente de soldagem (Is) | 4,5 (75%) | 4,8 (80%) | 5,1 (85%) | kA |

Fonte: A autora.

Tabela 5.3 (a) – Matriz experimental para o Arranjo de Taguchi com respostas de resistência e diâmetro.

| Teste | Parâmetros | | | | | | | Respostas | | | | | |
|-------|------------|--------|--------|------|-------|----|-----|-----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| | Pressão | Pré-P1 | Pré-P2 | Isub | Pós-P | ts | Is | R1 (N) | R2 (N) | R3 (N) | D1 (mm) | D2 (mm) | D3 (mm) |
| T1 | 4 | 30 | 30 | 0 | 30 | 8 | 75% | 11456,12 | 11031,82 | 11945,08 | 3,87 | 3,23 | 3,53 |
| T2 | 4 | 30 | 40 | 10 | 45 | 12 | 80% | 13506,20 | 11809,34 | 11029,22 | 4,69 | 4,40 | 4,36 |
| T3 | 4 | 30 | 50 | 20 | 60 | 16 | 85% | 10557,90 | 10510,29 | 9779,33 | 4,47 | 4,84 | 4,66 |
| T4 | 4 | 40 | 30 | 0 | 45 | 12 | 85% | 14963,74 | 15547,59 | 15936,24 | 3,82 | 4,18 | 4,00 |
| T5 | 4 | 40 | 40 | 10 | 60 | 16 | 75% | 10907,53 | 10479,72 | 10695,34 | 4,28 | 3,97 | 3,98 |
| T6 | 4 | 40 | 50 | 20 | 30 | 8 | 80% | 12100,67 | 11219,84 | 10830,29 | 3,60 | 3,72 | 3,55 |
| T7 | 4 | 50 | 30 | 10 | 30 | 16 | 80% | 11643,75 | 11836,60 | 13965,28 | 4,19 | 4,30 | 4,16 |
| T8 | 4 | 50 | 40 | 20 | 45 | 8 | 85% | 10698,63 | 11923,46 | 12128,77 | 4,41 | 4,39 | 4,40 |
| T9 | 4 | 50 | 50 | 0 | 60 | 12 | 75% | 9635,37 | 11572,52 | 11714,50 | 3,67 | 3,45 | 3,56 |
| T10 | 5 | 30 | 30 | 20 | 60 | 12 | 80% | 10816,77 | 10547,48 | 9631,29 | 3,67 | 3,81 | 3,74 |
| T11 | 5 | 30 | 40 | 0 | 30 | 16 | 85% | 12053,77 | 11765,07 | 12947,75 | 4,18 | 4,16 | 4,13 |
| T12 | 5 | 30 | 50 | 10 | 45 | 8 | 75% | 13278,60 | 10689,94 | 11488,56 | 3,70 | 3,76 | 3,73 |
| T13 | 5 | 40 | 30 | 10 | 60 | 8 | 85% | 13495,77 | 13938,80 | 14003,86 | 3,63 | 3,59 | 3,61 |
| T14 | 5 | 40 | 40 | 20 | 30 | 12 | 75% | 11148,60 | 10577,01 | 11314,79 | 3,59 | 3,53 | 3,56 |
| T15 | 5 | 40 | 50 | 0 | 45 | 16 | 80% | 12989,46 | 13671,24 | 13096,94 | 4,66 | 4,07 | 4,37 |
| T16 | 5 | 50 | 30 | 20 | 45 | 16 | 75% | 10073,18 | 10695,16 | 10934,82 | 3,72 | 3,85 | 3,77 |
| T17 | 5 | 50 | 40 | 0 | 60 | 8 | 80% | 11777,53 | 12811,25 | 12021,47 | 3,45 | 3,21 | 3,33 |
| T18 | 5 | 50 | 50 | 10 | 30 | 12 | 85% | 14665,01 | 13982,23 | 15316,55 | 3,98 | 4,14 | 4,10 |

Fonte: A autora.

Tabela 5.3 (b) – Matriz experimental para o Arranjo de Taguchi com respostas de indentação e ZTA.

| Teste | Parâmetros | | | | | | | Respostas | | | | | |
|-------|------------|--------|--------|------|-------|----|-----|-----------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Pressão | Pré-P1 | Pré-P2 | Isub | Pós-P | ts | Is | Id.1 (mm) | Id.2 (mm) | Id.3 (mm) | ZTA1 (mm ²) | ZTA2 (mm ²) | ZTA3 (mm ²) |
| T1 | 4 | 30 | 30 | 0 | 30 | 8 | 75% | 0,04 | 0,22 | 0,04 | 11,52 | 9,51 | 12,85 |
| T2 | 4 | 30 | 40 | 10 | 45 | 12 | 80% | 0,12 | 0,25 | 0,14 | 25,07 | 24,83 | 25,51 |
| T3 | 4 | 30 | 50 | 20 | 60 | 16 | 85% | 0,87 | 0,40 | 0,42 | 36,40 | 38,06 | 39,72 |
| T4 | 4 | 40 | 30 | 0 | 45 | 12 | 85% | 0,24 | 0,24 | 0,23 | 22,37 | 24,23 | 23,10 |
| T5 | 4 | 40 | 40 | 10 | 60 | 16 | 75% | 0,30 | 0,29 | 0,29 | 28,07 | 24,95 | 27,73 |
| T6 | 4 | 40 | 50 | 20 | 30 | 8 | 80% | 0,41 | 0,48 | 0,73 | 22,23 | 18,78 | 20,19 |
| T7 | 4 | 50 | 30 | 10 | 30 | 16 | 80% | 0,46 | 0,28 | 0,32 | 30,14 | 30,07 | 27,90 |
| T8 | 4 | 50 | 40 | 20 | 45 | 8 | 85% | 0,68 | 0,37 | 0,37 | 24,81 | 25,65 | 25,05 |
| T9 | 4 | 50 | 50 | 0 | 60 | 12 | 75% | 0,24 | 0,22 | 0,16 | 20,47 | 19,38 | 19,38 |
| T10 | 5 | 30 | 30 | 20 | 60 | 12 | 80% | 0,39 | 0,44 | 0,34 | 30,05 | 32,17 | 29,44 |
| T11 | 5 | 30 | 40 | 0 | 30 | 16 | 85% | 0,51 | 0,61 | 0,41 | 29,45 | 29,15 | 24,62 |
| T12 | 5 | 30 | 50 | 10 | 45 | 8 | 75% | 0,20 | 0,19 | 0,15 | 18,33 | 18,64 | 17,11 |
| T13 | 5 | 40 | 30 | 10 | 60 | 8 | 85% | 0,46 | 0,36 | 0,33 | 21,02 | 21,11 | 19,85 |
| T14 | 5 | 40 | 40 | 20 | 30 | 12 | 75% | 0,15 | 0,12 | 0,09 | 25,18 | 23,56 | 25,85 |
| T15 | 5 | 40 | 50 | 0 | 45 | 16 | 80% | 0,32 | 0,37 | 0,32 | 27,39 | 26,65 | 25,79 |
| T16 | 5 | 50 | 30 | 20 | 45 | 16 | 75% | 0,22 | 0,23 | 0,21 | 31,99 | 31,23 | 29,45 |
| T17 | 5 | 50 | 40 | 0 | 60 | 8 | 80% | 0,17 | 0,17 | 0,18 | 14,11 | 14,10 | 14,20 |
| T18 | 5 | 50 | 50 | 10 | 30 | 12 | 85% | 0,37 | 0,47 | 0,35 | 24,78 | 25,63 | 25,82 |

Fonte: A autora.

Os resultados das análises serão mostrados a seguir no gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre cada resposta e na tabela de parâmetros, que mostra a média dos resultados das três réplicas em cada nível dos fatores testados.

A tabela de parâmetros inclui classificações (*Rank*) baseadas na estatística Delta, que compara a magnitude relativa dos efeitos. O Delta é a diferença entre a maior e a menor média dos níveis de cada fator. *Rank* 1 representa o maior valor de Delta, *Rank* 2 o segundo maior valor e assim por diante; as classificações (*Rank*) indicam a importância relativa de cada fator para a resposta.

O valor das médias para cada nível dos fatores determina qual nível gera melhor resposta. Esses valores podem ser observados tanto no gráfico de efeitos principais quanto na tabela de parâmetros.

5.3.1. Resistência ao cisalhamento por tração

A Figura 5.1 apresenta o gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre a resistência ao cisalhamento por tração e a Figura 5.2 traz a tabela de parâmetros para essa resposta.

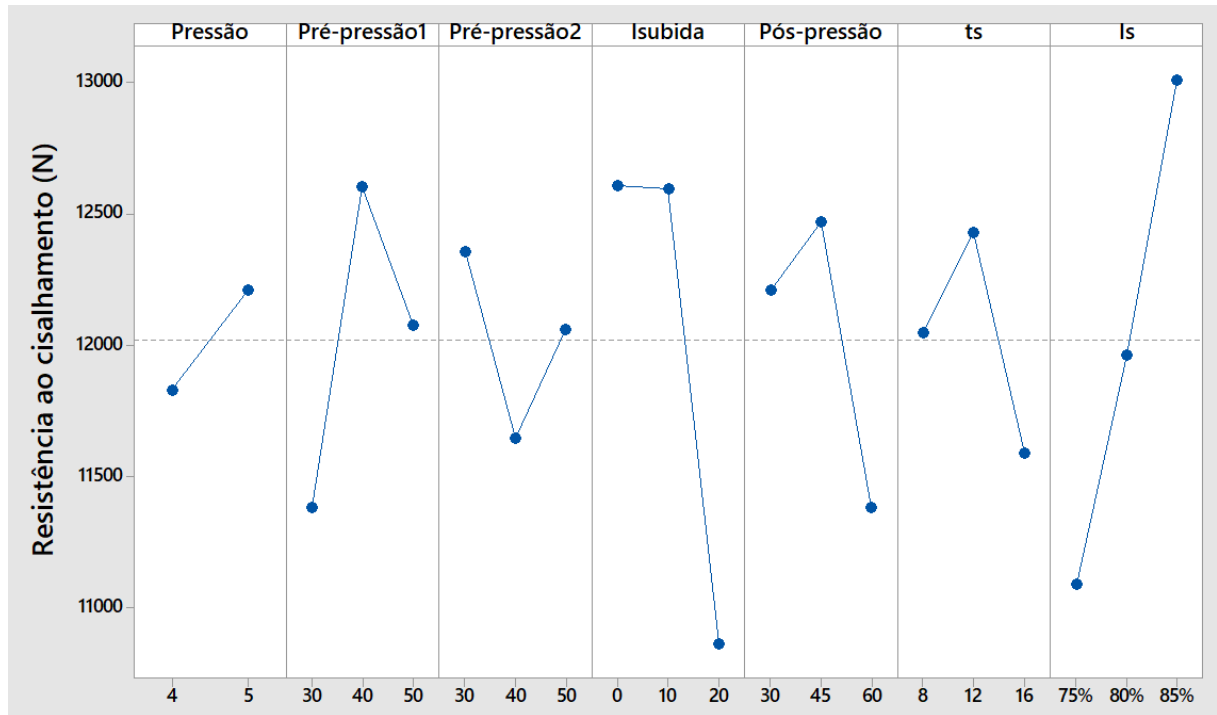


Figura 5.1 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre a resistência ao cisalhamento.

Fonte: A autora.

| Level | Pressão | Pré-pressão1 | Pré-pressão2 | Isubida | Pós-pressão | ts | Is |
|-------|---------|--------------|--------------|---------|-------------|-------|-------|
| 1 | 11831 | 11380 | 12359 | 12608 | 12211 | 12047 | 11091 |
| 2 | 12212 | 12607 | 11644 | 12596 | 12470 | 12429 | 11961 |
| 3 | | 12078 | 12061 | 10860 | 11383 | 11589 | 13012 |
| Delta | 382 | 1226 | 715 | 1747 | 1087 | 840 | 1921 |
| Rank | 7 | 3 | 6 | 2 | 4 | 5 | 1 |

Figura 5.2 – Tabela de parâmetros para a resistência ao cisalhamento.

Fonte: A autora.

De acordo com a classificação (*Rank*) dada na tabela da Figura 5.2, os parâmetros mais significativos sobre a resistência ao cisalhamento são, em ordem decrescente de influência: corrente, tempo de subida de corrente, tempo de pré-pressão 1 e tempo de pós-pressão. Esse resultado pode ser visualizado no gráfico da Figura 5.1, que mostra a variação na resistência com a variação dos níveis dos fatores.

5.3.2. Diâmetro do ponto de solda

O gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre o diâmetro do ponto de solda e a tabela de parâmetros para essa resposta são apresentados, respectivamente, nas Figuras 5.3 e 5.4.

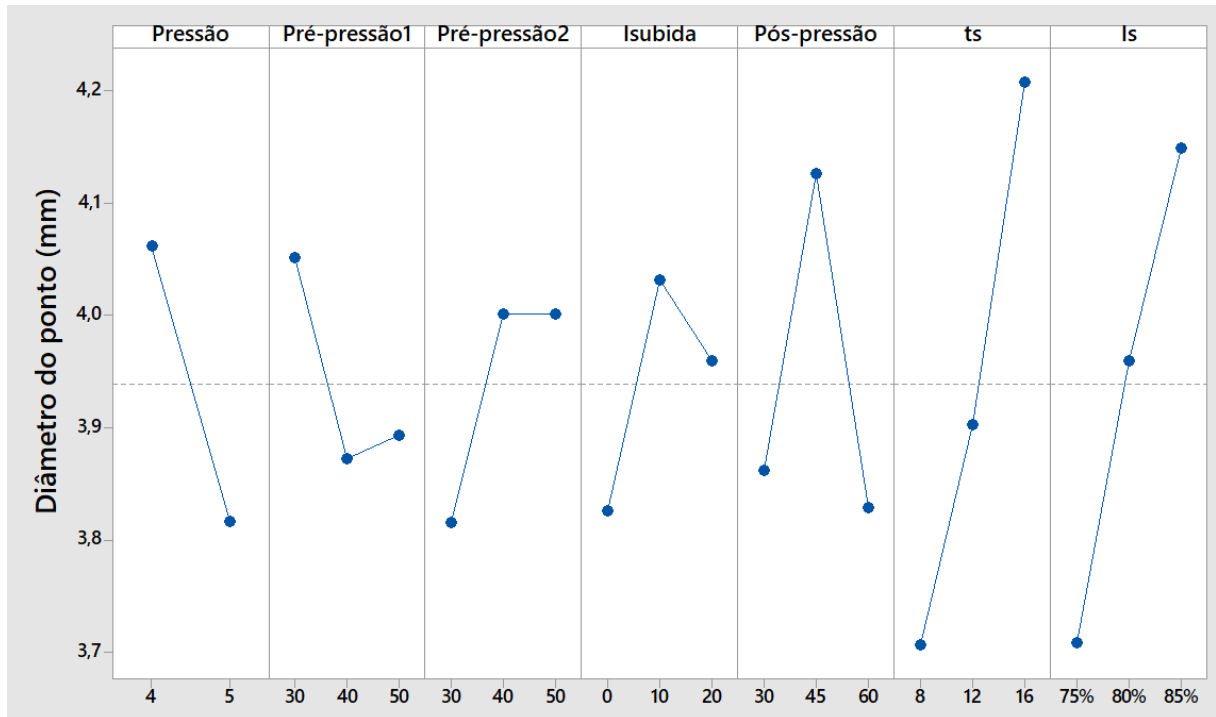


Figura 5.3 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre o diâmetro do ponto de solda.
Fonte: A autora.

| Level | Pressão | Pré-pressão1 | Pré-pressão2 | Isubida | Pós-pressão | ts | Is |
|-------|---------|--------------|--------------|---------|-------------|-------|-------|
| 1 | 4,062 | 4,051 | 3,815 | 3,826 | 3,826 | 3,706 | 3,708 |
| 2 | 3,816 | 3,873 | 4,001 | 4,032 | 4,126 | 3,903 | 3,960 |
| 3 | | 3,893 | 4,001 | 3,960 | 3,829 | 4,208 | 4,149 |
| Delta | 0,246 | 0,179 | 0,186 | 0,206 | 0,298 | 0,502 | 0,441 |
| Rank | 4 | 7 | 6 | 5 | 3 | 1 | 2 |

Figura 5.4 – Tabela de parâmetros para o diâmetro do ponto de solda.
Fonte: A autora.

O gráfico de efeitos principais, mostrado na Figura 5.3, aponta que os quatro parâmetros que mais influenciam no diâmetro do ponto de solda são, em ordem decrescente de influência, tempo, corrente, tempo de pós-pressão e pressão. Este fato pode ser confirmado pela classificação (*Rank*) dada na Figura 5.4, que ranqueia o tempo como o fator mais importante para o diâmetro, seguido de corrente, tempo de pós-pressão e pressão.

5.3.3. Indentação

São apresentados a seguir, nas Figuras 5.5 e 5.6, respectivamente, o gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre a indentação e a tabela de parâmetros para tal resposta.

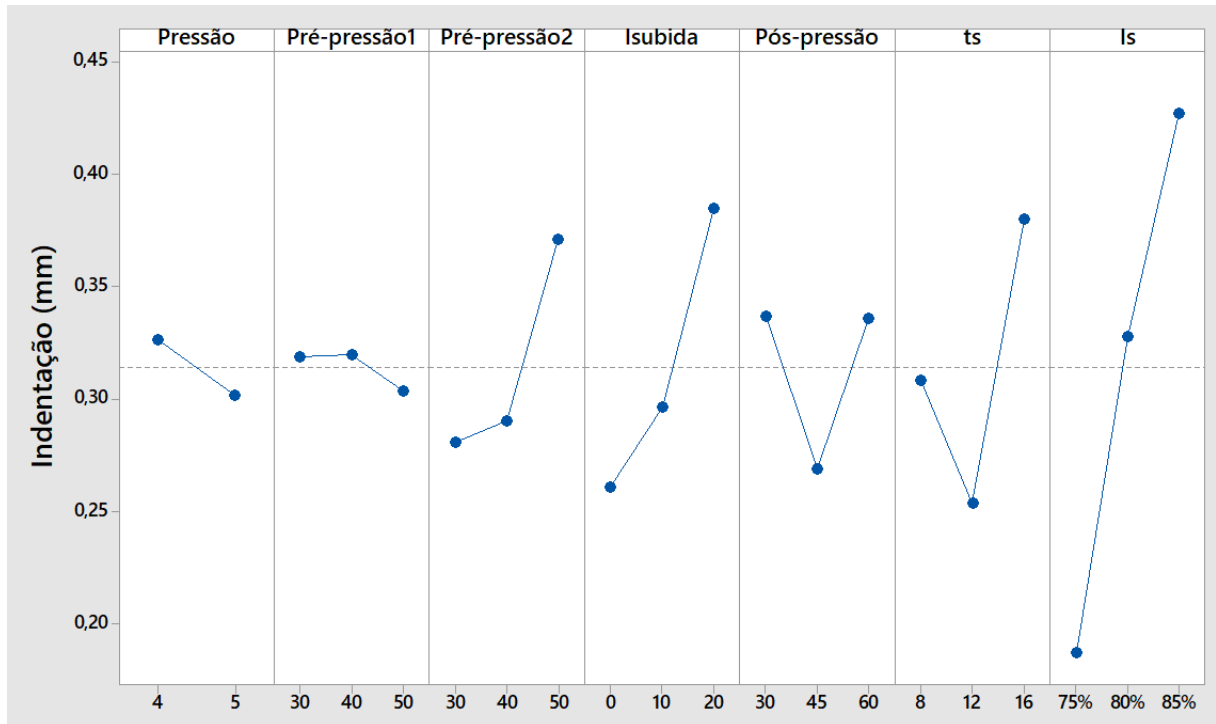


Figura 5.5 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre a indentação.

Fonte: A autora.

| Level | Pressão | Pré-pressão1 | Pré-pressão2 | Isubida | Pós-pressão | ts | Is |
|-------|---------|--------------|--------------|---------|-------------|--------|--------|
| 1 | 0,3266 | 0,3188 | 0,2806 | 0,2607 | 0,3369 | 0,3084 | 0,1872 |
| 2 | 0,3015 | 0,3196 | 0,2902 | 0,2963 | 0,2691 | 0,2536 | 0,3276 |
| 3 | | 0,3037 | 0,3713 | 0,3851 | 0,3361 | 0,3801 | 0,4273 |
| Delta | 0,0250 | 0,0159 | 0,0908 | 0,1244 | 0,0679 | 0,1265 | 0,2400 |
| Rank | 6 | 7 | 4 | 3 | 5 | 2 | 1 |

Figura 5.6 – Tabela de parâmetros para a indentação.

Fonte: A autora.

Depreende-se do gráfico de efeitos principais (Figura 5.5) e da tabela de parâmetros (Figura 5.6) que os fatores mais influentes sobre a indentação são, em ordem decrescente (mostrada no *Rank*), corrente, tempo, tempo de subida de corrente e tempo de pré-pressão 2.

5.3.4. Zona Termicamente Afetada (ZTA) visível

A análise dos resultados para a ZTA visível é mostrada nas Figuras 5.7 e 5.8, que apresentam o gráfico de efeitos principais dos parâmetros e a tabela de parâmetros, respectivamente.

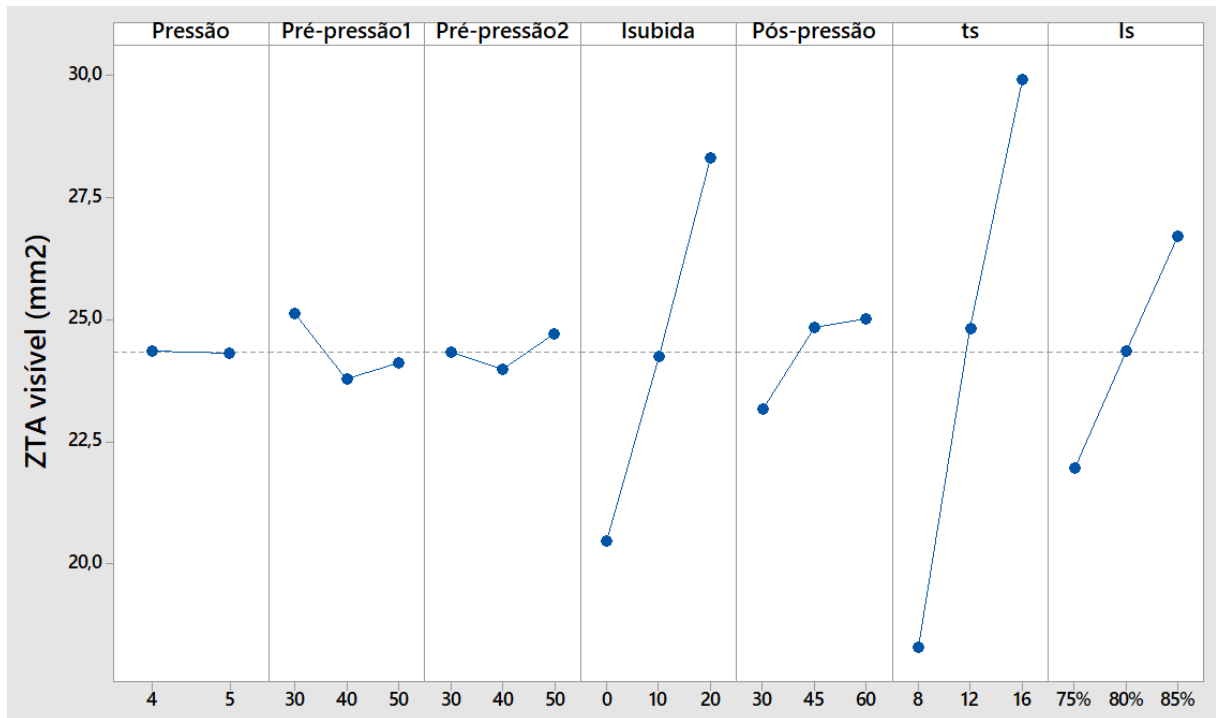


Figura 5.7 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros sobre a ZTA visível.
Fonte: A autora.

| Level | Pressão | Pré-pressão1 | Pré-pressão2 | Isubida | Pós-pressão | ts | Is |
|-------|---------|--------------|--------------|---------|-------------|-------|-------|
| 1 | 24,37 | 25,13 | 24,33 | 20,46 | 23,18 | 18,28 | 21,95 |
| 2 | 24,32 | 23,78 | 23,99 | 24,25 | 24,84 | 24,82 | 24,37 |
| 3 | | 24,12 | 24,71 | 28,32 | 25,01 | 29,93 | 26,71 |
| Delta | 0,05 | 1,36 | 0,71 | 7,86 | 1,83 | 11,65 | 4,76 |
| Rank | 7 | 5 | 6 | 2 | 4 | 1 | 3 |

Figura 5.8 – Tabela de parâmetros para a ZTA visível.
Fonte: A autora.

Nota-se claramente pelo gráfico de efeitos principais (Figura 5.7) que os parâmetros mais significativos para a ZTA visível são tempo, tempo de subida de corrente, corrente e tempo de pós-pressão, o que é confirmado pela classificação (*Rank*) apresentada na tabela de parâmetros (Figura 5.8), que aponta o tempo como o fator mais significativo, seguido de tempo de subida de corrente, corrente e tempo de pós-pressão.

Os quatro parâmetros mais significativos para cada resposta são apresentados no Quadro 5.3 abaixo, que sumariza as análises realizadas para resistência ao cisalhamento, diâmetro do ponto de solda, indentação e ZTA visível.

Quadro 5.3 – Quatro primeiros parâmetros mais significativos para cada resposta.

| Parâmetros Respostas | Pressão | Pré-P1 | Pré-P2 | Isub | Pós-P | Tempo | Corrente |
|---------------------------------------|----------------|---------------|---------------|-------------|--------------|--------------|-----------------|
| Resistência | | * | | * | * | | * |
| Diâmetro | * | | | | * | * | * |
| Indentação | | | * | * | | * | * |
| ZTA | | | | * | * | * | * |

Fonte: A autora.

Observa-se que os quatro parâmetros que apareceram mais vezes como significativos para as respostas de interesse foram: corrente de soldagem, tempo de soldagem, tempo de subida de corrente e tempo de pós-pressão. Deste modo, os experimentos exploratórios de Taguchi permitiram conhecer melhor o processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5, pois permitiram avaliar quais são as quatro variáveis mais influentes sobre as respostas e selecioná-las, dentre as sete variáveis testadas, para a próxima etapa.

É importante salientar que, apesar de a revisão de literatura mostrar que a pressão é um dos três parâmetros principais da soldagem a ponto por resistência elétrica, na análise dos experimentos de Taguchi, a pressão só apareceu entre as quatro variáveis mais significativas para uma das quatro respostas. Este fato provavelmente se deve à pequena variação nos níveis de pressão testados, 4 e 5 bar, pois, como explicado no item 5.2.1, a utilização de forças (pressão) mais elevadas exige correntes mais elevadas para produzir o ponto de solda e o equipamento utilizado já será testado em 95% de sua capacidade máxima de corrente em algumas etapas do presente estudo.

5.4. Fase Um – Análise de curvatura e adequação dos níveis de trabalho (Arranjo Fatorial Completo)

5.4.1. Primeiro Arranjo Fatorial Completo

Com a definição dos quatro parâmetros mais significativos para o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5, avançou-se para a Fase Um da Metodologia de Superfície de Resposta, em que um Arranjo Fatorial Completo foi empregado para definir a matriz experimental. Os níveis dos parâmetros são mostrados na Tabela 5.4 e foram definidos com base nos gráficos de efeitos principais da Fase Zero. Os outros parâmetros foram mantidos fixos e seus valores podem ser observados no Quadro 5.4. Optou-se por testar uma faixa de corrente mais baixa para evitar o grande desgaste dos eletrodos.

O Arranjo Fatorial Completo com 7 pontos centrais é composto por 23 experimentos, como pode ser visto na Tabela 5.5, que, além da matriz experimental, apresenta as respostas obtidas. Além disso, o Quadro 5.5 apresenta as observações feitas durante o processo de soldagem e após o ensaio de cisalhamento. A partir dessa etapa, o tamanho da solda foi medido pela largura da lentilha, a qual é mais precisa do que o diâmetro do ponto. A coleta dos dados e a análise dos mesmos foram feitas de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 4.

A separação entre as chapas foi medida na análise metalográfica, pois, apesar de não compor o conjunto de respostas a ser otimizado, deseja-se entender como essa característica está relacionada à indentação e à expulsão de material e como afeta a resistência ao cisalhamento.

Tabela 5.4 – Níveis dos parâmetros para o primeiro Arranjo Fatorial Completo.

| Parâmetro | Nível -1 | Ponto Central | Nível +1 | Unidade |
|---------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------|
| Tempo de soldagem (ts) | 10 | 14 | 18 | ciclos |
| Corrente de soldagem (Is) | 4,2 (70%) | 4,5 (75%) | 4,8 (80%) | kA |
| Pós-pressão (Pós-P) | 40 | 50 | 60 | ciclos |
| Subida de corrente (Isub) | 10 | 15 | 20 | ciclos |

Fonte: A autora.

Quadro 5.4 – Nível dos parâmetros fixos.

| Parâmetro | Nível |
|------------------------|--------------|
| Pressão | 5 bar |
| Tempo de pré-pressão 1 | 50 ciclos |
| Tempo de pré-pressão 2 | 50 ciclos |
| Impulso | 1 |
| Intervalo/Resfriamento | 0 |

Fonte: A autora.

Tabela 5.5 – Matriz experimental para o primeiro Arranjo Fatorial Completo com respostas.

| Teste | Parâmetros | | | | Respostas | | | | | |
|--------------|-------------------|-----------|--------------|-------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| | ts | Is | Pós-P | Isub | Resistência (N) | Larg. (mm) | Indent. (mm) | ZTA (mm) | Penet. (mm) | Separ. (mm) |
| F1 | 10 | 70% | 40 | 10 | 8234,84 | 3,00 | 0,10 | 0,90 | 0,99 | 0,13 |
| F2 | 18 | 70% | 40 | 10 | 8765,42 | 3,81 | 0,17 | 1,03 | 1,11 | 0,20 |
| F3 | 10 | 80% | 40 | 10 | 15071,11 | 4,69 | 0,42 | 0,72 | 1,10 | 0,30 |
| F4 | 18 | 80% | 40 | 10 | 14482,63 | 4,79 | 0,64 | 0,98 | 0,66 | 0,47 |
| F5 | 10 | 70% | 60 | 10 | 9363,77 | 3,44 | 0,13 | 0,82 | 1,04 | 0,12 |
| F6 | 18 | 70% | 60 | 10 | 10293,79 | 3,68 | 0,21 | 1,00 | 1,15 | 0,20 |
| F7 | 10 | 80% | 60 | 10 | 13652,10 | 4,37 | 0,25 | 0,71 | 1,24 | 0,23 |
| F8 | 18 | 80% | 60 | 10 | 11653,85 | 5,15 | 0,54 | 0,92 | 0,79 | 0,38 |
| F9 | 10 | 70% | 40 | 20 | 10160,60 | 3,86 | 0,14 | 0,83 | 1,16 | 0,14 |
| F10 | 18 | 70% | 40 | 20 | 8757,04 | 4,08 | 0,22 | 0,99 | 0,92 | 0,22 |
| F11 | 10 | 80% | 40 | 20 | 13324,02 | 4,60 | 0,19 | 0,80 | 1,28 | 0,17 |
| F12 | 18 | 80% | 40 | 20 | 11972,88 | 4,99 | 0,27 | 0,91 | 0,97 | 0,21 |
| F13 | 10 | 70% | 60 | 20 | 9647,53 | 3,57 | 0,11 | 0,92 | 1,10 | 0,10 |
| F14 | 18 | 70% | 60 | 20 | 9958,96 | 3,86 | 0,17 | 1,08 | 1,03 | 0,16 |
| F15 | 10 | 80% | 60 | 20 | 14646,58 | 4,60 | 0,20 | 0,77 | 1,24 | 0,22 |
| F16 | 18 | 80% | 60 | 20 | 10722,74 | 5,37 | 0,31 | 0,88 | 0,98 | 0,30 |
| F17 | 14 | 75% | 50 | 15 | 12655,46 | 4,51 | 0,17 | 0,82 | 1,02 | 0,17 |
| F18 | 14 | 75% | 50 | 15 | 11339,40 | 4,19 | 0,13 | 0,88 | 1,06 | 0,14 |
| F19 | 14 | 75% | 50 | 15 | 10574,65 | 4,10 | 0,13 | 0,92 | 1,08 | 0,12 |
| F20 | 14 | 75% | 50 | 15 | 11661,91 | 4,26 | 0,14 | 0,87 | 1,03 | 0,15 |
| F21 | 14 | 75% | 50 | 15 | 12356,32 | 4,53 | 0,18 | 0,80 | 1,04 | 0,18 |
| F22 | 14 | 75% | 50 | 15 | 11959,82 | 4,35 | 0,15 | 0,86 | 1,07 | 0,16 |
| F23 | 14 | 75% | 50 | 15 | 11630,14 | 4,35 | 0,17 | 0,91 | 1,03 | 0,16 |

Fonte: A autora.

Quadro 5.5 – Observações realizadas durante o processo de soldagem e após o ensaio de cisalhamento para os experimentos do primeiro Arranjo Fatorial Completo.

| Teste | Observações | |
|------------|-------------------|--|
| | Expulsão | Modo de falha |
| F1 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F2 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento do ponto das duas chapas, fratura iniciada na ZTA |
| F3 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA |
| F4 | Bastante expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F5 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F6 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F7 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA |
| F8 | Bastante expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F9 | Sem expulsão | Interfacial |
| F10 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F11 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F12 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F13 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F14 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F15 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F16 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F17 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F18 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F19 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F20 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F21 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F22 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| F23 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |

Fonte: A autora.

5.4.1.1. Análise da expulsão de material

A Figura 5.9 a seguir mostra o gráfico de relação entre a resistência ao cisalhamento e o tamanho do ponto de solda.

Os pontos marcados em vermelho são aqueles que tiveram expulsão de material durante o processo de soldagem. Esses pontos são mostrados na Figura 5.10.

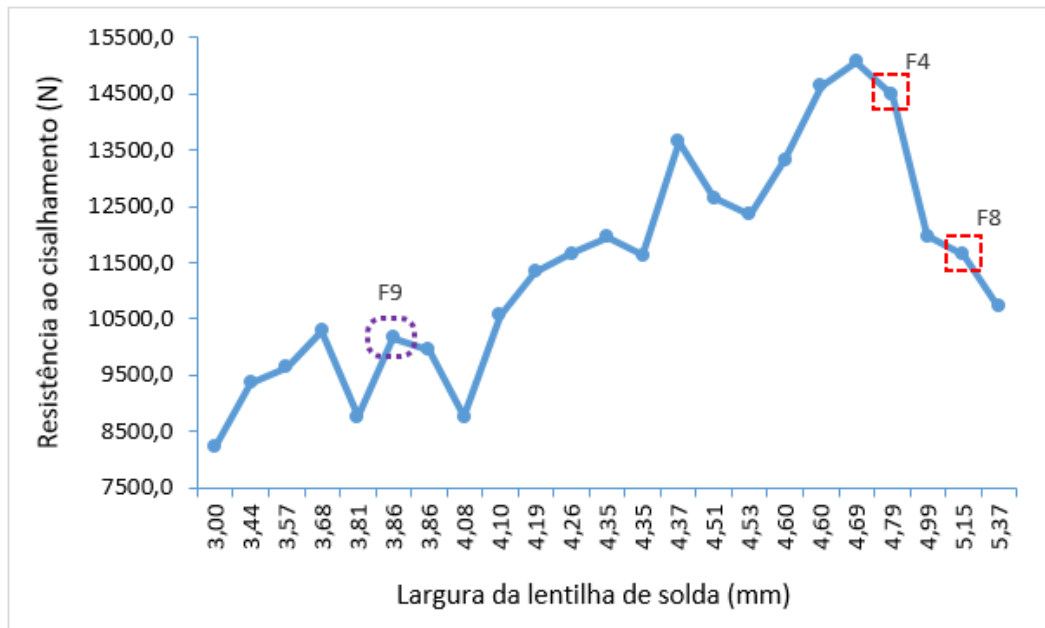


Figura 5.9 – Gráfico da relação entre a resistência e o tamanho da solda para o primeiro Fatorial Completo.
Fonte: A autora.

Observa-se que os pontos F4 e F8 apresentaram crescimento da largura da lentilha de solda em relação ao ponto imediatamente anterior no gráfico, porém, redução da resistência ao cisalhamento. Para estes dois pontos, foi observada expulsão de material na interface peça/peça. Como exposto no item 2.5.3.1 da fundamentação teórica por Zhang e Senkara (2006), quando a ocorrência de expulsão se dá no contato peça/peça, a resistência mecânica da solda pode ser comprometida, visto que há perda de metal líquido na zona fundida.

Alguns autores analisados na revisão de pesquisas anteriores sobre a soldagem a ponto do aço 22MnB5 explicam que existe uma forte dependência entre a carga de ruptura e o aumento do tamanho da solda, desde que não ocorram defeitos causados pela expulsão de material (HUIN *et al.*, 2016).



Figura 5.10 – Pontos F4 e F8 do primeiro Arranjo Fatorial Completo.
Fonte: A autora.

5.4.1.2. Análise da separação entre as chapas

A Figura 5.11 mostra o gráfico de dispersão para a separação entre as chapas e a indentação.

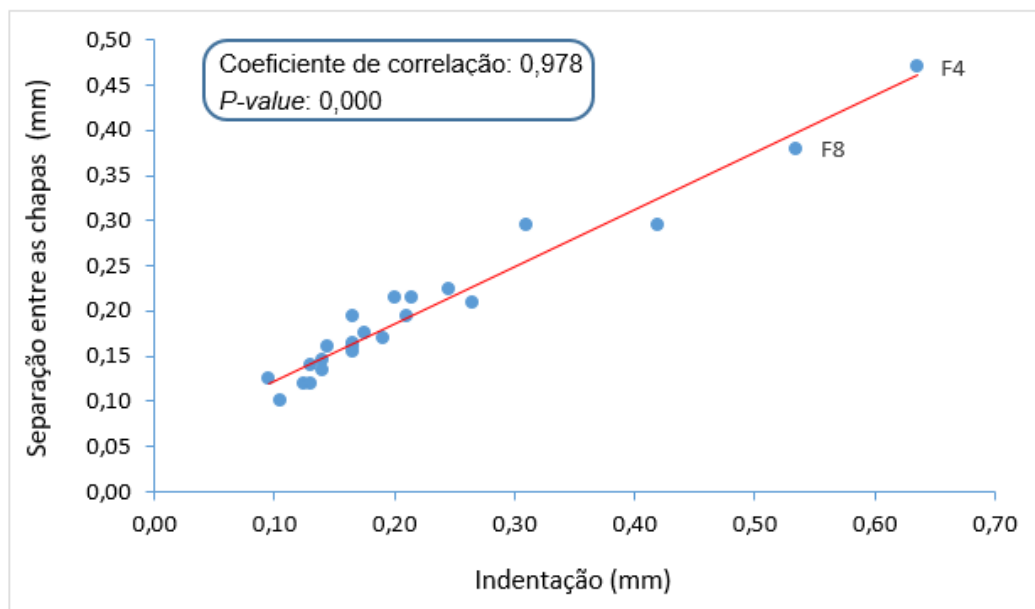


Figura 5.11 – Gráfico de dispersão entre a separação das chapas e a indentação para o primeiro Fatorial Completo.

Fonte: A autora.

Nota-se, claramente, pelo gráfico, a forte correlação entre a separação das chapas e a indentação, o que é comprovado pela análise de correlação, que apresenta coeficiente de 0,978 e *P-value* de 0,000 (< 5% de significância). O coeficiente de correlação varia de -1 a +1, sendo que valores próximos de +1 indicam uma alta correlação positiva, ou seja, o aumento na indentação leva ao aumento na separação das chapas.

Esses resultados comprovam o que foi dito por Zhang e Senkara (2006), que uma indentação excessiva pode induzir a uma grande separação entre as chapas. Essa separação pode fragilizar a solda e levá-la ao rompimento, pois reduz sua resistência.

Além disso, frequentemente, a expulsão de material está associada à excessiva indentação e conseqüente excessiva separação entre as peças. Os pontos F4 e F8, que tiveram expulsão de material e queda da resistência, foram os pontos que apresentaram maiores indentação e separação entre as chapas, demonstrando como o aumento da indentação, da separação entre as chapas e da expulsão de material estão inter-relacionados e podem levar à diminuição da resistência ao cisalhamento.

5.4.1.3. Análise dos modos de falha

As Figuras 5.12 (a), 5.12 (b), 5.12 (c) e 5.12 (d) mostram os modos de falha identificados após o ensaio de cisalhamento por tração dos experimentos do primeiro Fatorial Completo.

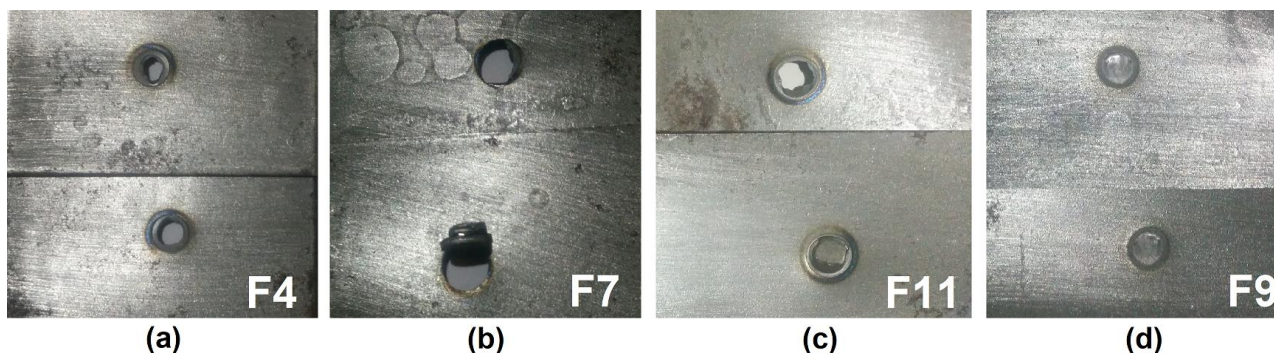


Figura 5.12 (a) – Falha por pullout, com arrancamento do ponto das duas chapas, fratura iniciada na ZTA.
 Figura 5.12 (b) – Falha por pullout, com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA.
 Figura 5.12 (c) – Falha por pullout, com fratura iniciada na ZTA.
 Figura 5.12 (d) – Falha interfacial.

Fonte: A autora.

O ponto F9, marcado em roxo no gráfico da Figura 5.9, apresentada anteriormente, foi o único entre os 23 experimentos que apresentou modo de falha interfacial. Nota-se que não houve queda da resistência ao cisalhamento em relação ao ponto imediatamente anterior no gráfico, mesmo que tenha ocorrido esse modo de falha. Choi, *et al.* (2011), autores abordados na análise de pesquisas anteriores, explicam que, no caso dos Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS), uma boa resistência ao cisalhamento pode ser obtida, mesmo quando falhas interfaciais ocorrem. Os autores acreditam que esse tipo de falha, para esses materiais, é causado pela presença de entalhes afiados na fronteira da lentilha assim como pela alta dureza e microestrutura frágil da solda, sendo esta causada pelo elevado carbono equivalente.

Os outros 22 pontos apresentaram falha por *pullout* e, independentemente de o ponto ter-se desprendido de uma ou ambas as chapas, a fratura iniciou-se na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Ighodaro, Biro e Zhou (2016), em seu trabalho analisado no Capítulo 3, explicam que, para os metais estampados a quente, a falha por *pullout* se inicia na ZTA, devido à menor dureza da mesma em relação ao metal de base, resultando na combinação clara de botão e furo sem rasgamento da chapa.

5.4.1.4. Análise da curvatura

O Quadro 5.6 mostra, pela análise dos *P-values* dos pontos centrais, quais respostas apresentaram curvatura dentro do espaço experimental testado. Rejeita-se a hipótese nula de que a resposta não apresenta curvatura quando o *P-value* é menor do que o nível de significância escolhido (geralmente, $\alpha = 0,05$).

Quadro 5.6 – Análise de curvatura para as respostas.

| Resposta | <i>P-value</i> dos pontos centrais | Curvatura |
|-----------------------------|------------------------------------|-----------|
| Resistência ao cisalhamento | 0,200 | Não |
| Largura da lentilha | 0,277 | Não |
| Indentação | 0,000 | Sim |
| ZTA | 0,237 | Não |
| Penetração | 0,980 | Não |

Fonte: A autora.

Observa-se que a resposta de maior interesse não apresentou curvatura e, além disso, apenas uma das cinco respostas apresentou curvatura. Sendo assim, os níveis de trabalho foram ajustados e um novo Arranjo Fatorial Completo foi executado.

Os novos níveis de trabalho foram definidos com base nos gráficos de efeitos principais dos parâmetros sobre as respostas para o primeiro Fatorial, que são apresentados nas Figuras 5.13 (a) e 5.13 (b).

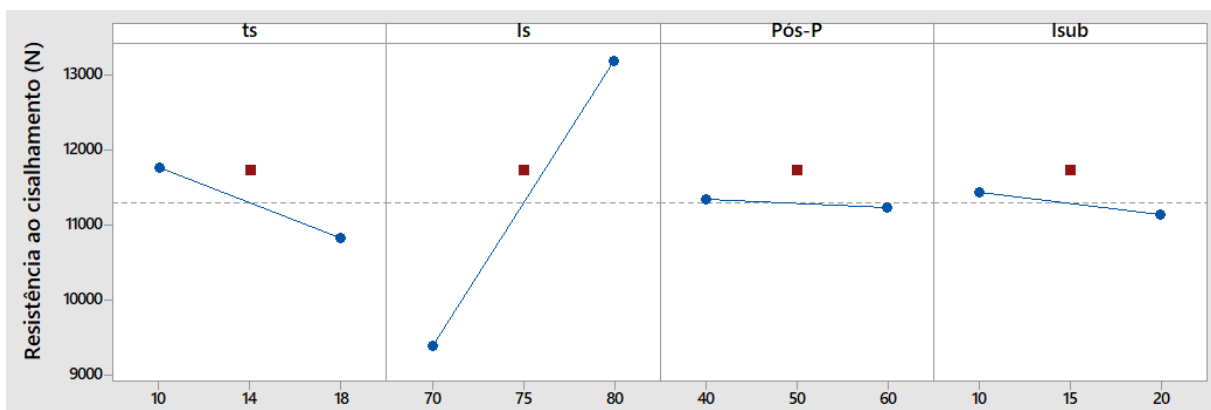


Figura 5.13 (a) – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros para o primeiro Arranjo Fatorial Completo.

Fonte: A autora.

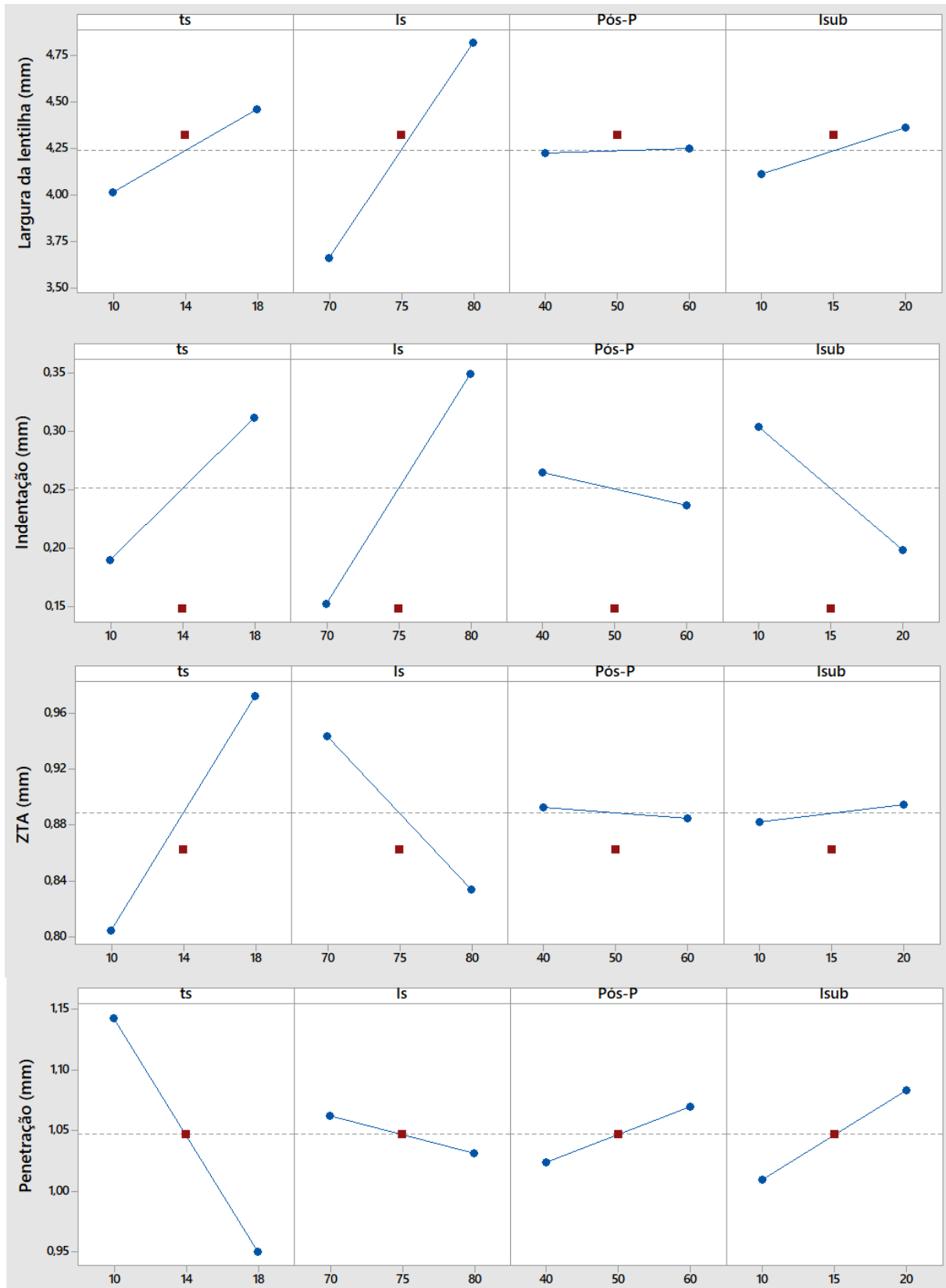


Figura 5.13 (b) – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros para o primeiro Arranjo Fatorial Completo.
Fonte: A autora.

Os gráficos das Figuras 5.13 (a) e 5.13 (b) mostram que grande parte da influência individual dos parâmetros sobre as respostas não apresentou tendência a formar curvatura, parecendo seguir uma função linear. Isto pode ser visualizado pelo posicionamento do ponto central (ponto em vermelho) em relação à linha formada entre os pontos fatoriais (+1 e -1, pontos em azul). Deste modo, demonstra-se a necessidade de ajuste dos níveis dos fatores para que a região experimental apresente curvatura, ou seja, possa ser adequadamente representada por um modelo de segunda ordem e englobar o ponto de ótimo do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5.

Para o tempo de soldagem, os gráficos de efeitos principais mostram que, na maioria das respostas, o efeito deste fator não apresentou tendência a gerar uma curvatura, sugerindo, assim, uma necessidade de escolher novos níveis de trabalho para esse parâmetro. Além disso, o gráfico de efeitos principais sobre a resistência ao cisalhamento mostra que o nível -1 para o tempo de soldagem (10 ciclos) produziu pontos com maior resistência. Já para a largura da lentilha, o nível +1 (18 ciclos) formou soldas maiores. O aumento do tamanho do ponto, em contraste com a diminuição da resistência, provavelmente acontece devido ao início de expulsão de material, que enfraquece a solda. As observações visuais durante o processo mostraram que, dos 23 pontos de solda, dois pontos, F4 e F8, tiveram expulsão de material e queda na resistência ao cisalhamento; esses experimentos foram feitos com tempo de 18 ciclos. Portanto, devido ao fato de que tempos menores produziram soldas de melhor resistência, somado ao fato de que tempos menores formaram menor ZTA, menor indentação e maior penetração, diminuíram-se os valores dos níveis experimentais da variável tempo de soldagem.

Quanto à corrente, os gráficos de efeitos principais mostram que, para a maioria das respostas, o efeito desse parâmetro não apresentou tendência a gerar uma curvatura, evidenciando a necessidade de escolher novos níveis de trabalho. Observa-se que o aumento nesta variável produziu aumento na resistência ao cisalhamento e no tamanho da solda; deste modo, os valores dos níveis experimentais do parâmetro corrente de soldagem foram aumentados.

O tempo de subida de corrente foi mantido em níveis similares. Houve uma pequena variação em relação aos primeiros níveis escolhidos para o primeiro Fatorial a fim de se explorar uma região experimental mais ampla.

Visto que os níveis utilizados anteriormente de tempo de pós-pressão não produziram mudança significativa sobre a resistência ao cisalhamento ($P\text{-value} = 0,772$), resposta mais importante para o presente estudo, os níveis desse parâmetro foram ligeiramente diminuídos para testar uma região experimental diferente, pois tempos maiores afetam negativamente os custos do processo.

5.4.2. Segundo Arranjo Fatorial Completo

Os níveis dos parâmetros e a matriz experimental com as respostas para o novo Arranjo Fatorial Completo são apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7 abaixo, respectivamente. Os parâmetros fixos se mantiveram os mesmos do primeiro Fatorial realizado. A coleta e a análise dos dados foram feitas de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 4.

Tabela 5.6 – Níveis dos parâmetros para o segundo Arranjo Fatorial Completo.

| Parâmetro | Nível -1 | Ponto Central | Nível +1 | Unidade |
|---------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------|
| Tempo de soldagem (ts) | 5 | 9 | 13 | ciclos |
| Corrente de soldagem (Is) | 4,8 (80%) | 5,1 (85%) | 5,4 (90%) | kA |
| Pós-pressão (Pós-P) | 20 | 35 | 50 | ciclos |
| Subida de corrente (Isub) | 7 | 14 | 21 | ciclos |

Fonte: A autora.

Tabela 5.7 – Matriz experimental para o segundo Arranjo Fatorial Completo com respostas.

| Teste | Parâmetros | | | | Respostas | | | | |
|-------|------------|----|-------|------|--------------------|---------------|-----------------|-------------|----------------|
| | ts | Is | Pós-P | Isub | Resistência (N) | Larg. (mm) | Indent. (mm) | ZTA (mm) | Penet. (mm) |
| NF1 | 5 | 80 | 20 | 7 | 11764,52 | 3,80 | 0,10 | 0,55 | 1,30 |
| NF2 | 13 | 80 | 20 | 7 | 13559,82 | 4,61 | 0,19 | 0,69 | 1,01 |
| NF3 | 5 | 90 | 20 | 7 | 11555,68 | 4,00 | 0,11 | 0,54 | 1,14 |
| NF4 | 13 | 90 | 20 | 7 | 16302,71 | 5,00 | 0,26 | 0,71 | 0,94 |
| NF5 | 5 | 80 | 50 | 7 | 13193,52 | 3,66 | 0,08 | 0,52 | 1,16 |
| NF6 | 13 | 80 | 50 | 7 | 14521,44 | 4,89 | 0,14 | 0,78 | 1,03 |
| NF7 | 5 | 90 | 50 | 7 | 14863,25 | 4,54 | 0,10 | 0,63 | 1,14 |
| NF8 | 13 | 90 | 50 | 7 | 16917,87 | 5,53 | 0,30 | 0,86 | 0,99 |
| NF9 | 5 | 80 | 20 | 21 | 12465,90 | 5,20 | 0,18 | 0,61 | 1,12 |
| NF10 | 13 | 80 | 20 | 21 | 16180,09 | 4,65 | 0,20 | 0,83 | 0,92 |
| NF11 | 5 | 90 | 20 | 21 | 16084,31 | 4,19 | 0,12 | 0,66 | 1,16 |
| NF12 | 13 | 90 | 20 | 21 | 15797,59 | 4,90 | 0,22 | 0,78 | 1,01 |
| NF13 | 5 | 80 | 50 | 21 | 14469,04 | 4,02 | 0,13 | 0,54 | 1,08 |
| NF14 | 13 | 80 | 50 | 21 | 13602,78 | 4,77 | 0,20 | 0,73 | 1,02 |
| NF15 | 5 | 90 | 50 | 21 | 16618,62 | 4,93 | 0,14 | 0,67 | 1,19 |
| NF16 | 13 | 90 | 50 | 21 | 16550,39 | 5,66 | 0,27 | 0,79 | 0,96 |
| NF17 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16672,71 | 4,98 | 0,13 | 0,69 | 1,11 |
| NF18 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16280,52 | 5,02 | 0,16 | 0,70 | 1,10 |
| NF19 | 9 | 85 | 35 | 14 | 15573,64 | 4,96 | 0,16 | 0,71 | 1,08 |
| NF20 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16135,03 | 5,01 | 0,13 | 0,66 | 1,11 |
| NF21 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16495,14 | 5,11 | * | 0,66 | 1,10 |
| NF22 | 9 | 85 | 35 | 14 | 15698,76 | 4,94 | 0,13 | 0,69 | 1,12 |
| NF23 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16089,39 | 5,00 | 0,12 | 0,65 | 1,08 |

Fonte: A autora.

Nota-se que um dado referente à indentação (teste NF21) foi eliminado do estudo, pois se caracterizou como um *outlier*, e a presença do mesmo poderia influenciar negativamente nas análises realizadas.

5.4.2.1. Análise da curvatura

O Quadro 5.7 mostra, pela análise dos *P-values* dos pontos centrais, quais respostas apresentaram curvatura dentro do novo espaço experimental testado.

Quadro 5.7 – Análise de curvatura para as respostas do novo Arranjo Fatorial Completo.

| Resposta | <i>P</i>-value dos pontos centrais | Curvatura |
|-----------------------------|---|------------------|
| Resistência ao cisalhamento | 0,000 | Sim |
| Largura da lentilha | 0,000 | Sim |
| Indentação | 0,007 | Sim |
| ZTA | 0,923 | Não |
| Penetração | 0,007 | Sim |

Fonte: A autora.

A mudança nos níveis dos fatores mostrou-se significativa, pois a resistência ao cisalhamento, a largura da lentilha e a penetração passaram a apresentar curvatura, o que indica que o ponto de ótimo se encontra nessa região experimental. A indentação se manteve com curvatura.

A ZTA foi a única resposta que, novamente, não apresentou curvatura, o que, provavelmente, se deve ao fato de que quanto mais elevados os níveis dos parâmetros maior será a Zona Termicamente Afetada (ZTA), seguindo um modelo linear, como sugerido pelo gráfico de efeitos principais sobre a ZTA na Figura 5.14 (b), em que os pontos centrais (pontos em vermelho) situam-se em cima da linha formada entre os pontos fatoriais (+1 e -1, pontos em azul). As influências dos fatores principais sobre as demais respostas são mostradas nas Figuras 5.14 (a) e 5.14 (b).

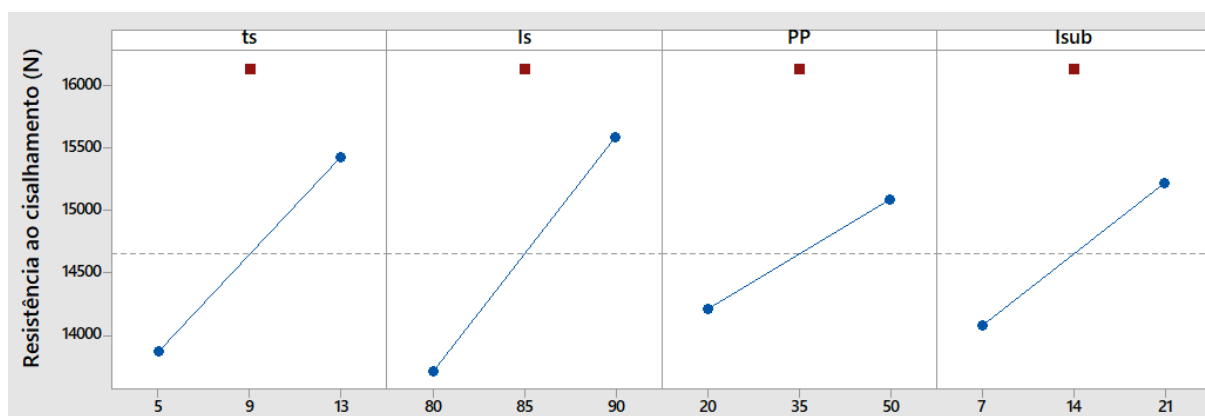


Figura 5.14 (a) – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros para o segundo Arranjo Fatorial Completo.

Fonte: A autora.

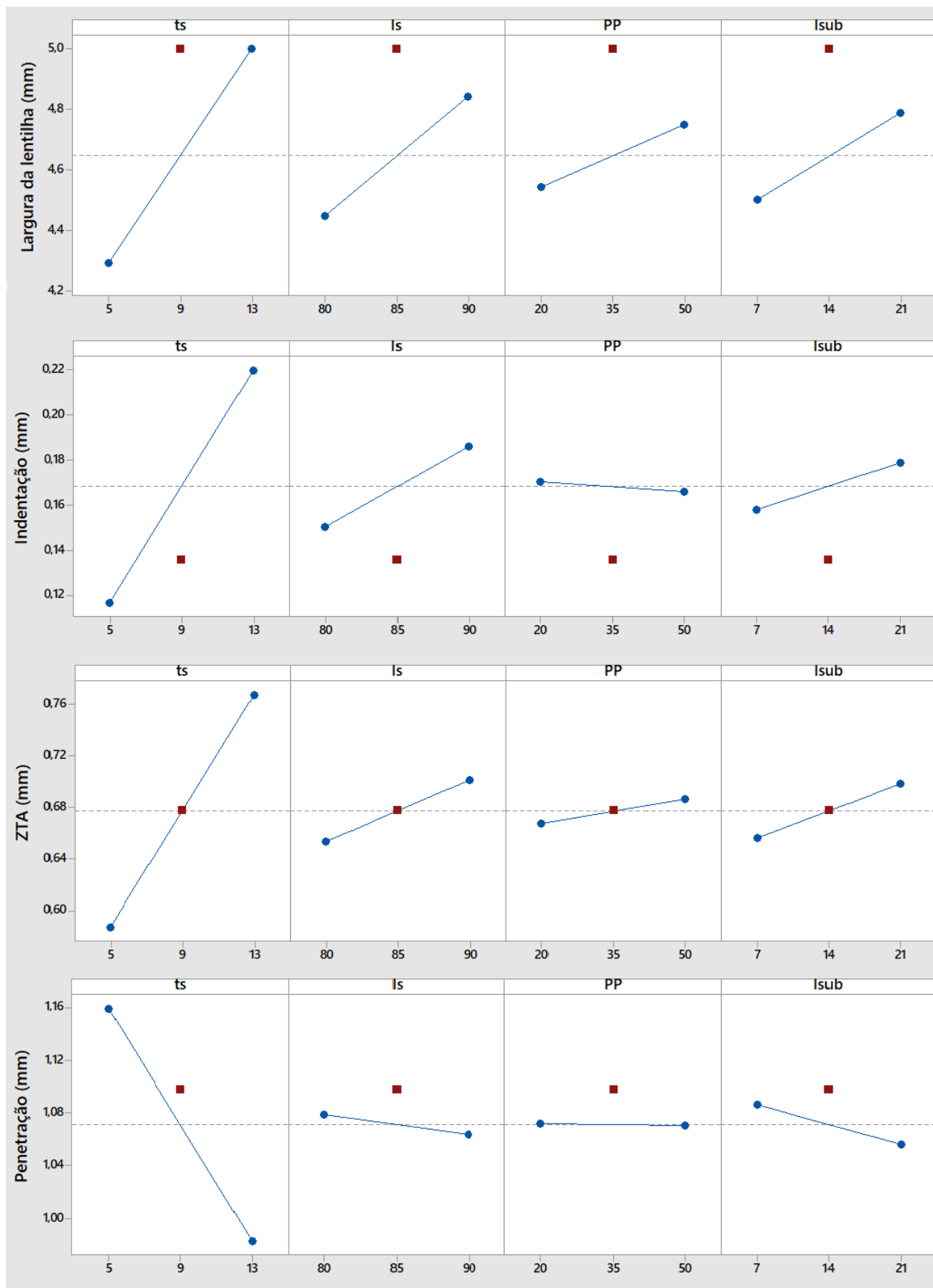


Figura 5.14 (b) – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros para o segundo Arranjo Fatorial Completo.

Fonte: A autora.

Os gráficos das Figuras 5.14 (a) e 5.14 (b) mostram, pelo posicionamento dos pontos centrais (pontos em vermelho) em relação aos pontos fatoriais (+1 e -1, pontos em azul), que existe uma tendência em se apresentar curvatura para as respostas resistência, largura, indentação e penetração.

Diferentemente do primeiro Fatorial, agora o tempo de pós-pressão apresenta-se como uma variável significativa para a resistência, o que pode ser notado pelo gráfico da Figura 5.14 (a) e confirmado pelo *P-value* do efeito desse fator sobre a resistência (0,004).

5.4.2.2. Análise das variáveis significativas

As Figuras 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 a seguir apresentam os gráficos de Pareto gerados para a influência dos fatores sobre cada resposta de interesse. O gráfico de Pareto determina a magnitude e a importância de cada fator sobre a resposta. Esse gráfico exibe o valor absoluto dos efeitos e apresenta uma linha de referência; qualquer efeito que passe a linha referência é estatisticamente significativo.

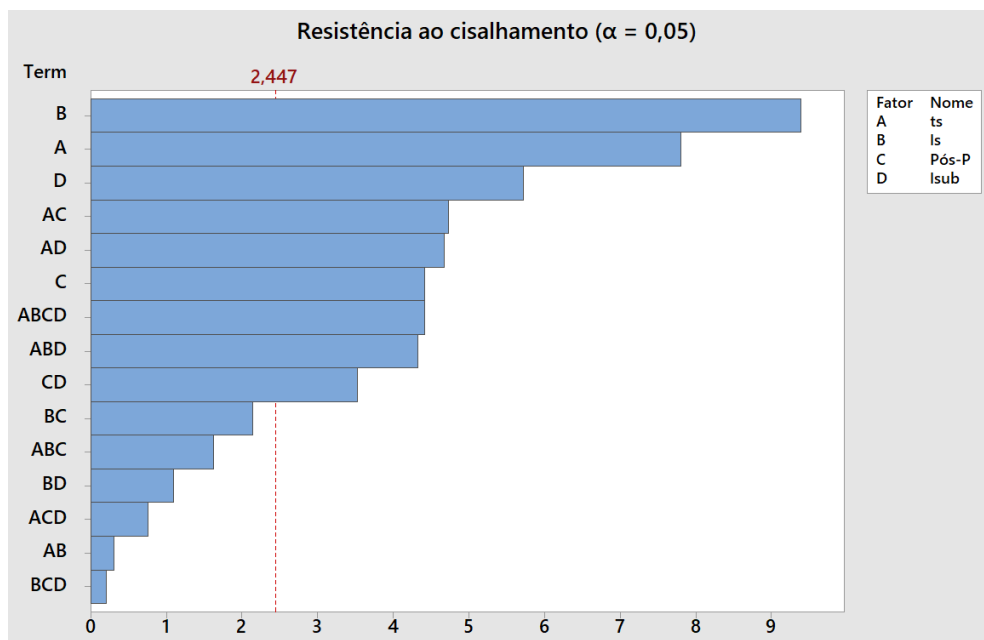


Figura 5.15 – Gráfico de Pareto para a resistência ao cisalhamento.

Fonte: A autora.

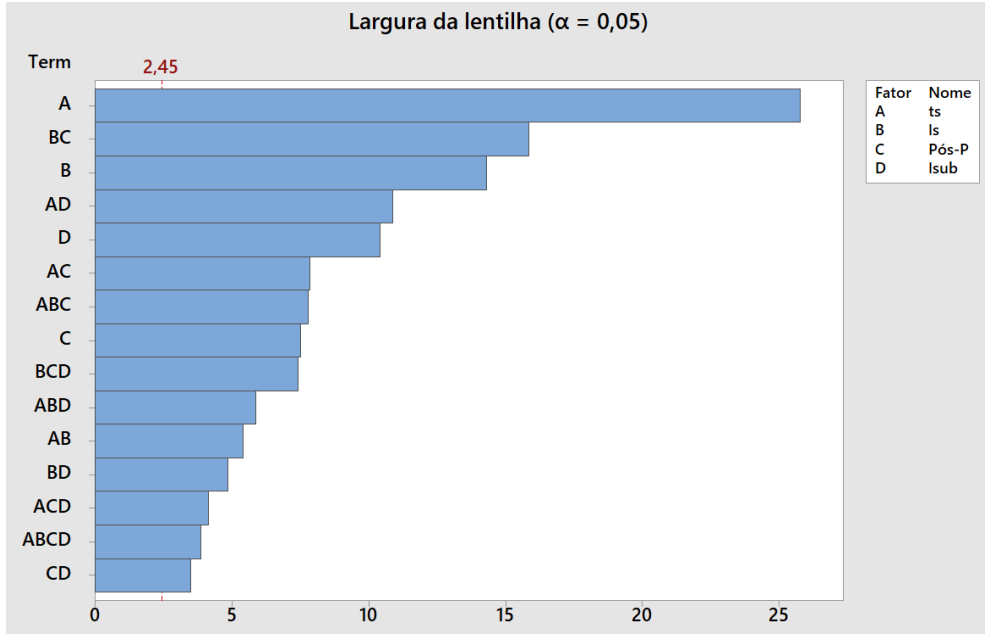


Figura 5.16 – Gráfico de Pareto para a largura da lentilha.
Fonte: A autora.

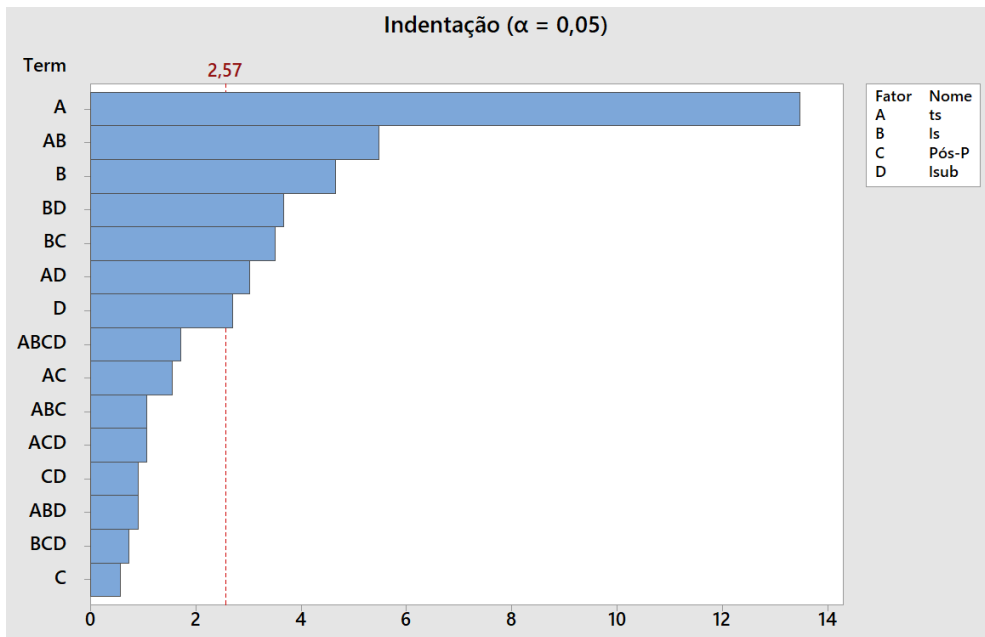


Figura 5.17 – Gráfico de Pareto para a indentação.
Fonte: A autora.

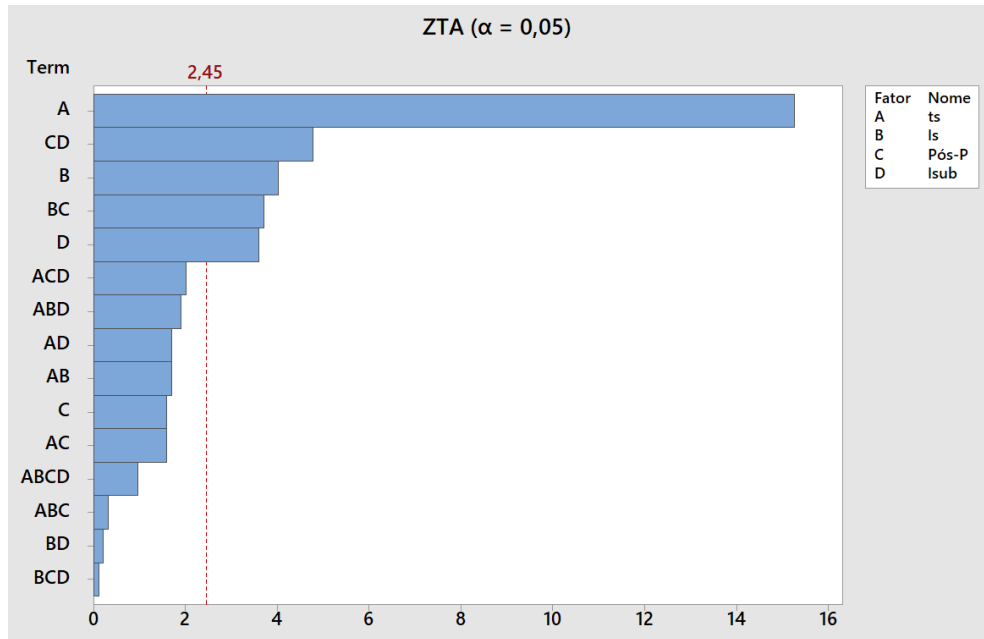


Figura 5.18 – Gráfico de Pareto para ZTA.
Fonte: A autora.

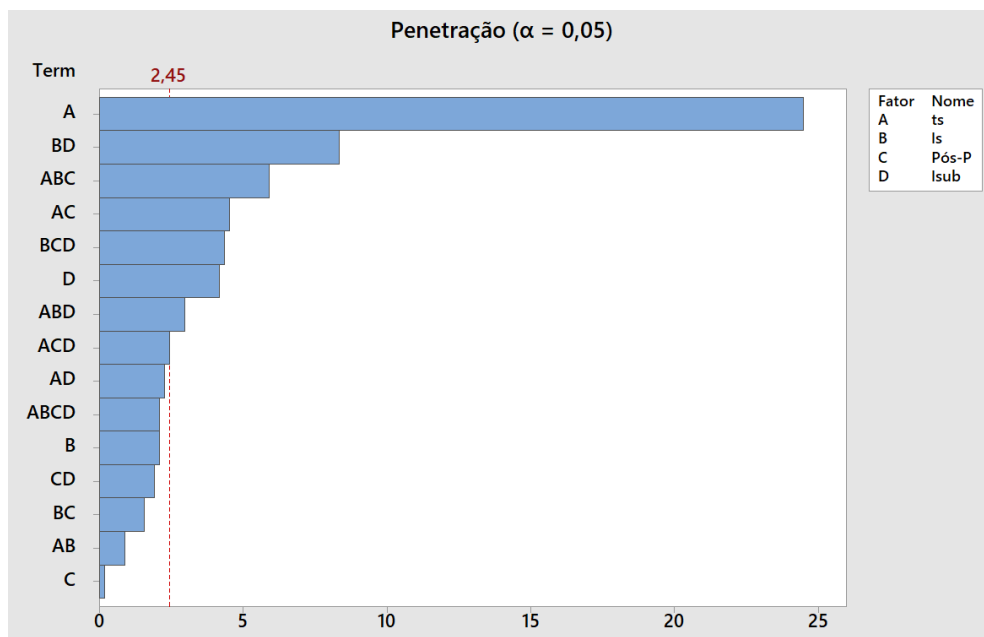


Figura 5.19 – Gráfico de Pareto para a penetração.
Fonte: A autora.

Os gráficos de Pareto confirmam que as quatro variáveis independentes escolhidas, anteriormente, na Fase Zero, são significativas para as respostas de interesse. As variáveis tempo de soldagem (A) e tempo de subida de corrente (D) foram significativas para todas as cinco respostas; a variável corrente de soldagem (B) foi significativa para quatro respostas; e a variável tempo de pós-pressão (C) foi significativa para duas respostas. Além disso, vários

efeitos de interação entre os parâmetros se mostraram significantes; esses efeitos das interações podem ser visualizados nos gráficos de interação entre os fatores, que são apresentados no Anexo B.

5.5. Fase Dois – Modelagem das Superfícies de Resposta (Arranjo Composto Central – CCD)

5.5.1. Níveis de trabalho e matriz experimental

Para a modelagem da superfície de resposta, foi empregado um Arranjo Composto Central (CCD).

A matriz do CCD, para 4 fatores, é composta por 31 testes, que são formados por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ($2^k = 2^4 = 16$ experimentos); um grupo de pontos axiais ($2*k = 2*4 = 8$ experimentos); e um conjunto de pontos centrais (7 experimentos).

Os níveis dos parâmetros foram os mesmos definidos no item 5.4.1 para o segundo Arranjo Fatorial Completo e podem ser observados na Tabela 5.8. Além disso, no CCD, há a adição de pontos axiais, que, de acordo com Montgomery (2013), representam os valores extremos dos fatores e são dados pelo dobro do número de fatores. Os valores dos parâmetros fixos foram mantidos os mesmos da etapa anterior (item 5.4.1).

A matriz experimental com respostas é apresentada na Tabela 5.9 e as observações acerca do ponto de solda, durante o processo de soldagem e após o ensaio de cisalhamento, são mostradas no Quadro 5.8. A coleta e a análise dos dados foram feitas de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 4.

Tabela 5.8 – Níveis dos parâmetros para o Arranjo Composto Central.

| Parâmetro | Nível -2 (Axial) | Nível -1 (Fatorial) | Nível 0 (Pt. Cent.) | Nível +1 (Fatorial) | Nível +2 (Axial) | Unidade |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------|
| Tempo de soldagem (ts) | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | ciclos |
| Corrente de soldagem (Is) | 4,5 (75%) | 4,8 (80%) | 5,1 (85%) | 5,4 (90%) | 5,7 (95%) | kA |
| Pós-pressão (Pós-P) | 5 | 20 | 35 | 50 | 65 | ciclos |
| Subida de corrente (Isub) | 0 | 7 | 14 | 21 | 28 | ciclos |

Fonte: A autora.

Tabela 5.9 – Matriz experimental para o Arranjo Composto Central com respostas.

| Teste | Parâmetros | | | | Respostas | | | | | |
|-------|------------|----|-------|------|--------------------|---------------|-----------------|-------------|----------------|----------------|
| | ts | Is | Pós-P | Isub | Resistência (N) | Larg. (mm) | Indent. (mm) | ZTA (mm) | Penet. (mm) | Separ. (mm) |
| CCD1 | 5 | 80 | 20 | 7 | 11764,52 | 3,80 | 0,10 | 0,55 | 1,30 | 0,11 |
| CCD2 | 13 | 80 | 20 | 7 | 13559,82 | 4,61 | 0,19 | 0,69 | 1,01 | 0,22 |
| CCD3 | 5 | 90 | 20 | 7 | 11555,68 | 4,00 | 0,11 | 0,54 | 1,14 | 0,06 |
| CCD4 | 13 | 90 | 20 | 7 | 16302,71 | 5,00 | 0,26 | 0,71 | 0,94 | 0,25 |
| CCD5 | 5 | 80 | 50 | 7 | 13193,52 | 3,66 | 0,08 | 0,52 | 1,16 | 0,05 |
| CCD6 | 13 | 80 | 50 | 7 | 14521,44 | 4,89 | 0,14 | 0,78 | 1,03 | 0,18 |
| CCD7 | 5 | 90 | 50 | 7 | 14863,25 | 4,54 | 0,10 | 0,63 | 1,14 | 0,13 |
| CCD8 | 13 | 90 | 50 | 7 | 16917,87 | 5,53 | 0,30 | 0,86 | 0,99 | 0,30 |
| CCD9 | 5 | 80 | 20 | 21 | 12465,90 | 5,20 | 0,18 | 0,61 | 1,12 | 0,18 |
| CCD10 | 13 | 80 | 20 | 21 | 16180,09 | 4,65 | 0,20 | 0,83 | 0,92 | 0,23 |
| CCD11 | 5 | 90 | 20 | 21 | 16084,31 | 4,19 | 0,12 | 0,66 | 1,16 | 0,12 |
| CCD12 | 13 | 90 | 20 | 21 | 15797,59 | 4,90 | 0,22 | 0,78 | 1,01 | 0,20 |
| CCD13 | 5 | 80 | 50 | 21 | 14469,04 | 4,02 | 0,13 | 0,54 | 1,08 | 0,04 |
| CCD14 | 13 | 80 | 50 | 21 | 13602,78 | 4,77 | 0,20 | 0,73 | 1,02 | 0,18 |
| CCD15 | 5 | 90 | 50 | 21 | 16618,62 | 4,93 | 0,14 | 0,67 | 1,19 | 0,13 |
| CCD16 | 13 | 90 | 50 | 21 | 16550,39 | 5,66 | 0,27 | 0,79 | 0,96 | 0,24 |
| CCD17 | 1 | 85 | 35 | 14 | 10924,83 | 3,47 | 0,06 | 0,52 | * | 0,08 |
| CCD18 | 17 | 85 | 35 | 14 | 16431,74 | 5,35 | 0,29 | 0,92 | 0,92 | 0,26 |
| CCD19 | 9 | 75 | 35 | 14 | 10667,82 | 4,01 | 0,11 | 0,71 | 1,23 | 0,10 |
| CCD20 | 9 | 95 | 35 | 14 | 16854,00 | 5,37 | 0,19 | 0,72 | 1,10 | 0,16 |
| CCD21 | 9 | 85 | 5 | 14 | 16000,51 | 4,91 | 0,12 | 0,66 | * | 0,11 |
| CCD22 | 9 | 85 | 65 | 14 | 16282,82 | 5,11 | 0,15 | 0,62 | 0,98 | 0,14 |
| CCD23 | 9 | 85 | 35 | 0 | 13823,30 | 4,47 | 0,10 | 0,55 | 1,24 | 0,11 |
| CCD24 | 9 | 85 | 35 | 28 | 15996,82 | 4,93 | 0,18 | 0,74 | 1,04 | 0,22 |
| CCD25 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16672,71 | 4,98 | 0,13 | 0,69 | 1,11 | 0,17 |
| CCD26 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16280,52 | 5,02 | 0,16 | 0,70 | 1,10 | 0,21 |
| CCD27 | 9 | 85 | 35 | 14 | 15573,64 | 4,96 | 0,16 | 0,71 | 1,08 | 0,15 |
| CCD28 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16135,03 | 5,01 | 0,13 | 0,66 | 1,11 | 0,15 |
| CCD29 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16495,14 | 5,11 | * | 0,66 | 1,10 | 0,21 |
| CCD30 | 9 | 85 | 35 | 14 | 15698,76 | 4,94 | 0,13 | 0,69 | 1,12 | 0,16 |
| CCD31 | 9 | 85 | 35 | 14 | 16089,39 | 5,00 | 0,12 | 0,65 | 1,08 | 0,14 |

Fonte: A autora.

Nota-se que três dados, um referente à indentação (CCD27) e dois referentes à penetração (CCD17 e CCD21), foram eliminados das análises, pois caracterizam *outliers*, que poderiam influenciar de maneira negativa a modelagem matemática das respostas.

Quadro 5.8 – Observações realizadas durante o processo de soldagem e após o ensaio de cisalhamento para os experimentos do Arranjo Composto Central.

| Teste | Observações | |
|--------------|----------------------|--|
| | Expulsão | Modo de falha |
| CCD1 | Sem expulsão | Interfacial |
| CCD2 | Muito pouca expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD3 | Bastante expulsão | Interfacial |
| CCD4 | Bastante expulsão | Interfacial |
| CCD5 | Sem expulsão | Interfacial |
| CCD6 | Sem expulsão | Interfacial |
| CCD7 | Média expulsão | Interfacial |
| CCD8 | Média expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD9 | Sem expulsão | Interfacial |
| CCD10 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD11 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA |
| CCD12 | Bastante expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD13 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD14 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD15 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA |
| CCD16 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD17 | Muito pouca expulsão | Interfacial |
| CCD18 | Média expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD19 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD20 | Média expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA |
| CCD21 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD22 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA |
| CCD23 | Bastante expulsão | Interfacial |
| CCD24 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD25 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento do ponto das duas chapas, fratura iniciada na ZTA |
| CCD26 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento do ponto das duas chapas, fratura iniciada na ZTA |
| CCD27 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento do ponto das duas chapas, fratura iniciada na ZTA |
| CCD28 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |
| CCD29 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA |
| CCD30 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com arrancamento total em uma chapa e parcial na outra, fratura iniciada na ZTA |
| CCD31 | Sem expulsão | <i>Pullout</i> , com fratura iniciada na ZTA |

Fonte: A autora.

5.5.2. Modelagem matemática das respostas

A partir dos dados experimentais trazidos na Tabela 5.10, foi possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas de interesse e os parâmetros do processo. De acordo com a Equação 2.4 (item 2.7.1), que mostra o modelo de superfície de resposta de segunda ordem para representar a relação aproximada entre uma dada resposta e as variáveis de entrada, pode-se escrever o modelo para o processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5 conforme a Equação 5.1 a seguir.

$$\begin{aligned}
 y = & \beta_0 + \beta_1 ts + \beta_2 Is + \beta_3 PósP + \beta_4 Isub + \beta_{11} ts^2 + \beta_{22} Is^2 + \beta_{33} PósP^2 \\
 & + \beta_{44} Isub^2 + \beta_{12} ts \cdot Is + \beta_{13} ts \cdot PósP + \beta_{14} ts \cdot Isub \\
 & + \beta_{23} Is \cdot PósP + \beta_{24} Is \cdot Isub + \beta_{34} PósP \cdot Isub
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Em que:

y = Resposta de interesse;

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ = Alvos definidos para as funções objetivo;

ts = Tempo de soldagem;

Is = Corrente de soldagem;

$PósP$ = Tempo de pós-pressão;

$Isub$ = Tempo de subida de corrente.

Os coeficientes foram estimados com o auxílio do *software* MINITAB®, que utiliza, para essa finalidade, o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). A Tabela 5.10 apresenta os coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos desenvolvidos para as respostas de interesse do presente estudo.

Tabela 5.10 – Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos.

| Coeficiente | Respostas | | | | |
|-------------------------|-------------|---------|------------|---------|------------|
| | Resistência | Largura | Indentação | ZTA | Penetração |
| <i>Constante</i> | 16135,0275 | 5,0029 | 0,1358 | 0,6786 | 1,0979 |
| <i>ts</i> | 976,3196 | 0,3929 | 0,0535 | 0,0933 | -0,0854 |
| <i>Is</i> | 1137,7356 | 0,2446 | 0,0190 | 0,0167 | -0,0158 |
| <i>PósP</i> | 316,2881 | 0,0854 | 0,0010 | 0,0033 | 0,0021 |
| <i>Isub</i> | 559,8723 | 0,1338 | 0,0135 | 0,0300 | -0,0267 |
| <i>ts²</i> | -609,1446 | -0,1575 | 0,0134 | 0,0103 | -0,0072 |
| <i>Is²</i> | -588,4892 | -0,0875 | 0,0065 | 0,0078 | 0,0141 |
| <i>PósP²</i> | 6,6994 | -0,0075 | 0,0021 | -0,0104 | -0,0359 |
| <i>Isub²</i> | -301,2022 | -0,0850 | 0,0034 | -0,0085 | 0,0078 |
| <i>ts.Is</i> | 29,7230 | 0,0744 | 0,0209 | -0,0100 | -0,0031 |
| <i>ts.PósP</i> | -470,1096 | 0,1081 | 0,0059 | 0,0094 | 0,0163 |
| <i>ts.Isub</i> | -464,4936 | -0,1494 | -0,0116 | -0,0100 | 0,0081 |
| <i>Is.PósP</i> | 212,0873 | 0,2181 | 0,0134 | 0,0219 | 0,0056 |
| <i>Is.Isub</i> | 108,3058 | -0,0669 | -0,0141 | -0,0012 | 0,0300 |
| <i>PósP.Isub</i> | -350,0259 | -0,0481 | 0,0034 | -0,0281 | 0,0069 |

Fonte: A autora.

5.5.3. Adequação e ajuste dos modelos

Os modelos foram ajustados a partir da Análise de Variância (ANOVA) feita no *software* MINITAB®. A Tabela 5.11 apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 5.11 – Análise de Variância (ANOVA).

| Resposta | Graus de liberdade | | Adj. SS | | Adj. MS | | <i>P-value</i> | R² (adj.) (%) |
|--------------------|--------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------------|---|
| | Regressão | Residual | Regressão | Residual | Regressão | Residual | | |
| Resistência | 14 | 16 | 93852108 | 12163748 | 6703722 | 760234 | 0,000 | 78,49% |
| Largura | 14 | 16 | 8,225 | 0,784 | 0,588 | 0,049 | 0,000 | 83,68% |
| Indentação | 14 | 15 | 0,103 | 0,006 | 0,007 | 0,000 | 0,000 | 88,67% |
| ZTA | 14 | 16 | 0,274 | 0,017 | 0,020 | 0,001 | 0,000 | 89,30% |
| Penetração | 14 | 14 | 0,227 | 0,028 | 0,016 | 0,002 | 0,000 | 77,84% |

Fonte: A autora.

Todos os modelos desenvolvidos são adequados para representar o sistema real, pois apresentam *P-value* inferior a 5% de significância. A ANOVA também indica que três dos cinco modelos apresentaram bons ajustes, pois os valores de R² (adj.) foram superiores a 80%. Para resistência e penetração o ajuste obtido foi de 78,49% e 77,84%, respectivamente, não considerados ajustes excelentes, porém satisfatórios.

Após a verificação da adequação dos modelos, estes foram reduzidos pela eliminação dos termos não significativos. Adotou-se como critério para remoção dos termos não significativos o aumento do valor de R² (adj.) e a redução da variância S dos modelos.

As Equações de 5.2 a 5.6 apresentam os modelos finais e a Tabela 5.12 mostra a comparação entre os ajustes dos modelos completos e dos modelos reduzidos.

$$\begin{aligned}
 \text{Resistência} &= 16141,9 + 976,3ts + 1137,7Is + 316,3PósP + 559,9Isub \\
 &- 609,9ts^2 - 589,2Is^2 - 301,9Iub^2 - 470,1ts.PósP \\
 &- 464,5ts.Isub + 212,1Is.PósP - 350,0PósP.Isub
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Largura} &= 4,9952 + 0,3929 ts + 0,2446 Is + 0,0854PósP + 0,1337Isub \\
 &- 0,1567ts^2 - 0,0867Is^2 - 0,0842Isub^2 + 0,0744ts.Is \\
 &+ 0,1081ts.PósP - 0,1494ts.Isub + 0,2181Is.PósP \\
 &- 0,0669Is.Isub
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Indentação} = & 0,14135 + 0,05354ts + 0,01896Is + 0,00104PósP \\
 & + 0,01354Isub + 0,01270ts^2 + 0,00582Is^2 + 0,02094ts.Is \\
 & + 0,00594ts.PósP - 0,01156ts.Isub + 0,01344Is.PósP \\
 & - 0,01406Is.Isub
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

$$\begin{aligned}
 ZTA = & 0,6786 + 0,09333ts + 0,01667Is + 0,00333PósP + 0,03000Isub \\
 & + 0,01025ts^2 + 0,00775Is^2 - 0,01037PósP^2 - 0,00850Isub^2 \\
 & - 0,01000ts.Is + 0,00937ts.PósP - 0,01000ts.Isub \\
 & + 0,02188Is.PósP - 0,02812PósP.Isub
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Penetração} = & 1,11247 - 0,08975ts - 0,01583Is + 0,00124PósP \\
 & - 0,02667Isub - 0,03748PósP^2 + 0,01625ts.PósP \\
 & + 0,03000Is.Isub
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Tabela 5.12 – Comparação entre os ajustes dos modelos completos e dos modelos finais.

| Resposta | R ² (adj.) (%) | | S | |
|--------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Modelo completo | Modelo reduzido | Modelo completo | Modelo Reduzido |
| Resistência | 78,49% | 81,58% | 871,9140 | 806,7760 |
| Largura | 83,68% | 84,78% | 0,2214 | 0,2138 |
| Indentação | 88,67% | 89,70% | 0,0207 | 0,0197 |
| ZTA | 89,30% | 89,91% | 0,0322 | 0,0312 |
| Penetração | 77,84% | 80,21% | 0,0449 | 0,0425 |

Fonte: A autora.

Os modelos finais desenvolvidos são expressões de grande confiabilidade, pois todos eles apresentaram ajustes superiores a 80%.

5.5.4. Análise dos resíduos

A análise de resíduos é fundamental para garantir que os modelos matemáticos desenvolvidos representam adequadamente as respostas de interesse. Os resíduos são definidos como a diferença entre o valor previsto do modelo e o valor experimental observado para uma certa condição; eles devem ser normais, aleatórios e não correlacionados (MONTGOMERY, 2013). Os resíduos relacionados aos modelos reduzidos foram analisados com o auxílio do *software* MINITAB® e os resultados são apresentados na Tabela 5.13 abaixo.

Tabela 5.13 – Análise dos resíduos.

| Análise dos resíduos | | Resistência | Largura | Indentação | ZTA | Penetração |
|------------------------------|--------------------|-------------|---------|------------|-------|------------|
| Teste de normalidade | <i>AD</i> | 0,375 | 0,626 | 0,279 | 0,311 | 0,205 |
| | <i>P-value</i> | 0,393 | 0,094 | 0,622 | 0,534 | 0,858 |
| Análise de correlação | <i>Pearson</i> | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | <i>P-value</i> | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Padrões de não aleatoriedade | <i>Clustering</i> | 0,575 | 0,430 | 0,645 | 0,575 | 0,717 |
| | <i>Mixtures</i> | 0,425 | 0,570 | 0,355 | 0,425 | 0,283 |
| | <i>Trends</i> | 0,442 | 0,879 | 0,724 | 0,879 | 0,675 |
| | <i>Oscillation</i> | 0,558 | 0,121 | 0,276 | 0,121 | 0,325 |

Fonte: A autora.

O teste de normalidade apresentou coeficientes de *Anderson-Darling (AD)* menores que um e *P-values* maiores que 5% de significância, o que indica que os resíduos são normais para todas as respostas.

Os resíduos não são correlacionados com os *fitted values*, pois os *P-values* de correlação foram todos iguais a 1,000 (maiores que 5% de significância) e os coeficientes de *Pearson* foram iguais a 0,000.

A análise de aleatoriedade é feita através de quatro testes que tentam identificar padrões de não aleatoriedade, são eles: *Clustering*, *Mixtures*, *Trends* e *Oscillation*. Os *P-values* dos quatro testes para as cinco respostas foram maiores que 5% de significância, o que indica que nenhum padrão foi encontrado, ou seja, os resíduos são aleatórios.

Deste modo, verifica-se que os resíduos se encontram adequados, já que foram caracterizados como normais, não correlacionados e aleatórios. Os gráficos gerados pela análise de resíduos são mostrados no Anexo C.

Após o desenvolvimento dos modelos finais e da análise dos resíduos, prossegue-se para a análise dos efeitos principais das variáveis independentes sobre as variáveis de saída, que permite entender como as respostas do processo se comportam quando alterações são feitas nos parâmetros de entrada. A partir da variação dos parâmetros cujo efeito se deseja estudar, enquanto os demais são mantidos constantes, é possível conhecer como esses fatores influenciam as respostas.

5.5.5. Efeitos principais dos parâmetros sobre a resistência ao cisalhamento

A Figura 5.20 mostra como os efeitos principais influenciam a resistência ao cisalhamento da solda a ponto do aço 22MnB5.

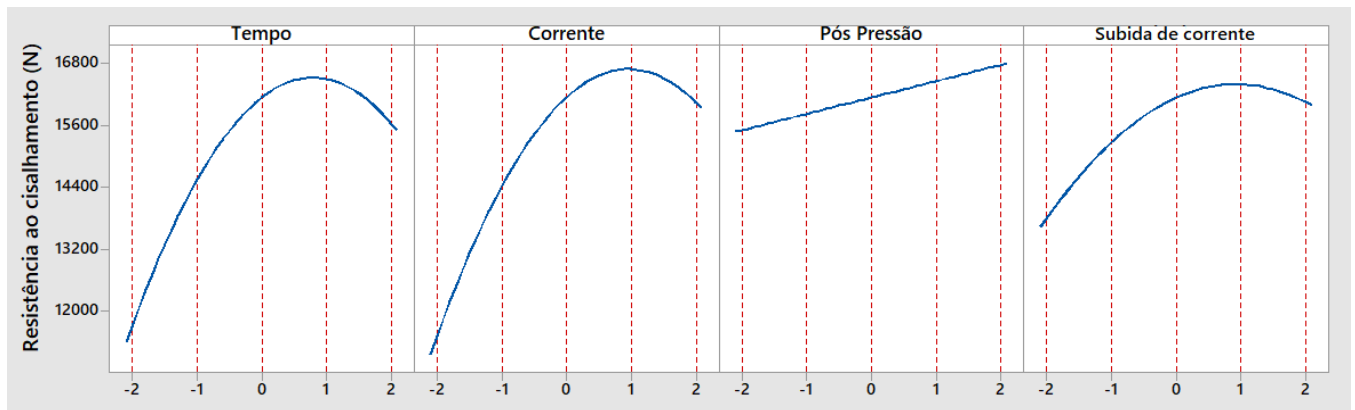


Figura 5.20 – Efeitos principais sobre a resistência ao cisalhamento.

Fonte: A autora.

Observa-se que os efeitos principais dos parâmetros sobre a resistência ao cisalhamento, com exceção do efeito do tempo de pós-pressão, apresentaram um ponto de curvatura. Para o tempo de soldagem, o valor máximo de resistência foi obtido entre os níveis 0 e +1 (9 e 13 ciclos, respectivamente). Já para corrente de soldagem, a resistência máxima foi alcançada próximo ao nível +1 (5,4 kA, 90% da corrente máxima). Menores valores de resistência foram atingidos nos níveis extremos de tempo e corrente de soldagem. A resistência ao cisalhamento cresce em função do aumento do tamanho da solda, que está diretamente relacionado à geração de calor, a qual, por sua vez, é dependente do tempo e da corrente empregados; assim, uma maior resistência pode ser obtida com o aumento nesses parâmetros. Entretanto, quando há defeitos causados pela expulsão de material, a resistência ao cisalhamento começa a cair, o que explica o ponto máximo de curvatura para a resistência obtido em relação ao tempo e à corrente e posterior declínio nos valores dessa resposta.

O tempo de subida de corrente apresentou ponto máximo de curvatura para a resistência ao cisalhamento próximo ao nível +1 (21 ciclos), confirmando a teoria de que esse parâmetro é importante para fazer com que a corrente aumente gradualmente e evite, assim, a expulsão de material, que diminui a resistência da junta de solda. Além disso, o valor máximo de resistência atingido próximo a 21 ciclos, confirma o exposto por Bacic Junior (2016) de que, em uma consideração individual dos parâmetros, 20 ciclos de tempo de subida de corrente é um valor ótimo para o processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5.

Com relação ao tempo de pós-pressão, o aumento nesse parâmetro levou ao aumento da resistência ao cisalhamento. O tempo de pós-pressão tem por finalidade permitir o resfriamento e a solidificação adequados da lentilha de solda até que esta tenha resistência mecânica suficiente para manter as chapas de trabalho unidas; deste modo, um tempo de pós-pressão maior garante maior estabilidade para a solidificação e, conseqüentemente, melhor fixação entre as peças, resultando em maior resistência ao cisalhamento. Entretanto, o efeito individual do tempo de pós-pressão não se mostrou significativo para o modelo que representa a resistência ao cisalhamento, visto que seu *P-value* (0,070) foi maior do que o nível de significância de 0,05.

5.5.5.1. Análise da expulsão de material

Nota-se, pelo Quadro 5.8, que 10 dos 31 experimentos apresentaram expulsão, que foi classificada em muito pouca, média e bastante. Entretanto, a análise dos dados não mostrou queda significativa da resistência ao cisalhamento nos pontos que tiveram expulsão de material, ou seja, nem sempre a expulsão gera defeitos que prejudicam a resistência do ponto de solda.

Como explicado anteriormente no referencial teórico e na revisão de pesquisas anteriores, existe uma forte dependência entre a resistência ao cisalhamento e o tamanho da solda, sendo que os mesmos crescem com o aumento na corrente de soldagem, desde que não haja defeitos causados pela expulsão de material. Sob elevados valores de corrente, apesar de ser obtido aumento no tamanho da solda, a resistência ao cisalhamento diminui, o que provavelmente se deve aos defeitos causados pela expulsão de material, corroborando os resultados obtidos por Choi *et al.* (2011), Jong *et al.* (2011), Huin *et al.* (2016) e Liang *et al.* (2016), autores abordados na análise de pesquisas anteriores sobre a soldagem a ponto do aço 22MnB5. Há um limite de corrente para a soldagem a ponto do aço 22MnB5, próximo a 90% (5,4 kA) da corrente máxima do equipamento, após o qual a lentilha continua a crescer, mas a carga de ruptura começa a cair, conforme apresenta a Figura 5.21.

Além disso, é possível observar, pela Tabela 5.9 e pelo Quadro 5.8, que o tempo de subida de corrente foi eficiente em reduzir a expulsão de material, como mostra a comparação entre os pontos que foram feitos com 7 ciclos (CCD1 a CC8) e os pontos que foram feitos com 21 ciclos de tempo de subida de corrente (CCD9 a CC16); entre estes, apenas um apresentou expulsão de material e a média de resistência ao cisalhamento foi de 15221 N, com média de tamanho da lentilha de 4,79 mm, enquanto que, entre os primeiros, 5 dos 8 pontos tiveram expulsão de material e a média de resistência ao cisalhamento foi de 14085 N, com média de tamanho da lentilha de 4,50 mm.

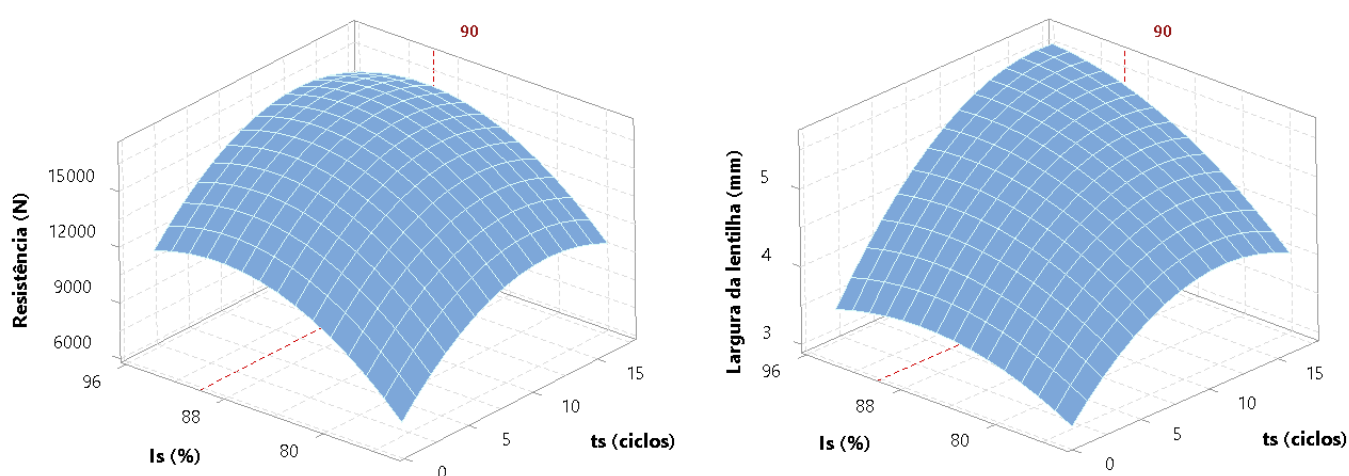


Figura 5.21 – Comparação entre o aumento da resistência ao cisalhamento e o aumento da largura da lentilha.
Fonte: A autora.

5.5.5.2. Análise dos modos de falha

A Figura 5.22 a seguir relaciona a resistência ao cisalhamento com o tamanho da solda. Os pontos marcados em roxo são aqueles que apresentaram modo de falha interfacial. Observa-se que apenas um desses nove pontos, o CCD9, teve uma queda significativa na resistência ao cisalhamento quando comparado ao ponto imediatamente anterior no gráfico, o que pode caracterizar um *outlier*. O fato de oito dos nove pontos que fraturaram por falha interfacial não terem mostrado queda brusca na resistência ao cisalhamento corrobora os estudos analisados na revisão de pesquisas anteriores no ponto em que mostra que o aumento da carga de ruptura e do tamanho da solda, para o aço 22MnB5, são independentes do modo de falha. Acredita-se que esse tipo de falha ocorra pela presença de entalhes afiados na fronteira da lentilha assim como pela alta dureza e microestrutura frágil da solda. Existe forte dependência da carga de ruptura em relação ao tamanho do ponto sem que haja relação dos mesmos com o tipo de fratura sofrido pela solda.

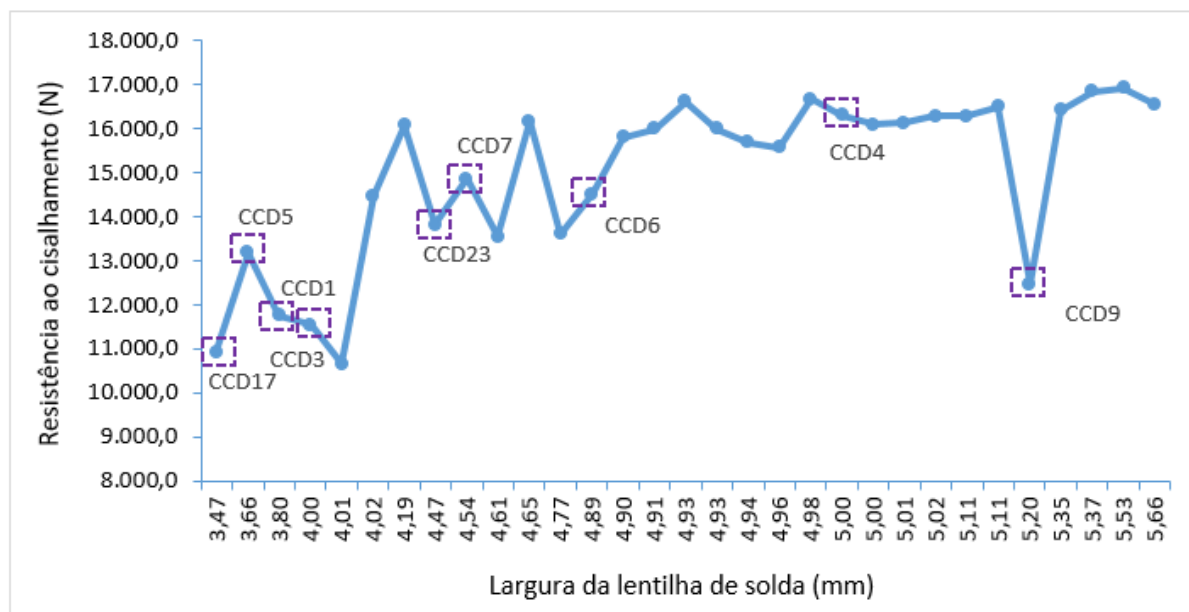


Figura 5.22 – Gráfico de relação entre a resistência e o tamanho da solda para o Arranjo CCD.
Fonte: A autora.

As amostras que falharam por *pullout*, independente de terem arrancamento total ou parcial dos pontos, tiveram a fratura iniciada na Zona Termicamente Afetada (ZTA), visto que, para os materiais estampados a quente, devido à menor dureza da ZTA em relação ao metal de base, a falha se inicia na mesma, resultando na combinação botão e furo sem rasgamento da chapa.

De acordo com os trabalhos abordados na análise de pesquisas anteriores, para o aço 22MnB5 totalmente endurecido, o metal de base é composto inteiramente por martensita, apresentando dureza bastante elevada, ao passo que a área da ZTA mais próxima ao metal de base é composta por martensita revenida e ferrita, o que diminui significativamente a dureza nessa região. Além disso, Eller *et al.* (2016) mostram que o material totalmente endurecido dificilmente apresentou alguma deformação no metal de base, praticamente todas as deformações foram localizadas na ZTA. Deste modo, as falhas por *pullout* ocorridas no presente estudo sobre o aço 22MnB5 se iniciaram na ZTA devido ao fato de que os aços 22MnB5 mais endurecidos, quando submetidos a um esforço de carga, apresentam deformações localizadas na zona com diminuição de dureza da ZTA.

As imagens do modo de falha para cada um dos 31 experimentos do Arranjo CCD são mostradas no Anexo D.

5.5.6. Efeitos principais dos parâmetros sobre a largura da lentilha

Os efeitos principais dos parâmetros de soldagem a ponto sobre a largura da lentilha são mostrados na Figura 5.23 abaixo.

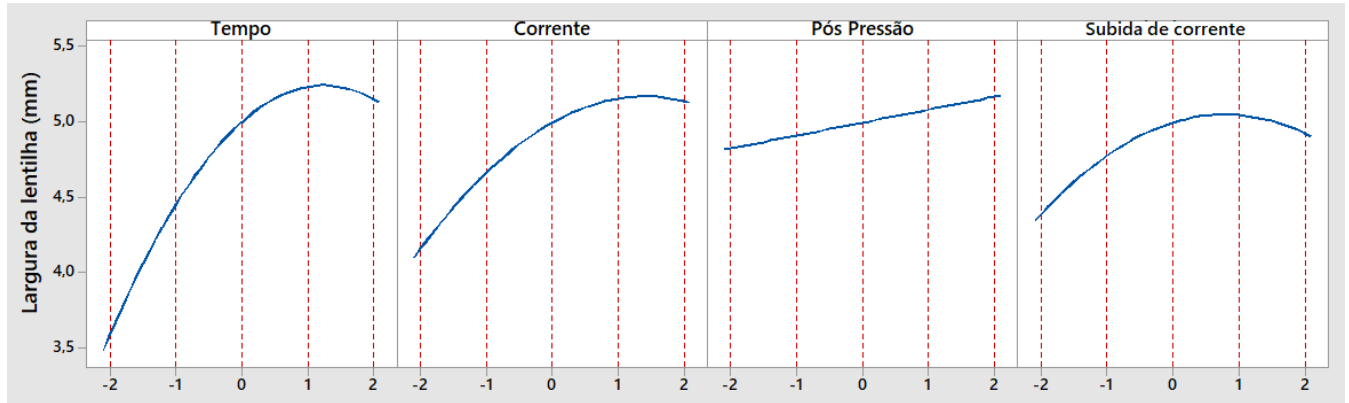


Figura 5.23 – Efeitos principais sobre a largura da lentilha.
Fonte: A autora.

Similar ao ocorrido para a resistência ao cisalhamento, três dos quatro parâmetros apresentaram curva com ponto de curvatura. Porém, para a largura da lentilha, o valor máximo foi obtido em níveis mais elevados tanto de tempo quanto de corrente. Com altos níveis de expulsão, o volume da lentilha diminui e, por consequência, seu tamanho também. Para o tempo, a largura máxima foi atingida próximo ao nível +1 (13 ciclos) e para a corrente, a maior largura da lentilha foi alcançada entre os níveis +1 e +2 (5,4 e 5,7 kA, 90% e 95% da corrente máxima, respectivamente).

Como ocorrido na resistência ao cisalhamento, o efeito do tempo de subida de corrente produziu a maior largura da lentilha próximo ao nível +1 (21 ciclos).

O aumento no tamanho da solda, assim como o aumento na resistência ao cisalhamento, está positivamente relacionado ao aumento do tempo de pós-pressão, visto que o aumento nos níveis desse parâmetro melhora a estabilidade de resfriamento e a solidificação do ponto de solda. Todavia, o tempo de pós-pressão não se mostrou significativo no modelo que representa a largura do cordão, dado que seu *P-value* de 0,066 é superior ao nível de significância (0,05).

5.5.7. Efeitos principais dos parâmetros sobre a indentação

A Figura 5.24 apresenta os efeitos principais dos parâmetros sobre a indentação.

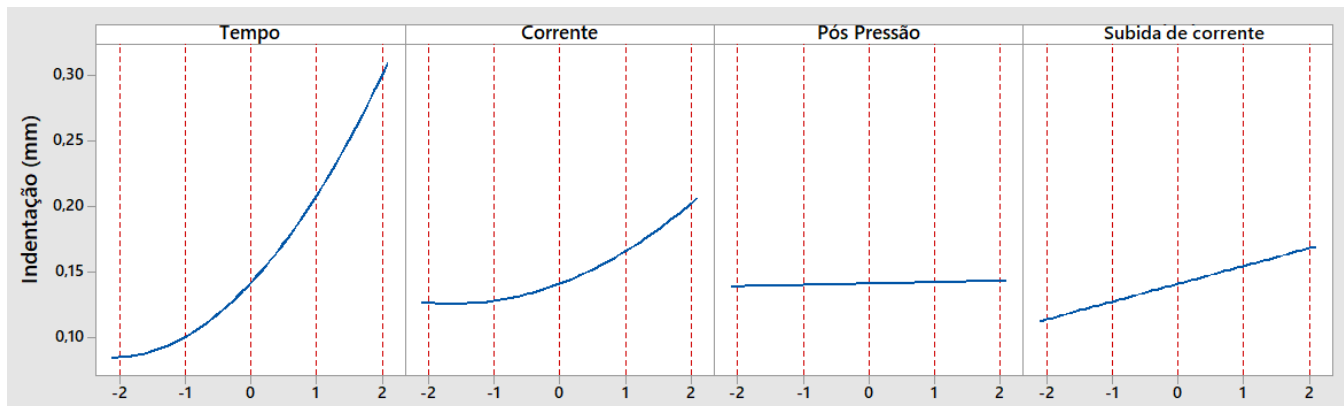


Figura 5.24 – Efeitos principais sobre a indentação.

Fonte: A autora.

Entre os quatro parâmetros avaliados, apenas um, o tempo de pós-pressão, não apresentou efeito significativo sobre a indentação, o que pode ser observado claramente no gráfico da Figura 5.24 acima e também pelo *P-value* desse termo do modelo gerado para a indentação, que foi de 0,799, muito acima do nível de significância de 0,05.

O aumento no tempo de soldagem, na corrente de soldagem e no tempo de subida de corrente causou aumento na profundidade da indentação, visto que estas variáveis estão diretamente ligadas à geração de calor e a indentação é causada por deformações ocorridas nas chapas devido ao calor produzido durante o processo de soldagem a ponto.

5.5.7.1. Análise da separação entre as chapas

O gráfico de correlação entre a separação das chapas e a indentação é mostrado na Figura 5.25. Observa-se que, assim como para os experimentos do primeiro Fatorial Completo, existe uma forte correlação positiva entre a separação das chapas e a indentação, pois o coeficiente de correlação foi de 0,873 e o *P-value* de correlação foi 0,000 (menor do 0,05 de significância).

Entre os quatro pontos com maiores separação e indentação, três deles, CCD4, CCD8 e CCD18, apresentaram expulsão de material.

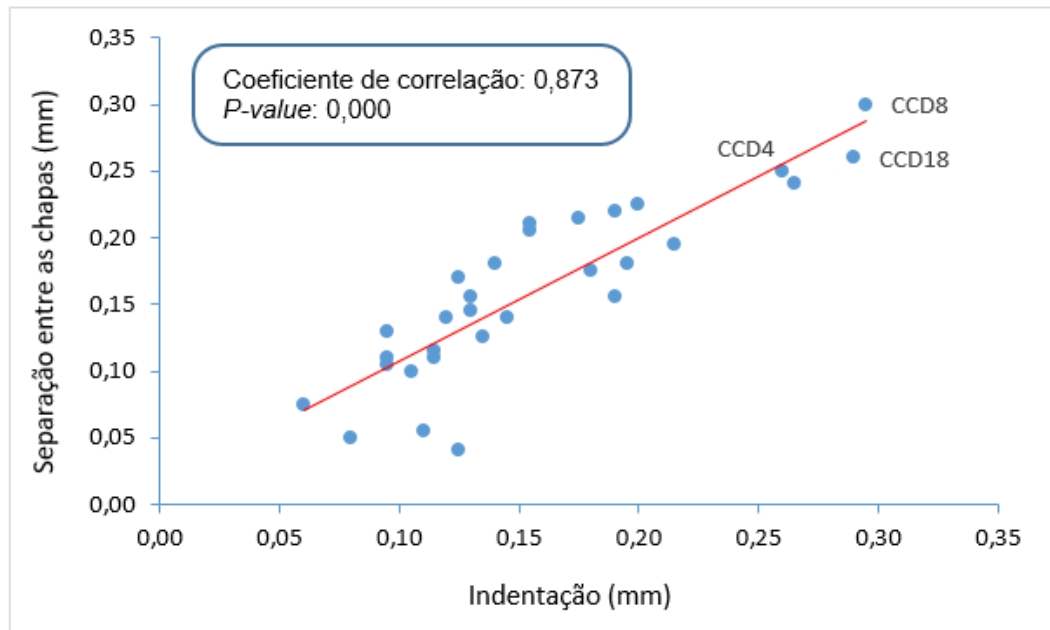


Figura 5.25 – Gráfico de dispersão entre a separação das chapas e a indentação para o Arranjo CCD.
Fonte: A autora.

5.5.8. Efeitos principais dos parâmetros sobre a ZTA

O comportamento da Zona Termicamente Afetada (ZTA), quando os parâmetros de entrada são variados, é apresentado na Figura 5.26.

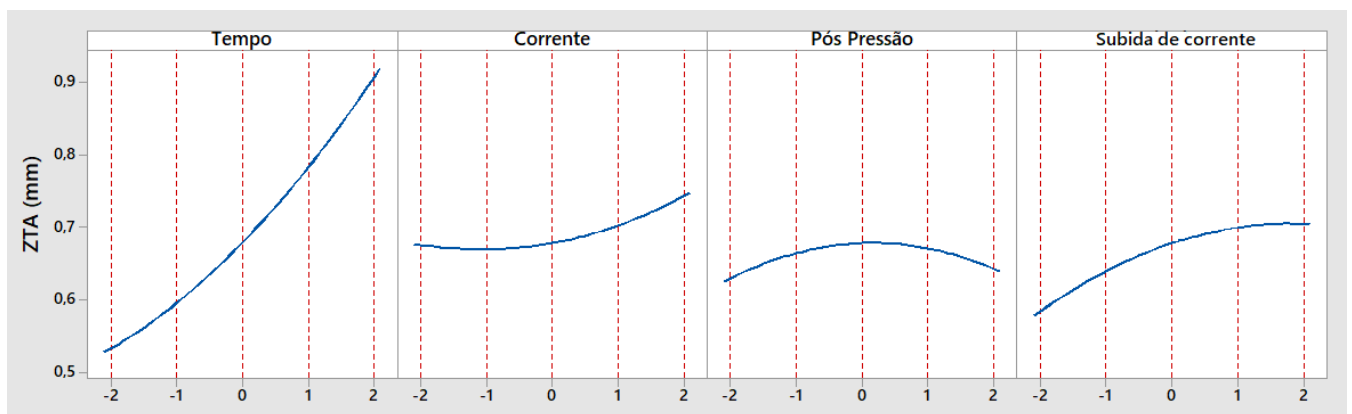


Figura 5.26 – Efeitos principais sobre a ZTA.
Fonte: A autora.

A variação dos níveis do tempo de soldagem, dentre os efeitos dos parâmetros principais, provocou a maior variação no tamanho da ZTA, sendo que o aumento na ZTA foi diretamente proporcional ao aumento do tempo, visto que um maior tempo de soldagem implica

em maior geração de calor e, por conseguinte, uma área maior é afetada pelas transformações térmicas que acontecem durante o processo de soldagem.

O efeito da corrente de soldagem passou a exercer influência sobre a ZTA a partir de valores próximos ao nível 0 (5,1 kA, 85% da corrente máxima). Com o aumento dos valores de corrente, a ZTA também aumentou, dado que, assim como o tempo de soldagem, a corrente está positivamente relacionada à geração de calor e, quanto mais calor gerado, maior é região afetada pelo ciclo térmico do processo de soldagem.

O aumento no nível do tempo de subida de corrente levou ao aumento da ZTA, visto que esse parâmetro é positivamente relacionado à geração de calor. Além disso, para os níveis +1 e +2 (21 e 28 ciclos, respectivamente), o tempo de subida de corrente não causou variações significativas na ZTA.

Novamente, a alteração nos níveis do tempo de pós-pressão, individualmente, não se mostrou significativa, pois seu efeito sobre a ZTA apresentou *P-value* de 0,608, bem superior ao nível de significância de 0,05.

5.5.9. Efeitos principais dos parâmetros sobre a penetração

A Figura 5.27 a seguir mostra os efeitos dos parâmetros de soldagem a ponto sobre a resposta penetração.

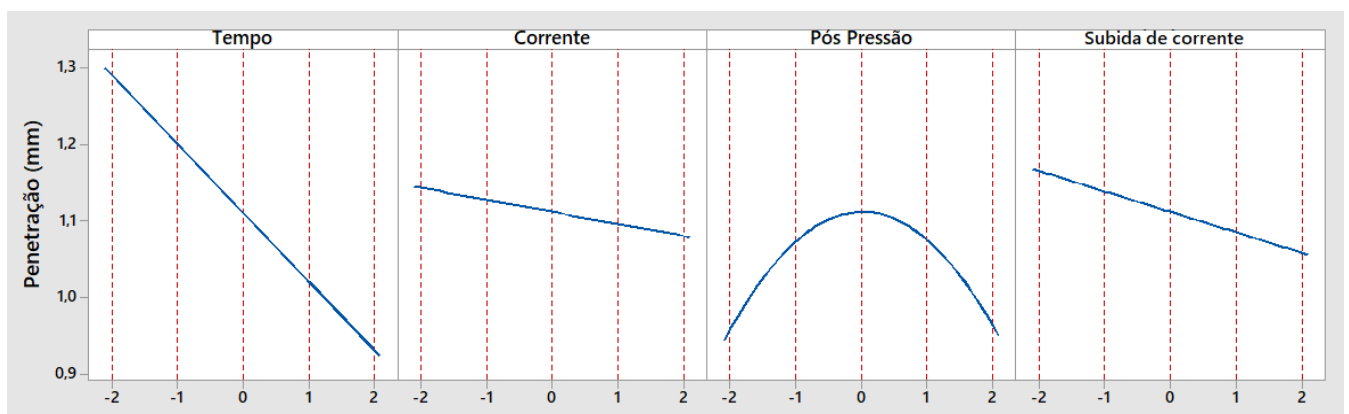


Figura 5.27 – Efeitos principais sobre a Penetração.

Fonte: A autora.

O tempo de soldagem influenciou de forma negativa a penetração, pois, conforme explicado por Luo *et al.* (2016), apesar de o calor gerado aumentar com o prolongamento do tempo de soldagem, o calor perdido também aumenta, diminuindo o aporte térmico disponível para fundir o material. A Tabela 5.9 confirma esse fato, pois mostra que a diminuição do tempo

de soldagem foi eficiente em aumentar a taxa de penetração, como pode ser visto pela comparação entre os pares de pontos CCD1-CCD2, CCD3-CCD4, CCD5-CCD6, CCD7-CCD8, CCD9-CCD10, CCD11-CCD12, CCD13-CCD4 e CCD5-CCD16.

A corrente de soldagem e o tempo de subida de corrente, parâmetros que estão diretamente ligados à produção de calor, assim como o tempo de soldagem, também exerceram influência negativa sobre a penetração, o que vai ao encontro dos resultados obtidos por Luo *et al.* (2016). Se correntes muito altas são empregadas, a lentilha de solda cresce de modo acelerado, diminuindo a taxa de penetração.

O efeito do tempo de pós-pressão individualmente não se mostrou significativo para a penetração; seu *P-value* foi de 0,904, muito superior ao nível de significância de 0,05.

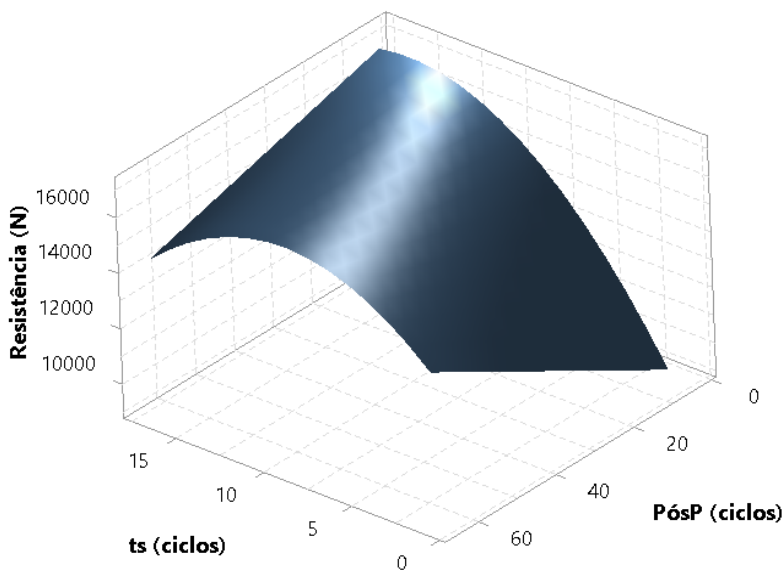
Apesar de o efeito individual do tempo de pós-pressão não ter sido significativo para nenhuma das respostas, as interações deste com outros parâmetros foram significativas em vários casos. Além disso, outras interações entre os parâmetros também se comportaram como fatores significativos sobre os resultados do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5. Para analisar o efeito de tais interações significativas (*P-value* < 0,05), foram construídas superfícies de respostas e gráficos de interação entre os parâmetros. Os resultados são apresentados a seguir.

5.5.10. Efeitos das interações entre os parâmetros

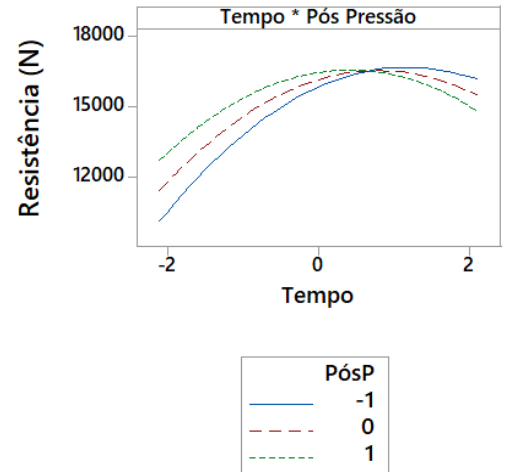
As Figuras 5.28 (a), 5.28 (b), 5.29 (a) e 5.29 (b) apresentam os efeitos das interações sobre a resistência ao cisalhamento.

Observa-se que a redução do tempo de pós-pressão combinada com um tempo de soldagem próximo a 13 ciclos resulta em resistências ao cisalhamento mais elevadas (Figuras 5.28 (a) e 5.28 (b)).

O tempo de soldagem de, aproximadamente, 13 ciclos juntamente com o tempo de subida de corrente próximo a 10 ciclos proporcionam aumento na resistência ao cisalhamento (Figuras 5.29 (a) e 5.29 (b)).



(a)

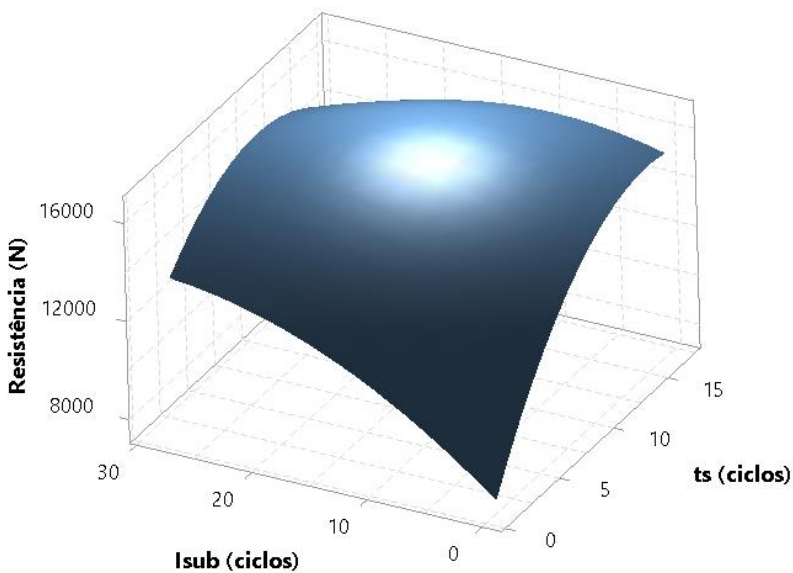


(b)

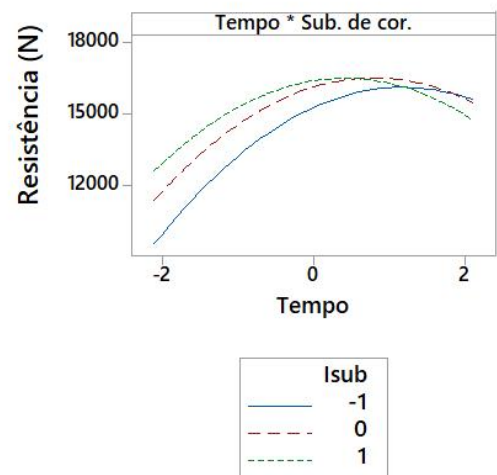
Figura 5.28 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a resistência ao cisalhamento ($I_s = 85 \text{ kA}$; $I_{sub} = 14 \text{ ciclos}$).

Figura 5.28 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a resistência ao cisalhamento.

Fonte: A autora.



(a)



(b)

Figura 5.29 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a resistência ao cisalhamento ($I_s = 85 \text{ kA}$; PósP = 35 ciclos).

Figura 5.29 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a resistência ao cisalhamento.

Fonte: A autora.

Os efeitos das interações sobre a largura da lentilha de solda são apresentados nas Figuras 5.30 (a), 5.30 (b), 5.31 (a) e 5.31 (b).

A análise da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente mostra que o aumento do primeiro parâmetro combinado com a diminuição do segundo permite a obtenção de lentilhas de maior tamanho, o que pode ser observado nas Figuras 5.30 (a) e 5.30 (b).

Um aumento considerável na largura da lentilha também pode ser obtido com o aumento simultâneo da corrente de soldagem e do tempo de pós-pressão (Figuras 5.31 (a) e 5.31 (b)), pois a o tamanho da solda está diretamente relacionado à corrente, além do que o maior tempo de pós-pressão fornece mais estabilidade para a solidificação da lentilha.

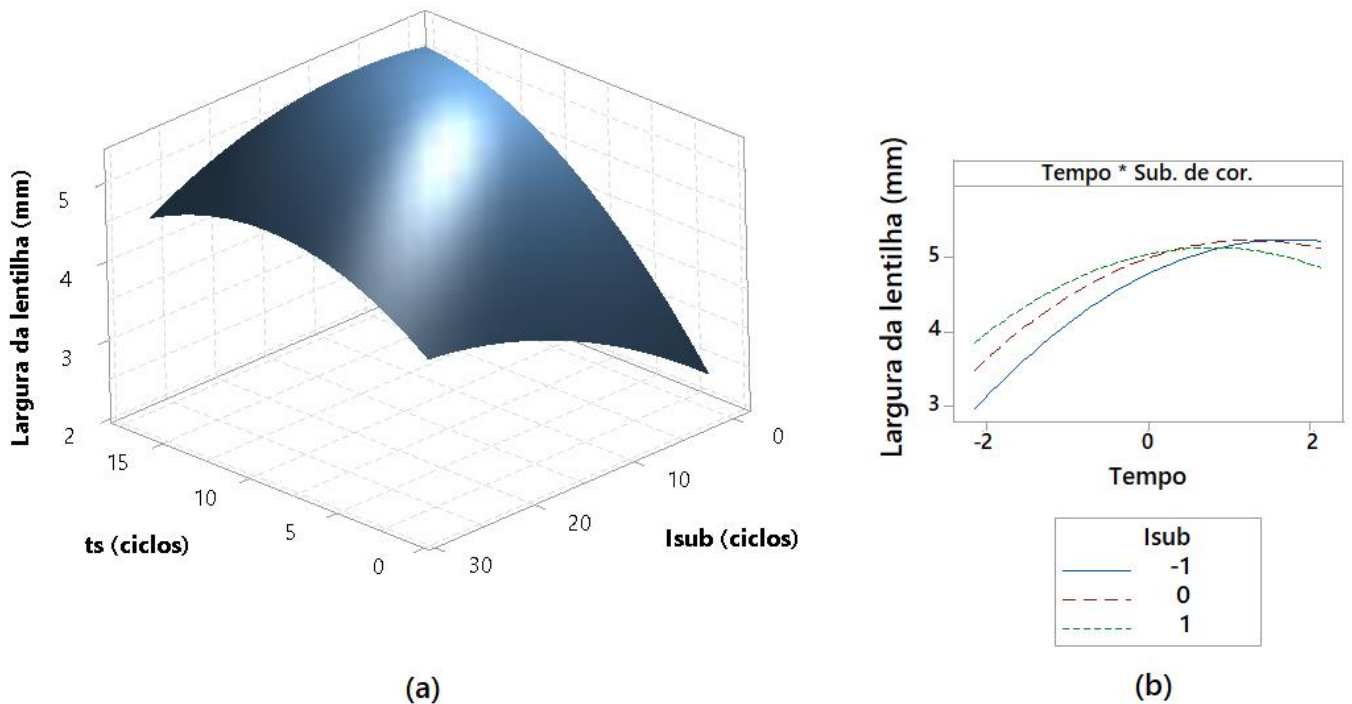


Figura 5.30 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a largura da lentilha ($I_s = 85$ kA; PósP = 35 ciclos).

Figura 5.30 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a largura da lentilha.

Fonte: A autora.

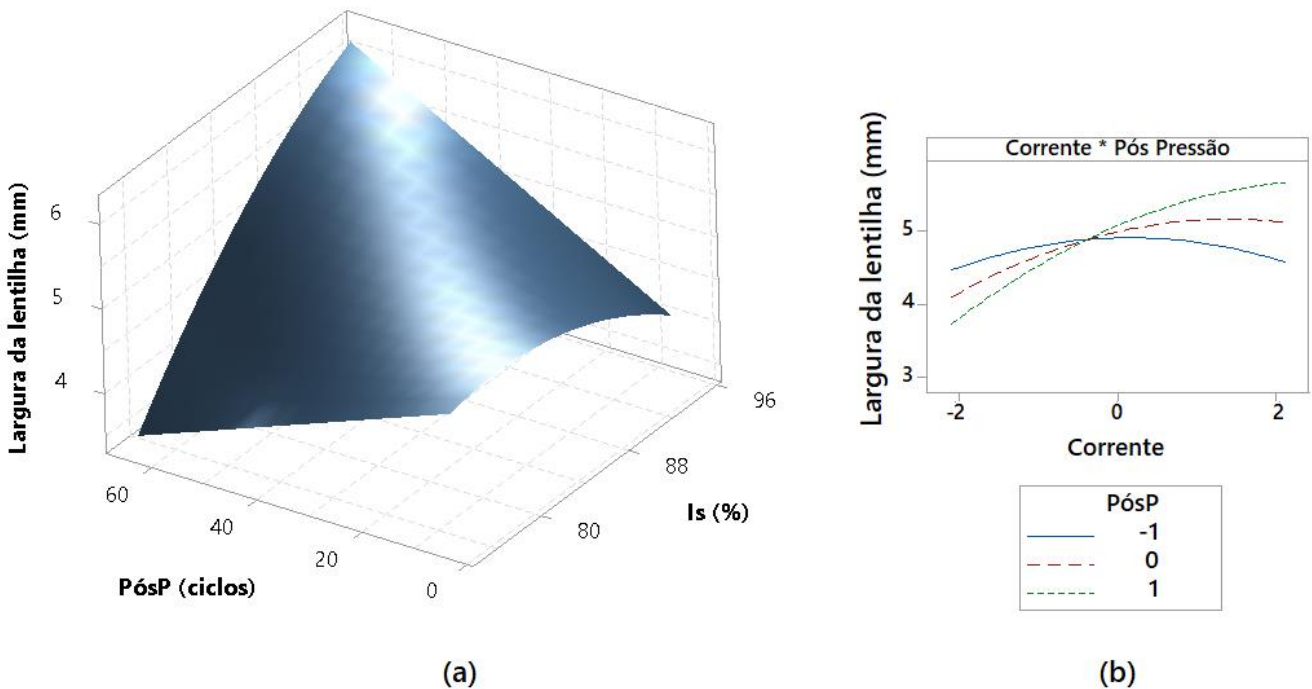


Figura 5.31 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a largura da lentilha ($t_s = 9$ ciclos; $I_{sub} = 14$ ciclos).

Figura 5.31 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a largura da lentilha.

Fonte: A autora.

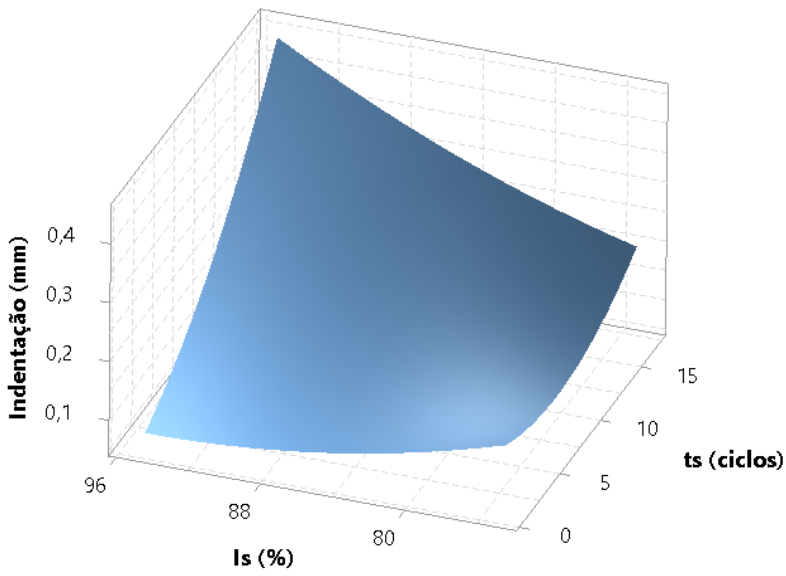
As análises das interações sobre a resposta indentação são apresentadas nas Figuras de 5.32 (a) a 5.35 (b) a seguir.

Nota-se claramente pelas Figuras 5.32 (a) e 5.32 (b) que indentações excessivas são formadas com o aumento do tempo de soldagem combinado com o aumento da corrente de soldagem.

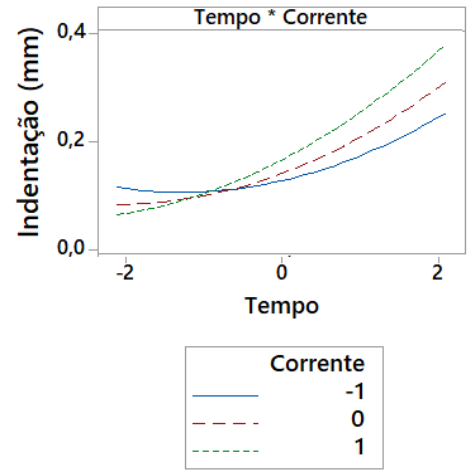
Indentações menores podem ser obtidas com a redução do tempo de soldagem em conjunto com a redução do tempo de subida de corrente, como mostram as Figuras 5.33 (a) e 5.33 (b). Além disso, menores indentações também podem ser obtidas com a redução da corrente de soldagem simultaneamente à redução do tempo de subida de corrente, conforme apresentado nas Figuras 5.34 (a) e 5.34 (b).

As interações sobre a indentação analisadas acima explicam-se pelo fato de que estes parâmetros estão diretamente relacionados à geração de calor durante o processo de soldagem a ponto e que quanto maior é o aporte térmico mais deformações são sofridas pelas peças em trabalho, causando o aumento da indentação.

Com relação à interação entre corrente de soldagem e tempo de pós-pressão, menores indentações são formadas com a redução do primeiro parâmetro juntamente com o aumento do segundo (Figuras 5.35 (a) e 5.35 (b)).



(a)

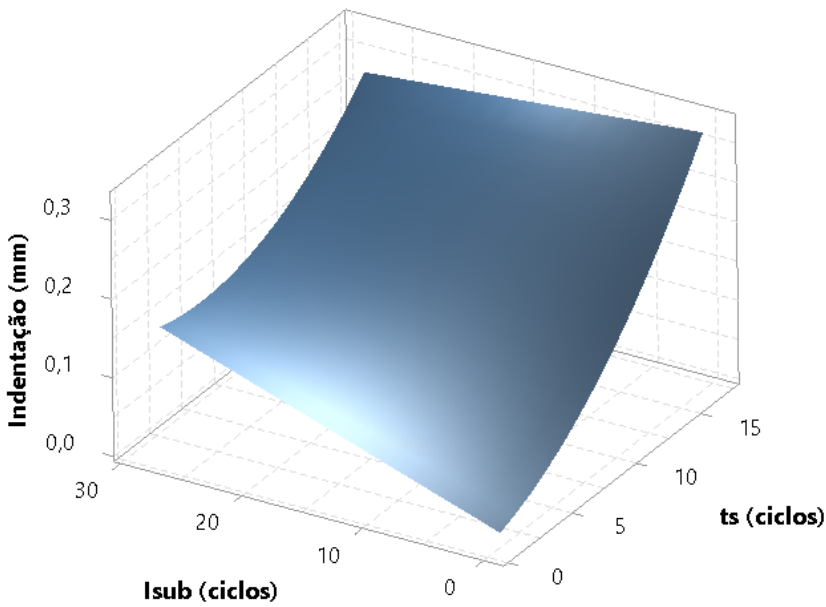


(b)

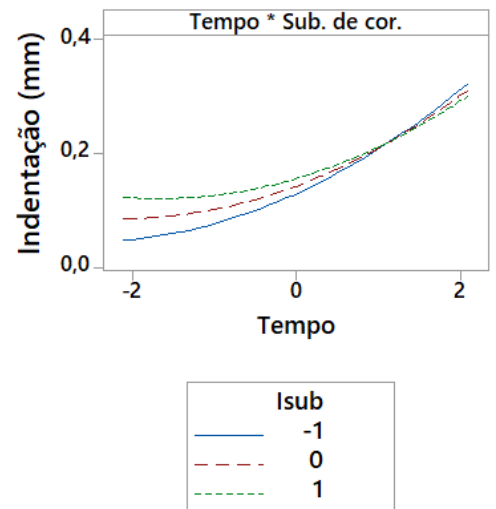
Figura 5.32 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de soldagem sobre a indentação (PósP = 35 ciclos ; Isub = 14 ciclos).

Figura 5.32 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de soldagem sobre a indentação.

Fonte: A autora.



(a)



(b)

Figura 5.33 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a indentação (Is = 85 kA; PósP = 35 ciclos).

Figura 5.33 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a indentação.

Fonte: A autora.

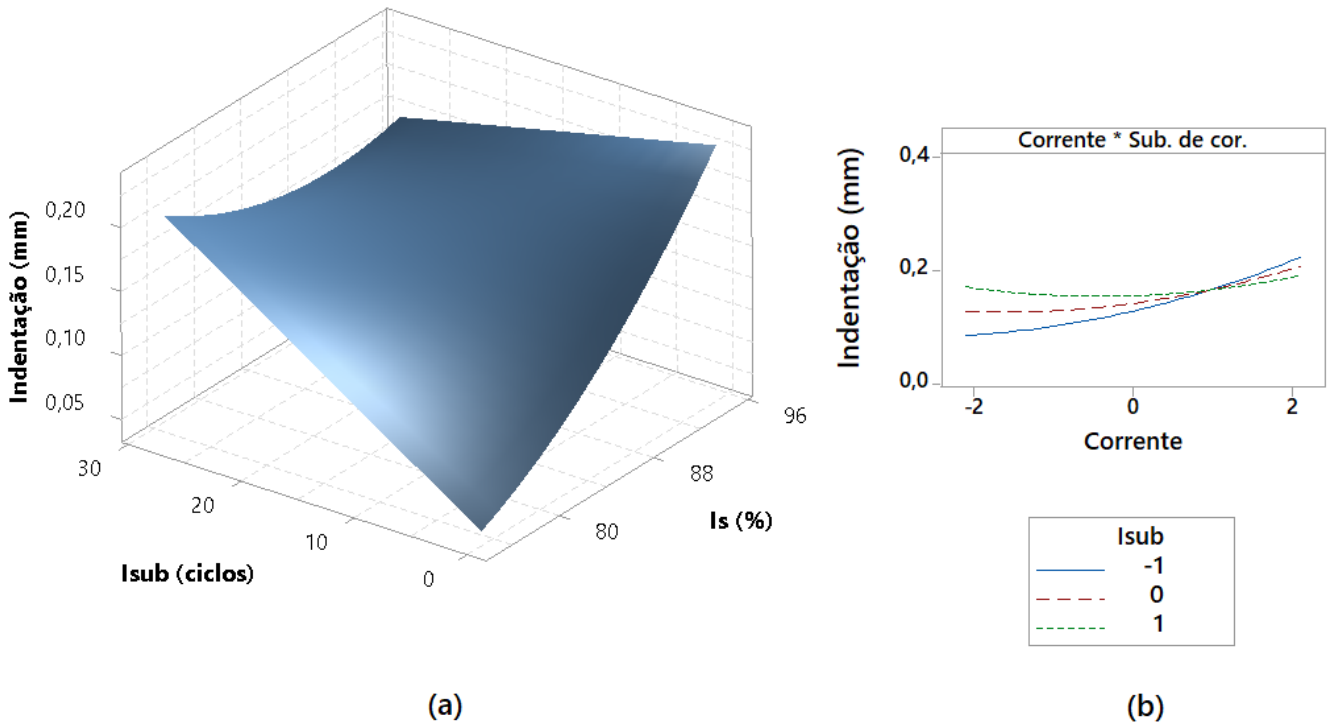


Figura 5.34 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a indentação ($t_s = 9$ ciclos; PósP = 35 ciclos).

Figura 5.34 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a indentação.

Fonte: A autora.

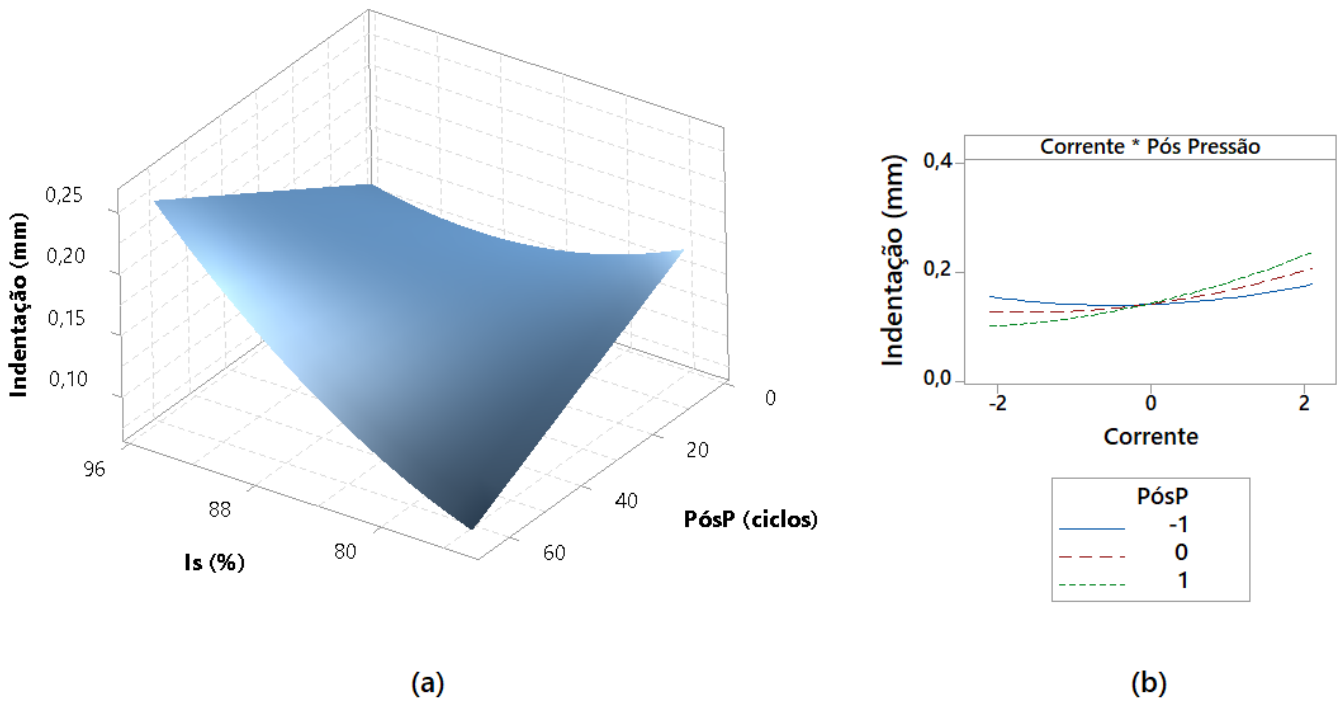


Figura 5.35 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a indentação ($t_s = 9$ ciclos; Isub = 14 ciclos).

Figura 5.35 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a indentação.

Fonte: A autora.

As Figuras 5.36 (a), 5.36 (b), 5.37 (a) e 5.37 (b) apresentam os efeitos das interações entre os parâmetros de soldagem a ponto sobre a formação da Zonta Termicamente Afetada (ZTA).

A diminuição da ZTA pode ser alcançada com a redução da corrente de soldagem em conjunto com o aumento do tempo de pós-pressão (Figuras 5.36 (a) e 5.36 (b)).

Por outro lado, a redução no tempo de pós-pressão somada à redução no tempo de subida de corrente formou uma menor ZTA, como pode ser observado nas Figuras 5.37 (a) e 5.37 (b).

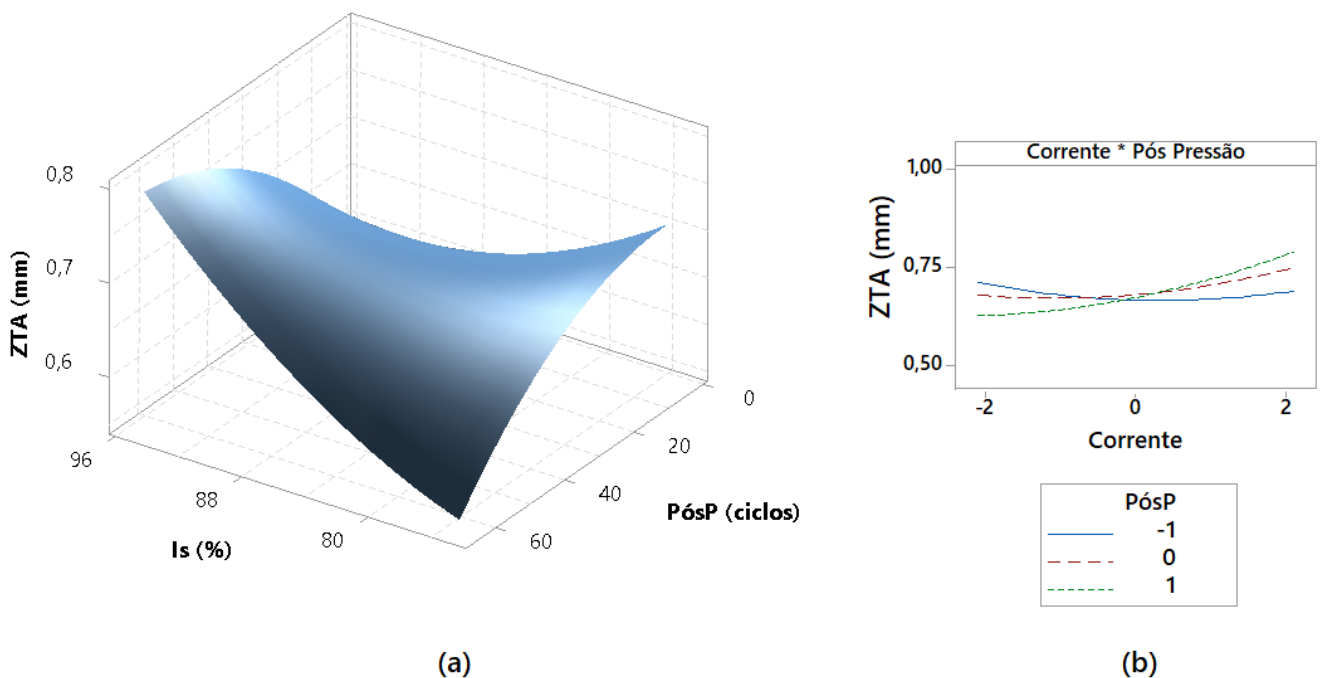


Figura 5.36 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a ZTA ($t_s = 9$ ciclos; $I_{sub} = 14$ ciclos).

Figura 5.36 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de pós-pressão sobre a ZTA.

Fonte: A autora.

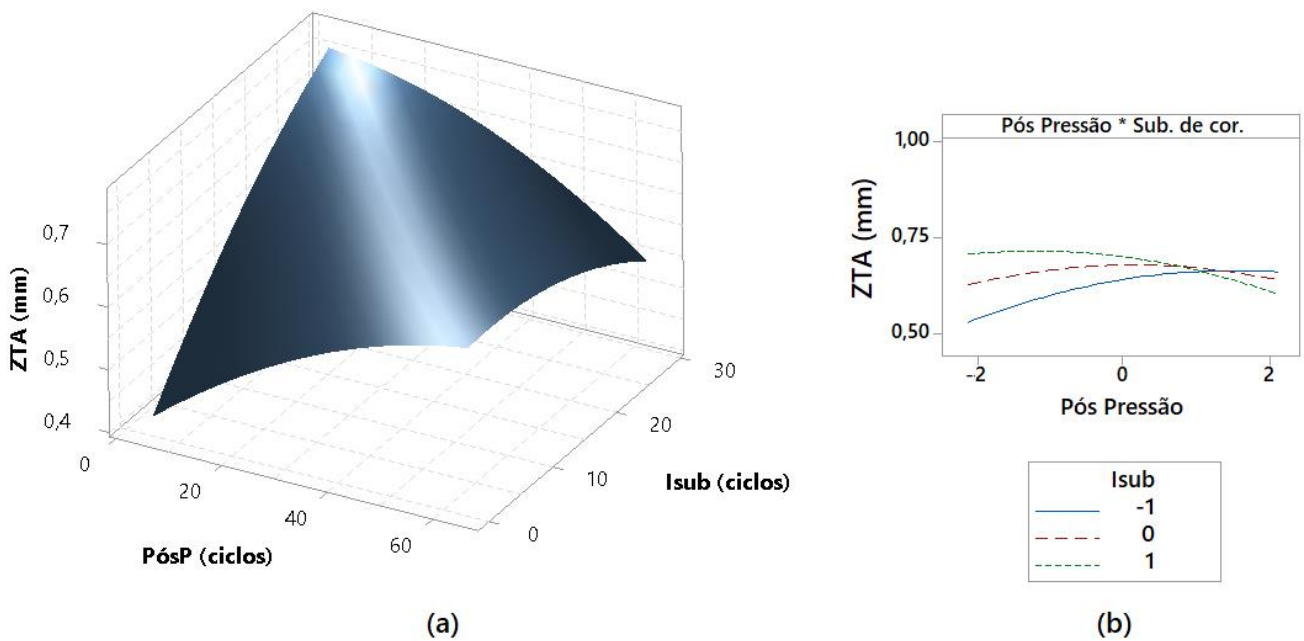


Figura 5.37 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre o tempo de subida de corrente e o tempo de pós-pressão sobre a ZTA ($t_s = 9$ ciclos; $I_s = 85\%$).

Figura 5.37 (b) – Gráfico do efeito da interação entre o tempo de subida de corrente e o tempo de pós-pressão sobre a ZTA.

Fonte: A autora.

As Figuras 5.38 (a) e 5.38 (b) mostram o efeito da interação entre corrente de soldagem e tempo de subida de corrente sobre a resposta penetração. Observa-se que a diminuição conjunta desses parâmetros aumenta consideravelmente a penetração da solda, visto que a exposição a correntes mais elevadas acarreta no crescimento acelerado da lentilha e consequente redução da penetração, ao passo que maiores tempos de soldagem aumentam a perda de calor, diminuindo também a penetração.

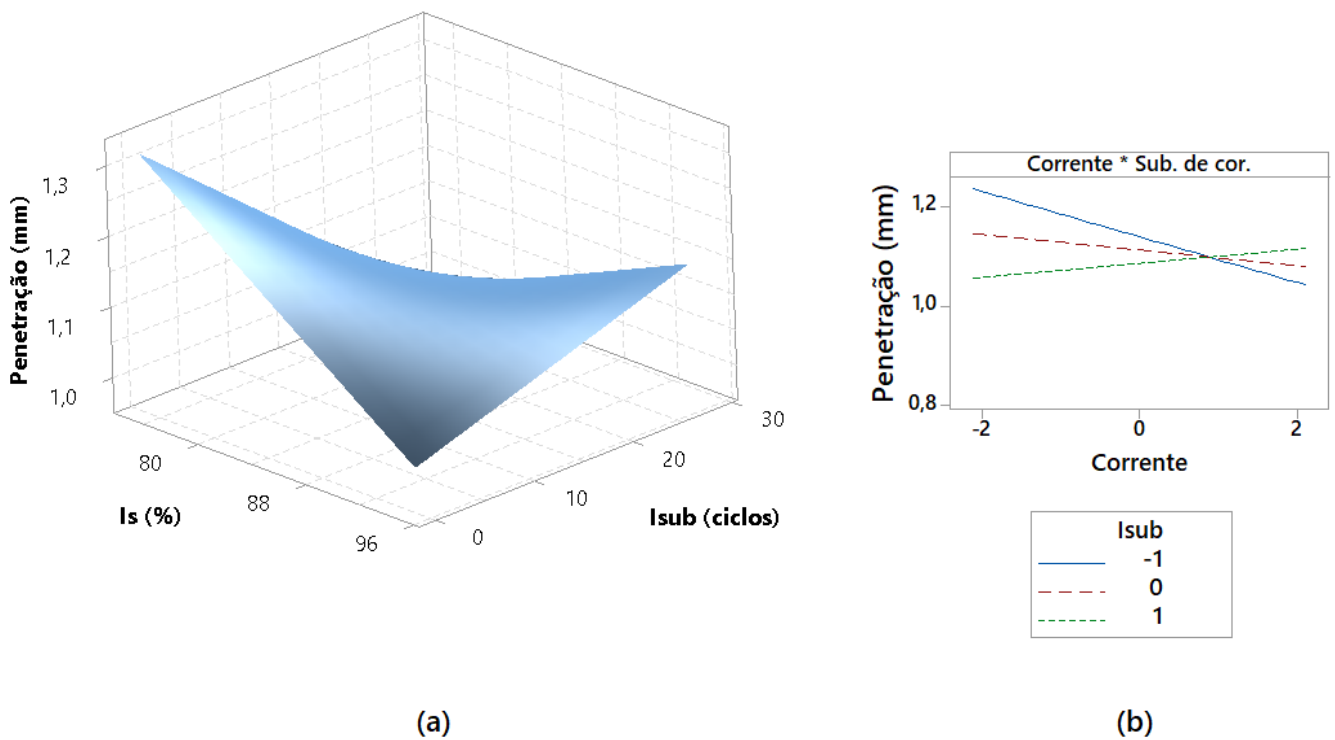


Figura 5.38 (a) – Superfície de resposta para o efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a penetração ($t_s = 9$ ciclos; PósP = 35 ciclos).

Figura 5.38 (b) – Gráfico do efeito da interação entre a corrente de soldagem e o tempo de subida de corrente sobre a penetração.

Fonte: A autora.

As análises desenvolvidas até aqui já são de enorme relevância para o processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5. Foi possível identificar as variáveis significativas para o processo e seus efeitos sobre as respostas de interesse assim como os efeitos de suas interações, o que permite um controle adequado e eficiente desse sistema. Ademais, com os modelos de alta confiabilidade desenvolvidos, é possível realizar a otimização do processo. Sendo assim, na próxima etapa, será desenvolvida a otimização multi-objetivo do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica aplicado ao aço 22MnB5, empregando dois métodos diferentes para posterior comparação e escolha daquele que melhor se adequa ao presente estudo.

5.6. Otimização pelo MCG (Método do Critério Global)

A formulação matemática do MCG aplicada ao presente estudo é mostrada nas Equações 5.7, 5.8, 5.9, e 5.10. A estratégia de ponderação das respostas utilizada foi sugerida por Ch'ng, Quah e Low (2005), atribuindo os pesos de forma que a soma entre eles seja igual a um (Equação 2.12, item 2.10).

Os pesos foram definidos a partir do julgamento de especialistas. Foi atribuído peso 0,4 para a resistência ao cisalhamento, visto que essa é a resposta mais importante para medir o desempenho da solda. Peso 0,2 foi dado à largura da lentilha e à penetração, dois fatores essenciais para garantir a boa resistência do ponto de solda. Por fim, às respostas indentação e ZTA, as quais se deseja minimizar para que afetem o mínimo possível a qualidade da solda, foi conferido peso 0,1. Uma maior penetração é preferida desde que não prejudique a resistência das peças, por isso, a escolha de maximizar a penetração, empregando um peso inferior ao dado para a resistência ao cisalhamento.

Além disso, a largura da lentilha e a indentação foram utilizadas como restrições. A largura mínima aceitável foi definida com base na norma AWS D8.9M:2012 (2012), que recomenda um valor de $4\sqrt{t}$, em que t é a espessura média das chapas, dada em milímetros. Sendo assim, como a espessura das chapas é de 1 mm, a largura mínima deve ser de 4 mm. Já para a indentação, foi definido um valor máximo aceitável de 20% da espessura média das chapas a fim de se garantir um acabamento superficial de alta qualidade e uma solda de boa resistência mecânica.

Minimizar MCG

$$\begin{aligned}
 &= 0,4 \cdot \left[\frac{17619,071 - Resistência}{17619,071} \right]^2 + 0,2 \cdot \left[\frac{5,752 - Largura}{5,752} \right]^2 \\
 &+ 0,1 \cdot \left[\frac{0,065 - Indentação}{0,065} \right]^2 + 0,1 \cdot \left[\frac{0,481 - ZTA}{0,481} \right]^2 \\
 &+ 0,2 \cdot \left[\frac{1,268 - Penetração}{1,268} \right]^2
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

$$\text{sujeito a: } X^T X \leq 4,0 \tag{5.8}$$

$$\text{Largura} \geq 4,0 \tag{5.9}$$

$$\text{Indentação} \leq 0,20 \tag{5.10}$$

A modelagem do MCG foi resolvida com o auxílio do *software* Microsoft Excel®, como mostra a planilha descrita na Figura 5.39, empregando o Algoritmo Genético, disponível no recurso *Solver Evolutinary*. Os resultados ótimos obtidos foram: resistência ao cisalhamento de 15322,27 N; largura da lentilha de 4,17 mm; indentação de 0,08 mm; ZTA de 0,56 mm; e penetração de 1,10 mm.

Modelos reduzidos

| | Resistência | Largura | Indentação | ZTA | Penetração |
|-----------|-------------|---------|------------|---------|------------|
| Constante | 16141,9000 | 4,9952 | 0,1414 | 0,6786 | 1,1125 |
| ts | 976,3000 | 0,3929 | 0,0535 | 0,0933 | -0,0898 |
| ls | 1137,7000 | 0,2446 | 0,0190 | 0,0167 | -0,0158 |
| PP | 316,3000 | 0,0854 | 0,0010 | 0,0033 | 0,0012 |
| lsub | 559,9000 | 0,1338 | 0,0135 | 0,0300 | -0,0267 |
| ts*ts | -609,9000 | -0,1567 | 0,0127 | 0,0103 | 0,0000 |
| ls*ls | -589,2000 | -0,0867 | 0,0058 | 0,0078 | 0,0000 |
| PP*PP | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | -0,0104 | -0,0375 |
| lsub*lsub | -301,9000 | -0,0842 | 0,0000 | -0,0085 | 0,0000 |
| ts*ls | 0,0000 | 0,0744 | 0,0209 | -0,0100 | 0,0000 |
| ts*PP | -470,1000 | 0,1081 | 0,0059 | 0,0094 | 0,0163 |
| ts*lsub | -464,5000 | -0,1494 | -0,0116 | -0,0100 | 0,0000 |
| ls*PP | 212,1000 | 0,2181 | 0,0134 | 0,0219 | 0,0000 |
| ls*lsub | 0,0000 | -0,0669 | -0,0141 | 0,0000 | 0,0300 |
| PP*lsub | -350,0000 | 0,0000 | 0,0000 | -0,0281 | 0,0000 |

Resultados

| | Resistência | Largura | Indentação | ZTA | Penetração |
|----------------------|-------------|---------|------------|--------|------------|
| Modelo | 15322,274 | 4,167 | 0,075 | 0,557 | 1,101 |
| Alvo | 17619,071 | 5,752 | 0,065 | 0,481 | 1,268 |
| R ² (adj) | 81,58% | 84,78% | 89,70% | 89,91% | 80,21% |

Variáveis

| | ts | ls | Pós-P | lsub |
|---------|--------|--------|-------|--------|
| Coded | -0,994 | -0,035 | 1,599 | -0,673 |
| Uncoded | 5,03 | 84,82 | 58,99 | 9,29 |

Restrições

| | | | |
|-------------|--------|-----|-------|
| X'X: | 4,000 | <= | 4,000 |
| Largura: | 4,167 | >= | 4,000 |
| Indentação: | 0,075 | <= | 0,200 |
| Limites: | -2,000 | <=> | 2,000 |

Função objetivo

G: 0,031

Figura 5.39 – Planilha para a otimização do processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5, utilizando o MCG.
Fonte: A autora.

5.7. Otimização pelo EQMMP (Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado)

5.7.1. Análise da correlação entre as respostas

O uso do EQMMP somente se justifica quando existe correlação entre as respostas. Portanto, o primeiro passo dessa etapa consiste em verificar se as respostas a serem otimizadas são correlacionadas. Tal verificação é mostrada na Figura 5.40 a seguir.

| Correlação: Resistência; Largura; Indentação; ZTA; Penetração | | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Resistência | Largura | Indentação | ZTA |
| Largura | 0,763 0,000 | | | |
| Indentação | 0,503 0,005 | 0,722 0,000 | | |
| ZTA | 0,565 0,001 | 0,694 0,000 | 0,815 0,000 | |
| Penetração | -0,533 0,003 | -0,595 0,001 | -0,802 0,000 | -0,704 0,000 |

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Figura 5.40 – Estrutura de correlação entre as respostas.

Fonte: A autora.

A correlação é significativa quando o *P-value* é menor do que o nível de significância, que no caso do presente trabalho é de 0,05. Observa-se que existe uma forte estrutura de correlação, visto que todas as respostas de interesse estão correlacionadas umas com as outras.

5.7.2. Padronização e ponderação das respostas

Antes da atribuição de pesos, as respostas devem ser padronizadas para unificar os dados, colocando-os na mesma escala. Este procedimento foi realizado conforme a Equação 2.11 do item 2.10 e as respostas padronizadas são apresentadas na Tabela 5.14.

No EQMMP, a ponderação das respostas deve ser feita antes da Análise de Componentes Principais (ACP), pois os pesos não podem ser atribuídos diretamente na função objetivo, como explicado no item 2.10. Deste modo, após a padronização das respostas, estas

são multiplicadas pelos respectivos pesos, que foram definidos da mesma maneira feita para o MCG: 0,4 para a resistência; 0,2 para a largura da lentilha; 0,1 para a indentação; 0,1 para a ZTA; e 0,2 para a penetração. As respostas de interesse multiplicadas pelos seus pesos são mostradas na Tabela 5.15.

Tabela 5.14 – Respostas padronizadas.

| Teste | Parâmetros | | | | Respostas | | | | |
|-------|------------|----|-------|------|-----------|--------|----------|--------|---------|
| | ts | Is | Pós-P | Isub | Resist.s | Larg.s | Indent.s | ZTAs | Penet.s |
| CCD1 | 5 | 80 | 20 | 7 | -1,710 | -1,718 | -0,994 | -1,351 | 2,246 |
| CCD2 | 13 | 80 | 20 | 7 | -0,755 | -0,240 | 0,550 | 0,072 | -0,738 |
| CCD3 | 5 | 90 | 20 | 7 | -1,821 | -1,353 | -0,750 | -1,453 | 0,571 |
| CCD4 | 13 | 90 | 20 | 7 | 0,704 | 0,471 | 1,688 | 0,326 | -1,524 |
| CCD5 | 5 | 80 | 50 | 7 | -0,950 | -1,974 | -1,238 | -1,606 | 0,832 |
| CCD6 | 13 | 80 | 50 | 7 | -0,244 | 0,271 | -0,263 | 0,987 | -0,529 |
| CCD7 | 5 | 90 | 50 | 7 | -0,062 | -0,368 | -0,994 | -0,538 | 0,623 |
| CCD8 | 13 | 90 | 50 | 7 | 1,031 | 1,439 | 2,256 | 1,801 | -1,000 |
| CCD9 | 5 | 80 | 20 | 21 | -1,337 | 0,836 | 0,387 | -0,690 | 0,413 |
| CCD10 | 13 | 80 | 20 | 21 | 0,638 | -0,167 | 0,712 | 1,496 | -1,733 |
| CCD11 | 5 | 90 | 20 | 21 | 0,588 | -1,007 | -0,669 | -0,182 | 0,780 |
| CCD12 | 13 | 90 | 20 | 21 | 0,435 | 0,289 | 0,956 | 0,987 | -0,738 |
| CCD13 | 5 | 80 | 50 | 21 | -0,272 | -1,317 | -0,507 | -1,402 | -0,005 |
| CCD14 | 13 | 80 | 50 | 21 | -0,733 | 0,052 | 0,631 | 0,530 | -0,634 |
| CCD15 | 5 | 90 | 50 | 21 | 0,872 | 0,344 | -0,344 | -0,131 | 1,147 |
| CCD16 | 13 | 90 | 50 | 21 | 0,835 | 1,676 | 1,769 | 1,089 | -1,262 |
| CCD17 | 1 | 85 | 35 | 14 | -2,157 | -2,320 | -1,563 | -1,606 | * |
| CCD18 | 17 | 85 | 35 | 14 | 0,772 | 1,110 | 2,175 | 2,462 | -1,681 |
| CCD19 | 9 | 75 | 35 | 14 | -2,294 | -1,335 | -0,832 | 0,276 | 1,565 |
| CCD20 | 9 | 95 | 35 | 14 | 0,997 | 1,147 | 0,550 | 0,377 | 0,204 |
| CCD21 | 9 | 85 | 5 | 14 | 0,543 | 0,307 | -0,669 | -0,233 | * |
| CCD22 | 9 | 85 | 65 | 14 | 0,693 | 0,672 | -0,181 | -0,589 | -1,053 |
| CCD23 | 9 | 85 | 35 | 0 | -0,615 | -0,496 | -0,994 | -1,301 | 1,670 |
| CCD24 | 9 | 85 | 35 | 28 | 0,541 | 0,344 | 0,306 | 0,631 | -0,424 |
| CCD25 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,901 | 0,435 | -0,507 | 0,123 | 0,256 |
| CCD26 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,692 | 0,508 | -0,019 | 0,174 | 0,152 |
| CCD27 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,316 | 0,399 | * | 0,326 | -0,005 |
| CCD28 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,615 | 0,490 | -0,425 | -0,182 | 0,256 |
| CCD29 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,806 | 0,672 | -0,019 | -0,182 | 0,204 |
| CCD30 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,382 | 0,362 | -0,425 | 0,123 | 0,413 |
| CCD31 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,590 | 0,471 | -0,588 | -0,335 | -0,005 |

Fonte: A autora.

Tabela 5.15 – Ponderação das respostas.

| Teste | Parâmetros | | | | Respostas | | | | |
|-------|------------|----|-------|------|-----------|----------|----------|---------|----------|
| | ts | Is | Pós-P | Isub | Res.*0,4 | Lar.*0,2 | Ind.*0,1 | ZTA*0,1 | Pen.*0,2 |
| CCD1 | 5 | 80 | 20 | 7 | -0,684 | -0,344 | -0,099 | -0,135 | 0,449 |
| CCD2 | 13 | 80 | 20 | 7 | -0,302 | -0,048 | 0,055 | 0,007 | -0,148 |
| CCD3 | 5 | 90 | 20 | 7 | -0,729 | -0,271 | -0,075 | -0,145 | 0,114 |
| CCD4 | 13 | 90 | 20 | 7 | 0,281 | 0,094 | 0,169 | 0,033 | -0,305 |
| CCD5 | 5 | 80 | 50 | 7 | -0,380 | -0,395 | -0,124 | -0,161 | 0,166 |
| CCD6 | 13 | 80 | 50 | 7 | -0,098 | 0,054 | -0,026 | 0,099 | -0,106 |
| CCD7 | 5 | 90 | 50 | 7 | -0,025 | -0,074 | -0,099 | -0,054 | 0,125 |
| CCD8 | 13 | 90 | 50 | 7 | 0,412 | 0,288 | 0,226 | 0,180 | -0,200 |
| CCD9 | 5 | 80 | 20 | 21 | -0,535 | 0,167 | 0,039 | -0,069 | 0,083 |
| CCD10 | 13 | 80 | 20 | 21 | 0,255 | -0,033 | 0,071 | 0,150 | -0,347 |
| CCD11 | 5 | 90 | 20 | 21 | 0,235 | -0,201 | -0,067 | -0,018 | 0,156 |
| CCD12 | 13 | 90 | 20 | 21 | 0,174 | 0,058 | 0,096 | 0,099 | -0,148 |
| CCD13 | 5 | 80 | 50 | 21 | -0,109 | -0,263 | -0,051 | -0,140 | -0,001 |
| CCD14 | 13 | 80 | 50 | 21 | -0,293 | 0,010 | 0,063 | 0,053 | -0,127 |
| CCD15 | 5 | 90 | 50 | 21 | 0,349 | 0,069 | -0,034 | -0,013 | 0,229 |
| CCD16 | 13 | 90 | 50 | 21 | 0,334 | 0,335 | 0,177 | 0,109 | -0,252 |
| CCD17 | 1 | 85 | 35 | 14 | -0,863 | -0,464 | -0,156 | -0,161 | * |
| CCD18 | 17 | 85 | 35 | 14 | 0,309 | 0,222 | 0,218 | 0,246 | -0,336 |
| CCD19 | 9 | 75 | 35 | 14 | -0,918 | -0,267 | -0,083 | 0,028 | 0,313 |
| CCD20 | 9 | 95 | 35 | 14 | 0,399 | 0,229 | 0,055 | 0,038 | 0,041 |
| CCD21 | 9 | 85 | 5 | 14 | 0,217 | 0,061 | -0,067 | -0,023 | * |
| CCD22 | 9 | 85 | 65 | 14 | 0,277 | 0,134 | -0,018 | -0,059 | -0,211 |
| CCD23 | 9 | 85 | 35 | 0 | -0,246 | -0,099 | -0,099 | -0,130 | 0,334 |
| CCD24 | 9 | 85 | 35 | 28 | 0,216 | 0,069 | 0,031 | 0,063 | -0,085 |
| CCD25 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,360 | 0,087 | -0,051 | 0,012 | 0,051 |
| CCD26 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,277 | 0,102 | -0,002 | 0,017 | 0,030 |
| CCD27 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,126 | 0,080 | * | 0,033 | -0,001 |
| CCD28 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,246 | 0,098 | -0,043 | -0,018 | 0,051 |
| CCD29 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,322 | 0,134 | -0,002 | -0,018 | 0,041 |
| CCD30 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,153 | 0,072 | -0,043 | 0,012 | 0,083 |
| CCD31 | 9 | 85 | 35 | 14 | 0,236 | 0,094 | -0,059 | -0,033 | -0,001 |

Fonte: A autora.

5.7.3. Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais sobre as respostas, anteriormente padronizadas e ponderadas, deve ser realizada considerando a matriz de variância-covariância do conjunto de dados, como é apresentado na Figura 5.41 a seguir.

**Análise de Componentes Principais: Resist.*0,4; Larg.*0,2;
Indent.*0,1; ZTA*0,1; Penet.*0,2**

Eigenanalysis of the Covariance Matrix
28 cases used, 3 cases contain missing values

| | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Eigenvalue | 0,19136 | 0,03453 | 0,01315 | 0,00404 | 0,00154 |
| Proportion | 0,782 | 0,141 | 0,054 | 0,017 | 0,006 |
| Cumulative | 0,782 | 0,923 | 0,977 | 0,994 | 1,000 |
| Variable | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 |
| Res.*0,4 | 0,853 | 0,479 | -0,196 | 0,052 | 0,054 |
| Larg.*0,2 | 0,356 | -0,244 | 0,836 | -0,307 | -0,143 |
| Indent.*0,1 | 0,142 | -0,343 | 0,102 | 0,310 | 0,869 |
| ZTA*0,1 | 0,150 | -0,270 | 0,090 | 0,838 | -0,440 |
| Penet.*0,2 | -0,322 | 0,721 | 0,494 | 0,323 | 0,164 |

Figura 5.41 – Análise de Componentes Principais para as respostas ponderadas.
Fonte: A autora.

Foram selecionados dois componentes principais, pois eles representam 92,3% da variabilidade das respostas.

5.7.4. Modelos matemáticos para os componentes principais

Os modelos matemáticos de superfície de resposta para os componentes principais são desenvolvidos a partir dos *escores* dos mesmos, obtidos após a realização da ACP. O processo para obtenção dos modelos é idêntico àquele empregado na modelagem e ajuste das superfícies de resposta que representam as variáveis de saída do processo, explicado em detalhes nos itens 5.5.2 e 5.5.3. As Equações 5.11 e 5.12 apresentam os modelos finais desenvolvidos para os PC1 e PC2, com ajustes R^2 (adj.) de 88,81% e 80,11%, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 PC1 = & 0,2271 + 0,2758ts + 0,2558Is + 0,0869PósP + 0,1446Isub \\
 & - 0,0729ts^2 - 0,1312Is^2 - 0,0777Isub^2 - 0,0794ts.PósP \\
 & - 0,1134ts.Isub + 0,0695Is.PósP - 0,0779PósP.Isub
 \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned}
 PC2 = & 0,1303 - 1,1305ts + 0,0538Is + 0,0418PósP - 0,0277Isub \\
 & - 0,0528ts^2 - 0,0381Is^2 - 0,0740PósP^2 - 0,0409ts.PósP \\
 & + 0,0454Is.Isub
 \end{aligned} \quad (5.12)$$

5.7.5. Alvos em termos dos componentes principais

Para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais, de acordo com as Equações 2.13 e 2.14, apresentadas no item 2.10, utilizam-se os coeficientes dos autovetores dos componentes principais e os valores padronizados das respostas em relação aos alvos (*escores*), sendo estes calculados a partir dos alvos definidos para cada resposta e da média e desvio-padrão experimentais. Os alvos para cada uma das respostas foram definidos pela minimização/maximização individual das mesmas, empregando os modelos de superfície de resposta ajustados no item 5.5.3. Foram encontrados os alvos 0,710 e 2,692 para os PC1 e PC2, respectivamente. A Tabela 5.16 abaixo mostra os dados que foram utilizados para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais.

Tabela 5.16 – Dados para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais.

| | Resistência | Largura | Indentação | ZTA | Penetração |
|-----------------|--------------------|----------------|-------------------|------------|-------------------|
| Média | 14979,825 | 4,742 | 0,156 | 0,678 | 1,081 |
| Desvio-padrão | 1879,857 | 0,548 | 0,062 | 0,098 | 0,095 |
| Alvo individual | 17619,071 | 5,752 | 0,065 | 0,481 | 1,268 |
| <i>Escore</i> | 1,404 | 1,843 | -1,489 | -1,998 | 1,966 |
| Autovetor PC1 | 0,853 | 0,356 | 0,142 | 0,150 | -0,322 |
| Autovetor PC2 | 0,479 | -0,244 | -0,343 | -0,270 | 0,721 |

Fonte: A autora.

5.7.6. Formulação do EQMMP

A formulação matemática para o EQMMP é mostrada nas de Equações de 5.13 a 5.16.

$$\text{Minimizar } EQMM = \frac{0,782}{0,923} [(PC1 - 0,710)^2 + 0,191] + \frac{0,141}{0,923} [(PC2 - 2,692)^2 + 0,035] \quad (5.13)$$

$$\text{sujeito a: } X^T X \leq 4,0 \quad (5.14)$$

$$Largura \geq 4,0 \quad (5.15)$$

$$Indentação \leq 0,20 \quad (5.16)$$

As restrições foram definidas da mesma forma que para o MCG: largura mínima de 4,0 mm e indentação máxima de 0,20.

A planilha apresentada na Figura 5.42 foi construída no *software* Microsoft Excel® para resolver a formulação exposta acima. Novamente, o Algoritmo Genético, disponível no recurso *Solver Evolutionary*, foi empregado para se encontrar o ponto ótimo. Os resultados ótimos obtidos foram: resistência ao cisalhamento de 16875,97 N; largura da lentilha de 5,16 mm; indentação de 0,15 mm; ZTA de 0,68 mm; e penetração de 1,11 mm.

Modelos reduzidos

| | Resistência | Largura | Indentação | ZTA | Penetração | | PC1 | PC2 |
|-----------|-------------|---------|------------|---------|------------|-----------|---------|---------|
| Constante | 16141,9000 | 4,9952 | 0,1414 | 0,6786 | 1,1125 | Constante | 0,2271 | 0,1303 |
| ts | 976,3000 | 0,3929 | 0,0535 | 0,0933 | -0,0898 | ts | 0,2758 | -0,1305 |
| ls | 1137,7000 | 0,2446 | 0,0190 | 0,0167 | -0,0158 | ls | 0,2558 | 0,0538 |
| PP | 316,3000 | 0,0854 | 0,0010 | 0,0033 | 0,0012 | PP | 0,0869 | 0,0418 |
| lsub | 559,9000 | 0,1338 | 0,0135 | 0,0300 | -0,0267 | lsub | 0,1446 | -0,0277 |
| ts*ts | -609,9000 | -0,1567 | 0,0127 | 0,0103 | 0,0000 | ts*ts | -0,0729 | -0,0528 |
| ls*ls | -589,2000 | -0,0867 | 0,0058 | 0,0078 | 0,0000 | ls*ls | -0,1312 | -0,0381 |
| PP*PP | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | -0,0104 | -0,0375 | PP*PP | 0,0000 | -0,0740 |
| lsub*lsub | -301,9000 | -0,0842 | 0,0000 | -0,0085 | 0,0000 | lsub*lsub | -0,0777 | 0,0000 |
| ts*ls | 0,0000 | 0,0744 | 0,0209 | -0,0100 | 0,0000 | ts*ls | 0,0000 | 0,0000 |
| ts*PP | -470,1000 | 0,1081 | 0,0059 | 0,0094 | 0,0163 | ts*PP | -0,0794 | -0,0409 |
| ts*lsub | -464,5000 | -0,1494 | -0,0116 | -0,0100 | 0,0000 | ts*lsub | -0,1134 | 0,0000 |
| ls*PP | 212,1000 | 0,2181 | 0,0134 | 0,0219 | 0,0000 | ls*PP | 0,0695 | 0,0000 |
| ls*lsub | 0,0000 | -0,0669 | -0,0141 | 0,0000 | 0,0300 | ls*lsub | 0,0000 | 0,0454 |
| PP*lsub | -350,0000 | 0,0000 | 0,0000 | -0,0281 | 0,0000 | PP*lsub | -0,0779 | 0,0000 |

Resultados

| | Resistência | Largura | Indentação | ZTA | Penetração | PC1 | PC2 |
|----------------------|-------------|---------|------------|--------|------------|--------|--------|
| Modelo | 16875,972 | 5,161 | 0,148 | 0,680 | 1,113 | 0,425 | 0,221 |
| Alvo | 17619,071 | 5,752 | 0,065 | 0,481 | 1,268 | 0,710 | 2,692 |
| R ² (adj) | 81,58% | 84,78% | 89,70% | 89,91% | 80,21% | 88,81% | 80,11% |

Variáveis

| | ts | ls | PP | lsub |
|---------|--------|-------|-------|-------|
| Coded | -0,592 | 1,235 | 0,981 | 1,078 |
| Uncoded | 6,63 | 91,17 | 49,72 | 21,55 |

Autovalores e explicação

| PC1 | PC2 |
|--------|--------|
| 0,1914 | 0,0345 |
| 78,20% | 14,10% |
| 78,20% | 92,30% |

Restrições

| | | | |
|-------------|--------|-----|-------|
| X*X: | 4,000 | <= | 4,000 |
| Largura: | 5,161 | >= | 4,000 |
| Indentação: | 0,148 | <= | 0,200 |
| Limites: | -2,000 | <=> | 2,000 |

Função objetivo

EQMM_s: 1,169

Figura 5.42 – Planilha para a otimização do processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5, utilizando o EQMMP.

Fonte: A autora.

5.8. Comparação entre os métodos de otimização

A Tabela 5.17 a seguir sumariza os resultados encontrados com a aplicação dos métodos MCG (Método do Critério Global) e EQMMP (Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado) ao processo de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5.

Tabela 5.17 – Parâmetros ótimos da soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5.

| | Parâmetros | | | | Respostas | | | | |
|--------------|----------------|-----------|------------------|------------------|----------------|---------------|-----------------|-------------|----------------|
| | ts (ciclos) | Is (%) | PósP (ciclos) | Isub (ciclos) | Resist. (N) | Larg. (mm) | Indent. (mm) | ZTA (mm) | Penet. (mm) |
| MCG | 5 | 85 | 59 | 9 | 15322,27 | 4,17 | 0,08 | 0,56 | 1,10 |
| EQMMP | 7 | 91 | 50 | 22 | 16875,97 | 5,16 | 0,15 | 0,68 | 1,11 |

Fonte: A autora.

A geometria otimizada pelo MCG foi considerada menos satisfatória do que a geometria otimizada pelo EQMMP. Com a análise dos valores obtidos experimentalmente (matriz experimental para o Arranjo CCD), verifica-se que maiores resistência, largura da lentilha e penetração podem ser obtidas. Ademais, os parâmetros ótimos gerados pelo MCG atingiram respostas ótimas de resistência e largura relativamente distantes dos alvos definidos.

Os parâmetros ótimos sugeridos pelo EQMMP conduziram a uma geometria de solda melhor, visto que produziram um ponto com maiores resistência e largura da lentilha, se aproximando mais dos alvos dessas respostas, apesar de formarem indentação e ZTA um pouco maiores. Tendo em vista que a resposta mais importante, a resistência da solda, aumentou bastante em relação ao MCG e também que a largura da lentilha cresceu substancialmente em relação a tal método, a otimização pelo EQMMP mostrou-se mais adequada para otimizar as múltiplas respostas do processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5, ressaltando a importância de se empregar um método que considere a estrutura de correlação das respostas quando estas são fortemente correlacionadas.

A Figura 5.43 apresenta a comparação entre as geometrias de solda aproximadas calculadas pelos dois métodos de otimização.



Figura 5.43 – Geometrias de solda otimizadas pelo MCG e pelo EQMMP, respectivamente.
Fonte: A autora.

5.9. Experimentos de confirmação

Experimentos de confirmação foram realizados para comparar os resultados reais com os resultados calculados para a condição otimizada. Devido ao limitado número de chapas restantes, foram feitas seis réplicas para o ensaio de cisalhamento e seis réplicas para a análise metalográfica. Contudo, percebeu-se que o equipamento de solda está desregulado, impossibilitando a correta realização de tais experimentos. Foram feitos alguns testes com condições retiradas da matriz experimental do Arranjo CCD para confirmar se o equipamento não estava funcionando corretamente; foram executados quatro experimentos nos pontos centrais, dois experimentos nos pontos axiais de corrente de soldagem e dois experimentos escolhidos de forma aleatória dentro da matriz experimental em questão. Todos esses experimentos geraram expulsão de material e soldas com resistências ao cisalhamento significativamente inferiores às obtidas quando da realização dos experimentos do Arranjo CCD.

Apesar de os experimentos de confirmação não terem sido realizados com sucesso, os resultados obtidos são importantes para a análise da expulsão de material. A Tabela 5.18 mostra as respostas obtidas ao se realizar os experimentos de confirmação.

Tabela 5.18 – Experimentos de confirmação.

| Teste | Parâmetros | | | | Respostas | | | | |
|-------|----------------|-----------|-------------------|------------------|--------------------|---------------|-----------------|-------------|----------------|
| | ts (ciclos) | Is (%) | Pós-P (ciclos) | Isub (ciclos) | Resistência (N) | Larg. (mm) | Indent. (mm) | ZTA (mm) | Penet. (mm) |
| 1 | 7 | 91 | 50 | 22 | 14012,23 | 4,74 | 0,35 | 0,91 | 0,88 |
| 2 | 7 | 91 | 50 | 22 | 10284,65 | 3,78 | 0,46 | 1,20 | 0,51 |
| 3 | 7 | 91 | 50 | 22 | 11870,42 | 3,94 | 0,40 | 1,10 | 0,67 |
| 4 | 7 | 91 | 50 | 22 | 14326,84 | 5,20 | 0,42 | 0,67 | 0,95 |
| 5 | 7 | 91 | 50 | 22 | 10474,78 | 4,31 | 0,38 | 0,82 | 0,96 |
| 6 | 7 | 91 | 50 | 22 | 9549,96 | 4,51 | 0,31 | 0,88 | 0,97 |

Fonte: A autora.

Todos os experimentos apresentaram excessiva expulsão de material. Observa-se claramente como tal expulsão afetou a resistência ao cisalhamento e o tamanho do ponto de solda. Foram obtidas resistências muito abaixo do valor alvo da otimização e também dos valores encontrados nos experimentos do Arranjo CCD. Além disso, a largura da lentilha também foi muito inferior ao valor alvo da otimização e do que foi obtido nos testes do Arranjo CCD.

Outro ponto importante a ser notado é que indentações excessivas foram geradas, o que sugere que as mesmas estão fortemente relacionadas à expulsão de material e à redução da resistência das chapas.

A Figura 5.44 abaixo mostra dois exemplos dos experimentos de confirmação, os pontos 1 e 4. O ponto 1 apresenta uma grande cavidade, defeito causado na formação do volume da lentilha devido à excessiva expulsão de material. O ponto 4 mostra a formação de indentação excessiva e contaminação da solda com o material do eletrodo devido ao grande desgaste sofrido pelo mesmo durante a execução desse experimento.

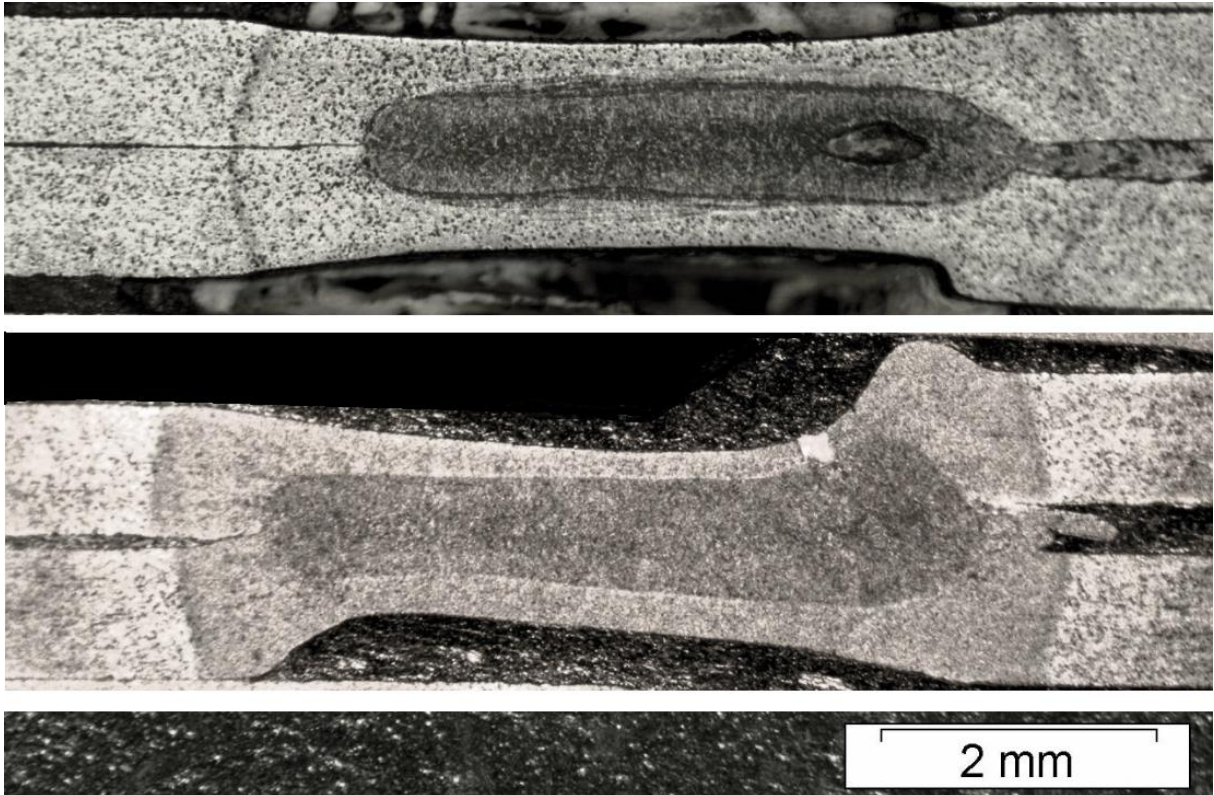


Figura 5.44 – Pontos 1 e 4 dos experimentos de confirmação.
Fonte: A autora.

5.10. Considerações finais

Neste capítulo, cada etapa definida no procedimento experimental (Capítulo 4) foi desenvolvida e discutida com a finalidade de se obter a condição otimizada do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5. Dois métodos de otimização foram empregados e, posteriormente, uma comparação entre eles foi feita para selecionar aquele que melhor se adequasse ao processo. O método EQMMP mostrou melhores resultados em relação ao MCG, visto que aquele considera a estrutura de correlação das respostas e as respostas de interesse do presente estudo estão fortemente correlacionadas.

6. CONCLUSÕES

6.1. Conclusões gerais

Com base nos resultados analisados e discutidos no capítulo anterior sobre a soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5, conclui-se que:

1. Dentre os parâmetros pressão, tempo de pré-pressão 1, tempo de pré-pressão 2, tempo de soldagem, corrente de soldagem, tempo de pós-pressão e tempo de subida de corrente, analisados na Fase Zero durante experimentos exploratórios, quatro deles mostraram-se mais significativos para a soldagem a ponto do aço 22MnB5, são eles: tempo de soldagem, corrente de soldagem, tempo de pós-pressão e tempo de subida de corrente.
2. A pressão exercida pelos eletrodos, apesar de ser um dos três parâmetros principais na geração de calor durante o processo de soldagem a ponto, quando variada em uma pequena amplitude (1 bar), não se mostrou significativa para a soldagem do aço 22MnB5.
3. Os modelos matemáticos desenvolvidos para as respostas de interesse resistência, largura da lentilha, indentação, Zona Termicamente Afetada (ZTA) e penetração constituem-se em expressões de alta confiabilidade, visto que apresentaram excelentes ajustes: 81,58%, 84,78%, 89,70%, 89,91% e 80,21%, respectivamente.
4. A análise individual da influência dos parâmetros sobre as respostas de interesse mostrou que:
 - O aumento da resistência ao cisalhamento é obtido com o emprego de tempos de soldagem intermediários (entre 9 e 13 ciclos), com a aplicação do tempo de subida de corrente em torno de 20 ciclos e com a elevação da corrente de soldagem, desde que tal elevação não provoque expulsão excessiva de material e consequente formação de defeitos, que comprometem a resistência da solda;
 - Maiores lentilhas de solda também podem ser obtidas com o aumento da corrente de soldagem e com o emprego do tempo de subida de corrente em torno de 20 ciclos, além de que tempos de soldagem ligeiramente mais elevados (13 ciclos) do que para a resistência ao cisalhamento foram mais eficientes em produzir lentilhas de solda maiores;
 - Indentações menos profundas podem ser obtidas com a diminuição do tempo de soldagem, da corrente de soldagem e do tempo de subida de corrente, visto que estas variáveis estão diretamente relacionadas à geração de calor e a indentação é causada

por deformações ocorridas na superfície das chapas devido ao calor produzido durante o processo de soldagem a ponto;

- Para diminuir o tamanho da ZTA, é essencial empregar tempos de soldagem menores, pois esta variável foi a mais significativa sobre a ZTA. Tempos de subida de corrente menores e corrente de soldagem de intermediária para baixa também formam menor ZTA. Estes três parâmetros estão diretamente ligados à geração de calor e, por conseguinte, quanto mais elevados forem, maior é a energia térmica gerada e maior é a área afetada pelas transformações térmicas que acontecem durante o processo de soldagem;
 - Maior penetração pode ser obtida com a diminuição do tempo de soldagem, da corrente de soldagem e do tempo de subida de corrente, considerando o espaço experimental estudado. O tempo de soldagem influencia de forma negativa a penetração, pois, apesar de o calor gerado aumentar com o prolongamento do tempo de soldagem, o calor perdido também aumenta, diminuindo o aporte térmico disponível para fundir o material. Além disso, se correntes muito altas são empregadas, a lentilha de solda cresce de modo acelerado, diminuindo a taxa de penetração.
5. Dentre os quatro parâmetros empregados para desenvolver os modelos, um deles, o tempo de pós-pressão, não se mostrou significativo individualmente para as respostas de interesse. Todavia, suas interações com outros fatores foram significativas em diversos casos, ressaltando que a ação conjunta de parâmetros com pouca influência sobre uma dada resposta pode conduzir a efeitos significativos e, portanto, esta análise das interações é essencial para o correto entendimento do processo. Tais interações significativas com o tempo de pós-pressão são: interação entre tempo de soldagem e tempo de pós-pressão sobre a resistência ao cisalhamento; interação entre corrente de soldagem e tempo de pós-pressão sobre a largura da lentilha; interação entre corrente de soldagem e tempo de pós-pressão sobre a indentação; interação entre corrente de soldagem e tempo de pós-pressão sobre a ZTA; e interação entre tempo de pós-pressão e tempo de subida de corrente sobre a ZTA.
 6. Observou-se que existe forte correlação entre a indentação e a separação entre as chapas. Tal separação pode fragilizar a solda e levá-la ao rompimento precoce, pois reduz sua resistência;
 7. Observou-se que, independentemente de a falha por *pullout* ter sido por arrancamento total ou parcial do ponto de solda das duas chapas, a fratura iniciou-se na ZTA,

resultando na combinação clara de botão e furo, sem rasgamento da chapa. A região da ZTA mais próxima ao metal de base é, geralmente, submetida a temperaturas de aquecimento subcríticas, formando martensita revenida e ferrita, o que lhe confere uma menor dureza; em contrapartida, tal região é cercada por metal de base de alta dureza. Deste modo, ocorre a formação de pontos frágeis com concentração de tensão, podendo promover a propagação de trincas e, conseqüentemente, levando ao início da fratura nessa região.

6.2. Confirmação das proposições

1. A primeira proposição de que **“existe vantagem significativa na aplicação de um método que leve em consideração a estrutura de variância-covariância (correlação)”** foi confirmada.
 - Melhores resultados otimizados, em comparação ao uso do Método do Critério Global (MCG), foram obtidos com o emprego do Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP);
 - O EQMMP mostrou-se como um método mais eficiente para otimizar múltiplas respostas com forte estrutura de correlação;
 - Com a aplicação do EQMMP, a otimização do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5 é alcançada com o emprego da seguinte combinação de parâmetros: $t_s = 7$ ciclos; $I_s = 91\%$ (5,46 kA); $PósP = 50$ ciclos; e $I_{sub} = 22$ ciclos. Nesta condição otimizada, são obtidas as seguintes respostas: Resistência ao Cisalhamento = 16875,97 N; Largura da lentilha = 5,16 mm; Indentação = 0,15 mm; ZTA = 0,68 mm; e Penetração = 1,11 mm.

2. A segunda proposição de que **“a expulsão de material compromete o volume da lentilha e a resistência ao cisalhamento da solda”** não pôde ser confirmada.
 - Observou-se que a expulsão de material comprometeu a resistência ao cisalhamento e o volume da lentilha em vários pontos de solda, porém, não em todos os pontos. Ou seja, a expulsão exerce uma influência não-monotônica (não contínua) sobre a resistência ao cisalhamento e sobre o tamanho do ponto das soldas de 22MnB5. Caso se formem defeitos decorrentes da expulsão de material, esta pode comprometer a resistência e o tamanho da solda, portanto, a expulsão deve ser

evitada, porém, não se pode dizer que sempre que há expulsão há redução da resistência e do tamanho da solda;

- Em todos os pontos de solda em que foram observadas expulsões excessivas, contudo, tanto a resistência ao cisalhamento quanto a largura da lentilha foram afetadas negativamente;
 - O alto teor de elementos de liga do aço 22MnB5 aumenta sua resistividade e, conseqüentemente, aumenta a geração de calor na interface peça/peça, podendo levar à maior expulsão de material;
 - A utilização e o aumento do tempo de subida de corrente foram eficientes em reduzir a expulsão de material;
 - A expulsão de material está, frequentemente, associada à excessiva indentação e conseqüente excessiva separação entre as chapas, podendo causar a diminuição da resistência ao cisalhamento do ponto de solda.
3. A terceira proposição de que **“existe forte dependência da carga de ruptura em relação ao tamanho da solda até um certo nível de corrente, acima do qual a resistência ao cisalhamento começa a cair devido a defeitos causados pela expulsão de material”** foi confirmada.
- A resistência ao cisalhamento e a largura da lentilha foram diretamente proporcionais e aumentaram com a elevação da corrente de soldagem até um certo nível de corrente;
 - Sob elevados níveis de corrente, apesar de o tamanho da lentilha continuar aumentando, a resistência ao cisalhamento diminuiu, o que, provavelmente, se deve aos defeitos causados pela expulsão de material;
 - Foi encontrado um limite de corrente para a soldagem a ponto do aço 22MnB5 de, aproximadamente, 5,4 kA (sob 5 bar de pressão), após o qual a lentilha continuou a crescer, mas a carga de ruptura começou a cair.
4. A quarta proposição de que **“o aumento da carga de ruptura do aço 22MnB5 é independente do modo de falha”** foi confirmada.
- A falha interfacial, inaceitável para os aços convencionais, ocorreu nas soldas de aço 22MnB5 sem causar prejuízo à resistência ao cisalhamento;

- Devido às características de alta temperabilidade do aço 22MnB5, as soldas feitas nesse material estão propensas a apresentar falha interfacial, mesmo quando atingem elevada resistência mecânica;
- Esse tipo de falha é causado, no aço 22MnB5, pela presença de entalhes afiados na fronteira da lentilha assim como pela alta dureza e microestrutura frágil da solda, sendo esta causada pelo elevado carbono equivalente;
- Concluiu-se que a previsibilidade da resistência ao cisalhamento do aço 22MnB5 é independente do modo de falha.

6.3. Contribuições do trabalho

O desenvolvimento desta pesquisa trouxe as seguintes contribuições:

1. Entendimento da influência dos parâmetros de soldagem a ponto sobre as soldas de aço 22MnB5;
2. Obtenção de modelos matemáticos confiáveis, que permitem controlar as respostas do processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5 em função dos quatro parâmetros principais;
3. Obtenção de um procedimento otimizado para a soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5;
4. Confirmação da relevância da aplicação de um método que considere a correlação entre as múltiplas respostas quando estas estão fortemente correlacionadas;
5. Entendimento da influência da expulsão de material sobre a soldagem a ponto de Aços Avançados de Alta Resistência, em especial o aço 22MnB5;
6. Entendimento da relação entre resistência ao cisalhamento e modos de falha para os Aços Avançados de Alta Resistência, em especial o aço 22MnB5.

6.4. Sugestões para estudos futuros

Para os trabalhos futuros, são feitas as seguintes sugestões:

1. Emprego de método de otimização com definição ótima para os pesos atribuídos a cada resposta de interesse;
2. Avaliação e otimização da microestrutura do aço 22MnB5 após o processo de têmpera a fim de atingir os requisitos mínimos de resistência ao cisalhamento e tamanho do ponto de solda, minimizando os efeitos da severidade da queda de dureza na Zona Termicamente Afetada (ZTA);
3. Avaliação da influência do uso de pressões do eletrodo mais elevadas sobre o processo de soldagem a ponto do aço 22MnB5;
4. Avaliação do desgaste dos eletrodos com o emprego dos parâmetros otimizados e avaliação da quantidade máxima de pontos de solda que podem ser feitos sem prejudicar as respostas de interesse, indicando quando os eletrodos precisam ser trocados ou afiados.

REFERÊNCIAS

ABEPRO, Associação Brasileira de Engenharia de Produção. **Áreas e Subáreas de Engenharia de Produção** (2008). Disponível em: < <http://www.abepro.org.br>>. Data de acesso: 06 de maio de 2017.

ASLANLAR, S. **The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry**. *Materials and Design*, v. 27, p. 125-131, 2006.

ASM Handbook: **Welding, Brazing and Soldering**. EUA: ASM International (American Society for Metals), 1993. Vol. 6, 2872 p.

ASTM E3:2011. **Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**. West Conshohocken (PA), EUA: ASTM Internacional (American Society for Testing and Materials), 2011.

AWS. **Jefferson's Welding Encyclopedia**. 18ª Edição, Miami, EUA: AWS (American Welding Society), 1997. 758 p.

AWS A3.0:2001. **Standard Welding Terms and Definitions**; Includes Terms for Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting, and Thermal Spraying. 11ª Edição, Miami, EUA: AWS (American Welding Society) and ANSI (American National Standards Institute), 2001. 148 p.

AWS Welding Handbook. **Welding Processes**, Part 2. 9ª Edição, Miami, EUA: AWS (American Welding Society), 2007. Vol. 3, 728 p.

AWS D8.9M:2012. **Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials**. 3ª Edição, Miami, EUA: AWS (American Welding Society) and ANSI (American National Standards Institute), 2012. 126 p.

AWS D8.1M:2013. **Specification for Automotive Weld Quality – Resistance Spot Welding of Steel**. 2ª Edição, Miami, EUA: AWS (American Welding Society) and ANSI (American National Standards Institute), 2013. 40 p.

BACIC JUNIOR, M. **Análise da soldabilidade do aço 2MnB5 no processo de solda a ponto por resistência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. 124 p.

BARDELICK, A.; SALISBURY, C. P.; WINKLER, S.; WELLS, M. A.; WORSWICK, M. J. **Effect of cooling rate on the high strain rate properties of boron steel**. *International Journal of Impact Engineering*, v. 37, p. 694-702, 2010.

BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E.: **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: UNICAMP, 1995. 303 p.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; MacGREGOR, J. F.; ERJAVEC, J. **Some Problems Associated with the Analysis of Multiresponse Data**. *Technometrics*, v. 15, n. 1, p. 33-51, 1973.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for experimenters**. 1ª Edição, New Jersey, EUA: Wiley-Interscience, 1978. 690 p.

- BRANCO, H. L. O. **Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem de Chapas Galvanizadas na Indústria Automobilística**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. 116 p.
- BS EN ISO 14273:2001. **Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds**. ISO, 2001.
- BUSACCA, G. P.; MARSEGUERRA, M.; ZIO, E. **Multi-objective optimization by genetic algorithms: application to safety systems**. Reliability Engineering & System Safety, v. 72, p. 59-74, 2001.
- CHAO, Y. J. **Failure mode of spot welds: interfacial versus pullout**. Science and Technology of Welding and Joining Journal, v. 8, n. 2, p. 133-137, 2003.
- CHIAO, C.; HAMADA, M. **Analyzing Experiments with Correlated Multiple Responses**. Journal of Quality Technology, v. 33, n.4, p.451-465, 2001.
- CHOI, H-S.; PARK, G-H.; LIM, W-S.; KIM, B-M. **Evaluation of weldability for resistance spot welded single-lap joint between GA780DP and hot-stamped 22MnB5 steel sheets**. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 25, n. 6, p. 1543-1550, 2011.
- CHOI, C. Y.; LEE, D.; KIM, I-B; KIM, Y.; PARK, Y-D. **The effect of paint baking on the strength and failure of spot welds for advanced high strength steels**. Korean Journal of Metals and Materials, v. 49, n. 12, p. 967-976, 2011.
- CH'NG, C. K.; QUAH, S. H.; LOW, H. C. **Index Cpm in Multiple Response Optimization**. Quality Engineering, v. 17, p. 165-171, 2005.
- DIALLO, I.; DUPUY, T.; KACZYNSKI, C. **High Strength Steel Spot Weld Strength improvement through In Situ Post Weld Heat Treatment**. Sheet Metal Welding Conference XVI, Livonia, USA, 2014.
- ELLER, T. K.; GREVE, L.; ANDRES, M. T.; MEDRICKY, M.; HATSCHER, A.; MEINDERS, V. T.; VAN DEN BOOGAARD, A. H. **Plasticity and fracture modeling of quench-hardenable boron steel with tailored properties**. Journal of Materials Processing Technology, v. 214, p. 1211-1227, 2014.
- ELLER, T. K.; GREVE, L.; ANDRES, M.; MEDRICKY, M.; GEIJSELAERS, H. J. M.; MEINDERS, V. T.; VAN DEN BOOGAARD, A. H. **Plasticity and fracture modeling of the heat-affected zone in resistance spot welded tailor hardened boron steel**. Journal of Materials Processing Technology, v. 234, p. 309-322, 2016.
- EN ISO 14273:2001. **Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds**. ISO, 2001.
- GARCIA-ARANDA, L.; CHASTEL, Y.; PASCUAL, J. F.; NEGRO, T. D. **Experiments and simulation of hot stamping of quenchable steels**. Advanced Technology of Plasticity, v. 2, p. 1135–1140, 2002.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª Edição, São Paulo: Atlas, 2008. 220 p.
- GOMES, J. H. F. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010. 136 p.
- GOMES, J. H. F.; PAIVA, A. P.; COSTA, S. C.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, E. J. **Weighted Multivariate Mean Square Error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings**. European Journal of Operational Research, v. 226, p. 522-535, 2013.

GORNI, A. A. **Novas tendências para o processo de estampagem a quente.** Corte & Conformação de Metais, p. 62-77, 2010.

GÜLER, H. **Investigation of Usibor 1500 Formability in a Hot Forming Operation.** Materials Science, v. 19, n. 2, p. 144-146, 2013.

HOU, J. S-C. **Resistance Spot Welding and In-Process Heat Treatment of Hot Stamped Boron Steel.** Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas em Engenharia Mecânica), University of Waterloo, Canadá, 2016. 116 p.

HUIN, T.; DANCETTE, S.; FABRÈGUE, D.; DUPUY, T. **Investigation of the Failure of Advanced High Strength Steels Heterogeneous Spot Welds.** Metals - MDPI, v. 6, n. 5, p. 111-129, 2016.

IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística** (2018). Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Nacionais/Contas_Nacionais_Trimestrais/Fasciculo_IndicaIndic_IBGE/2017/pib-vol-val_201704caderno.pdf>. Data de acesso: 07 de outubro de 2018.

IGHODARO, O. L.; BIRO, E.; ZHOU, Y. N. **Comparative effects of Al-Si and galvanized coatings on the properties of resistance spot welded hot stamping steel joints.** Journal of Materials Processing Technology, v. 236, p. 64-72, 2016.

JL, C-W.; JO, I.; LEE, H.; CHOI, I-D.; KIM, Y.; PARK, Y-D. **Effects of surface coating on weld growth of resistance spot-welded hot-stamped boron steels.** Journal of Mechanical Science and Technology, v. 28, n. 11, p. 4761-4769, 2014.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis.** 6ª Edição, Nova Jersey, EUA: Pearson, 2007. 794 p.

JONG, Y-S.; LEE, Y-K.; KIM, D-C.; KANG, M-J.; HWANG, I-S.; LEE, W-B. **Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Ultra High Strength Steel Containing Boron.** Materials Transactions, v. 52, n. 6, p. 1330-1333, 2011.

KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. **A review on hot stamping.** Journal of Materials Processing Technology, v. 210, p. 2103-2118, 2010.

KARAGOULIS, M. J. **A Nuts and Bolts Approach to the Control of Resistance Spot Welding.** Welding Journal, v. 73, n. 7, p. 27-31, 1994.

KHURI, A. I.; CORNELL, J. A. **Response Surfaces: Designs and Analyses.** 2ª Edição, Nova Iorque, EUA: CRC Press, 1996. 536 p.

KONG, J. P.; HAN, T. K.; CHIN, K. G.; PARK, B. G.; KANG C. Y. **Effect of boron content and welding current on the mechanical properties of electrical resistance spot welds in complex-phase steels.** Material and Design, v. 54, p. 598-609, 2014.

LIANG, X.; YUAN, X.; WANG, H.; LI, X.; LI, C.; PAN, X. **Microstructure, Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Resistance Spot Welding Joints between Ultra High Strength Steel 22MnB5 and Galvanized Steel HSLA350.** International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, v. 17, n. 12, p. 1659-1664, 2016.

LUO, X.; REN, J.; LI, D.; QIN, Y.; XU, P. **Macro characteristics of dissimilar high strength steel resistance spot welding joint.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 87, p. 1105-1113, 2016.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos.** Porto Alegre: UFRGS, 1996. 477 p.

- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 7ª Edição, São Paulo: Atlas, 2008. 296 p.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3ª Edição atualizada, Belo Horizonte: UFMG, 2011. 363 p.
- MATLOCK, D. K.; SPEER, J. G. **Processing Opportunities for New Advanced High-Strength Sheet Steels**. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 25, p. 7-13, 2010.
- MERKLEIN, M.; LECHLER, J. **Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 177, p. 452-455, 2006.
- MIN, J.; LIN, J.; MIN, Y.; LI, F. **On the ferrite and bainite transformation in isothermally deformed 22MnB5 steels**. *Materials Science and Engineering A*, v. 550, p. 375-387, 2012.
- MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **Setor automotivo** (2018). Disponível em: < <http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo>>. Data de acesso: 07 de outubro de 2018.
- MONTGOMERY, D. C.: **Design and analysis of experiments**. Nova Iorque, EUA: Wiley, 1991.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8ª Edição, Nova Iorque, EUA: Wiley, 2013. 756 p.
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology – Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 3ª Edição, Nova Jersey, EUA: Wiley, 2009. 1247p.
- NADERI, M. **Hot Stamping of Ultra High Strength Steels**. Tese, Department of Ferrous Metallurgy, RWTH Aachen University, 2007. 190 p.
- NEWTON, C. J.; BROWNE, D. J.; THORNTON, M.C.; BOOMER, D.R.; KEAY, B.F. **The fundamentals of resistance spot welding aluminum**. *Sheet Metal Welding Conference VI*, Detroit, Michigan. 1994.
- NILO JÚNIOR, L. P. **Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003. 111 p.
- OZEL, T.; KARPAT, Y. **Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 4-5, p. 467-479, 2005.
- PAIVA, A. P. **Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em Otimização de Processo de Manufatura com Múltiplas Respostas Correlacionadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006. 115 p.
- PAIVA, A. P.; PAIVA, E. J.; FERREIRA, J. F.; BALESTRASSI, P. P.; COSTA, S. C. **A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 43, p. 631-643, 2009.
- PESSARD, E.; MOREL, F.; ABRIVARD, B.; DELHAYE, P. **A new methodology for designing heat treated components in fatigue**. *Procedia Engineering*, v. 66, p. 292-299, 2013.
- POURANVARI, M.; MARASHI, P. **Resistance Spot Welding of Unequal Thickness Low Carbon Steel Sheets**. *Advanced Materials Research*, v. 83, p. 1205-1211, 2010.

POURANVARI, M.; MARASHI, S. P. H. **Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 18, n. 5, p. 361-403, 2013.

RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. 4ª Edição, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons, 2009. 840 p.

RWMA. **Resistance Welding Manual**. 4ª Edição, EUA: RWMA (Resistance Welder Manufacturer's Association), 1989. 443 p.

SCOTCHMER, N. **Widening the Welding Lobe of Advanced High Strength Steels in the Resistance Spot Welding Process**. 2007. Disponível em: < [http://huysindustries.com/wp-content/uploads/huysarticle06-](http://huysindustries.com/wp-content/uploads/huysarticle06-Widening_the_welding_lobes_in_AMSS%E2%80%93visiting_SORPAS_and_TiCAP_to_stabilize_production.pdf)

[Widening_the_welding_lobes_in_AMSS%E2%80%93visiting_SORPAS_and_TiCAP_to_stabilize_production.pdf](http://huysindustries.com/wp-content/uploads/huysarticle06-Widening_the_welding_lobes_in_AMSS%E2%80%93visiting_SORPAS_and_TiCAP_to_stabilize_production.pdf) >. Data de acesso: 23 de abril de 2018.

SHI, G.; WESGATE, S. A. **Resistance spot welding of high strength steels**. 11th International Conference on the Joining of Materials, Dinamarca, 2003.

SHOME, M.; TUMULURU, M. **Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)**. Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing, 2015. 194 p.

SO, H.; FABMANN, D.; HOFFMANN, H.; GOLLE, R.; SCHAPER, M. **An investigation of the blanking process of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process**. Journal of Materials Processing Technology, v. 212, p. 437-449, 2012.

SPINELLA, D. J. **Using fuzzy logic to determine operating parameters for resistance spot welding of aluminum**. Sheet Metal Welding Conference VI, Detroit, Michigan. 1994.

TUMULURU, M. **An overview of the resistance spot welding of coated high strength dual phase steel**. Welding Journal, v. 85, n. 8, p. 31-37, 2006.

USIMINAS. **Catálogo de Produtos Laminados a Frio** <<http://usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-laminados-frio-v20-baixa.pdf>>. Data de acesso: 15 de abril de 2017.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 494 p.

WHELAN, P. M.; HODGSON, M. J. **Essential Principles of Physics**. 2ª Edição, Londres, Reino Unido: John Murray, 1978. 510 p.

WORLDAUTOSTEEL **Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0**. Editores técnicos: KEELER, S.; KIMCHI, M. 2014. Disponível em: <<http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>>. Data de acesso: 25 de março de 2017.

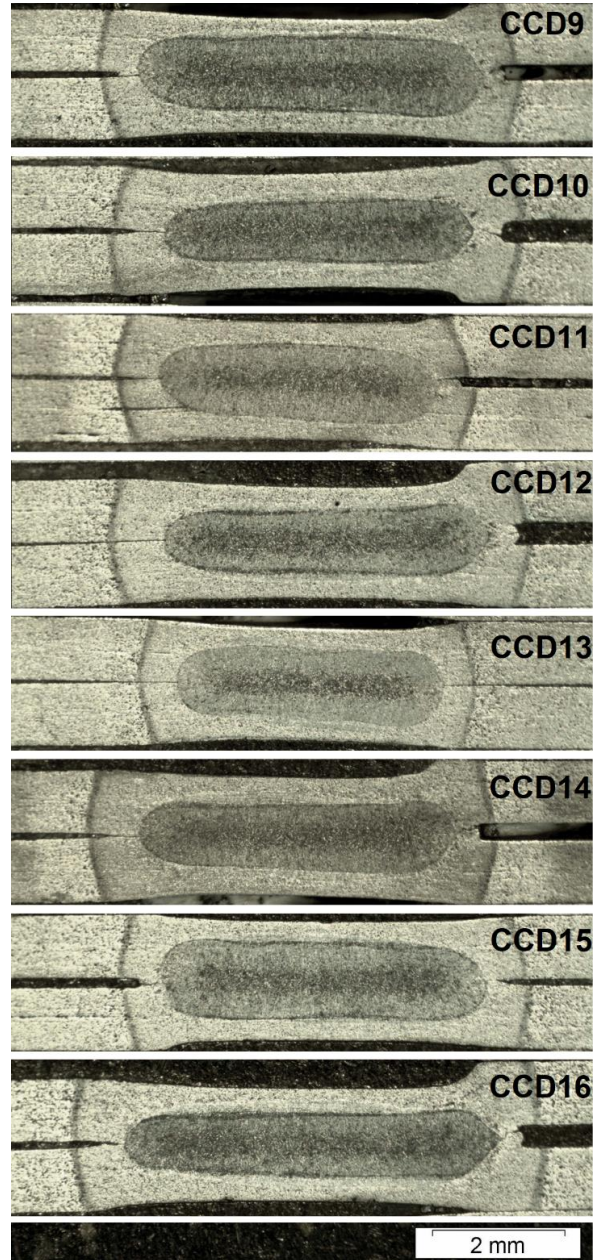
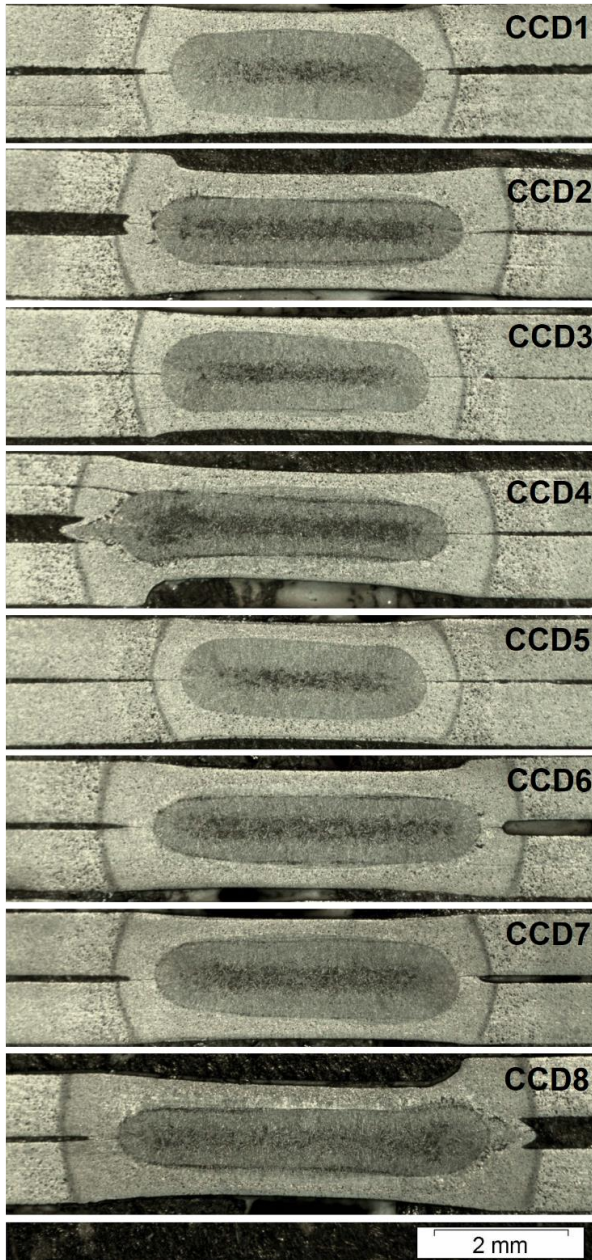
WORLDAUTOSTEEL **Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0**. Editores técnicos: KEELER, S.; KIMCHI, M.; MOONEY, P. J. 2017. Disponível em: <<http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>>. Data de acesso: 05 de agosto de 2017.

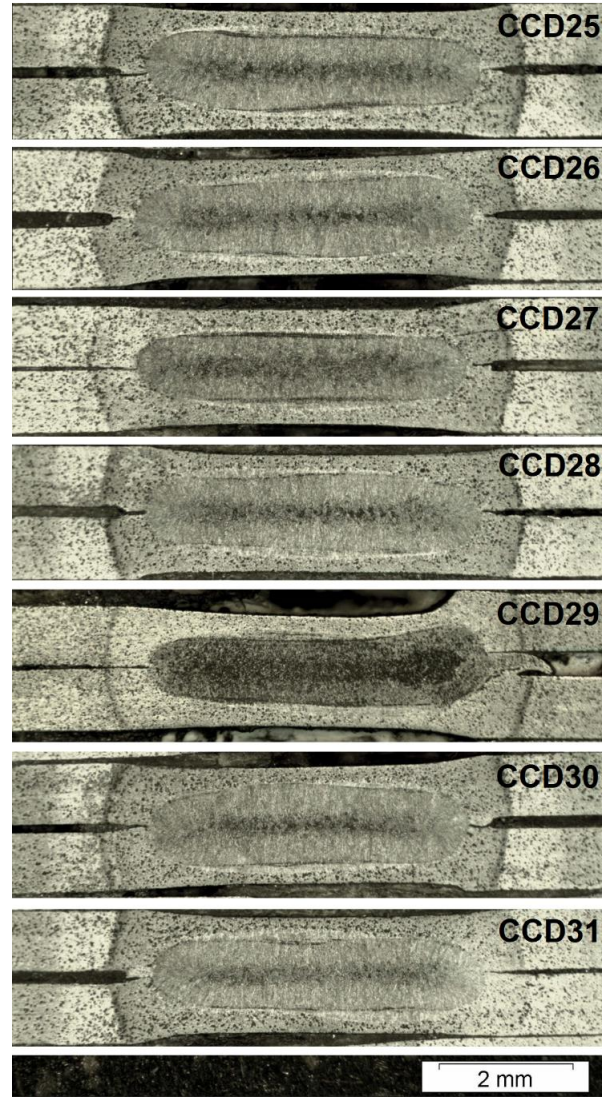
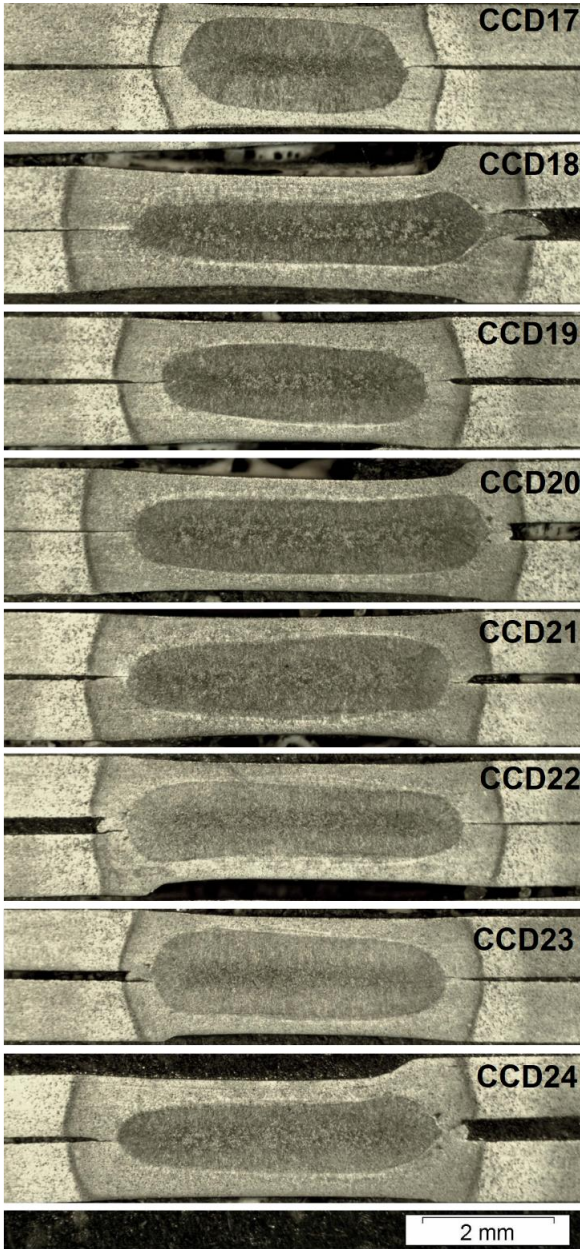
ZHANG, H.; SENKARA, J. **Resistance Welding: Fundamentals and Applications**. EUA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. 439 p.

ZHANG, H.; QIU, X.; BAI, Y.; XING, F.; YU, H.; SHI, Y. **Resistance spot welding macro characteristics of the dissimilar thickness dual phase steels**. Materials and Design, v. 63, p. 151-158, 2014.

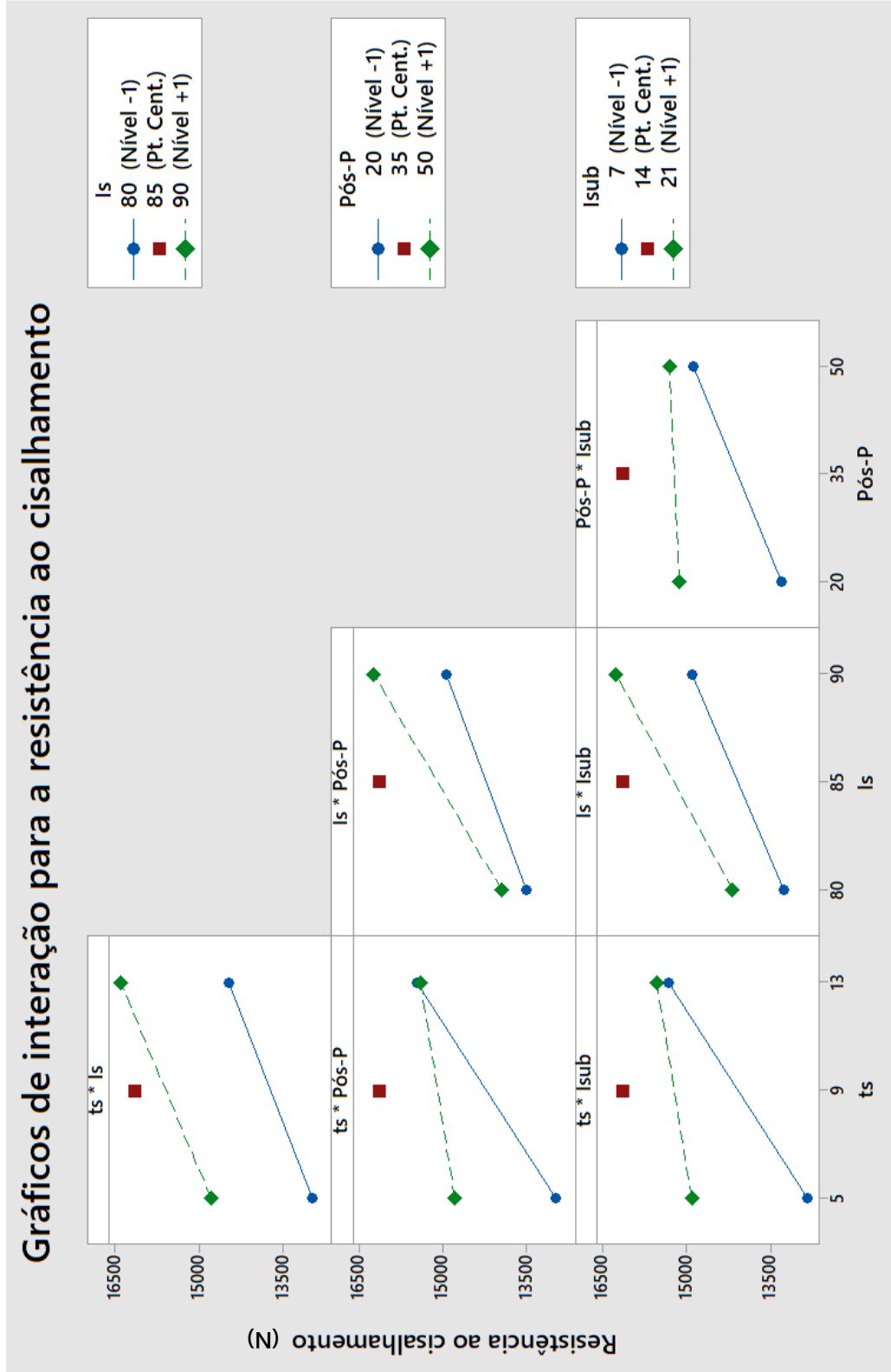
ZHANG, W.; YANG, H. **A study of the weighting method for a certain type of multicriteria optimization problem.** Computers & Structures, v. 79, n. 31, p. 2741-2749, 2001.

ANEXO A – Imagens digitalizadas para análise metalográfica dos pontos do Arranjo CCD

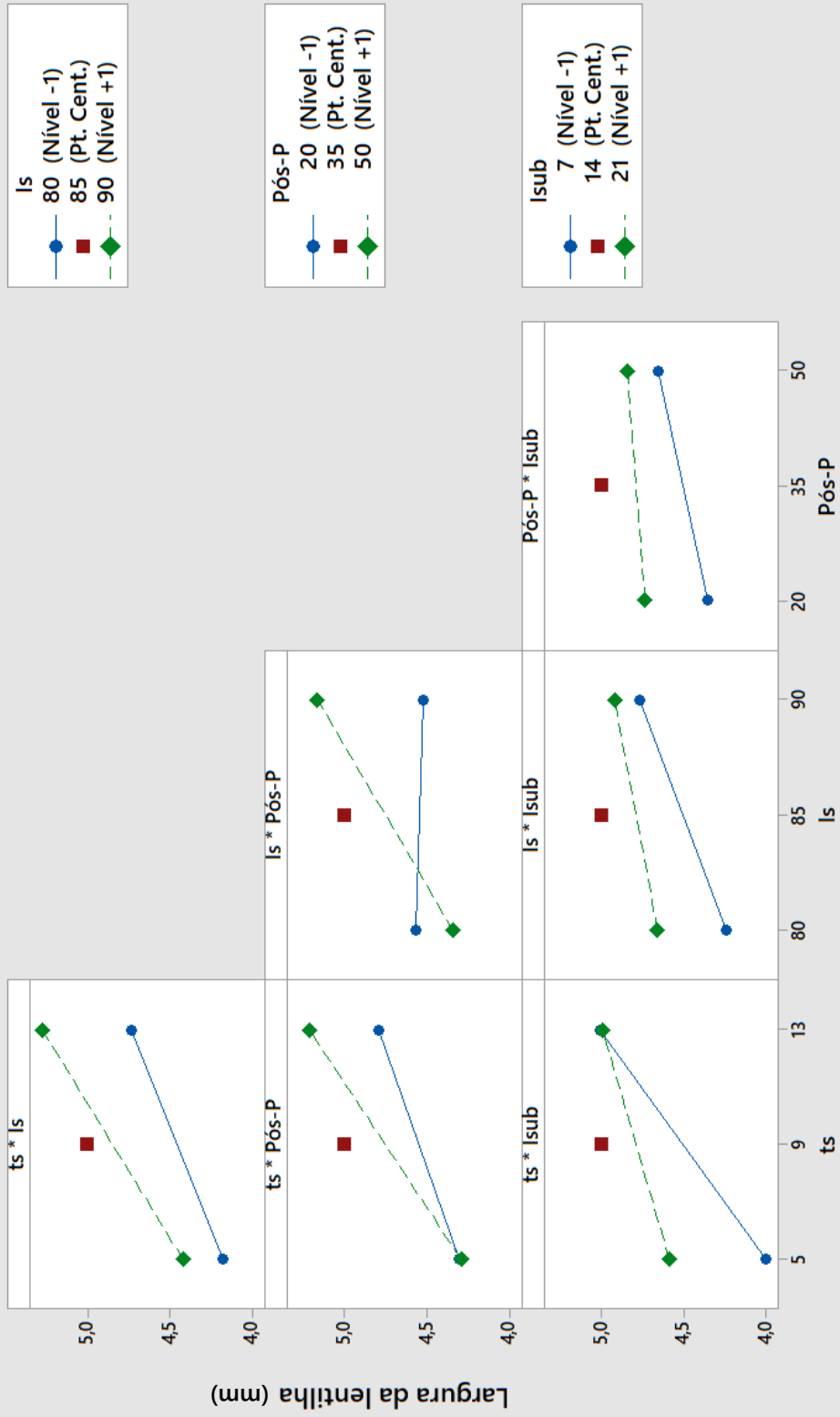




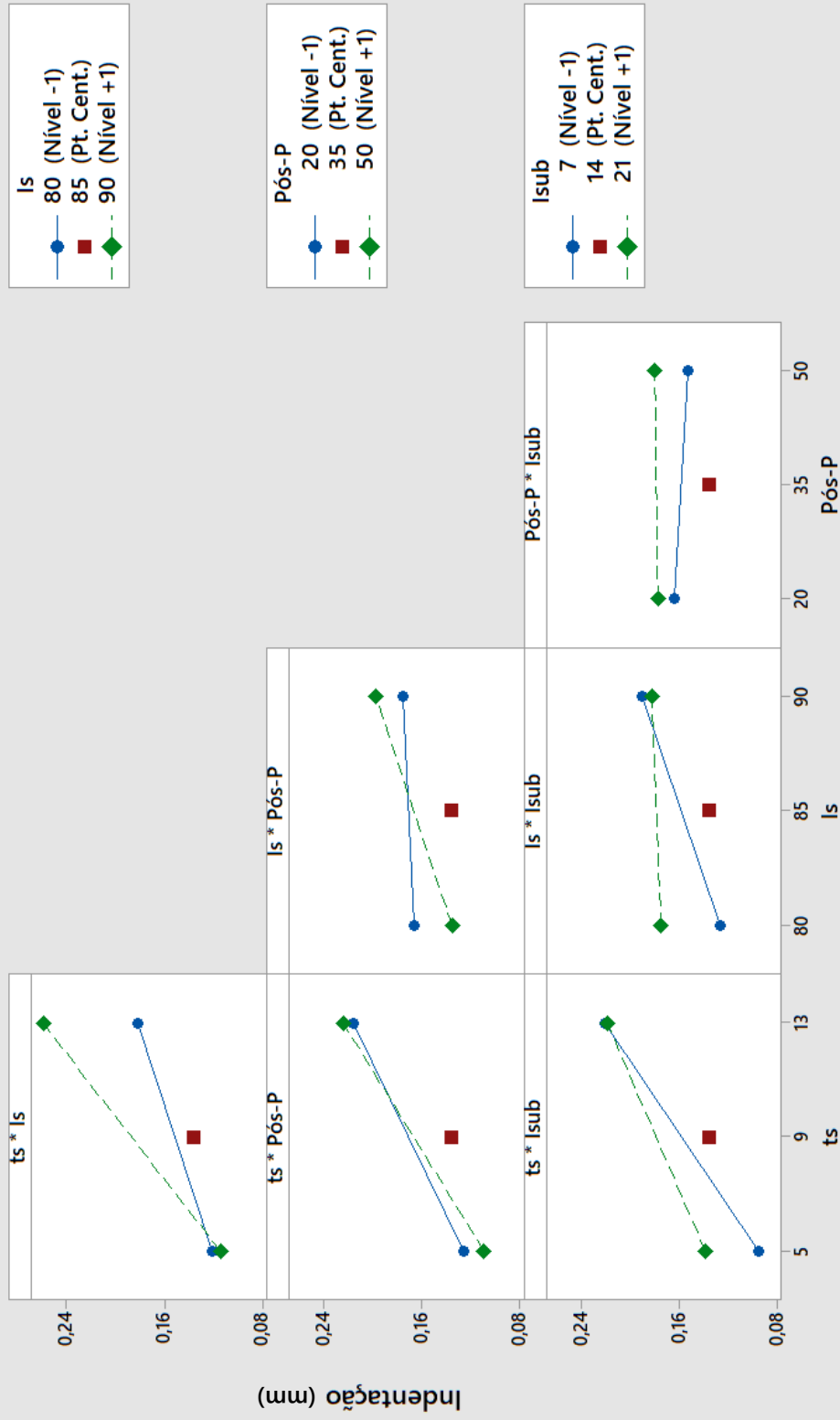
ANEXO B – Gráficos de interação para o segundo Arranjo Fatorial Completo



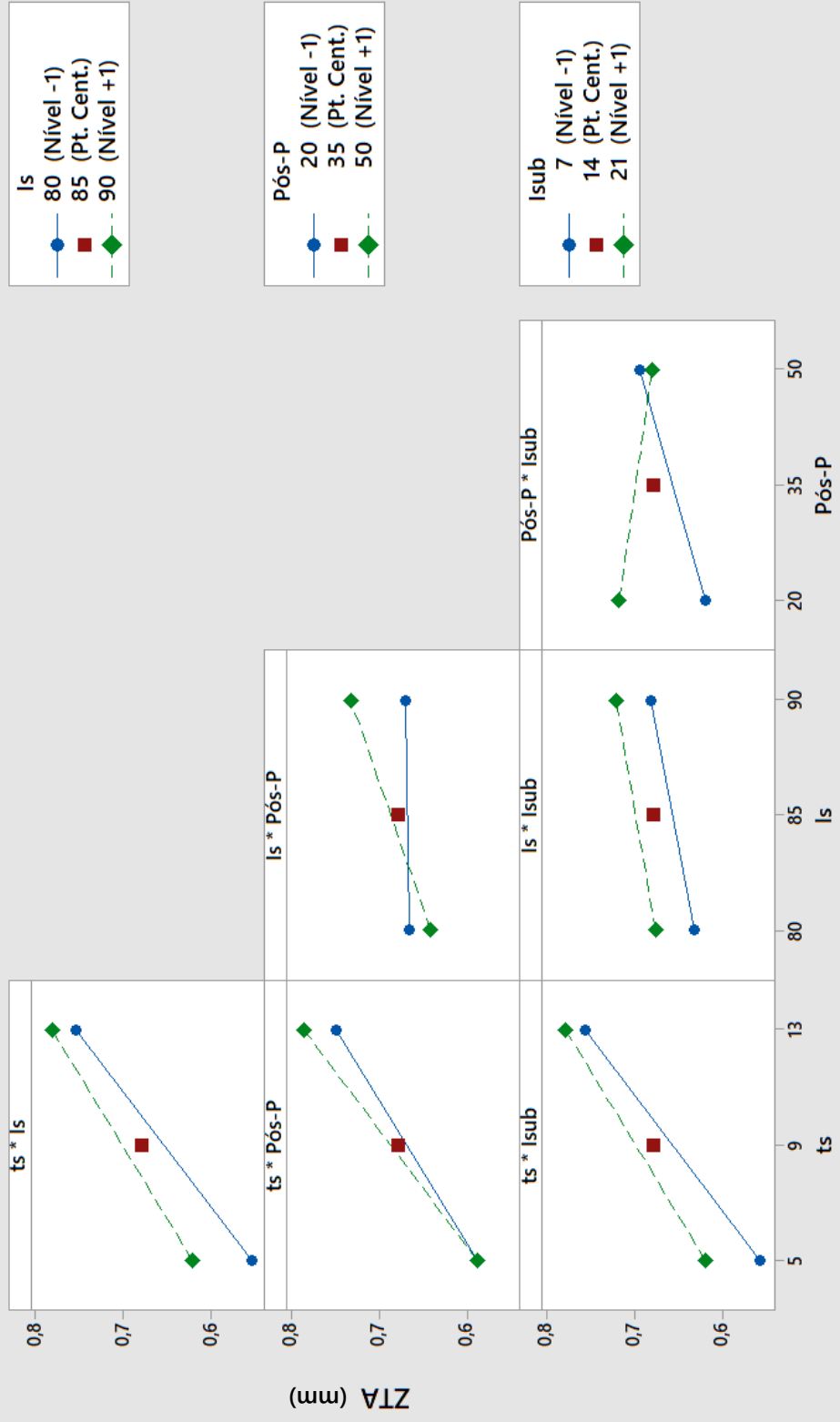
Gráficos de interação para a largura da lente



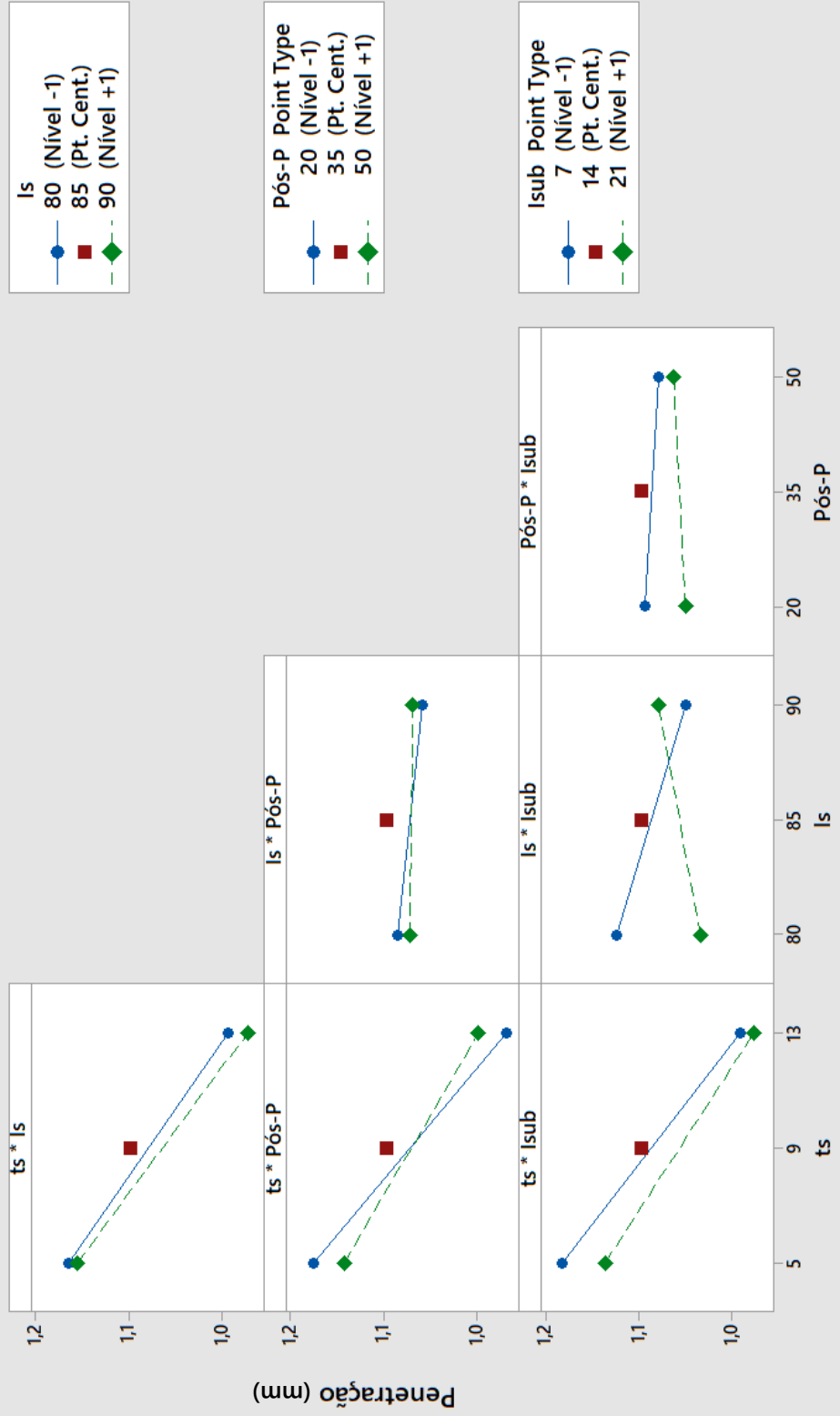
Gráficos de interação para a indentação



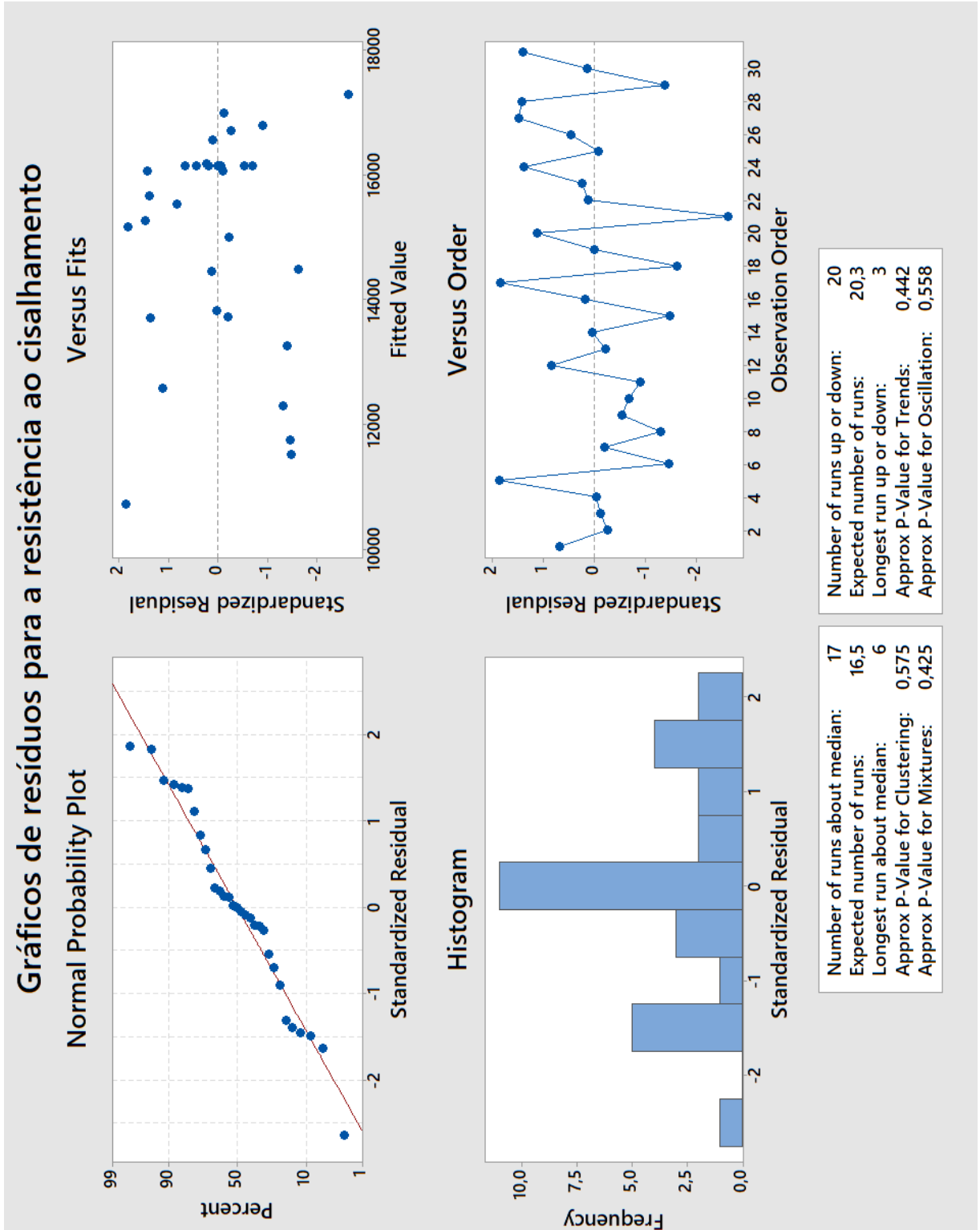
Gráficos de interação para a ZTA



Gráficos de interação para a penetração

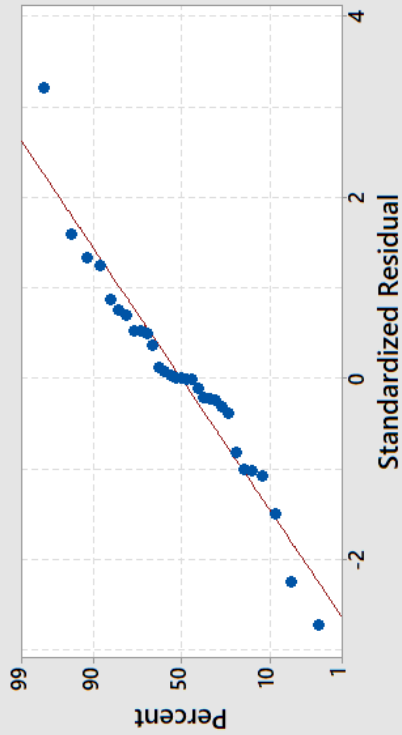


ANEXO C – Gráficos de resíduos para as respostas

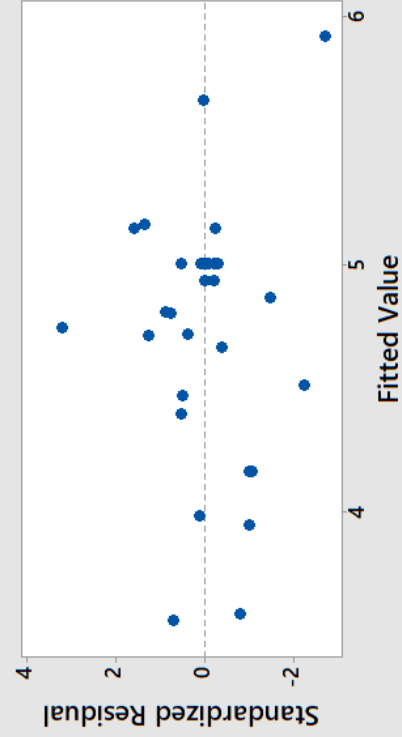


Gráficos de resíduos para a largura da lentilha

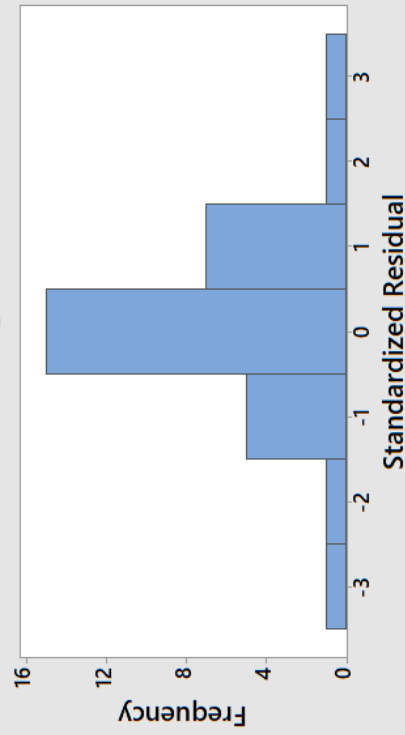
Normal Probability Plot



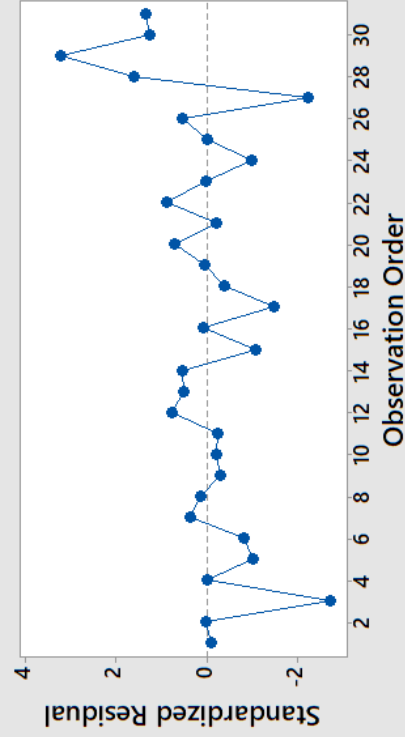
Versus Fits



Histogram



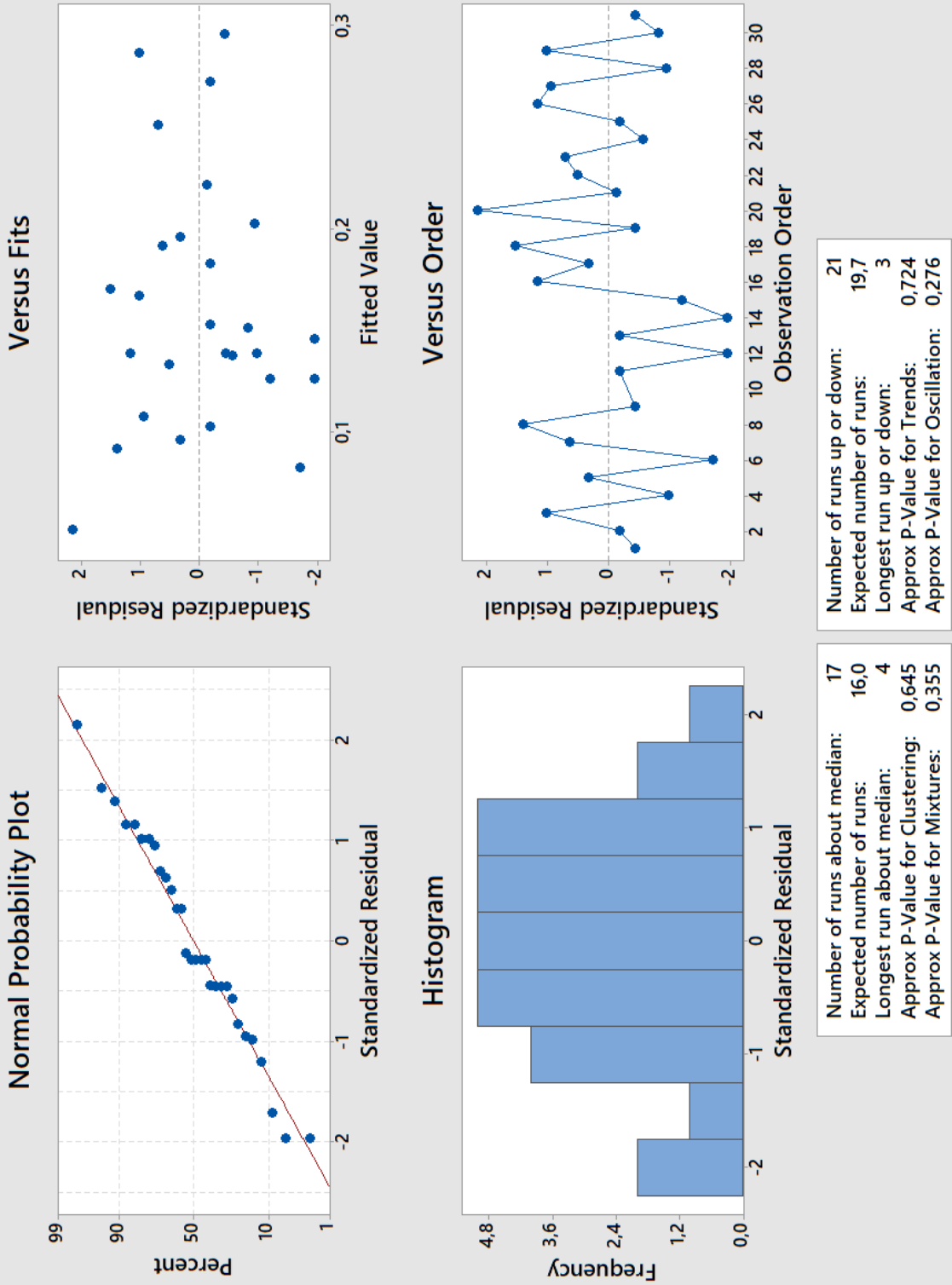
Versus Order



Number of runs about median: 16
 Expected number of runs: 16,5
 Longest run about median: 4
 Approx P-Value for Clustering: 0,430
 Approx P-Value for Mixtures: 0,570

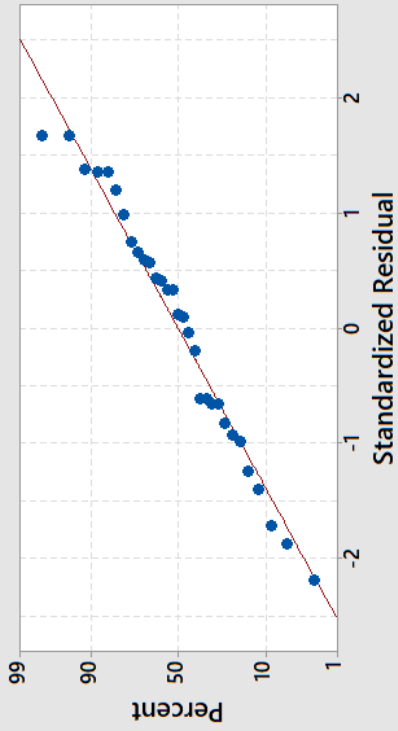
Number of runs up or down: 23
 Expected number of runs: 20,3
 Longest run up or down: 3
 Approx P-Value for Trends: 0,879
 Approx P-Value for Oscillation: 0,121

Gráficos de resíduos para a indentação

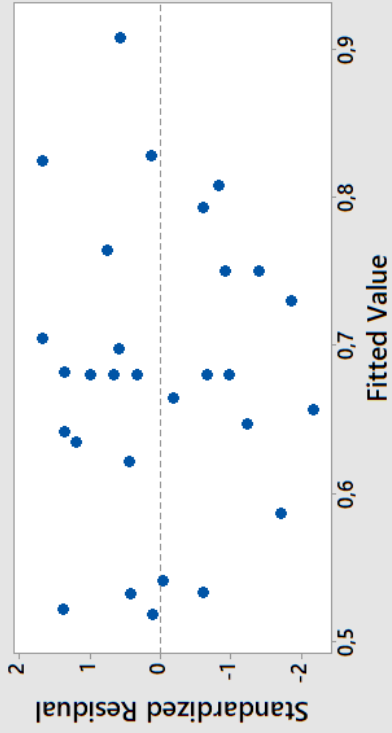


Gráficos de resíduos para a ZTA

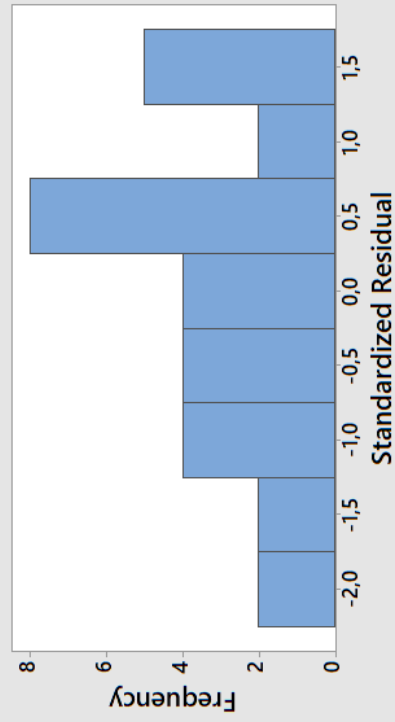
Normal Probability Plot



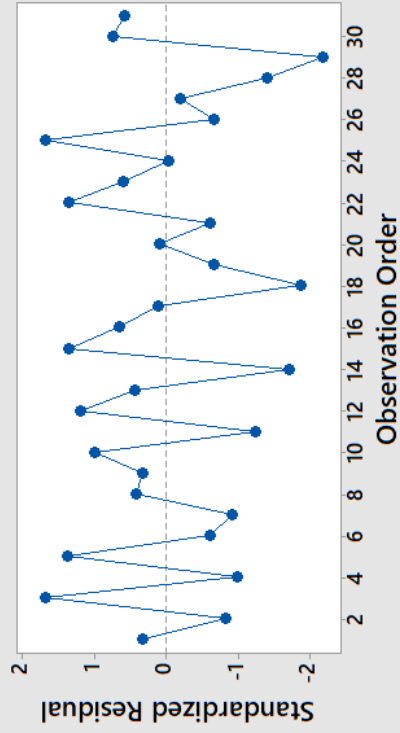
Versus Fits



Histogram



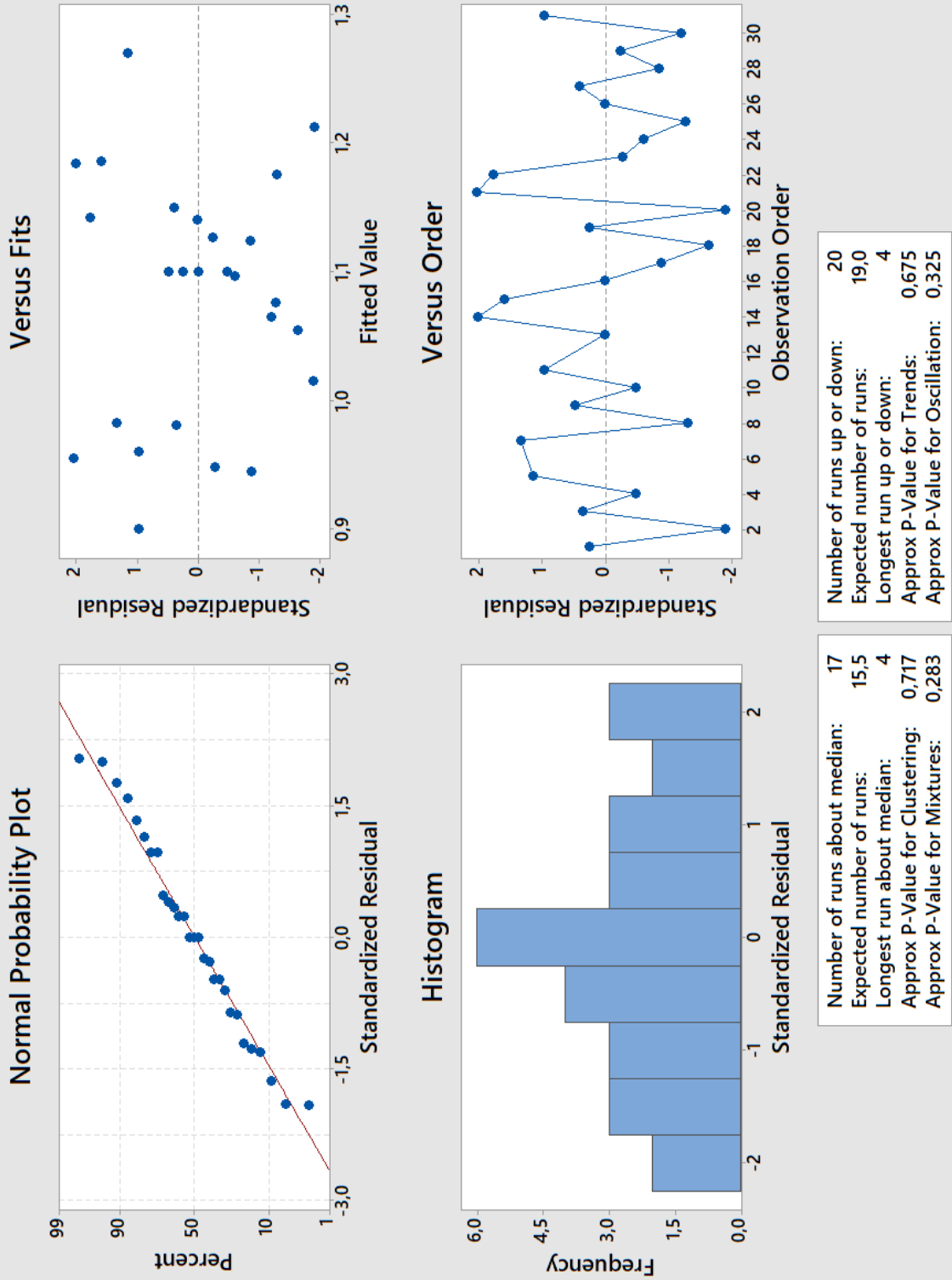
Versus Order



| | |
|--------------------------------|-------|
| Number of runs about median: | 17 |
| Expected number of runs: | 16,5 |
| Longest run about median: | 5 |
| Approx P-Value for Clustering: | 0,575 |
| Approx P-Value for Mixtures: | 0,425 |

| | |
|---------------------------------|-------|
| Number of runs up or down: | 23 |
| Expected number of runs: | 20,3 |
| Longest run up or down: | 3 |
| Approx P-Value for Trends: | 0,879 |
| Approx P-Value for Oscillation: | 0,121 |

Gráficos de resíduos para a penetração



ANEXO D – Modos de falha dos pontos do Arranjo CCD após o ensaio de cisalhamento por tração

