

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

TESE DE DOUTORADO

**A INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM RSW SOBRE AS
PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E TENSÃO
RESIDUAL DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO
AISI 444.**

Autor: Adriano Cássio Baldim

Orientador: Dr. Gilbert Silva

Co-Orientador: Dr. Manoel Ribeiro da Silva

Itajubá, Setembro de 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

TESE DE DOUTORADO

**A INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM RSW SOBRE AS
PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E TENSÃO
RESIDUAL DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO
AISI 444.**

Autor: **Adriano Cássio Baldim**

Orientador: **Dr. Gilbert Silva**

Co-Orientador: **Dr. Manoel Ribeiro da Silva**

Curso: **Doutorado em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Setembro de 2019

MG – Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

TESE DE DOUTORADO

**A INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM RSW SOBRE AS
PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E TENSÃO
RESIDUAL DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO
AISI 444.**

Autor: **Adriano Cássio Baldim**

Orientador: **Dr. Gilbert Silva**

Co-Orientador: **Dr. Manoel Ribeiro da Silva**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gilbert Silva, Presidente – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Manoel Ribeiro da Silva – IFQ/UNIFEI

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva – IEPG/UNIFEI

Prof. Dra. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Sérgio Souto Maior Tavares – DEM/UFF

Prof. Dr. Pedro José Papandrea – DCA/UNA

Dedicatória

À Deus pela luz e sabedoria, a Universidade Federal de Itajubá pela oportunidade de estudo, a família e aos amigos pelo apoio e incentivo.

Agradecimentos

Aos professores Dr. Gilbert Silva, Dr. Manoel Ribeiro da Silva, Dr. Anderson Paiva, Dr. Sebastião Carlos da Costa, Dr. José Henrique, Dr. Edmilson Otoni Correa, pela sabedoria, orientação e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelo competente corpo administrativo e docente e por seus dedicados funcionários, pela oportunidade de crescimento com a realização deste trabalho e pela aprendizagem no convívio profissional.

Aos funcionários da oficina mecânica da UNIFEI, em especial Marcos Cirilo dos Santos, Claudemiro Luz Teodoro e Arlei de Melo Rodrigues, pela ajuda e dicas nas atividades de laboratório de usinagem e metalografia.

A Universidade Federal Fluminense representada pela professora Dra. Maria da Penha Cindra Fonseca, pela colaboração nas análises de tensão residual.

A Universidade Federal de São Carlos representada pelo professor Dr. Adilson Jesus Aparecido de Oliveira pela colaboração nas análises de propriedades magnéticas.

As empresas APERAM e IMBEL representadas por Tarcísio Reis de Oliveira e Júlio Cesar da Silva pela amizade, pela colaboração nas análises químicas e informações técnicas.

A empresa PRÁTICA representada pela Karina, pela colaboração na doação das chapas de aço inoxidável AISI 444.

Aos meus pais Joaquim I. Baldim e Elza Ap. Baldim pela educação e pelo exemplo de vida, e aos meus irmãos Diego S. Baldim e Leandro H. Baldim, pela amizade e companheirismo ao longo de toda a vida.

Aos amigos Tarcísio Gonçalves de Brito, Leonardo Albergaria Oliveira, Leonardo Della Costa, Matheus Campos Martins, Ítalo do Valle Tomaz, Camila da Silva Ferreira, Edinaldo Luciano da Silva, Marco de Paula Cougo e Gustavo dos Santos Leal pela convivência, pela amizade e apoio durante este trabalho.

Aos amigos e colegas de trabalho do Instituto Federal do Sul de Minas pelo companheirismo e compreensão com desfecho desta pesquisa.

Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.

Thomas Edison

Resumo

Baldim, A.C. A influência da soldagem RSW sobre as propriedades magnéticas e tensão residual do aço inoxidável ferrítico AISI 444. 2019. 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

O conhecimento sobre a soldabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos é de grande importância acadêmica e industrial pelo potencial de ampliação da aplicabilidade desta liga em diversos ramos da indústria. Muito embora a natureza dos processos de soldagem possa interferir na microestrutura, união de materiais pela mescla da atuação simultânea de calor e deformação ambos presentes no processo de soldagem por resistência elétrica (Resistance Spot Welding - RSW), alteram as propriedades magnéticas, de tensão residual e de tamanho de grão dos aços inoxidáveis ferríticos. As alterações além de auferir baixa resistência a soldagem limitam o campo de aplicação deste material. Além disso, os elementos intersticiais presentes colaboram para diminuição da tenacidade e resistência a corrosão. Dependendo da utilização final, a magnetização presente no aço também torna-se um fator complicador. Assim esta tese teve por finalidade quantificar a influência da soldagem RSW sobre as propriedades magnéticas, microestruturais e de tensão residual do aço inoxidável ferrítico AISI 444. Métodos estatísticos DOE (Design of Experiments) foram utilizados como ferramenta de análise. As variáveis do processo escolhidas foram a corrente, o tempo, a pressão e a rampa de descida da corrente de soldagem. Foi avaliado a possibilidade de desmagnetização do ponto soldado durante o processo de soldagem. Partindo-se de uma condição otimizada os testes de soldagem foram realizados juntamente a um sensor de deslocamento indutivo para quantificar a deformação da soldagem. Evidências mostraram que a parametrização da soldagem RSW possui significativa influência sobre o tamanho de grão e este por sua vez pode influenciar algumas das propriedades magnéticas e tensionais do material. A minimização das alterações magnéticas pode ser obtida durante o processo de soldagem.

Palavras-chave: Aço inoxidável ferrítico, energia de soldagem, tensão residual, propriedades magnéticas, tamanho de grão, soldagem a ponto por resistência.

Abstract

Baldim, A.C. The influence of RSW welding on the magnetic properties and residual stress of ferritic stainless steel AISI 444. 2019. 134 p. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) – Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.

Knowledge about the weldability of ferritic stainless steels of great academic and industrial importance by the potential for increasing the applicability of this alloy in various industry branches. Although the nature of welding processes can interfere with the microstructure joining materials by the combination of simultaneous heat actuation and deformation both present in the RSW (Resistance Spot Welding) process alters the magnetic properties, residual stress and grain size of ferritic stainless steels. Changes in addition to low resistance to welding limit the field of application of this material. In addition the present interstitial elements contribute to decreased toughness and corrosion resistance. Depending on the end use the magnetization present in the metal also becomes a complicating factor. Thus this thesis aimed to quantify the influence of RSW welding on the magnetic microstructural and residual stress properties of AISI 444 ferric stainless steel. DOE (Design of Experiments) statistical methods were used as an analysis tool. The process variables chosen were the current the time the pressure and the downward slope of the welding current. The possibility of demagnetization of the welded spot during the welding process was evaluated. Starting from an optimized condition the welding tests were performed together with an inductive displacement sensor to quantify the welding deformation. Evidence has shown that RSW welding parameterization has a significant influence on grain size and this in turn may influence some of the material's magnetic and tensional properties. Minimization of magnetic changes can be achieved during the welding process.

Keywords: Ferritic stainless steel, welding energy, residual stress, magnetic properties, grain size, resistance spot welding.

Sumário

| | |
|--|-------------|
| Dedicatória | iv |
| Agradecimentos | v |
| Resumo | vii |
| Abstract | viii |
| Sumário | i |
| Lista de Figuras | iii |
| Lista de Quadros | vii |
| Lista de Tabelas | vii |
| Simbologia | viii |
| Letras Latinas | viii |
| Letras Gregas | ix |
| Abreviaturas e Siglas | ix |
| Capítulo 1 | 1 |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Motivação e Justificativa | 3 |
| 1.2. Objetivos | 5 |
| 1.4. Estrutura do trabalho..... | 6 |
| Capítulo 2 | 7 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 7 |
| 2.1. A soldagem RSW..... | 8 |
| 2.2. Os Aços Inoxidáveis | 12 |
| 2.2.1. Aços Inoxidáveis Ferríticos..... | 13 |
| 2.3. Propriedades magnéticas..... | 19 |
| 2.3.1. Correção devido ao campo desmagnetizante | 22 |
| 2.4. Análise da tensão residual..... | 24 |
| 2.5. Os efeitos da soldagem sobre as propriedades magnéticas e tensão residual dos aços..... | 28 |
| 2.6. Planejamento e Análise de Experimentos..... | 35 |
| 2.6.1. Correlação de Pearson..... | 36 |
| 2.6.2. Arranjo Fatorial e Superfície de Resposta | 36 |

| | |
|--|------------|
| 2.7. Avaliação da qualidade da soldagem..... | 40 |
| Capítulo 3 | 42 |
| 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 42 |
| 3.1. Procedimento experimental e Técnicas de caracterização..... | 43 |
| 3.1.1. Parametrização da soldagem..... | 45 |
| 3.2. A caracterização da tensão residual..... | 46 |
| 3.3. A caracterização magnética..... | 48 |
| 3.4. A caracterização microestrutural..... | 49 |
| 3.4. Medidas de dureza..... | 50 |
| 3.5. Ensaio de cisalhamento..... | 51 |
| 3.6. Procedimento experimental..... | 51 |
| Capítulo 4 | 57 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSÃO | 57 |
| 4.1. Resultados dos testes preliminares - Etapa 1..... | 57 |
| 4.2. Planejamento de experimentos DOE – Etapa 2..... | 70 |
| 4.2.1. A matriz experimental..... | 71 |
| 4.3. Análise dos resíduos..... | 80 |
| 4.4. Adequação dos modelos..... | 81 |
| 4.4. Modelagem matemática das respostas..... | 85 |
| 4.5. Análise dos efeitos principais e interações dos parâmetros..... | 96 |
| Capítulo 5 | 119 |
| 5. CONCLUSÕES | 119 |
| 5.1. Conclusões..... | 119 |
| 5.2. Sugestão de Trabalhos Futuros..... | 120 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 121 |
| 7. PUBLICAÇÕES REALIZADAS..... | 129 |
| 8. ANEXOS..... | 131 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2-1- Esboço e resistências do processo RSW. | 8 |
| Figura 2-2 – Efeito Shunt. | 10 |
| Figura 2-3 - Subida e descida da corrente. | 11 |
| Figura 2-4 – Curva senoidal da frequência de 60Hz. | 11 |
| Figura 2-5 – Sensor de deslocamento eletrodo..... | 12 |
| Figura 2-6 - O consumo de aço inoxidável pelo mundo..... | 13 |
| Figura 2-7 – Diagrama Fe-Cr | 15 |
| Figura 2-8 – Aço AISI 430: (a) Microestrutura da soldagem e metal base, (b) Fe-Cr-C pseudo-binary diagrama para 17% Cr , (c) Divisão das microestruturas dentro de ZTA, (d) MT-ZTA Microestrutura, (e) BT-ZTA Microestrutura, (f) Perfil de dureza do ponto soldado. | 16 |
| Figura 2-9 – 430Nb: a) microestrutura com adição de nióbio, (b) sem adição de nióbio. | 18 |
| Figura 2-10 – (a) Variação da magnetização de saturação pela deformação Lean Duplex UNS S 32304, (b) Força coerciva pela temperatura AISI 444. | 20 |
| Figura 2-11 – a) & b) Relação dos domínios magnéticos com a magnetização, c) Curva de magnetização. | 21 |
| Figura 2-12 – (a) magneto duro, (b) magneto mole. | 22 |
| Figura 2-13 - Correção do campo desmagnetizante. | 23 |
| Figura 2-14 - Superposição de Tensões: tipos I, II e III. | 25 |
| Figura 2-15 - Sistema de coordenadas..... | 26 |
| Figura 2-16 – Geometrias analisadas por difração de raios X..... | 26 |
| Figura 2-17 – a) Distâncias interplanares de grãos sem tensão, b) Difração de Bragg. | 28 |
| Figura 2-18 – Aço AISI 409. (a) Perfil de dureza, (b) Energia de falha | 29 |
| Figura 2-19 – Soldagem dissimilar com aços: AISI 430 e AISI 304. (a) Curvas de extensão de tensão de cisalhamento, (b) Microdureza do corpo de prova com tempo de soldagem de 1.2 s. | 30 |
| Figura 2-20 – AISI 301. Deslocamento do eletrodo pela: (a) Diâmetro da lentilha de soldagem, (b) Corrente de soldagem | 30 |
| Figura 2-21 – AISI 304. (a) Pressão de contato entre chapas, (b) Tensão residual na superfície da solda. | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 2-22 – Aços de Alta Resistência:(a) Tensão residual pela variação da força aplicada, AISI 304: (b) Tensão residual pela variação da corrente aplicada. | 32 |
| Figura 2-23 – Variação da temperatura e da massa do eletrodo em função do ângulo da ponta, (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°..... | 33 |
| Figura 2-24 – AISI 1060. Tensão residual versus: (a) Magnetização de saturação, (b) permeabilidade..... | 33 |
| Figura 2-25 – Correlação entre os valores de permeabilidade magnética com a distribuição da tensão residual por meio de 4 técnicas. | 34 |
| Figura 2-26 – Linhas de fluxo magnético ante anomalia no material soldado..... | 34 |
| Figura 2-27 – Laço da histerese: (a) A dureza, (b) A deformação. | 35 |
| Figura 2-28 – Variância para diferentes quantidades de center points..... | 38 |
| Figura 2-29 – Tipos de arranjos experimentais ortogonais..... | 39 |
| Figura 2-30 – Superfícies de resposta: Linear e Curvatura. | 39 |
| Figura 2-31 - Modos de falha: (a) interfacial (b) arrancamento do ponto (c) rasgamento da chapa. | 41 |
| Figura 2-32 - Tipos de medições do ponto de solda Fonte: Branco (2004). | 41 |
| Figura 3-1 – Equipamento de soldagem RSW. | 43 |
| Figura 3-2 – Detalhes de parte do equipamento de soldagem: a) acoplamento do sensor LVDT, b) eletrodo utilizado..... | 44 |
| Figura 3-3 - Corpos de prova para etapa 2. | 45 |
| Figura 3-4 - Critério de ajuste para os filtros do sistema de coleta e amostragem. | 46 |
| Figura 3-5 – Difratômetro de raios X StressRad. | 47 |
| Figura 3-6 - Magnetômetro de Corpos de prova Vibrante Lake Shore. | 48 |
| Figura 3-7 Equipamentos metalográficos: Microscópio metalográfico. | 50 |
| Figura 3-8 – Microscópio eletrônico de varredura ZEISS. | 50 |
| Figura 3-9 – Representação esquemática posições das medidas de dureza. | 51 |
| Figura 3-10 - Corpos de prova para etapa 1. | 52 |
| Figura 3-11 – Fluxograma da etapa 1..... | 53 |
| Figura 3-12 – Esboço dos tempo de rampa de descida a corrente de soldagem, etapa 1. | 54 |
| Figura 3-13 – Ponta do eletrodo: a) impressão em papel A4, b) contagem de pixel para determinar a área. | 55 |
| Figura 3-14 – Fluxograma da etapa 2..... | 56 |
| Figura 4-1 – Histerese: a) campo coercivo H_c e magnetização remanente M_r , b) magnetização de saturação M_s | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-2 – Corpos de provas 1, 2, 3 e 6 pós soldadas RSW com rampa de descida da corrente. (a) campo coercivo H_c , (b) permeabilidade PER, (c) campo remanente M_r , (d) Saturação M_s , (e) Energia de soldagem Q , (f) Deformação L | 60 |
| Figura 4-3 – Microestrutura após RSW com rampa de 30% do tempo de soldagem. CP 1: a) sem rampa e b) com rampa; CP 2: c) sem rampa, e d) com rampa; CP 3: e) sem rampa, e f) com rampa; CP 6: g) sem rampa, e h) com rampa. | 61 |
| Figura 4-4 – Influência do tamanho de grão sobre o campo coercivo H_c | 62 |
| Figura 4-5 - Influência da deformação (L) sobre o tamanho de grão ASTM. | 63 |
| Figura 4-6 –Baixa e alta magnificação da região central do ponto de soldagem: a-b) CP1, c-d) CP2, e-f) CP3, g-h) CP4, i-j) CP5, k-l) CP6, m-n) CP7. | 63 |
| Figura 4-7 – Imagem do MEV para o aço AISI 444. CP3: a) precipitado, b) Análise química dos precipitados | 66 |
| Figura 4-8 – Imagem do MEV para o aço AISI 444, CP 3: Distribuição dos precipitados. | 67 |
| Figura 4-9 – Imagem do MEV para o aço AISI 444, CP1: microestrutura da ZTA. | 67 |
| Figura 4-10 – Níveis de dureza na microestrutura do aço AISI 444 pós soldagem RSW. | 68 |
| Figura 4-11 –Centro do laço da histerese. | 71 |
| Figura 4-12 – Regressão linear de M_r | 72 |
| Figura 4-13 - Superfície de resposta para energia de soldagem (Q). Valores fixos: Rampa=6, Pressão=5. | 86 |
| Figura 4-14 - Superfície de resposta para deformação (L). Valores fixos: pressão=5, Rampa=6. | 87 |
| Figura 4-15 –Superfície de resposta para densidade da corrente (D_c). Valores fixos: pressão=5, Rampa=6. | 87 |
| Figura 4-16 - Superfície de resposta para tensão residual (TR). Valores fixos: pressão=5, Rampa=6. | 88 |
| Figura 4-17- Superfície de resposta para campo coercivo (H_c). Valores fixos: pressão=5, Corrente=80. | 88 |
| Figura 4-18 - Superfície de resposta para campo remanente (M_r). Valores fixos: tempo=10, Rampa=6. | 89 |
| Figura 4-19 - Superfície de resposta para magnetização saturação (M_s). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 89 |
| Figura 4-20 - Superfície de resposta para permeabilidade (PER). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4-21 - Superfície de resposta para área do laço da histerese (Ah). Valores fixos: Tempo=10, Rampa=6. | 90 |
| Figura 4-22 - Superfície de resposta para inclinação do laço da histerese (Inc). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 91 |
| Figura 4-23 - Superfície de resposta para metal base (MB). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 91 |
| Figura 4-24 - Superfície de resposta para zona termicamente afetada (ZTA). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 92 |
| Figura 4-25 - Superfície de resposta para zona fundida (ZF). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 92 |
| Figura 4-26- Superfície de resposta para zona fundida (HvMB). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 93 |
| Figura 4-27-Superfície de resposta para zona fundida (HvZTA). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 93 |
| Figura 4-28-Superfície de resposta para zona fundida (HvZF). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 94 |
| Figura 4-29 -Superfície de resposta para zona fundida (\emptyset). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 94 |
| Figura 4-30-Superfície de resposta para zona fundida (Fmax). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 95 |
| Figura 4-31-Superfície de resposta para zona fundida (DFmax). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6. | 95 |
| Figura 4-32 – Área da ponta do eletrodo: a) CP 28=19,6132mm ² , b) CP 6=13,0880mm ² | 98 |
| Figura 4-33 - Efeito dos parâmetros na Densidade de Corrente - Dc..... | 99 |
| Figura 4-34 – Efeito dos parâmetros na Deformação – L | 100 |
| Figura 4-35 - Efeito dos parâmetros no campo coercivo - Hc..... | 101 |
| Figura 4-36 - Efeito dos parâmetros no metal base - MB | 102 |
| Figura 4-37 - Efeito dos parâmetros no zona termicamente afetada - ZTA | 103 |
| Figura 4-38 - Efeito dos parâmetros no zona fundida – ZF..... | 105 |
| Figura 4-39 - Efeito dos parâmetros na Tensão Residual..... | 106 |
| Figura 4-40 - Efeito dos parâmetros no Campo Remanente - Mr | 107 |
| Figura 4-41 - Efeito dos parâmetros na magnetização de saturação - Ms..... | 108 |
| Figura 4-42 - Efeito dos parâmetros na permeabilidade - PER..... | 109 |
| Figura 4-43 - Efeito dos parâmetros sobre Área do Laço da Histerese - Ah..... | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4-44 - Efeito dos parâmetros em inclinação do laço da histerese - Inc..... | 111 |
| Figura 4-45 - Efeito dos parâmetros em Energia de Soldagem - Q..... | 112 |
| Figura 4-46 - Efeito dos parâmetros em dureza no metal base – HvMB | 113 |
| Figura 4-47 - Efeito dos parâmetros em dureza na zona termicamente afetada – HvZTA | 114 |
| Figura 4-48 - Efeito dos parâmetros em dureza na zona fundida – HvZF | 115 |
| Figura 4-49 - Efeito dos parâmetros em diâmetro da pepita – Ø | 116 |
| Figura 4-50 - Efeito dos parâmetros em força máxima de ruptura – Fmax..... | 117 |
| Figura 4-51 - Efeito dos parâmetros em deformação na força máxima de ruptura – DFmax. | 118 |

Lista de Quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 1-1 – Respostas analisadas nos trabalhos relevantes para esta pesquisa. | 3 |
| Quadro 3-1 - Parâmetros reguláveis no equipamento de solda ponto. | 45 |
| Quadro 3-2 Parâmetros de medição das tensões residuais. | 47 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2-1– Valores recomendados de pontos para o planejamento de experimentos | 37 |
| Tabela 4-1 – Composição química (conforme recebido - CR) do aço na etapa 1 – lote A. | 58 |
| Tabela 4-2– Dados das respostas escolhidas para etapa 1..... | 58 |
| Tabela 4-3. Tamanho de grão das corpos de provas segundo norma ASTM (2004). | 62 |
| Tabela 4-4 – Correlação entre respostas da etapa 1..... | 69 |
| Tabela 4-5 – Composição química (conforme recebido - CR) do aço na etapa 2 – lote B. | 70 |
| Tabela 4-6 – Parâmetros RSW e respostas do fatorial completo. | 73 |
| Tabela 4-7 – Parâmetros RSW e respostas do fatorial completo. | 74 |
| Tabela 4-8 - Parâmetros RSW e respostas do fatorial completo. | 75 |
| Tabela 4-9 – Curvatura em cada resposta no fatorial completo. | 75 |
| Tabela 4-10 – Curvatura em cada resposta no fatorial completo. | 76 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4-11 - Curvatura em cada resposta no fatorial completo..... | 76 |
| Tabela 4-12 – Parâmetros RSW e respostas da superfície de resposta. | 77 |
| Tabela 4-13 – Parâmetros RSW e respostas da superfície de resposta. | 78 |
| Tabela 4-14 - Parâmetros RSW e respostas da superfície de resposta. | 79 |
| Tabela 4-15 – Análise dos Resíduos | 80 |
| Tabela 4-16 – Indicadores “Run Chart” | 81 |
| Tabela 4-17 – Melhores modelos adotados | 82 |
| Tabela 4-18 – Melhores modelos adotados | 82 |
| Tabela 4-19 – Coeficientes codificados dos parâmetros para superfície de resposta..... | 83 |
| Tabela 4-20 – Coeficientes codificados dos parâmetros para a superfície de resposta..... | 84 |
| Tabela 4-21 – Coeficientes codificados dos parâmetros para a superfície de resposta..... | 84 |
| Tabela 4-22 – Correlação entre as respostas (y)..... | 96 |
| Tabela 4-23 – Correlação entre as respostas (y)..... | 97 |
| Tabela 8-1 – Respostas coletadas mas não analisadas na tese. | 134 |

Simbologia

Letras Latinas

| | |
|----------------|---|
| e | espessura da chapa |
| I | corrente |
| R | resistência elétrica |
| R ² | ajuste do modelo matemático em relação ao modelo real |
| U | tensão de solda |
| y | Resposta de interesse |
| xi | Parâmetros independentes |
| k | Número de parâmetros independentes |
| d _i | coeficiente do desirability $0 \leq d_i \leq 1$. |
| D | Índice global do desirability |
| Y _k | Valor ajustado da resposta |

Letras Gregas

| | |
|-----------------|---------------------------------------|
| σ | Tensão Residual |
| μ | Permeabilidade Magnética |
| ω | Ângulo de rotação dos corpos de prova |
| ν | Coefficiente de Poisson |
| ε | Deformação na rede cristalina. |
| λ | Comprimento de onda |
| θ | Ângulo de incidência e reflexão |
| ψ, φ | Direção das tensões |
| ξ | Fator de pressão |
| ρ | Resistividade elétrica |

Abreviaturas e Siglas

| | |
|-------|--|
| AISI | American Iron and Steel Institute |
| ANOVA | Análise de Variância |
| AWS | American Welding Society |
| CCD | Central Composite Design |
| DOE | Design of Experiments |
| EDS | Energy Dispersive Spectroscopy |
| ISO | International Organization for Standardization |
| LOF | Lack of Fit |
| LVDT | Linear Voltage Differential Transdutor |
| MAG | Metal Ativo Gás |
| MIG | Metal Inerte Gás |
| MSR | Metodologia de Superfície de Resposta |
| RSW | Resistance Spot Welding |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| TIG | Tungstênio Inerte Gás |

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o mercado vem sentindo os efeitos da instabilidade do preço do níquel, que ao estar incorporado a várias categorias de aço inoxidável, tem oscilado no mercado (Aperam, 2019) e do qual; o Brasil não dispõe de grandes reservas (BADOO, 2008). Logo, o aço inoxidável ferrítico, teria um potencial de reduzir o custo de produção em diversas aplicações viabilizando uma maior utilização em diversos produtos pelo mercado (SHANMUGAM, 2009). Atualmente, as principais aplicações dos aços inoxidáveis ferríticos, limitam-se a sistemas para aquecimento de água, revestimentos internos de equipamentos, trocadores de calor, sistemas de exaustão de gases em motores de explosão, estampagem em geral, utensílios de cozinha, refinarias de petróleo e sucroalcooleiro (MADEIRA, 2008; APERAM, 2019; ACELORMITTAL, 2019).

Sua utilização tem sido limitada pelas baixas soldabilidade e tenacidade. Segundo Modenesi (2001) a aplicabilidade pode estar ligada ao teor de elementos intersticiais (C, N, O, S) que influenciam na corrosão por pites (extremamente localizada e causa a formação de pequenos furos no metal) e intergranular devido ao empobrecimento de cromo livre no contorno do grão (Huang, 2015). O contorno de grão é definido como o desordenamento atômico que ocorre nas regiões onde os grãos se encontram. Os grãos e/ou agregado de cristais tridimensionais (formados pelo agrupamento de átomos) representam uma estrutura metálica de tamanhos e formas variados. O tamanho do grão é definido pelo número de grãos por polegada quadrada em uma magnificação metalográfica de 100x segundo ASTM E112 (2010).

Com intuito de minimizar a corrosão intergranular durante a soldagem alguns elementos de liga (como o titânio Ti e o nióbio Nb) presentes nos aços inoxidáveis ferríticos agem no sentido de minimizar o problema, pela formação de precipitados de TiN e NbC que são mais estáveis. Neste contexto, o aço AISI 444 (Sistema americano para classificação dos aços - AISI - American Iron and Steel Institute) ganha destaque. A presença do Ti e Nb tende a limitar o crescimento de grão das regiões soldadas (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1994; ANTUNES, 2010; ACELORMITTAL, 2019). O elevado teor de molibdênio aumenta a resistência a corrosão por pites. Muito embora, a utilização desta liga deva considerar as capacidades e restrições individuais pertinentes a cada processo e material, a deformação e o calor (ambos presentes nos processos de soldagem) podem alterar as propriedades magnéticas (ASSDA, 2007), a microestrutura (MODENESI, 2001) e a tensão residual (Iyota, 2013) em chapas de aço de alta resistência pós soldagem. Segundo Kwun (1987) e Vashista (2009), as tensões residuais e a microestrutura podem ter relação com as propriedades magnéticas. Assim, o desenvolvimento de conhecimento sobre sua soldagem desta liga além de melhorar a soldabilidade pode indicar novas direções que possibilitem o uso seguro em aplicações das mais distintas (MOREIRA, 2009). Como exemplo, no ramo automotivo (Meyer, 2013; Villares Metals, 2016), aplicações biomédicas (MARTIN et al., 2008; MALHEIRO, 2011) entre outras. Uma análise pós soldagem do tamanho de grão, das propriedades magnéticas, das tensões residuais bem como da deformação e da energia de soldagem, pode determinar os níveis de influência e correlação com a parametrização RSW.

A deformação coletada por meio do sinal de deslocamento do eletrodo e a energia de soldagem foram quantificadas, sendo esta última equacionada. Um magnetômetro de amostra vibrante e um equipamento de difração de raios X foram utilizados para coleta do sinal magnético, e das tensões residuais. Um microscópio de varredura eletrônica (MEV) e um microscópio ótico (MO) para obter a microestrutura do material pós soldagem. Além disso, o tamanho de grão pós soldagem e sua influência perante as propriedades magnéticas foi quantificada. Buscando otimizar a aplicabilidade do método proposto, as propriedades magnéticas, de tensão residual e de tamanho de grão foram contrapostas a parametrização RSW, por meio de métodos estatísticos (MONTGOMERY, 2009). A compreensão da influência destes parâmetros de soldagem pode constituir-se num meio eficiente de se eliminar ou minimizar a alteração magnética e tensional quando da realização da soldagem no aço AISI 444.

1.1. Motivação e Justificativa

Com o objetivo de quantificar a influência da soldagem sobre as propriedades magnéticas, microestruturais e de tensão residual vem sendo abordada pela literatura, uma pesquisa bibliográfica sobre análise das propriedades magnéticas em aços foi realizada entre os principais periódicos do meio científico e mostrada no **Quadro 1-1**. Foi utilizado como critério de busca as expressões “propriedades magnéticas” (“magnetic properties”) e “aços inoxidáveis” (“stainless steel”) e “tensão residual” (“residual stress”) dentro do cenário de “soldagem por resistência” (“resistance spot welding”).

Quadro 1-1 – Respostas analisadas nos trabalhos relevantes para esta pesquisa.

| ANO | AUTOR | PROCESSO | AÇO | RESPOSTAS ANALISADAS | | | | | | | | | | | | | |
|------|-------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----|----|-----|----|---|------|----|---|------|----|------|---|---|
| | | | | Hc | Mr | Ms | PER | TR | F | M.F. | Rc | D | D.E. | HV | M.E. | | |
| 2016 | Subrammanian | RSW | 409 | | | | | | | x | x | | x | | x | x | |
| 2015 | Pouranvari | RSW | 430 | | | | | | | | | | | | | x | |
| 2015 | Vourna <i>et al.</i> | Feixe eletrons | AISI 1008 | x | x | | | x | * | | | | | | | x | |
| 2015 | Alisadeh | RSW | AISI 430 | | | | | | | x | x | | | | | x | x |
| 2014 | Bina <i>et al.</i> | RSW | 430/304 | | | | | | | | x | | x | | | | x |
| 2014 | Moshayedi | RSW | 304 | | | | | x | | | | | x | | | | |
| 2014 | Wei | RSW | binary alloy | | | | x | | | | | | x | | | | x |
| 2013 | Iyota | RSW | HT980 NSS | | | | | x | | | | | | | | | |
| 2013 | Li <i>et al.</i> | RSW | low carbon steel | | | | | | | | | | x | | | | |
| 2012 | Tseng | RSW | 301 | | | | | | | | | | x | x | | | |
| 2012 | Tavares | Heat treatment | duplex | | | x | | | | x | | | | | | x | x |
| 2010 | Thakur | RSW | 304 | | | | | | | x | | | | | | | |
| 2009 | Karci | RSW | 304 | | | | | | | x | | | x | | | x | x |
| 2009 | Vashista | Plastic deformation | AISI 1060 | x | x | x | x | x | * | | | | | | x | x | |
| 2008 | Kocabekir <i>et al.</i> | RSW | 316 | | | | | | | | x | | x | | | x | x |
| 2008 | Khanna | RSW | low carbon steel | | | | | x | | | | | | | | | |
| 2008 | Tavares <i>et al.</i> | Heat treatment | 444 | x | x | | | | | | | | | | | x | x |
| 2006 | Zhang | RSW | low carbon steel | | | | | x | | | | | | | | | |
| 2005 | Souza <i>et al.</i> | Heat treatment | 444 | x | | x | | | | | | | | | | x | x |
| 2000 | Makar | Plastic deformation | Carbono steel alloys | x | x | x | x | x | | | | | | | | | |
| 1987 | Kwun | Plastic deformation | AISI 410 | x | x | x | | x | | | | | | | | x | x |

Ao observar as publicações na área da soldagem RSW que englobam os aços inoxidáveis ferríticos, foi considerado os artigos que contemplavam outros tipos de aços bem como outros processos de manufatura dos quais apresentassem análise de propriedades magnéticas ou de

tensão residual. Dos artigos encontrados, somente 21 apresentaram alguma contribuição relevante para a pesquisa em questão. Considerando as mais diversas aplicações dos aços em geral nos dias atuais por meio dos processos de manufatura existentes, uma análise com base em literatura, nas mais diversas bases científicas, destaca que, a maior parte das pesquisas em 14 artigos têm-se direcionado a retratar o comportamento dos aços, no que tange sua aplicação final por meio dos processos de soldagem RSW (KARCI, 2009). Os casos menos comuns incluíram a soldagem por feixe de elétrons, tratamento térmico e deformação plástica. Observa-se que, nos artigos que envolvem características magnéticas os estudos concentram-se sobre Hc (campo coercivo), Mr (campo remanente), Ms (magnetização de saturação) e PER (Permeabilidade); juntamente a HV(dureza Vickers), M.E (microestrutura), TR (tensão residual por difração de X-Ray), F (Força de tração), M.F.(Modo de Falha), Rc (Resistência de contato), D (Diâmetro do ponto de soldagem), D.E. (Deslocamento do eletrodo), * TR (tensão residual por Barkhausen Noise).

Apenas 8 artigos retratam análises magnéticas. Somente 7 artigos foram considerados os aços inoxidáveis ferríticos como material de pesquisa. Dos 4 artigos que analisam o modo de falha, 3 artigos referem-se aos aços inoxidáveis ferríticos. Dos 11 artigos que analisam a microestrutura apenas 7 referem-se aos aços inoxidáveis ferríticos sendo 2 deles retratam o comportamento do aço AISI 444. Fato este pode ser justificado pela baixa soldabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos segundo Modenesi (2001).

Considerando que oportunidades de melhoria e aprimoramento sempre existem, percebe-se que, na maioria dos trabalhos pesquisados pouco estudo faz-se referência aos aços ferríticos estabilizados por meio da soldagem RSW, o que caracteriza, portanto como um campo ainda a ser explorado. Em se tratando de soldagem a ponto por resistência elétrica, esta promove deformação e calor (energia de soldagem) no metal base. A energia de soldagem induz o crescimento de grãos nos aços inoxidáveis ferríticos (Alisadeh, 2015) bem como a formação de precipitados (carbonetos e nitretos) que podem empobrecer os contornos de grão contribuindo para a fragilidade da soldagem (MODENESI, 2001). Embora Kocabekir (2008) e Karci (2009) tenham observado uma crescente utilização do processo RSW em aços inoxidáveis informações sobre a influência dos parâmetros de tempo, pressão, corrente e rampa de descida da corrente de soldagem em aços inoxidáveis ferríticos (em especial AISI 444) ainda são escassos. Além disso, a alteração microestrutural e magnética não estão bem esclarecidas na literatura. A natureza magnética tem-se tornado um fator complicador na difusão da utilização de produtos fabricados com aço inoxidável ferrítico (MARTIN, 2008; MEYER *et al*, 2013). Pois em se tratando de soldagem, ao considerar a existência de um campo eletromagnético juntamente a

toda corrente elétrica (Cullity, 2009) a aplicação de uma rampa de descida poderia exercer a função do campo magnético oposto removido (Thamm, 1998), podendo assim retornar o metal para a magnetização inicial antes da soldagem. Poderia aqui vislumbrar que o ineditismo deste trabalho está no fato que pouco se tem discutido sobre como minimizar estas alterações no campo magnético durante a soldagem do aço AISI 444. Após a soldagem foram quantificados os efeitos do processo RSW sobre as propriedades magnéticas, tamanho de grão e de tensão residual pós soldagem.

A técnica usual para quantificar as mudanças magnéticas no metal pós soldagem como exemplo o magnetômetro de corpos de prova vibrante além de destrutiva apresenta alto custo e tempo de execução. Assim, caso a correlação entre deformação e propriedade magnética (ASSDA,2007) se confirme poderia conjecturar aqui que o sinal de deslocamento do eletrodo também seja um método de determinação on-line não destrutivo das propriedades magnéticas em aços inoxidáveis ferríticos.

1.2. Objetivos

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de cumprir os seguintes objetivos:

Objetivo geral:

- ✓ Quantificar, a influência da soldagem RSW no tamanho de grão, nas propriedades magnéticas e na tensão residual do metal AISI 444 por meio de um planejamento de experimentos (DOE).

Objetivo específico:

- ✓ Utilizar o planejamento de experimentos (DOE) para quantificar a influência da parametrização do processo RSW (tempo, corrente, pressão e rampa de descida da corrente) sobre as respostas de deformação, propriedades magnéticas, tensão residual, tamanho de grão e energia de soldagem.
- ✓ Avaliar a possibilidade da desmagnetização do ponto soldado, ainda durante o processo de soldagem.
- ✓ Quantificar a correlação entre as respostas escolhidas.

1.4. Estrutura do trabalho

Este primeiro capítulo teve como função justificar o problema de pesquisa no cenário industrial atual. Dentre suas aplicações, procurou-se demonstrar a relevância do processo considerando a utilização de materiais com propriedades anticorrosivas e magnéticas com intuito de introduzir, justificar e contextualizar o problema de pesquisa. Os fatores que motivaram a realização desta pesquisa foram então apresentados e os objetivos e delimitações devidamente estabelecidos. Por fim, para cumprir com o proposto, o presente trabalho foi elaborado em cinco capítulos, estando os demais organizados da seguinte maneira:

O **capítulo 2** apresenta uma revisão bibliográfica sobre aços inoxidáveis com intuito de embasar teoricamente esta pesquisa. Aborda-se ainda, de forma superficial, a soldabilidade RSW dos aços inoxidáveis ferríticos, suas propriedades magnéticas, mecânicas e microestruturais. Técnicas estatísticas usando Projeto e Análise de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*), como métodos importantes de aplicação prática industrial ganham destaque, considerando em conjunto inovações como a desmagnetização do aço inoxidável ferrítico e os parâmetros de soldagem RSW. Em resumo, este capítulo dedica-se a descrever o cenário atual no qual se insere este problema de pesquisa, mostrando uma visão sobre o ineditismo do tema proposto e quantificar as oportunidades de pesquisa e suas questões correlatas.

O **capítulo 3** descreve o planejamento experimental proposto, bem como os equipamentos utilizados para este fim, com intuito de demonstrar a aplicabilidade do método em questão.

O **capítulo 4** apresenta e discute os resultados obtidos com a simulação e planejamento estatístico e, a correlação entre propriedades presentes no material e na microestrutura.

O **capítulo 5** finaliza este trabalho apresentando as conclusões e as devidas contribuições da pesquisa e, possíveis caminhos para os trabalhos futuros.

Os **anexos** mostram dados complementares não inseridos no corpo principal do trabalho.

Capítulo 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

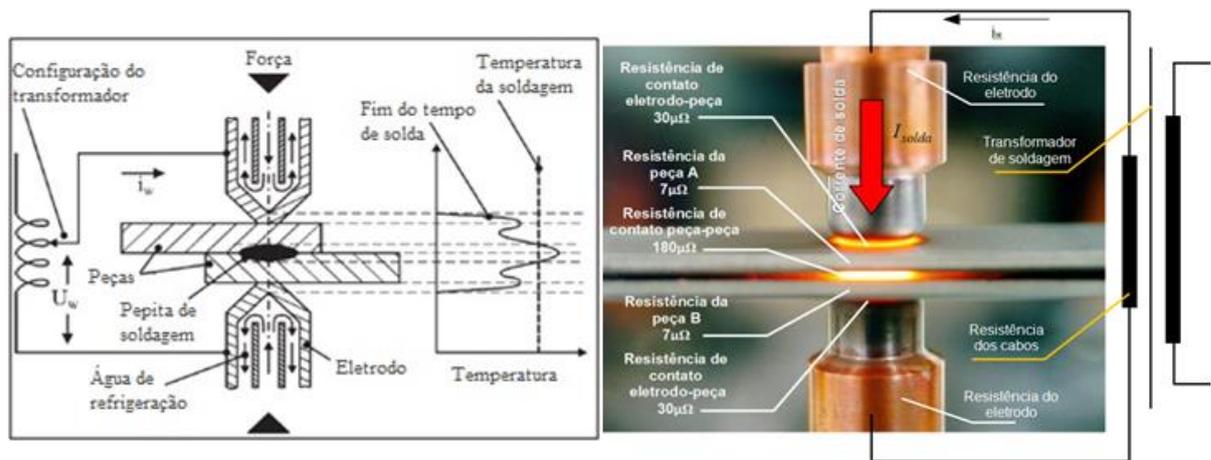
Durante a soldagem por resistência elétrica (Resistance Spot Welding – RSW), a deformação e o calor gerado, auferem ao metal base uma significativa transformação. Estas modificações, têm grande influência sobre as propriedades magnéticas e mecânicas da junta soldada. A ampla compreensão de tais propriedades faz-se necessário por revelar informações consideráveis sobre a qualidade da soldagem. Para tanto, este capítulo, tem por finalidade apresentar todo suporte teórico relativo sobre o estudo dos efeitos da soldagem a ponto por resistência RSW, em chapas de aços inoxidáveis. Uma análise das pesquisas anteriores envolvendo este processo de soldagem é apresentada, com a finalidade de identificar como vem sendo abordado pela literatura. Em seguida, faz-se necessário uma explanação sobre os aços inoxidáveis, suas propriedades e aplicações, quanto sua utilização no meio industrial e a repercussão no contexto da soldabilidade. O propósito desta seção é desenvolver uma análise crítica a respeito dos efeitos da soldagem RSW no magnetismo residual e de tensões residuais em chapas de aços inoxidáveis ferríticos, em especial o AISI 444. Procura-se, explorar o aspecto magnético do metal pós-soldagem, levando em consideração o aporte térmico teórico e a deformação do ponto soldado, sendo esta última caracterizada com base na resposta do sensor de deslocamento indutivo. Em seguida, várias questões são levantadas sobre aplicação da teoria do campo desmagnetizante, as inconsistências verificadas na literatura, tornando claras as contribuições deste trabalho. Por outro lado, com a utilização de técnicas de simulação, indaga-se o perfil térmico da soldagem pela modelagem da energia imposta. Por último, dentro de um cenário estatístico de projeto e análise de experimentos (*Design of Experiments* – DOE) discute-

se também o aspecto da influência da conjugação dos múltiplos parâmetros de entrada, sobre as particularidades otimizadas correlacionadas com a alteração das propriedades magnéticas dos aços inoxidáveis.

2.1. A soldagem RSW

O processo de soldagem a ponto por resistência a ponto segundo Feng (2006), é descrito pela união de duas ou mais peças de metal por meio da fusão. Tais peças, envoltas por dois eletrodos, superior e inferior que oferecem pressão, gerando calor conforme observado na **Figura 2-1**, no ponto de maior resistência a passagem da corrente elétrica, encontrado na interface das chapas a serem soldadas.

Figura 2-1- Esboço e resistências do processo RSW.



Adaptado de: PODRZAJ *et al*, 2008.

Este fenômeno pode ser explicado, pela resistência ao fluxo de corrente elétrica através na interface das peças metálicas, onde o calor, é gerado por meio do efeito joule, representado pela **Equação 2.1**, segundo Weiner *et al*. (1992). Nesta equação, Q é a energia térmica desenvolvida no ato da solda [Joule]; t o tempo de duração da passagem da corrente elétrica [segundos]; R a resistência total " R_C+R_M " [ohms] e I o valor da intensidade da corrente elétrica que passa através do metal [Amperes].

$$Q = \int_0^t I^2 R dt \quad (2.1)$$

Ao considerar cada resistência elétrica presente no caminho da corrente que vai de um eletrodo ao outro, pode-se dizer que R_C na **Equação 2.2**, seja à resistência elétrica de contato

entre chapas livres de qualquer revestimento, e varia em função da pressão dos eletrodos (Tan *et al.*, 2004). Nesta Equação, ρ representa a resistividade elétrica do material [Ohm-cm], ξ o fator de pressão que pode variar entre 0,2 a 1,0 na superfície de contato entre chapas. Neste exemplo, o valor de $\xi=0,2$ é indicado para superfícies elásticas, já o valor de $\xi = 1,0$ é indicado para superfícies completamente plásticas ou dúcteis. Para este estudo foi utilizado o valor de $\varepsilon = 0,7$ como uma aproximação razoável para o aço inoxidável utilizado. A dureza [HRB] do material a ser soldado é representada por H , o número de pontos de contato entre chapas representado por n e a força do eletrodo indicada por F [N]. Sendo a definição de pressão: força por unidade de área, torna-se possível calcular o valor da força aplicada entre os eletrodos ao considerar o diâmetro do embolo do pistão de acionamento pneumático do equipamento igual a 8 cm.

$$R_C = 0,89\rho \left(\frac{\xi H}{nF}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

A resistência elétrica do material R_M determinada pela **Equação 2.3**, em que l representa a soma da espessura das chapas, A é a área da ponta do eletrodo por onde a corrente de soldagem é aplicada na chapa (TAN *et al.*, 2004; NASCIMENTO, 2008).

$$R_M = \rho \frac{l}{A} \quad (2.3)$$

A resistência de contato (entre chapas) é relativamente elevada em comparação com a resistência da própria chapa de metal a ser soldada (SAMPAIO, 2010), resulta na rápida elevação de temperatura na interface, iniciando a fusão dos metais e o crescimento do ponto de solda (TANG *et al.*, 2003). Os eletrodos aplicam força entre as peças, assim, a massa metálica que está se fundindo fica sob pressão, evitando sua expulsão entre as superfícies de contato (SANTOS, 2006). Muito embora, esteja relacionada a uma série de problemas metalúrgicos e estruturais das peças soldadas (Zhang, 2006; Furlanetto, 2014), a expulsão pode ser evitada com uma boa parametrização do sistema. Uma vez que o metal é derretido a corrente é desligada, em seguida a lentilha é arrefecida para solidificar sobre a pressão dos eletrodos refrigerados.

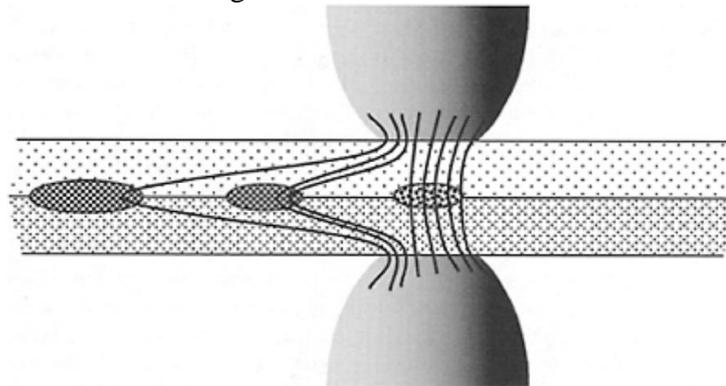
Responsável pelo aquecimento da área de soldagem, pode-se dizer que a corrente elétrica é representada pelo fluxo de cargas elétricas e a intensidade de corrente elétrica pela quantidade de elétrons pelo tempo. Sua relação com algumas propriedades mecânicas e geométricas de aços inoxidáveis ferríticos (SUBRAMMANIAN, 2016). Tão importante quanto a corrente, é a densidade de corrente na região de contato eletrodo/chapa que está diretamente ligada ao

diâmetro e forma da ponta do eletrodo (Santos, 2006). Para diâmetros maiores da ponta do eletrodo, a densidade de corrente diminui devido ao aumento da área de contato conforme **Equação 2.4**. O alinhamento central e axial dos eletrodos e a alta rigidez do equipamento de soldagem, contribui para a densidade da corrente (ZHANG, 2006).

$$\text{Densidade de Corrente} = I / \text{Área de contato do eletrodo} \quad (2.4)$$

Segundo Bracarense (2000) existe perda de corrente ao iniciar um processo de soldagem devido ao efeito de circuitos derivados (denominado efeito shunt), fenômeno do qual apenas parte da corrente total passa por meio do ponto desejado. Assim ao realizar o primeiro ponto de solda, menor será a corrente do ponto seguinte, acarretando um menor diâmetro e penetração da solda. Isto é, na prática a partir do terceiro ponto, a fuga da corrente fica constante para os próximos pontos.

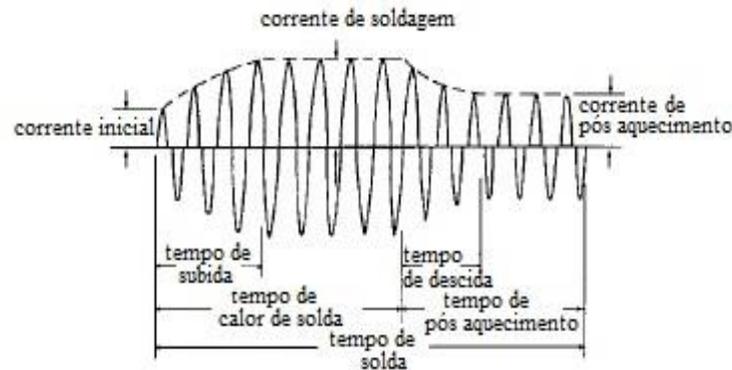
Figura 2-2 – Efeito Shunt.



Fonte: Zhang (2006).

A rampa de subida e descida da corrente é o intervalo de tempo que se leva para que a corrente atinja o valor programado. Este parâmetro também evita o faiscamento, pois a inserção e declínio da corrente de forma suave pode ser utilizado em situações onde a densidade de corrente é maior ocasionada pela diminuição do diâmetro da ponta do eletrodo. Muito embora, a utilização do ciclo de soldagem com subida e descida de corrente possa aumentar a vida útil do eletrodo, pois possui efeitos similares ao preaquecimento e ao pós-aquecimento segundo Gedeon & Edgar (1986), também podem ser utilizados para controlar a solidificação do ponto de fusão do metal base (SANTOS, 2006; AWS, 1998). O tempo total do processo de soldagem inicia com o a descida do eletrodo (ou movimento da pinça) até encostar-se às chapas e a este chamamos de tempo de pré-pressão, pode ser observado na **Figura 2-3**.

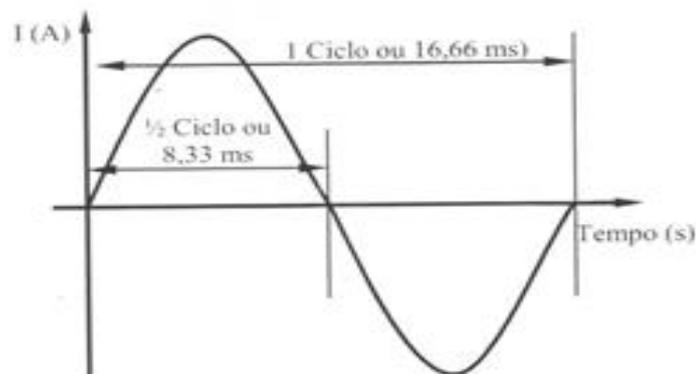
Figura 2-3 - Subida e descida da corrente.



Adaptado de: Willians (2004).

O ajuste do tempo de soldagem conforme **Figura 2-4**, varia de acordo com o tipo de material soldado, espessura das chapas e tratamento superficial, devendo ser otimizado em função dos demais parâmetros de soldagem (VARGAS, 2006). Segundo Vargas *et al.* (2007), correntes mais altas e tempos mais curtos (em torno de 1/4 segundo) favorecem a resistência e o acabamento do produto. Pouranvari (2015) demonstrou que, a maior resistividade elétrica e a menor condutividade térmica, associadas às temperaturas de fusão mais baixas dos aços inoxidáveis, contribuem para as correntes mais baixas e para os tempos de soldagem mais curtos. Bina *et al.* (2014) observou que o aumento do tempo de soldagem resultou num aumento no tamanho da lentilha e na resistência da solda.

Figura 2-4 – Curva senoidal da frequência de 60Hz.

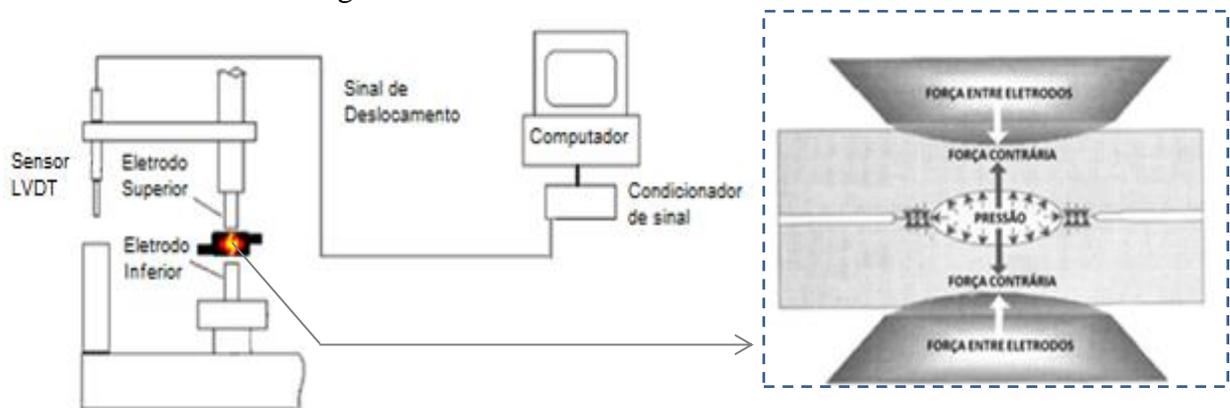


Fonte: Baldim (2014).

O sistema mecânico presente no equipamento de soldagem é responsável pela aplicação da pressão sobre as peças. É a força que se encarrega de juntar, segurar e unir as peças de trabalho, exercendo pressão antes, durante e depois do fornecimento da corrente. Assim, quando o valor da força diminui, a resistência de contato aumenta e conseqüentemente há um aumento no calor gerado entre chapas (VARGAS, 2006). Este parâmetro está subdividido em: pré-pressão

(compressão ou aperto), pressão de soldagem e pós-pressão (retenção). Muito embora Thakur (2010) tenha observado que, o tempo e a corrente possam contribuir para a qualidade do ponto de soldagem em aços inoxidáveis em relação a força, existem outras avaliações que podem retratar essa qualidade (AWS/SAE D8.9M., 2002). Considerando a força contrária a dos eletrodos conforme **Figura 2-5** pela pressão interna do metal fundido (Zhang, 2006), observa-se uma ligação entre o sinal de deslocamento do eletrodo e a qualidade do ponto soldado (Chuntao, 2010) em aços inoxidáveis (Tseng, 2012) que será utilizada nesta pesquisa com intuito de caracterizar a deformação do ponto soldado.

Figura 2-5 – Sensor de deslocamento eletrodo.



Adaptado de: Chuntao, 2010 e Zhang, 2006.

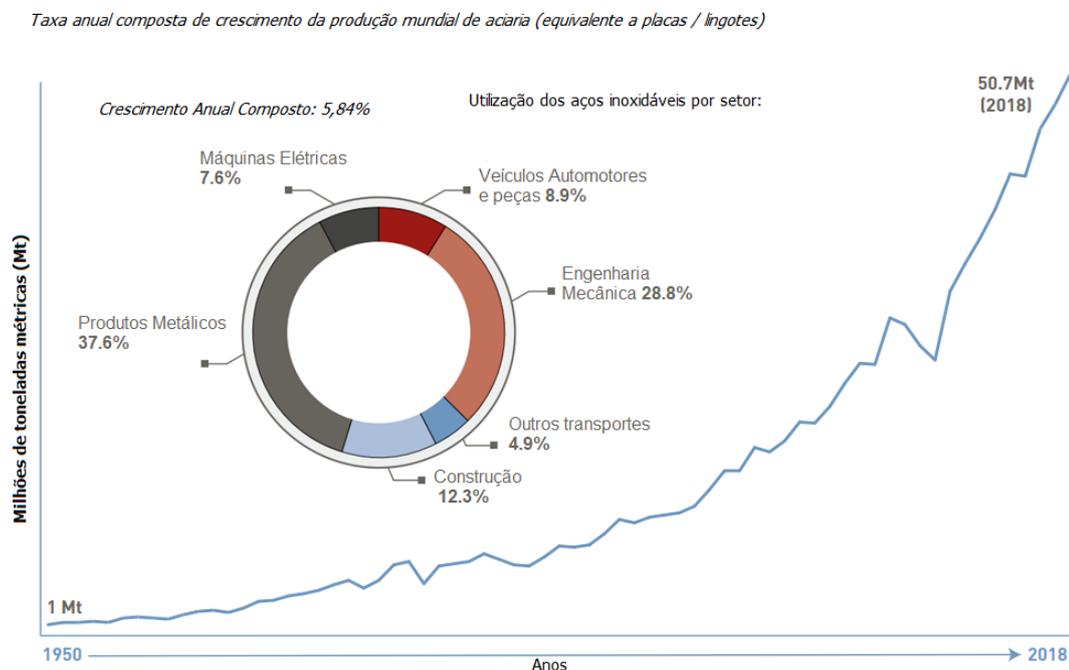
Ao considerar a extrema importância das investigações científicas ligadas aos processos de soldagem, Kocabekir, et. al. (2008) e Karci, et. al. (2009) notaram um crescente interesse pelo estudo dos aços inoxidáveis submetidos ao processo de soldagem a ponto por resistência elétrica RSW.

2.2. Os Aços Inoxidáveis

Desde o seu desenvolvimento, os aços inoxidáveis vêm ganhando cada vez mais espaço dentro da indústria. Este fato pode estar ligado a grande durabilidade e aplicabilidade deste material em diversos setores. Como exemplo em produtos metálicos seguidamente por aplicações de engenharia. Conforme mostrado na **Figura 2-6** (ISSF, 2019) este consumo tem aumentado últimos anos. A classificação dos aços inoxidáveis de acordo com sua microestrutura, composição química e fatores cristalográficos, os quais estão relacionados com suas propriedades mecânicas e químicas, contextualizando-os em cinco diferentes classes de

ligas e nomenclaturas (Lippold & Kotecki, 2005). Além do cromo, outros elementos podem ser adicionados ao aço para que a sua resistência à corrosão em meios específicos seja elevada. Elementos químicos elementos como o níquel, manganês, carbono, nitrogênio, cobre, cobalto, os quais são elementos gamagênicos, promovem da formação da fase austenítica. Já elementos como molibdênio, vanádio, tungstênio, silício, nióbio e alumínio, os quais são elementos alfa gênicos, favorecem a formação da fase ferrítica nos aços inoxidáveis. São os aços inoxidáveis: martensíticos e ferríticos (série 400 da AISI), os austeníticos (série 200 e 300 da AISI), os duplex e os endurecíveis por precipitação (STAINLESS STEEL, 1994). Contudo, considerando a pesquisa em questão, mais enfoque será dado aos ferríticos.

Figura 2-6 - O consumo de aço inoxidável pelo mundo.



Adaptado de: ISSF (2019).

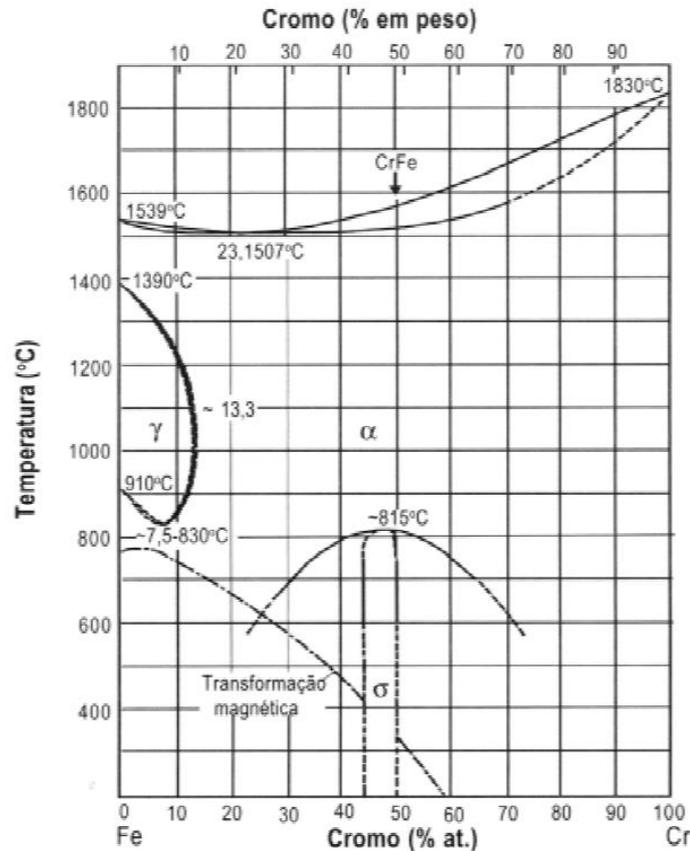
2.2.1. Aços Inoxidáveis Ferríticos

Villafuerte & Kerr (1992) descreveram que os aços inoxidáveis ferríticos mesmo possuindo baixo teor de níquel pode ter adições de elementos de liga como Mn, Si, Al, Mo e Ti suficientes para estabilizar a estrutura CCC da ferrita em todas as temperaturas e, para garantir propriedades específicas. São usados em aplicações envolvendo o ácido nítrico, na fabricação de eletrodomésticos, cubas e utensílios para cozinha e laboratórios, sistemas de exaustão de automóveis dentre outras. As alterações nas propriedades magnéticas podem apresentar interferência em aparelhos que mantêm a vida humana. Como um exemplo pode-se

citar o cardioversor-desfibrilador implantável, em que, a interferência eletromagnética pode afetar seu funcionamento tornando assim o paciente sem proteção contra fibrilação ventricular. A corrente de soldagem inerente ao processo RSW, quando parametrizada num intervalo entre 4kA a 9kA, excede o campo eletromagnético de 10G (MARTIN, 2008). Pode-se dizer que, a magnetização nos aços inoxidáveis ferríticos, torna-se prejudicial a pacientes que utilizam tais equipamentos, principalmente quando somada a outros campos magnéticos próximos como por exemplo celulares, autofalantes e o campo magnético do planeta Terra com aproximadamente 0.5 Gauss (FETTER, et al., 1998). Por ser um material ferromagnético e magneticamente mole (quando parte de sua magnetização desaparece com a retirada do campo magnético), Meyer et al. (2013) demonstrou que, tal característica melhoraram o tempo de resposta das válvulas de injeção de combustível, que nos dias atuais, tem sido um grande desafio da indústria automobilística a fim de se aumentar a eficiência dos motores durante a combustão, diminuindo às emissões de gases tóxicos para o meio ambiente.

Considerando o diagrama Fe-Cr apresentado na **Figura 2-7**, há uma temperatura de transição acima da qual o efeito dispersivo da agitação térmica anula a tendência orientadora das forças de interação atômica, de modo que o material perde sua característica ferromagnética. Essa temperatura de transição é representada pela linha de Transformação magnética na **Figura 2-7** e denominada temperatura de Curie. A temperatura ambiente, estas ligas seriam formadas exclusivamente por ferrita (α), solução sólida de ferro e cromo com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) e magnética, com pouco carbono dissolvido, pois sua maior parte precipita na forma de finos carbonetos de cromo (STAINLESS STEEL, 1994; TSE, 2011). Para teores superiores a 13% de cromo, a fase τ não será formada (Modenesi, 2001), a liga permanecerá ferrítica. Com a presença de elementos gamagênicos (estabilizadores da fase- γ), principalmente carbono e nitrogênio, ocorre expansão do campo de existência da austenita. Portanto, de acordo com o balanço entre as quantidades de elementos gamagênicos e alfa-gênicos presentes, pode haver transformação parcial de ferrita em austenita em altas temperaturas (900°C a 1200°C), mesmo em aços inoxidáveis ferríticos. A presença de austenita em temperatura elevadas leva à formação de martensita nos contornos de grão quando o material é resfriado, o que acarreta em aumento da dureza e perda de ductilidade do material (SUBRAMMANIAN, 2016).

Figura 2-7 – Diagrama Fe-Cr

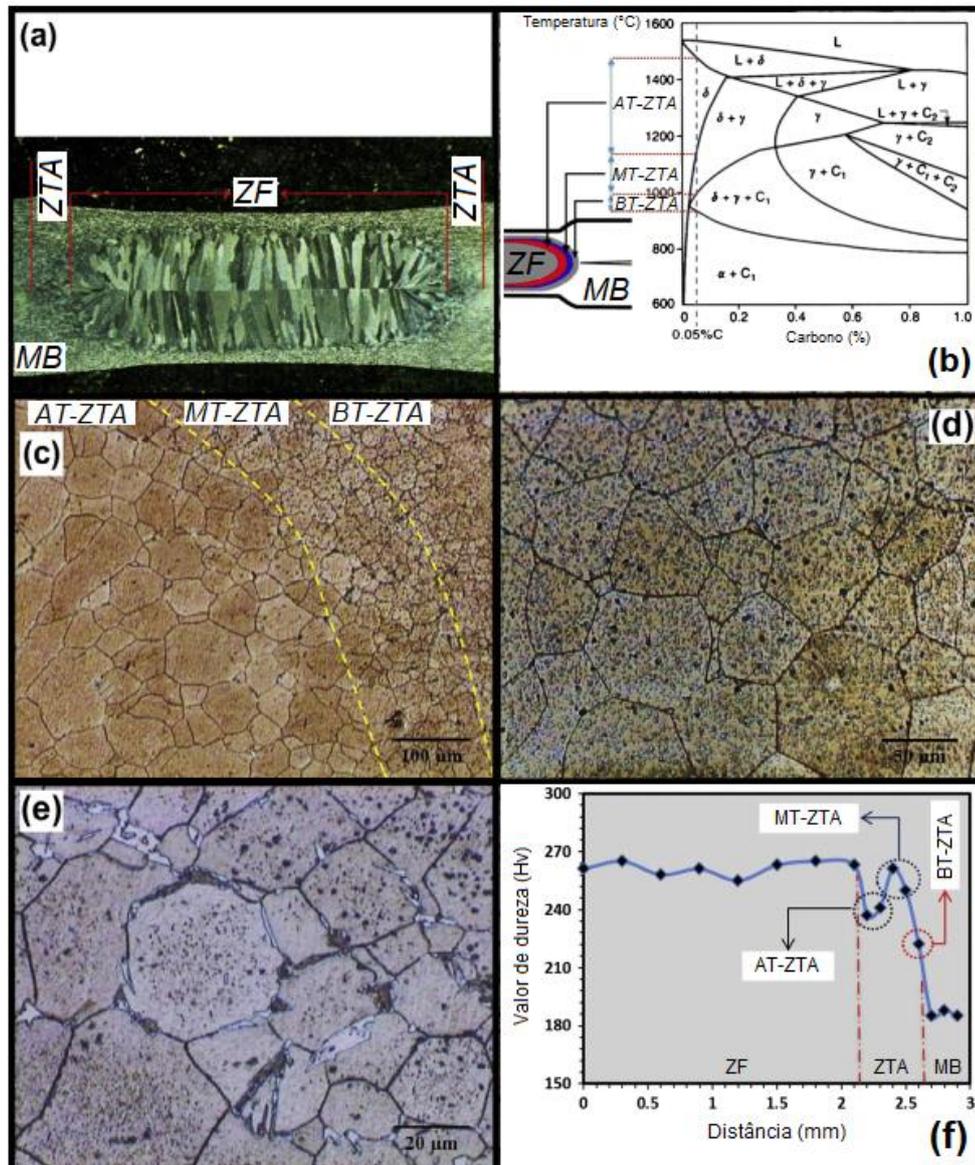


Fonte: Modenesi, 2001.

Segundo Carbó (2011), entre as três gerações de aços inoxidáveis ferríticos o aço ferrítico 430 foi o primeiro aço inoxidável a ser desenvolvido. A maior limitação para a utilização do aço 430 é a soldabilidade do mesmo. As soldas neste aço são frágeis e de menor resistência à corrosão. Primeiramente, a ocorrência de fragilização a alta temperatura, relacionada com a precipitação de carbonitretos em uma forma muito fina após a soldagem (Silva, 2011), tornando-o susceptível a corrosão intergranular. Segundo Lippold e Kotechk (2005), quanto mais rápida a velocidade de resfriamento maior é a fragilização. Isto torna-se preocupante, visto os processos RSW ter uma queda rápida de temperatura pós soldagem.

Observa-se a formação de granulação grosseira na zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF) em comparação com metal base (MB) conforme demonstrado na **Figura 2-8-a** quando aquecidos em temperaturas acima de 1150°C (ALISADEH, 2015). Em tal situação, tende a apresentar uma estrutura monofásica completamente ferrítica, o que favorece a dissolução dos carbonetos de cromo (VILLAFUERTE e KERR, 1992).

Figura 2-8 – Aço AISI 430: (a) Microestrutura da soldagem e metal base, (b) Fe-Cr-C pseudo-binary diagrama para 17% Cr, (c) Divisão das microestruturas dentro de ZTA, (d) MT-ZTA Microestrutura, (e) BT-ZTA Microestrutura, (f) Perfil de dureza do ponto soldado.



Adaptado de: ALISADEH (2015).

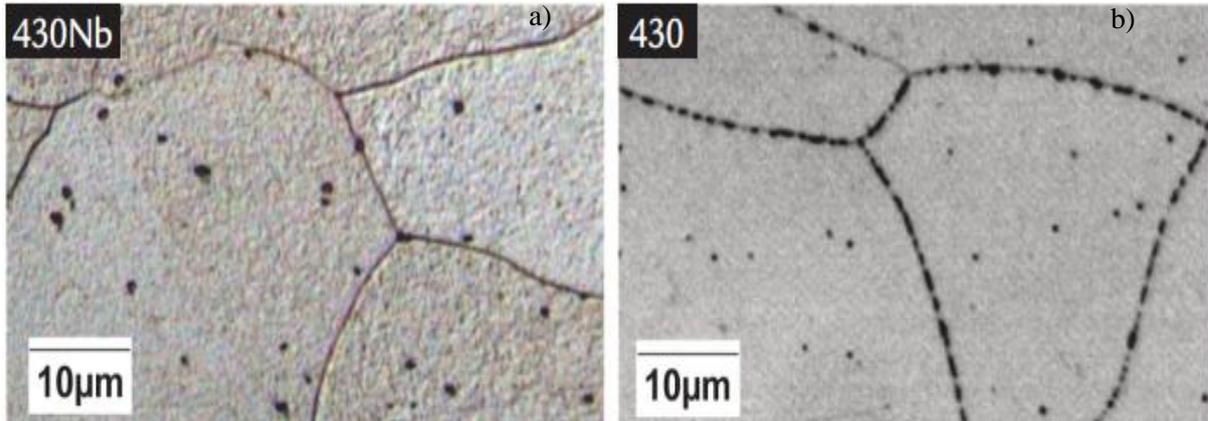
Outras abreviações presentes na **Figura 2-8** para metal como alta temperatura (AT), média temperatura (MT) e baixa temperatura (BT) da zona termicamente afetada (ZTA) estão representadas por AT-ZTA, MT-ZTA e BT-ZTA. O efeito combinado da ausência de partículas capazes de fixar os contornos de grão, aliada à elevada mobilidade atômica da estrutura ferrítica (MODENESI, 2001), possibilita crescimento de grão extremamente rápido. Wei (2014) observou que o parâmetro morfológico dos grãos em ambas as direções diminuiu para o maior raio da face e comprimento truncado do eletrodo. Diferentes microestruturas da lentilha de soldagem podem ser controladas através da concepção das formas do eletrodo que contém o

orifício de refrigeração. Pode-se dizer que a maior taxa de refrigeração radial em relação a axial limita o formato dos grãos neste sentido, permitindo um resfriamento mais tardio axialmente, ao considerar os grãos lamelares na direção axial aos eletrodos de soldagem.

Primeiramente a AT-ZTA conforme **Figura 2-8-c** representada na região próxima à zona fundida entre 1120°C a 1480°C em que, apresenta microestrutura totalmente ferrítica, devido ao resfriamento rápido. A transformação de ferrita- α em austenita- δ é suprimida não formando martensita nos limites de grãos. Por outro lado, há o crescimento de grãos elevado formando grãos colunares. Ainda assim, a maior dureza da Zona fundida (ZF) em relação ao metal base (MB) é explicada pela formação de precipitados, no aço AISI 430. Já para o segundo momento, está MT-ZTA conforme **Figura 2-8-e** com uma microestrutura ferrítica e austenítica, aquecida a uma temperatura entre 1000°C a 1120°C. A austenita ao longo dos limites do grão ferrítico ao absorver o carbono se transforma em martensita após o resfriamento. Muito embora implique em fragilidade, também atua na prevenção do crescimento de grão. A formação de uma rede de martensita ao longo dos contornos de grão ferríticos está representada na **Figura 2-8-e** pela MT e BT-ZTA. A martensita além de ser dura e frágil gera perda de tenacidade e ductilidade no material. Sua formação, ocorre no resfriamento a partir da austenita, presente na região bifásica (austenita + ferrita) do diagrama ferro-cromo conforme **Figura 2-7**.

Uma solução é a adição dos elementos como o Nb e Ti que tendem estabilizar a ferrita e diminuir, a quantidade de austenita no equilíbrio. Os vários carbonetos e nitretos produzidos pela adição de estabilizantes também auxiliam na resistência ao crescimento de grão (ANTUNES, 2010). Segundo ASTM A240/240M(2018) é recomendado um teor mínimo deste elemento igual a $4(C + N) + 0,2$. Quando o aço é estabilizado conforme **Figura 2-9**, os carbonetos e os nitretos formados tendem a ser dos elementos estabilizantes, o que acarreta em uma maior quantidade de cromo disponível no contorno de grão, impedindo, assim, a corrosão (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1994). Os carbonetos e nitretos de Cr por Ti (C,N) e/ou Nb (C,N) são menos solúveis do que os de Cr e só se dissolvem completamente na ferrita em temperaturas superiores a 1200°C. Em temperaturas elevadas o teor de C e N em solução na ferrita é limitado pelos elementos estabilizantes que reduzem o efeito austenizante de C e N, o que tende a impedir a formação de austenita entre 900°C e 1200°C (GORDON, 1996). Assim, aços adequadamente estabilizados apresentam uma microestrutura completamente ferrítica da temperatura ambiente até a de sua fusão.

Figura 2-9 – 430Nb: a) microestrutura com adição de nióbio, (b) sem adição de nióbio.



Fonte: MEYER (2013)

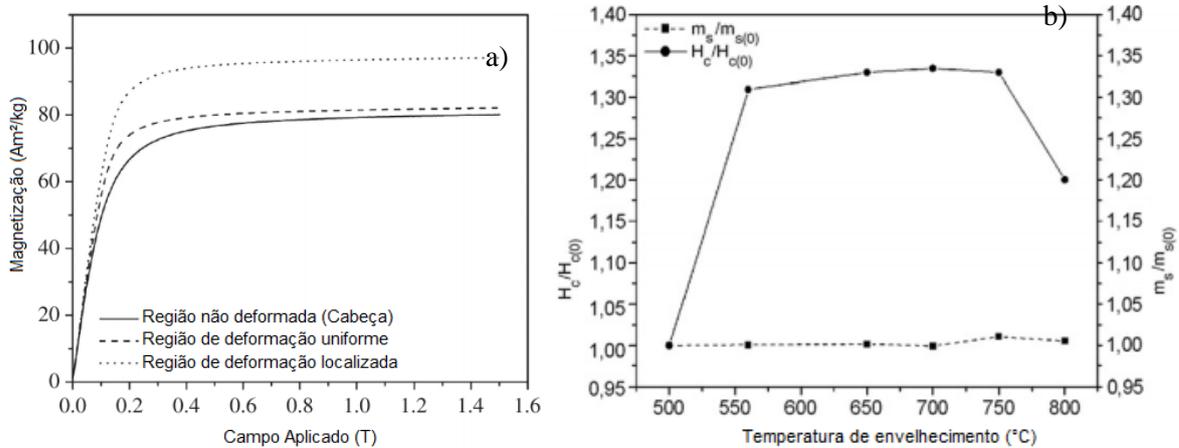
Entre os aços inoxidáveis ferríticos estabilizados, pode-se mencionar o 439 (com aproximadamente 17% de cromo), o 441 (semelhante em cromo ao anterior, mas, com um excesso de nióbio), o 409 (com 11% de cromo) e o 444 (com 18% de cromo e aproximadamente 2% de molibdênio). Todos eles podem ser soldados pelo fato de serem aços inoxidáveis ferríticos estabilizados (CARBÓ, 2011). As pesquisas de soldagem com aços inoxidáveis ferríticos mais comumente utilizados, demonstram um embasamento teórico do possível comportamento que poderá ocorrer no Aço AISI 444. O aço inoxidável ferrítico AISI 444 utilizado neste trabalho, é um aço que combina uma resistência à corrosão superior à do aço inoxidável austenítico AISI 304 com todas as vantagens que os aços inoxidáveis ferríticos têm sobre os austeníticos, como, por exemplo, a imunidade a corrosão sob tensão, sem falar na ausência do níquel, o que torna o aço mais competitivo no mercado. Akita et. al. (2008) em seus estudos, comprovaram que o aço inoxidável ferrítico AISI 444 apresenta uma excelente resistência à fadiga, boa dureza, boa ductilidade e vem aumentando a cada ano, as aplicações em componentes estruturais de máquinas e estruturas, particularmente em aplicações às temperaturas elevadas como por exemplo em sistemas de exaustão de automóveis. Segundo estudos de Guimarães et. al. (2008) a aplicação do aço inoxidável AISI 444 em torres de destilação de petróleo pode representar uma redução nos custos durante as paradas das torres, uma vez que este aço tem uma maior resistência à corrosão que o aço AISI 316L (muito usado nessa aplicação) e, uma maior vida útil. Carbó (2001) observou que, o aço AISI 444 apresenta algumas vantagens, dentre estas estão o baixo custo, a boa resistência à corrosão (praticamente a mesma do AISI 316L), a boa formabilidade, a boa soldabilidade em todos os processos elétricos e o limite de escoamento elevado para este aço. Por outro lado, o alongamento é inferior em comparação aos austeníticos. Algumas desvantagens trazem limitações a sua

aplicação em soldagens para seções de espessura acima de 3mm, estampagem profunda (difícil estiramento) e possuir perdas de tenacidade em temperaturas muito baixas. A alta condutividade térmica e o baixo coeficiente de dilatação (comparado com os aços austeníticos) permitem a realização de soldas sem muitas distorções na forma. A baixa dilatação térmica (muito próxima à do aço-carbono) é também uma vantagem no projeto de equipamentos que combinam uma utilização do aço inox com o aço-carbono em partes estruturais. Gardner *et al.* (2010) descreveram que os elementos químicos presentes nos aços inoxidáveis, além de conferir excelentes propriedades, também melhoram a condução térmica para temperaturas acima de 1000°C. Baddoo (2008) observou que, com relação à distribuição da energia térmica os aços inoxidáveis ferríticos apresentam expansão térmica mais baixa do que austeníticos e podem conduzir calor de forma mais uniforme além de apresentarem propriedades magnéticas.

2.3. Propriedades magnéticas.

A inovação tecnológica ligada aos processos de soldagem promoveu, uma grande utilização do aço inoxidável ferrítico em vários setores da indústria, possibilitando assim, a construção de bens manufaturados em que, o controle das propriedades magnéticas pertinentes a estes materiais faz-se necessário. Por outro lado, alguns processos de fabricação podem auferir ao aço inoxidável quando submetido a deformação e calor alguma alteração em suas propriedades magnéticas conforme demonstrado na **Figura 2-10** abaixo. Os estudos de Tavares *et al.* (2008, 2012), tem demonstrado que, a formação de precipitados de Fe-Mo no aço inoxidável ferrítico, pode provocar um endurecimento magnético para o aço AISI 444 conforme **Figura 2-10-b**, e a deformação pode alterar a magnetização de saturação dos aços duplex conforme **Figura 2-10-a**. Por outro lado, mesmo que as reações de precipitação das fases Fe-Mo tenham proporcionado tal fenômeno (constatado pelo acréscimo na força coerciva), a magnetização de saturação (M_s) não é afetada pelas reações de precipitação **Figura 2-10-b**. O conhecimento sobre o conceito magnético torna-se importante principalmente para análise desta pesquisa, assim, será explanado na sequência. Cada elétron em um átomo possui momentos magnéticos que têm sua origem a partir de duas fontes. Uma está relacionada ao seu movimento orbital ao redor do núcleo.

Figura 2-10 – (a) Variação da magnetização de saturação pela deformação Lean Duplex UNS S 32304, (b) Força coerciva pela temperatura AISI 444.



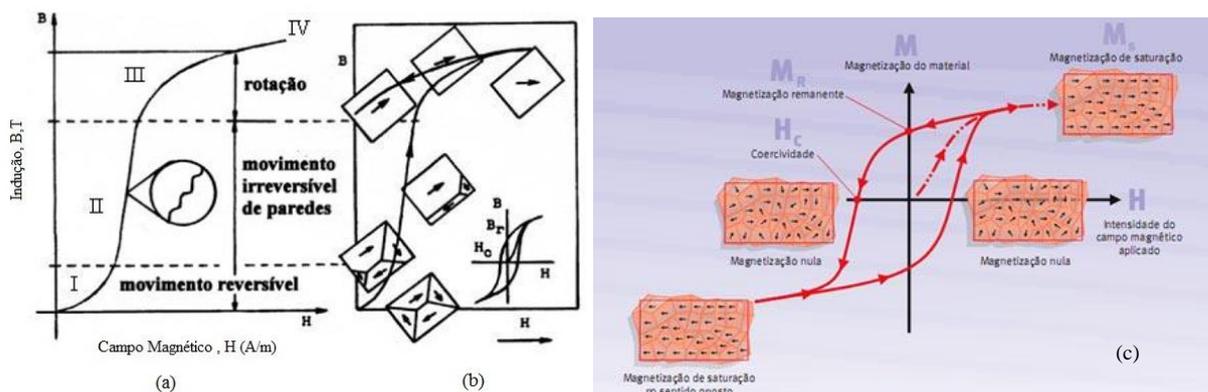
Adaptado de: a) TAVARES (2012), b) TAVARES (2008).

O outro momento magnético tem origem na rotação do elétron em torno do seu eixo (CULLITY, 2009). Spaldin (2003) e Resende (1996) descreveram que os materiais magnéticos são comumente classificados em uma das cinco seguintes categorias: diamagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos, antiferromagnéticos e paramagnéticos. Sendo o paramagnetismo e o ferromagnetismo as categorias mais importantes para esta pesquisa Cullity e Graham (2009), descreveram que o paramagnetismo, é a propriedade de certas substâncias que colocadas num campo magnético, magnetizam-se na direção do campo. É uma forma fraca e não permanente de magnetismo, cuja susceptibilidade magnética é pequena e positiva. Em contrapartida, o ferromagnetismo é uma propriedade apresentada por certas substâncias que têm magnetização elevada, mesmo na ausência de campos magnéticos externos. Substâncias ferromagnéticas exibem uma substancial magnetização espontânea a temperatura ambiente, eles consistem de domínios magneticamente saturados, e exibem o fenômeno de magnetização de saturação e histerese.

Giraldo (2007) e Gontijo (2007), observaram que o campo magnético representado pela curva de magnetização BxH na **Figura 2-11-a** e **Figura 2-11-b** pode ser utilizado para quantificar o comportamento magnéticos dos materiais. A não existência de campo magnético na etapa I, permite a configuração dos domínios do material desmagnetizado, representados pelos momentos atômicos, distribuídos ao acaso. Assim, a medida que um campo H é aplicado, os domínios mudam de forma e de tamanho mediante o movimento dos contornos do domínio. Na etapa II, os domínios que estão orientados em direções favoráveis (ou que estejam praticamente alinhados) em relação ao campo aplicado e crescem à custa daqueles que estão orientados de maneira desfavorável. Esse processo continua com o aumento da força do campo,

até que a corpos de prova macroscópica se torne um único domínio, o qual se encontra praticamente alinhado com o campo conforme observado na etapa III. A energia de anisotropia é vencida pelos momentos magnéticos atômicos dos domínios alinhados desfavoravelmente que rotacionam de forma abrupta, desde sua direção original de magnetização até o eixo fácil magnetização próximo à direção do campo. A saturação na etapa IV, é atingida quando esse domínio, por meio de rotação, fica orientado com o campo H na direção de fácil magnetização, muito próximas a mesma direção do campo magnético aplicado. Após a magnetização de saturação M_s conforme **Figura 2-11-c**, à medida que o campo H é reduzido pela reversão da direção do campo, a curva não retorna seguindo seu trajeto original. M_s é o campo magnético necessário para o alinhamento de todos os domínios magnéticos do material, a partir do qual a magnetização não aumenta mais, tendo assim a saturação. Produz-se um efeito de histerese, onde o campo M se defasa em relação ao campo H que é aplicado, ou diminui a uma taxa mais baixa. Sabe-se que, quando o campo H é removido, nem todos os domínios irão voltar ao seu estado aleatório original (TAKÁCS, 2000). Conforme descrito na figura anterior, M_r representa o campo remanente denominada B_r na **Figura 2-11-a** e **Figura 2-11-b** é a máxima magnetização residual de um material que é submetido à curva de histerese. O campo H , também denominado campo coercivo H_c indica o campo reverso que deve ser aplicado para reduzir a magnetização (M) à zero (CULLITY e GRAHAM, 2009).

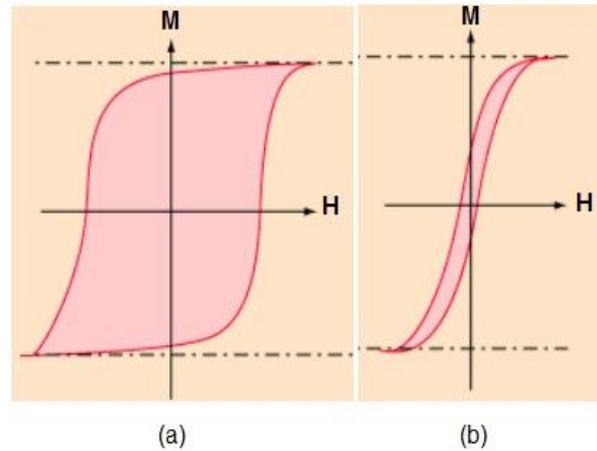
Figura 2-11 – a) & b) Relação dos domínios magnéticos com a magnetização, c) Curva de magnetização.



Fonte: SILVA (2011); CIÊNCIA HOJE (2019).

O campo coercivo é um parâmetro utilizado para distinguir se o material possui comportamento magneticamente duro ou magneticamente mole conforme **Figura 2-12**. Geralmente o que diferencia um material duro de um material mole é a sua coercividade, caracterizada pela capacidade do material resistir à desmagnetização. Os materiais magnéticos moles são aqueles que facilmente magnetizam e desmagnetizam.

Figura 2-12 – (a) magneto duro, (b) magneto mole.



Fonte: Autor

A característica magnética macia possibilita sua utilização em aplicações onde existam campos magnéticos alternados e as perdas de energia devem ser minimizadas como em transformadores. Esta característica magnética macia pode ser explicada pelo desaparecimento de parte da magnetização do metal com a retirada do campo magnético. Este desaparecimento ocorre devido a não conservação da orientação magnética dos átomos individuais. As paredes do domínio retornam depois do campo ser removido, desorganizando a orientação magnética. Os materiais magnéticos duros, conhecidos também como ímãs permanentes, são os que retêm seu magnetismo após serem magnetizados. A característica magnética dura possibilita sua aplicação onde há necessidade de um campo magnético fixo após cessada a corrente elétrica (CULLITY, 2009). Como por exemplo rotores em motores, alto falantes, etc.

2.3.1. Correção devido ao campo desmagnetizante

Considerando que o valor do campo desmagnetizante H_d se desenvolve nas extremidades dos corpos de prova e varia principalmente em função da forma dos corpos de prova analisados, deve-se aplicar uma correção nos valores do campo magnético externo H (Silva, 2011) conforme **Equação 2.5**.

$$H_d = N_c M \quad (2.5)$$

Em se tratando de corpos de prova em forma de disco, com as dimensões t (espessura) e d (diâmetro) e razão $d/t = r_a$, o valor do fator de desmagnetização no plano dos corpos de prova N_c , pode ser calculado pela **Equação 2.6**.

$$N_c = \frac{4\pi - N_a}{2} \quad (2.6)$$

Sendo N_a o fator de desmagnetização na direção do eixo axial, dado pela **Equação 2.7**.

$$N_a = \frac{4\pi r_a^2}{r_a^2 - 1} \left(1 - \sqrt{\frac{1}{r_a^2 - 1} \operatorname{sen}^{-1} \frac{\sqrt{r_a^2 - 1}}{r}} \right) \quad (2.7)$$

Quando $r_a = d/t$ for muito grande (>20), pode-se então utilizar a fórmula simplificada para o fator de desmagnetização N_c , conforme demonstrado na **Equação 2.8**

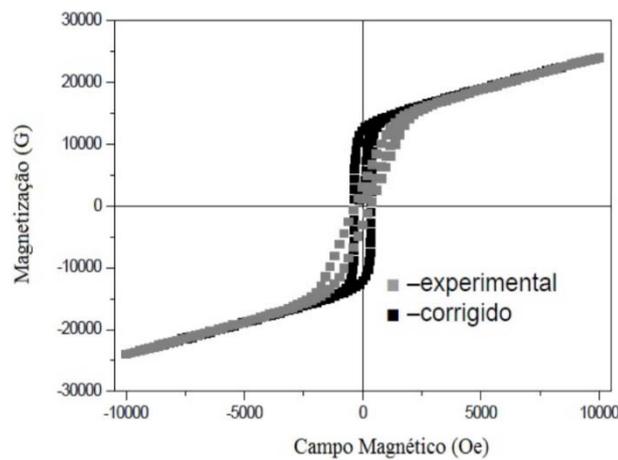
$$N_c \approx \frac{\pi^2}{r_a} \quad (2.8)$$

Sabendo-se as dimensões da corpos de prova, os valores do campo externo H podem ser corrigidos subtraindo-se o valor do campo desmagnetizante conforme **Figura 2-13**. O campo efetivo H_{ef} descrito na **Equação 2.9**, a constar no eixo das ordenadas do ciclo de histerese, é então dado por:

$$H_{ef} = H - H_d \quad (2.9)$$

Mesmo ao apresentar as **Equações 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9** acima, Cullity & Graham (2009) faz algumas ressalvas ao cálculo do fator de desmagnetização e sua aplicação aos dados experimentais. Inclusive, tem se constatado experimentalmente que, além da forma e dimensões dos corpos de provas, a permeabilidade do material também influencia sobre o valor de H_d .

Figura 2-13 - Correção do campo desmagnetizante.



Fonte: (SILVA, 2011).

A permeabilidade magnética μ_r de um material indica o quanto um material é permeável quando submetido a um campo magnético externo. Assim, para materiais ferromagnéticos dentro do sistema CGS a razão entre a densidade do fluxo magnético máximo (M_s) e o campo magnético aplicado (H) está presente na **Equação 2.10** que determina a permeabilidade μ_r .

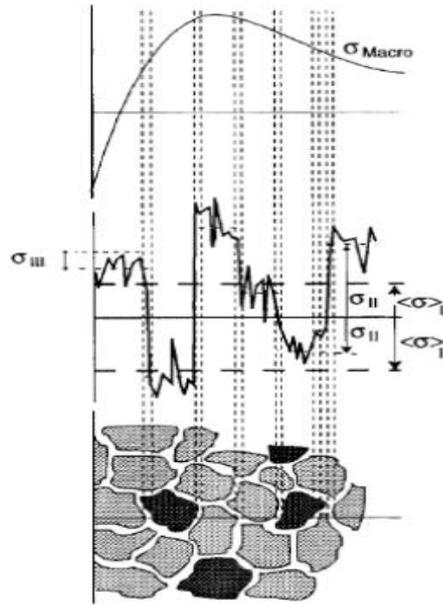
$$PER = 1 + 4\pi \left(\frac{Ms}{H} \right) \quad (2.10)$$

Geralmente, alta permeabilidade induz a um alto magnetismo por meio de um pequeno campo magnético aplicado. A susceptibilidade magnética X_m indica o quanto um material é sensível quando submetido a um campo magnético (SPALDIN, 2003) e, representa a capacidade que o material tem de ficar magnetizado sobre a ação de um campo magnético externo (B), pela razão entre M e H (CULLITY e GRAHAM, 2009).

2.4. Análise da tensão residual

O estado auto equilibrado (resultantes de todas as forças e momentos são iguais a zero) existente em um material sem carregamento externo ou de outras fontes como térmicas, é denominado tensão residual. Divididas em três grupos como microscópicas de segunda ordem: equilibradas nos limites dos contornos de grão ou entre grãos vizinhos, submicroscópicas de terceira ordem: equilibradas nos limites das células unitárias. Estas, existem dentro do grão como resultado de discordâncias cristalinas. Por último temos as tensões macroscópicas de 1° ordem, são tensões que ocorrem em uma escala maior do que o contorno de grão do material, equilibradas nos limites dos componentes como um todo (MACHERAUCH e KLOOS, 1987). Normalmente, uma combinação dessas tensões determina a tensão residual total de uma peça conforme **Figura 2-14**. As Tensões residuais surgem a partir da deformação não uniforme de um corpo; nesta pesquisa a deformação é provocada pela força dos eletrodos contra o metal base juntamente ao calor gerado na soldagem RSW. Muito embora sejam responsáveis pela ruptura prematura do componente, o conhecimento da natureza e magnitude das tensões residuais auxilia no aumento da vida útil, pois influenciam nas características mecânicas e físicas ao ser somadas as tensões aplicadas no regime elástico (CINDRA, 2000). É possível dividir as tensões em dois tipos: compressivas(-) e trativas(+), sendo esta última indesejável por contribuir para falhas de fadiga e trincas. Assim, as tensões residuais compressivas tornam-se geralmente benéficas pois pode aumentar a resistência a fadiga e à fratura de juntas de solda por pontos devido ao fechamento da trinca pela tensão residual de compressão (MOSHAYEDI, 2014).

Figura 2-14 - Superposição de Tensões: tipos I, II e III.



Fonte: WITHERS & BHADESHIA, 2001.

A soldagem por resistência a deformação presente no processo causa mudanças no espaçamento interplanar de forma que as distâncias entre os planos cristalinos são modificadas em relação ao estado livre de tensões e varia proporcionalmente à magnitude da tensão existente. Entre os meios de medição da tensão residual existentes o método da difração de raios X será utilizado neste estudo, por meio da análise dos Ângulos de Bragg descrito adiante.

Ao irradiar a corpos de prova com feixes de raios X de alta energia, estes, penetram no material e parte dos feixes são difratados pelos planos cristalinos conforme determina a lei de Bragg. Um sensor detecta a intensidade dos feixes difratados em determinada posição angular e a localização dos picos permite calcular as tensões residuais ou aplicadas (KANDIL *et al.*, 2001). Além da teoria da difração de raios X em materiais cristalinos, existe teoria da elasticidade do material sólido, sendo esta última, determinada pela Lei de Hooke para estado triaxial de tensões, adequados ao estado real de tensões por meio de coordenadas polares nas **Equações 2.11, 2.12 e 2.13**. Em seguida há adequação ao estado real de tensões com a **Equação 2.14** utilizaremos as coordenadas polares conforme **Figura 2-15**.

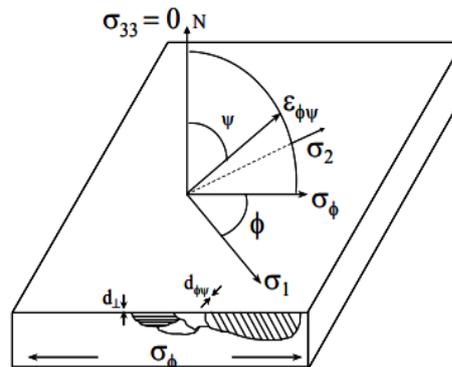
$$\varepsilon_1 = \left(\frac{\sigma_1}{E}\right) - \nu \cdot \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\sigma_2}{E}\right) - \nu \cdot \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{E} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{\sigma_3}{E}\right) - \nu \cdot \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_{\psi, \phi} = (\sigma_1 \cdot \cos^2 \phi + \sigma_2 \cdot \sin^2 \phi) \cdot \sin^2 \psi - \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad (2.14)$$

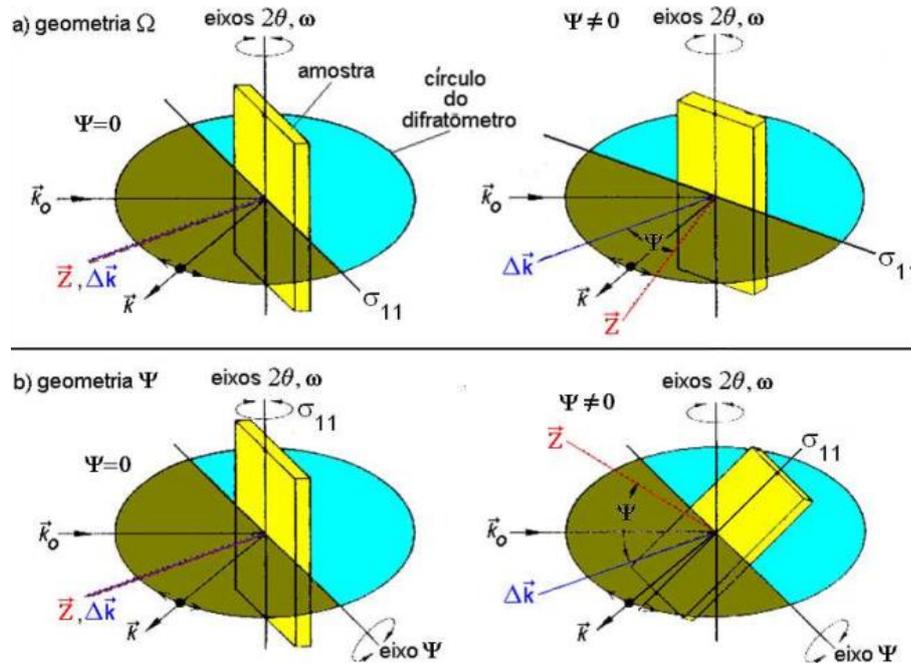
Figura 2-15 - Sistema de coordenadas



Fonte: FITZPATRICK *et al.*, 2005.

Onde: $\varepsilon_{\phi\psi}$ são as deformações, σ_{123} são as tensões, ν o coeficiente de Poisson, E o módulo de Young, ϕ e ψ são as direções das tensões. Na **Figura 2-16** ψ representa o ângulo de inclinação dos corpos de prova entre a normal Z dos corpos de prova e o vetor de espalhamento $\Delta\vec{k}$, k_0 é a direção do feixe incidente e k é a direção do feixe difratado (CAMPOS, 2006). O ângulo de rotação dos corpos de prova representado por ω .

Figura 2-16 – Geometrias analisadas por difração de raios X.



Adaptado de CAMPOS (2006).

No método também denominado geometria PSI, o eixo de um goniômetro especial denominado Euleriano, que varia para fornecer as distâncias interplanares referenciadas à variação da inclinação dos corpos de prova frente a sua normal original. Nela, o ângulo entre a

normal dos corpos de prova e a direção do vetor de difração (k) é PSI. Na geometria Ômega, é o eixo destinado ao ângulo θ , também chamado eixo ω que varia. As possíveis geometrias de análise denominadas: Geometria Ω (OMEGA) ou ψ (PSI) sendo nesta última o ângulo ψ pode ser definido pela **Equação 2.15**.

$$\psi = \frac{2\theta}{2-\Omega} \quad (2.15)$$

Ao considerar que para um ponto pertencente a superfície de uma corpos de prova não existam tensões perpendiculares a superfície, a **Equação 2.16** inclui as distâncias interplanares ao cálculo. Pela medição do ângulo 2θ , foi possível aplicar a **Equação 2.17**. Ao isolar o termo σ_φ encontra a tensão na direção φ em função dos ângulos ψ_1 e ψ_2 e do ângulo 2θ , pela substituição das deformações em cada direção conforme **Equação 2.16**. Fato este culmina na **Equação 2.18**.

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{d_{\varphi,\psi} - d_o}{d_o} = -\cotg\theta_o \cdot (\theta_{\varphi,\psi} - \theta_o) \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{\varphi,\psi_2} - \varepsilon_{\varphi,\psi_1} = \frac{1-\nu}{E} \cdot \sigma_\varphi \cdot (\text{sen}^2\psi_2 - \text{sen}^2\psi_1) \quad (2.17)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{1+\nu} \cdot \cotg\theta_o \cdot \frac{(\theta_{\varphi,\psi_2} - \theta_{\varphi,\psi_1})}{(\text{sen}^2\psi_2 - \text{sen}^2\psi_1)} \quad (2.18)$$

Neste caso, a componente da deformação na direção φ, ψ pelo sistema de coordenadas polares na **Figura 2-15**, é representado por $\varepsilon_{\varphi,\psi}$. Em $d_{\varphi,\psi}$ referência-se a distância interplanar de uma corpos de prova com tensão medida na direção φ, ψ . Por último, d_o determina a distância interplanar dos corpos de prova sem tensão podendo ser calculada pela Lei de Bragg. Por meio da análise dos Ângulos de Bragg e variação das distâncias interplanares conforme **Figura 2-17** e a partir daí, calcular as tensões residuais.

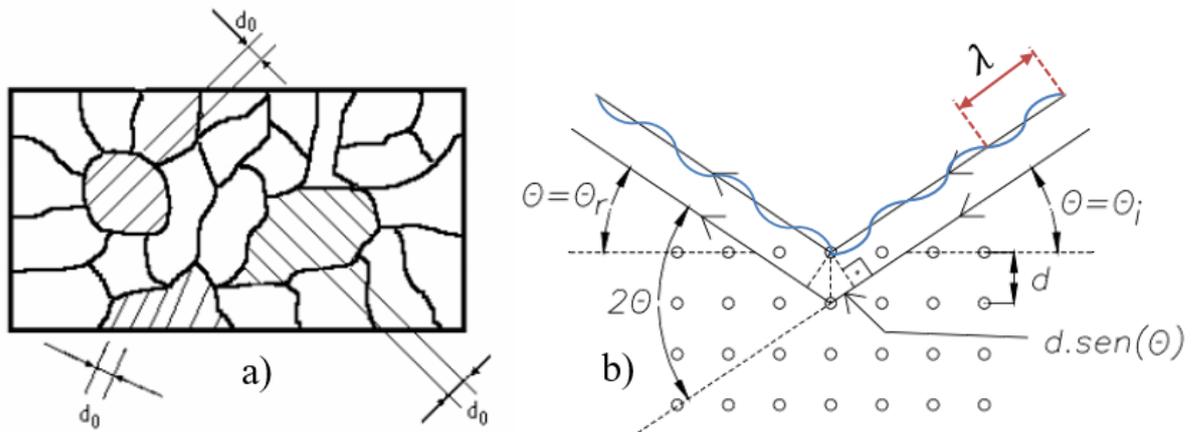
A lei de Bragg é definida pela interferência resultante construtiva do feixe de raios X difratado ao atingir a estrutura cristalina (**Figura 2-17-b**) com o espaçamento interplanar d do material analisado, determinada pela relação entre o comprimento de onda λ e os ângulos θ de incidência e reflexão.

$$n\lambda = 2d\text{sen}\theta \quad (2.19)$$

Onde:

- n = Número inteiro conhecido por ordem de difração
- λ = comprimento de onda do feixe incidente de raios X
- d = distância entre planos
- θ = ângulo de interferência construtiva.

Figura 2-17 – a) Distâncias interplanares de grãos sem tensão, b) Difração de Bragg.



Adaptado de: CULLITY (2009).

No material tensionado, a distância interplanar d_0 varia de um valor $\Delta d = d - d_0$, sendo d a distância interplanar no material tensionado, ocasionando a deformação $\varepsilon = \frac{\Delta d}{d}$ na rede cristalina do material. Para qualquer variação Δd resultará em uma mudança $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ na posição do feixe de raios X difratados conforme **Figura 2-17-b**. Todavia, medindo $\Delta\theta$ pode-se determinar a deformação elástica da rede cristalina. Assim, quando maior o ângulo de difração θ maior é a precisão de determinação da deformação.

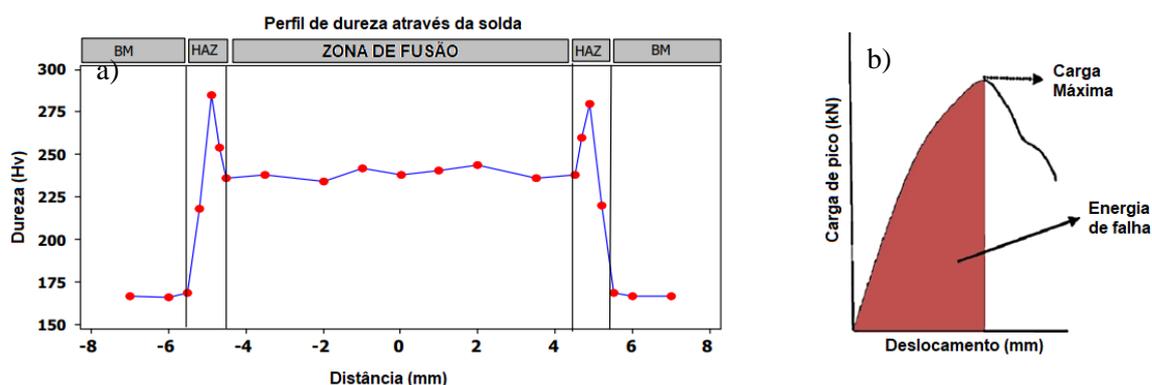
Contudo, ao utilizar o método do $\text{sen}^2\psi$ com intuito de determinar a tensão em uma direção φ , a medição do ângulo 2θ em mais de duas direções ψ considerando para isto, os valores dos ângulos 2θ medido para cada ângulo ψ ; constrói-se uma reta 2θ pelo $\text{sen}^2\psi$. Desta forma a inclinação da linha de tendência criada a partir dos pontos medidos é substituída no termo $\frac{(\theta_{\varphi,\psi_2} - \theta_{\varphi,\psi_1})}{(\text{sen}^2\psi_2 - \text{sen}^2\psi_1)}$ da **Equação 2.18** obtendo a tensão residual do material.

2.5. Os efeitos da soldagem sobre as propriedades magnéticas e tensão residual dos aços.

De uma maneira geral, sua solda é caracterizada por ductilidade e tenacidade baixas, além de sensibilidade à corrosão intergranular (ALISADEH, 2015). Segundo Modenesi (2001), a baixa soldabilidade é devido à formação de uma estrutura de granulação grosseira, de martensita e à precipitação de carbonetos e nitretos. Considerando a influência da parametrização RSW sobre a soldagem, Bina (2014; 2015) analisaram a evolução do tempo e da corrente de soldagem

RSW em junções dissimilares de AISI 430 e 304 demonstrando seu efeito sobre o crescimento do ponto. Para o aço AISI 409M, o crescimento de grão não influencia na microdureza do ponto de solda. Uma análise da influência da parametrização RSW e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas, microestruturais e magnéticas fazem-se necessário com intuito de observar as alterações apresentadas pós-soldagem, no contexto dos aços inoxidáveis ferríticos duplamente estabilizados. Na **Figura 2-18-a** observa-se que, a dureza aumentou na HAZ (zona termicamente afetada) devido à formação de martensita ao longo dos limites de grãos de ferrita. Embora o tamanho do grão seja maior em ZF (zona fundida) do que em MB (metal base), o aumento da dureza pode ser atribuído a formação de alguma martensita conforme demonstrada na **Figura 2-8**. Na **Figura 2-18-b** observa-se que a energia de falha, é caracterizada pela área abaixo da curva do gráfico de tensão-deformação e apresenta correlação com a corrente de soldagem (SUBRAMMANIAN; 2016).

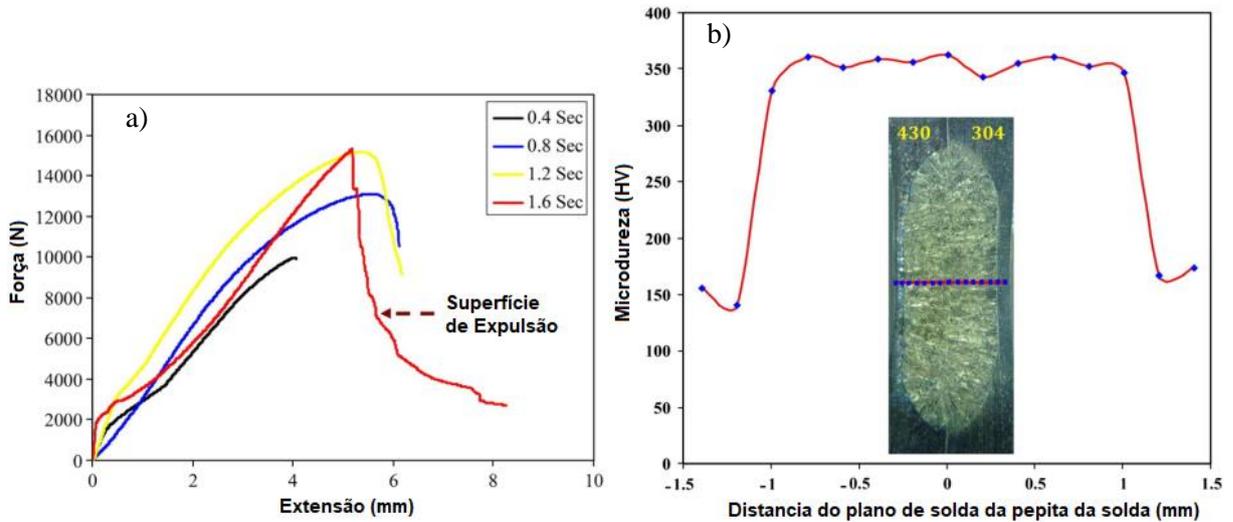
Figura 2-18 – Aço AISI 409. (a) Perfil de dureza, (b) Energia de falha



Fonte: SUBRAMMANIAN (2016).

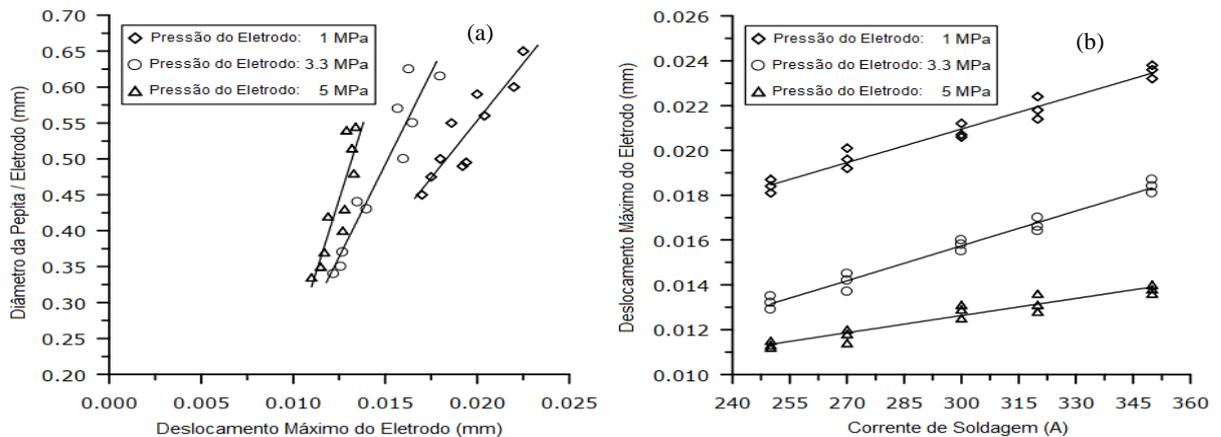
Segundo Bina (2015), outros parâmetros do processo RSW como a força dos eletrodos aplicada na **Figura 2-19**, o tempo de soldagem e a geometria do eletrodo também tem sido alvo de investigação. A força aplicada pelo eletrodo influencia a área de contato e a densidade de corrente. A microdureza também é maior no centro da zona fundida conforme observado por SUBRAMMANIAN (2016). O deslocamento do eletrodo serve para uma boa indicação da deformação e do crescimento da lentilha na soldagem RSW. Tseng (2012) demonstrou na **Figura 2-20-a** que, o tamanho final de uma pepita está fortemente correlacionado com o valor de pico de uma curva de deslocamento do eletrodo. O deslocamento máximo do eletrodo medido sob uma pressão de eletrodo de 5MPa é menor do que aquele medido sob uma pressão de eletrodo de 1MPa devido à maior área de contato e menor corrente sob maior força de eletrodo.

Figura 2-19 – Soldagem dissimilar com aços: AISI 430 e AISI 304. (a) Curvas de extensão de tensão de cisalhamento, (b) Microdureza do corpo de prova com tempo de soldagem de 1.2 s.



Adaptado de: BINA (2015).

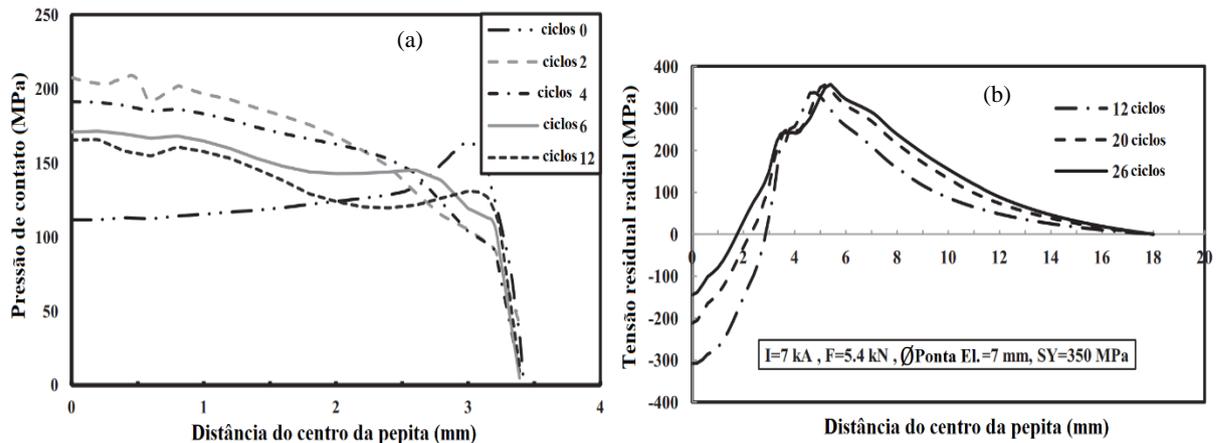
Figura 2-20 – AISI 301. Deslocamento do eletrodo pela: (a) Diâmetro da lentilha de soldagem, (b) Corrente de soldagem



Adaptado de TSENG (2012).

Ao constatar que a força aplicada pelos eletrodos irá gerar uma pressão de contato entre as superfícies do metal base a ser soldado, observa-se que a distribuição e a magnitude da pressão de contato em qualquer momento do processo, determina a distribuição e a quantidade de resistência de contato naquele momento conforme **Figura 2-21-a** para 8kA de corrente de soldagem e 5,7kN de pressão dos eletrodos. Considerando que, a resistência de contato é uma função da pressão de contato, esta, tem um impacto no padrão de densidade de corrente que afeta a distribuição de temperatura pela lei de aquecimento Joule na **Equação 2.1**. Já para a **Figura 2-21-b** foi observado uma redução da tensão de compressão pelo aumento do tempo de soldagem no centro da lentilha de solda.

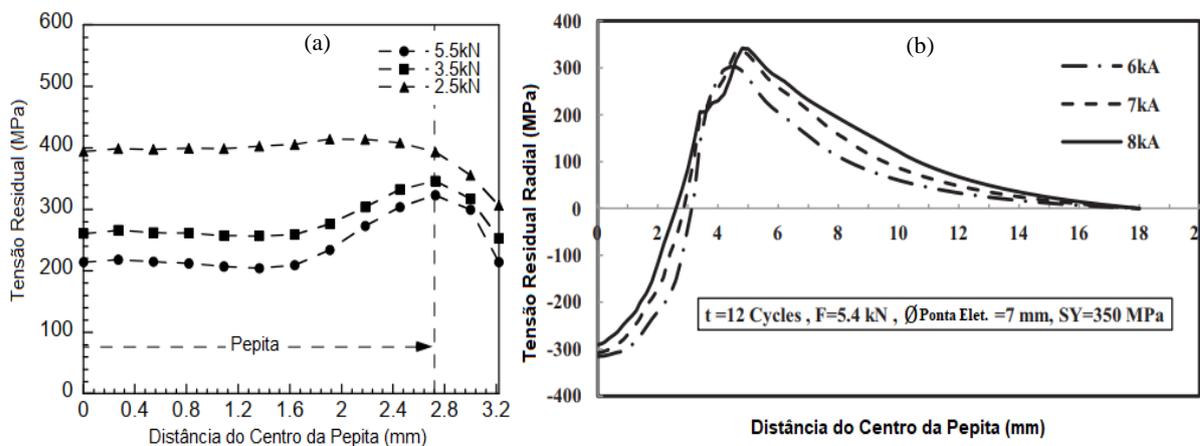
Figura 2-21 – AISI 304. (a) Pressão de contato entre chapas, (b) Tensão residual na superfície da solda.



Adaptado de MOSHAYEDI (2014).

Ao iniciar os ciclos de soldagem, a pressão próxima à borda diminui, enquanto a pressão interna aumentou rapidamente, na região central da área de contato (MOSHAYEDI, 2014). O aumento da pressão nas regiões de bordo é útil, uma vez que impede a expulsão. Muito embora a força aplicada pelos eletrodos esteja relacionada à resistência de contato, esta, também possui uma relação com a tensão residual, conforme demonstrado na **Figura 2-22-a**. Observando a **Figura 2-22-a**, verifica-se que a tensão residual na lentilha e perto da borda, foram reduzidas com o aumento da força aplicada pelos eletrodos. Próximo à borda do ponto soldado, a tensão residual compressiva apresenta-se menor (KHANNA, 2008). Fato este pode ser explicado, considerando a diferente microestrutura entre ZF (zona de fusão) e ZTA (zona termicamente afetada) conforme mencionado anteriormente. Colombo *et al.* (2019) observou que a tensão residual varia para diferentes tamanhos de grãos dentro da geometria do ponto de soldagem RSW. Na **Figura 2-22-b**, com o aumento da corrente de soldagem, as distribuições das tensões residuais foram estendidas e o nível de tensão residual máxima aumentou nas regiões interna e externa da lentilha de solda, ao mesmo tempo que reduziu ligeiramente nos bordos da lentilha de solda. Observa-se que, as tensões residuais radiais máximas ocorreram fora e perto da borda da lentilha de solda. Moshayedi (2014) demonstrou que, a taxa de crescimento da tensão residual diminui com aumento da corrente e do tempo de soldagem, sendo mais influenciado por este último. A aplicação da força por meio do eletrodo durante a solidificação e resfriamento, além de gerar tensões residuais compressivas na superfície da junta soldada pelo processo RSW, também pode aumentar a resistência à fadiga e a fratura das juntas soldadas devido ao fechamento da fenda resultante das tensões residuais compressivas (KHANNA, 2008; MOSHAYEDI, 2014).

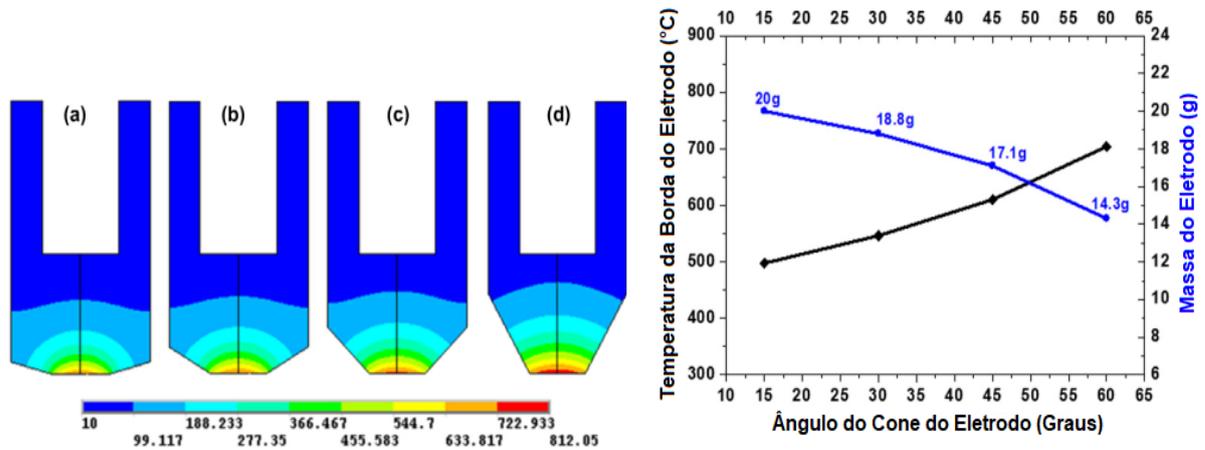
Figura 2-22 – Aços de Alta Resistência:(a) Tensão residual pela variação da força aplicada, AISI 304; (b) Tensão residual pela variação da corrente aplicada.



Adaptado de: a)YOTA (2013), b)MOSHAYEDI (2014).

A resistência de contato e tensões residuais, tanto a força aplicada por meio do eletrodo quanto o seu deslocamento, têm refletido diretamente o processo térmico da soldagem RSW (ZHANG, 2006). Os estudos do aporte térmico e da deformação do material (pela força aplicada), demonstram ter contribuído diretamente para a alteração das propriedades magnéticas dos aços inoxidáveis ferríticos (ASSDA, 2007). Neste sentido, o ângulo da ponta do eletrodo deve ser observado, pois a temperatura da borda do eletrodo foi fortemente relacionada com o aumento linear do ângulo do cone, como mostrado na **Figura 2-23**. A massa do eletrodo caiu substancialmente especialmente para ângulos do eletrodo de 45° a 60° . A redução de massa como ângulo do cone aumentado reduziria significativamente a taxa de resfriamento do eletrodo causando assim o aumento da temperatura da borda do eletrodo, especialmente para os eletrodos com ângulos de 60° de cone. Considerando as análises apresentadas na seção anterior, os efeitos da soldagem RSW no magnetismo dos aços inoxidáveis, ganha destaque visto a importância tecnológica. As alterações nas propriedades do metal soldado, sejam elas: mecânicas, químicas ou magnéticas auferem mudanças que, muitas vezes não atendem padrões de qualidades exigidos para os devidos fins de aplicação (MARTIN, 2008; MALHEIRO, 2011).

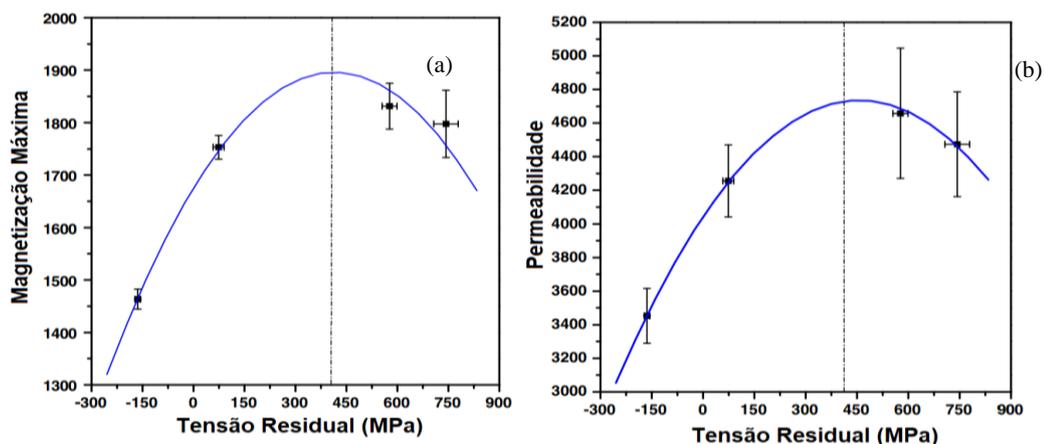
Figura 2-23 – Variação da temperatura e da massa do eletrodo em função do ângulo da ponta, (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°.



Adaptado de: Li *et al.* (2013).

Vashista (2009) e Vourna *et al.* (2015) utilizando uma técnica denominada Barkhausen Noise (BN) observaram que a magnetização máxima é uma propriedade sensível à tensão conforme demonstrado na **Figura 2-24**. Jiles (1996) encontrou dificuldades na correlação entre o laço de histerese e a tensão residual. O laço de histerese revelou uma correlação insignificante entre tensão residual e as propriedades magnéticas, justificada supostamente, pela faixa de frequência da qual foi gerado o campo de histerese. Em contrapartida Makar (2000) observou que as propriedades magnéticas M_s , H_c , M_r e PER não são sensíveis a tensão residual.

Figura 2-24 – AISI 1060. Tensão residual versus: (a) Magnetização de saturação, (b) permeabilidade.

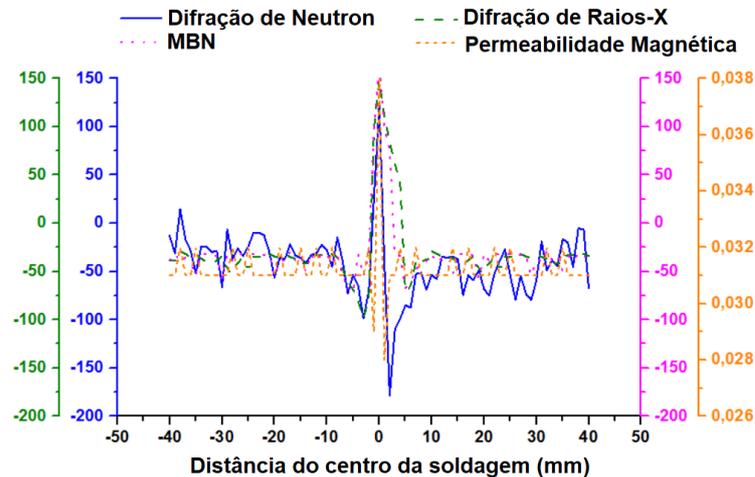


Adaptado de: Vashista (2009).

Um estudo mais aprofundado na concepção analítica do laço de histerese pode refletir melhor correlação com as propriedades de tensão. Motivado pela incerteza na medição, um estudo focado somente na variação das propriedades presentes na histerese, pode revelar

alguma correlação com as propriedades de tensão residual considerando um maior espaço corpos de prova em meios estatísticos. Dentre as respostas magnéticas, as medidas de permeabilidade revelaram variações espaciais significativas, observadas na **Figura 2-25**.

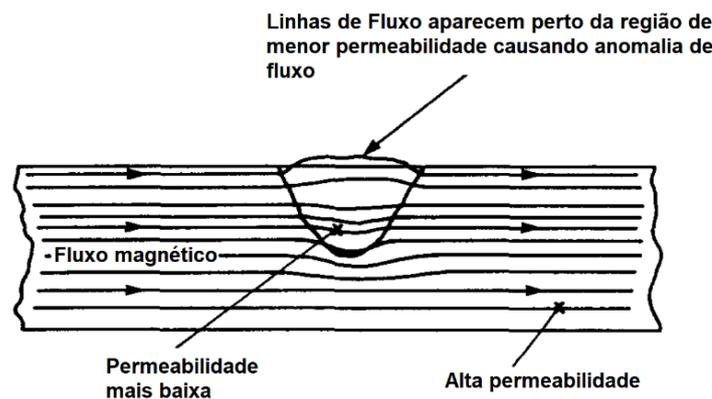
Figura 2-25 – Correlação entre os valores de permeabilidade magnética com a distribuição da tensão residual por meio de 4 técnicas.



Adaptado de: VOURNA *et al.* (2015).

Onde a permeabilidade oferece maior precisão na determinação da tensão residual antes as outras 3 técnicas apresentadas, também pode ser confirmado pela observação de JILES (1996) na **Figura 2-26**.

Figura 2-26 – Linhas de fluxo magnético ante anomalia no material soldado.

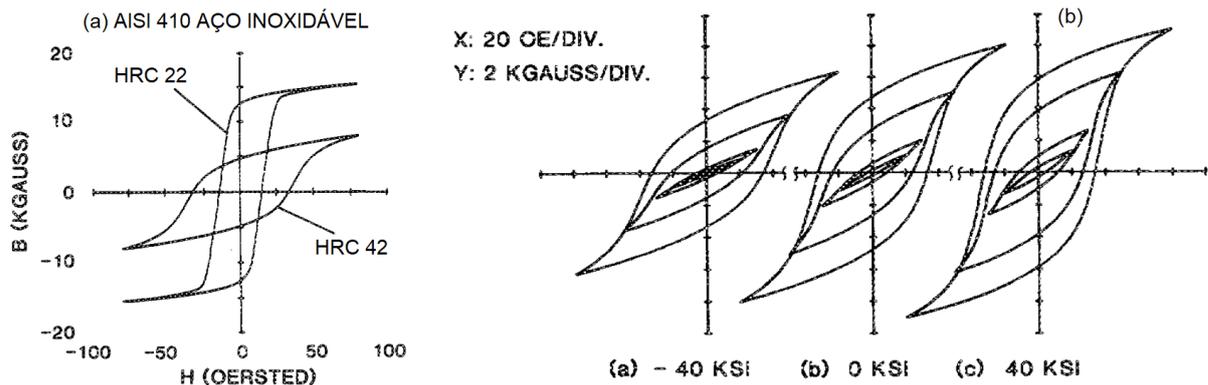


Adaptado de: JILES (1996).

Jiles (1996), demonstrou em sua publicação que, as propriedades de histerese como a permeabilidade, a coercividade, a remanência e a perda por histerese são conhecidas por serem sensíveis a fatores como: estresse, deformação, tamanho de grão, tratamento térmico e presença de precipitados de uma segunda fase como o carboneto de ferro nos aços. A medição de histerese produz um número de parâmetros independentes, cada um dos quais, muda em algum

grau com a tensão e a microestrutura. Por outro lado, Kwun (1987) observou que o tamanho do grão tem um pequeno efeito sobre as propriedades magnéticas do aço AISI 410, mas os ciclos de histerese são sensíveis tanto à dureza conforme **Figura 2-27-a**, como a deformação conforme **Figura 2-27-b**. Neste último foi considerando para o aço AISI 410 uma dureza de 43 Hc (1KSI=6.9Mpa).

Figura 2-27 – Laço da histerese: (a) A dureza, (b) A deformação.



Adaptado de: KWUN (1987).

Visto os estudos apresentados até o momento para os mais variados tipos de aços, entende-se que, entre as pesquisas analisadas, o foco tem sido direcionado ao estudo dos aços inoxidáveis ferríticos e suas propriedades magnéticas. Se dividiu na avaliação das seguintes características: tamanho de grão, tensão residual, parametrização da soldagem e campo magnético.

2.6. Planejamento e Análise de Experimentos

Segundo Montgomery (2009), os processos de planejamento e análise de experimentos (DOE) são utilizados para otimizar os parâmetros de qualidade e processo, bem como os recursos de uma empresa. Para iniciar o planejamento, alguns passos devem ser seguidos visando garantir a confiabilidade das análises.

1. Definição do objetivo do experimento;
2. Seleção da resposta;
3. Seleção dos parâmetros do processo;
4. Determinação dos níveis de cada fator;
5. Escolha do projeto de experimento adequado;

6. Planejamento do experimento que consiste em selecionar a matriz experimental com os fatores e níveis escolhidos;
7. Execução;
8. Análise e interpretação dos resultados.

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, gera-se uma combinação desses fatores sob a forma de arranjos experimentais. O arranjo mais comum é o fatorial completo, para o qual o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais, elevado ao número de fatores. Fatoriais completos cobrem todo o espaço experimental. Anteriormente ao planejamento e análise de experimentos, outros testes também podem ser utilizados com intuito de extrair informações das respostas como por exemplo os testes de correlação.

2.6.1. Correlação de Pearson

Ao medir o grau pela qual duas variáveis tendem a mudar juntas, o coeficiente de correlação Pearson pode descrever a força e a direção da relação linear entre duas variáveis contínuas. É considerado linear a relação quando a mudança em uma variável é associada a uma mudança proporcional na outra variável (MONTGOMERY, 2009). É basicamente um índice adimensional com valores situados entre -1,0 e 1,0 inclusive, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. Este coeficiente, normalmente representado pela letra "r" assume apenas valores entre -1 e 1:

- $r = 1$ Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis;
- $r = -1$ Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis - Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui.

Dentro deste contexto, pode-se determinar como correlação forte valores de correlação de Pearson $\geq 0,7$ e significantes para P-value $\leq 0,05$.

2.6.2. Arranjo Fatorial e Superfície de Resposta

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é um agrupamento de ferramentas matemáticas e estatísticas para quantificar a influência entre as respostas e os parâmetros, com

objetivo de otimizar essas respostas. Na grande maioria dos problemas de MSR, não se conhece a relação entre os fatores de entrada e saída. Um fatorial fracionado deve ser escolhido com o objetivo de determinar os parâmetros mais influentes no processo. Quando a resposta de interesse apresentar um comportamento linear, deve-se utilizar das informações do modelo de primeira ordem para buscar a região de curvatura. Essa abordagem busca aproximar linearmente conforme **Figura 2-30-a** as repostas obtidas em polinômios que descrevem o comportamento dos fatores mostrado na **Equação 2.20**.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.20)$$

Onde: y – Resposta de interesse; x_i – Parâmetros independentes; β_i – Coeficientes a serem estimados; k – Número de parâmetros independentes; ε – Erro experimental.

Ciente dos parâmetros de maior influência, um arranjo fatorial completo é gerado com o intuito de determinar se existe curvatura conforme **Figura 2-30-b** para as respostas escolhidas. Além dos pontos fatoriais $n_f = 2^k$ os pontos centrais são adicionados. Como o próprio nome sugere, esses pontos serão os valores (0, 0) na escala codificada dos níveis (-1, 1) conforme observado na **Figura 2-29 -c**. O número adequado de pontos centrais para um modelo depende do número de parâmetros independentes (k) escolhidos conforme observado na **Tabela 2-1**.

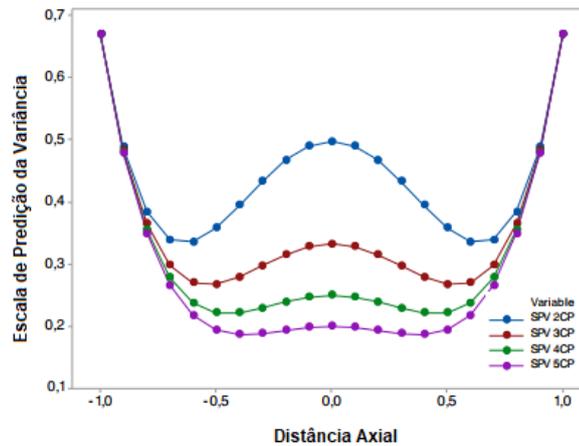
Tabela 2-1– Valores recomendados de pontos para o planejamento de experimentos

| k | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------|------|------|----|------|
| Centrais | 5 | 6 | 7 | 10 |
| Fatoriais | 4 | 8 | 16 | 32 |
| Axiais | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Alfa | 1,41 | 1,68 | 2 | 2,38 |

Adaptado de OLIVEIRA *et al* (2019^a)

Com a adição de pontos centrais é possível ter uma estimativa de erro (variância) puro, ou seja, que independe do modelo especificado. Quanto maior o número de pontos centrais menor será a variância conforme **Figura 2-28**.

Figura 2-28 – Variância para diferentes quantidades de center points.



Fonte: Adaptado de Oliveira et al (2019^b).

Os coeficientes de regressão do fatorial 2^k são estimados através do algoritmo Mínimos Quadrados Ordinários (Ordinary Least Squares – OLS) conforme **Equação 2.21**.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2.21)$$

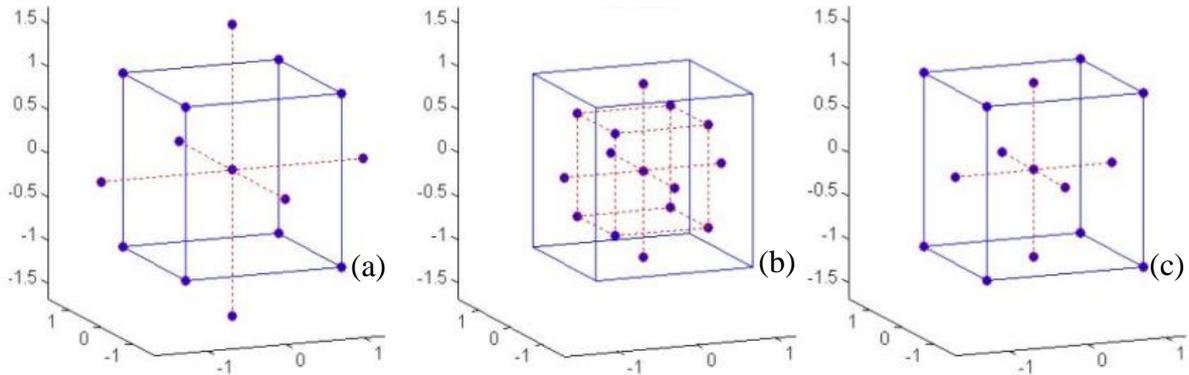
Onde β é o coeficiente de regressão, X é a matriz de fatores codificados do experimento e Y é a resposta e T significa formato transposto da matriz. Caso a curvatura se confirme, os pontos axiais podem ser inseridos no arranjo e, um polinômio de segunda ordem (MONTGOMERY, 2005; MYERS, 2009) pode ser utilizado conforme mostrado na **Equação 2.22**.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.22)$$

Na escolha do arranjo experimental, o arranjo mais comum é o CCD (CCD - Central Composite Design) conforme **Figura 2-29-a**, podendo utilizar um fatorial completo ou fracionado. Os níveis -1 corresponde ao menor valor do parâmetro selecionado, o nível +1 ao maior valor e o 0 ao ponto central (center point). O CCD pode ser: circunscrito (CCC), inscrito (CCI) ou face centrada (CCF). O arranjo CCC corresponde ao CCD original, e explora o maior espaço experimental possível, por este motivo, este arranjo é o mais adequado para o experimento requerido e será utilizado neste trabalho. O Alfa representa o intervalo do ponto mais distante do arranjo experimental para o ponto central. Para determinar a significância dos coeficientes estimados como também quais entre os termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos utiliza-se $P\text{-Value} \leq 0,05$. O ajuste dos modelos é representado pelo

coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta explicada pelo modelo construído.

Figura 2-29 – Tipos de arranjos experimentais ortogonais.

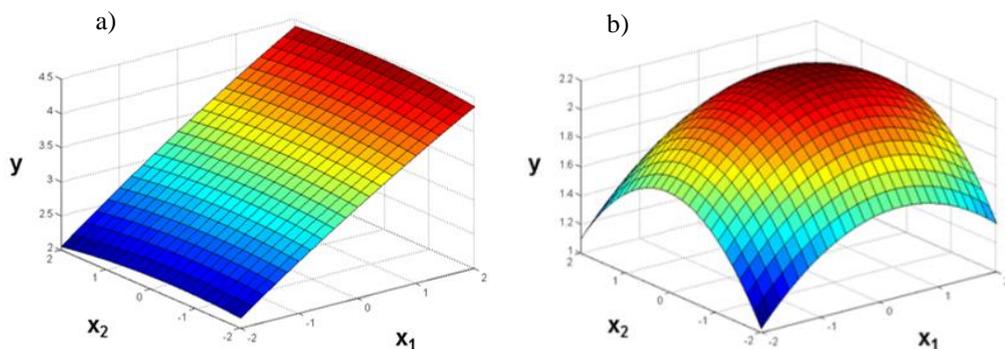


Fonte: PRASAD *et al.* (2012). a)Circunscrito, b)Inscrito, c)Face Centrada

Quanto maior o valor de R^2 mais explicativa é o modelo, melhor o modelo se ajusta a corpos de prova. Ao gerar o desenho desses modelos de regressão é possível identificar as regiões de ponto ótimo que apresenta curvatura na superfície de resposta conforme **Figura 2-30-b**. Segundo Newbold (1994), em exemplos onde a variância dos resíduos do modelo não é constante (heterocedástico), ao estimar os coeficientes de regressão β utiliza-se o método dos Mínimos Quadrados Ponderados (Weighted Least Squares - WLS) conforme **Equação 2.23**.

$$\beta = (X^T W X)^{-1} X^T W Y \quad (2.23)$$

Figura 2-30 – Superfícies de resposta: Linear e Curvatura.



Fonte: GOMES (2010).

Neste caso, a regressão é ponderada considerando pesos W como sendo o inverso dos quadrados dos resíduos do modelo já reduzido pela eliminação dos termos não significantes ($P\text{-value} \leq 0,05$) do modelo OLS conforme **Equação 2.24**.

$$W = \frac{1}{R^2} \quad (2.24)$$

Outras análises também são importantes como o teste de falta de ajuste (Lack-of-fit > 0,05) e a análise de resíduos que segundo Montgomery (2005), devem ser normais, aleatórios e não correlacionados. Comprovada a normalidade dos resíduos (P-value ≥ 0,05) por meio do software *MINITAB*® e obtendo o melhor ajuste R^2 pela redução dos termos não significativos, inicia-se o teste de hipótese que determina se o resíduo é heterocedástico. Segundo Newbold (1994) a hipótese é nula (H_0) quando se afirma que a variância dos resíduos é constante, contra a hipótese (H_1) onde a variância dos resíduos não é constante, neste caso denominada heterocedástico. Neste caso por meio de um modelo de regressão linear simples também no software *MINITAB*®. O teste de hipótese é escrito conforme **Equação 2.25**.

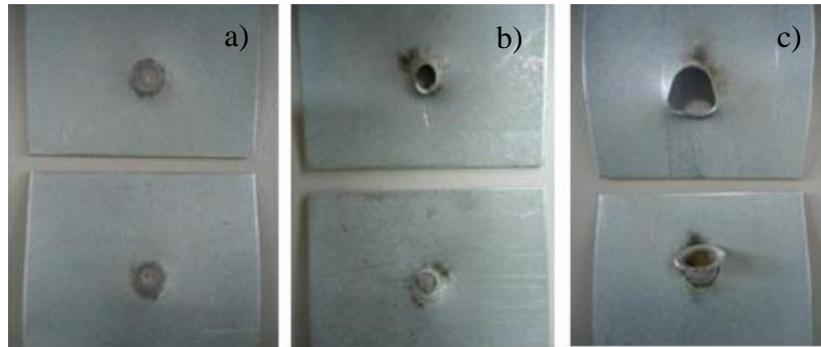
$$\begin{cases} H_0: nR^2 \leq X_1^2, \alpha \\ H_1: nR^2 > X_1^2, \alpha \end{cases} \quad (2.25)$$

Onde n é o número de observações realizadas, R^2 é o coeficiente de determinação do modelo de regressão linear simples, X_1^2, α é o valor de uma distribuição Qui-Quadrado (IFSC, 2019) com 1 grau de liberdade e nível de significância α .

2.7. Avaliação da qualidade da soldagem.

A pepita de soldagem é influenciado por vários fatores presentes no processo de soldagem manufatura. Os fatores denominados controláveis, englobam toda parametrização do equipamento de soldagem. Já os fatores incontroláveis, podem ser apresentados como o encaixe entre chapas no momento da soldagem, o desgaste no eletrodo e impurezas presentes como exemplo óxidos, óleos e graxas. Considerando que a formação da pepita de soldagem sofra interferência de ambos os fatores, o ponto soldado necessita ser avaliado constantemente com intuito de garantir a qualidade da soldagem. Durante a avaliação da qualidade da soldagem, também é observada a penetração do ponto de solda caracterizado pela pepita de soldagem conforme **Figura 2-1**, no conjunto soldado. Jou (2003) afirma que uma penetração adequada do ponto de solda deve preencher 0,6mm a 0,7mm da espessura total somada do conjunto soldado. Bina (2014) observou que a correntes de soldagem inferiores a 3,75kA são insuficientes para uma boa formação da pepita de soldagem. Um método de avaliação rápido que define se houve uma boa penetração da solda é determinado pelo modo de ruptura. Este método revela uma boa penetração da solda, após o teste de cisalhamento, quando a falha ocorre pelo modo de falha do ponto, conforme mostrado na **Figura 2-31**.

Figura 2-31 - Modos de falha: (a) interfacial (b) arrancamento do ponto (c) rasgamento da chapa.



Fonte: AMARAL (2011).

O diâmetro mínimo requerido para uma solda de boa qualidade obedece à norma ISO/DIS 14373 (2004). Tal norma remete que este diâmetro é dado pela **Equação 2.26**.

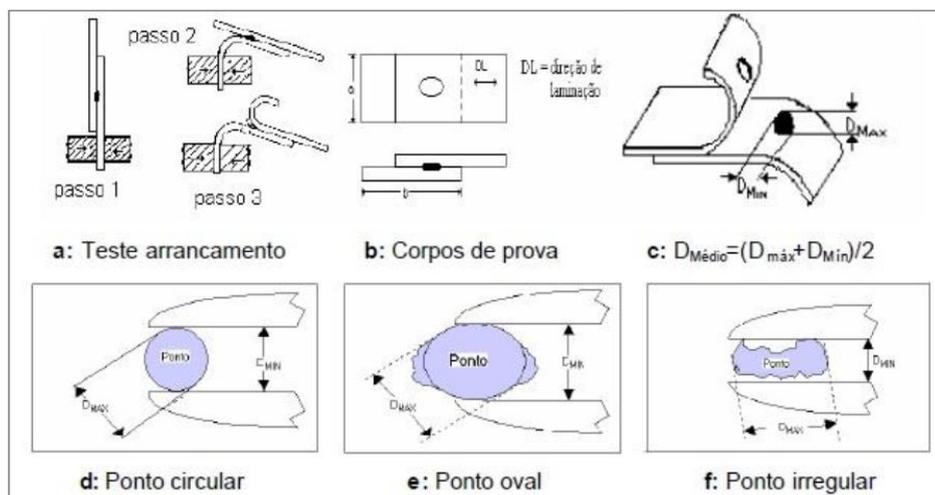
$$D = 5\sqrt{e} \quad (2.26)$$

Onde ‘D’ é o diâmetro mínimo aceitável para o ponto de solda e “e” é o valor da espessura da menor chapa utilizada no conjunto soldado. Um padrão mínimo aceitável utilizado pode ser determinado pela **Equação 2.27**. Este padrão também é utilizado pela Mercedes-Benz onde é mencionado na norma MBN 10 382(2005).

$$D = 4\sqrt{e} \quad (2.27)$$

A medição do ponto de solda é realizada após a separação das chapas ocasionada pelo teste de cisalhamento. Tais medições são mais bem explicadas na **Figura 2-32**, em que o resultado provém da média do diâmetro referenciada em duas direções deve ser igual ou maior ao valor determinado pela **Equação 2.27**.

Figura 2-32 - Tipos de medições do ponto de solda



Fonte: Branco (2004).

Capítulo 3

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve todas as etapas do procedimento experimental realizadas tais como adaptação do banco de testes, conjugadas com a utilização de um sensor de deslocamento indutivo para avaliação da deformação do aço durante o período de soldagem. Contém os materiais, equipamentos utilizados e a parametrização utilizada, bem como, o planejamento experimental desenvolvido para a pesquisa. Para se atingir os objetivos estabelecidos, este trabalho se dividirá em duas etapas distintas.

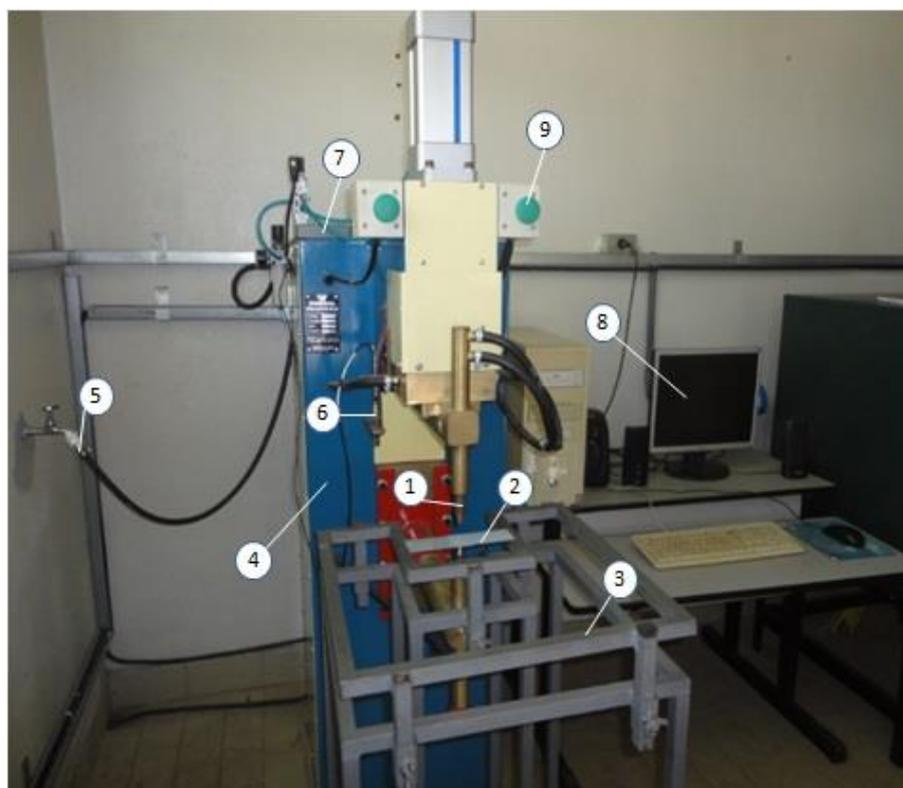
Em sua primeira etapa, este trabalho procurou conhecer melhor o comportamento do aço inoxidável AISI 444 e a correlação entre a parametrização RSW, a magnetização residual e a variação da tensão residual. Procurou-se também a determinação da microestrutura, e a influência da rampa de descida da corrente de soldagem sobre as propriedades magnéticas, tensão residual, energia de soldagem e deformação além dos níveis dos parâmetros necessários ao planejamento de experimentos da etapa 2.

Na segunda etapa, ciente do desempenho preliminar da liga AISI 444 ante o processo RSW, foi realizado um planejamento de experimentos (DOE) para quantificar a influência dos parâmetros de tempo, pressão, corrente e rampa de descida da corrente de soldagem sobre as propriedades magnéticas, microestrutura, tensão residual, deformação e energia de soldagem. O procedimento experimental das duas etapas de experimentos e as técnicas de caracterização utilizadas no desenvolvimento do trabalho serão detalhados a seguir.

3.1. Procedimento experimental e Técnicas de caracterização

Todo o procedimento de soldagem foi realizado no Laboratório de Soldagem – LSO da Unifei, em uma máquina de solda a ponto estacionária marca Presol Transweld®, modelo TWPRV50, com potência nominal de 50kVA, CA, alimentação de 220V e corrente máxima de 6kA. Conforme mostrados na **Figura 3-1**, os detalhes de seus principais acessórios são: 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 de parametrização do deslocamento do eletrodo, 9. Botão de acionamento pneumático. Este equipamento possui a capacidade de ajuste de 15 parâmetros diferentes, durante execução das soldagens, permitindo assim, isolar as diferentes etapas da soldagem.

Figura 3-1 – Equipamento de soldagem RSW.

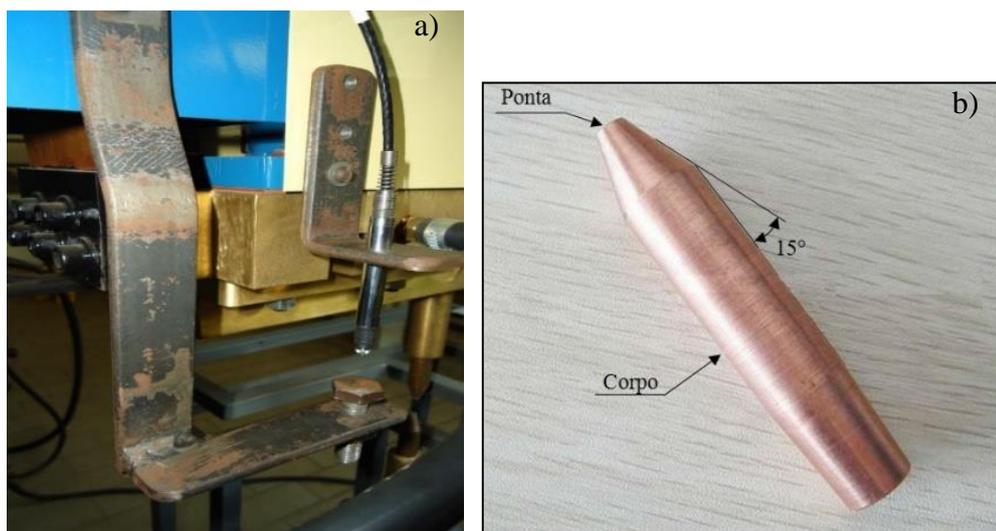


Fonte: Autor

Acoplado ao equipamento de soldagem a ponto, 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 +/-2,5mm. O

deslocamento linear do transdutor é medido por meio de uma interface composta por um sistema de aquisição dos dados composto por um condicionador digital *Metrolog*®, modelo SD20 com saída USB para aplicação com sensores LVDT e conversor A/D 24-bits. 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 solda conforme é mostrado na **Figura 3-2-a**. Com todo sistema ligado e as chapas já em posição de soldagem (formando o corpo de prova) conforme **Item 2** da **Figura 3-1** desliga-se a corrente de soldagem do equipamento. O parafuso de ajuste deve ser distanciando do sensor, em seguida retira-se a pressão pelo manômetro até o eletrodo superior descer e encostar superfície do corpo de prova. Neste momento, faz-se o referenciamento do sensor de deslocamento. A pressão é então restabelecida ao equipamento que ficará pronto para o uso. Para garantir melhor precisão na coleta do sinal de deslocamento do eletrodo durante a soldagem, a cada realização de três soldagens o sensor foi novamente referenciado até o final dos experimentos. Para o desenvolvimento dos trabalhos foram utilizados eletrodos de cobre cromo zircônio, Grupo A, classe 2, com formato cone truncado a 15°, com diâmetro da ponta de 5mm, diâmetro do corpo 5/8” e comprimento total de 70mm, conforme **Figura 3-2-b**.

Figura 3-2 – Detalhes de parte do equipamento de soldagem: a) acoplamento do sensor LVDT, b) eletrodo utilizado.



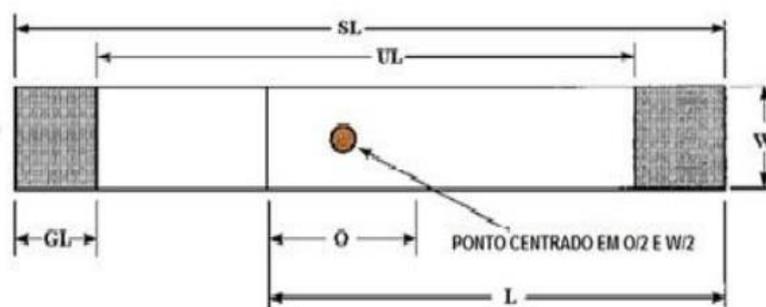
Fonte: Autor

Os eletrodos, para atingir um desempenho adequado, necessitam ser refrigerados para evitar a sua degradação sendo este um procedimento fundamental, recomendado por

fabricantes, a ser checado antes da realização das soldagens. Uma vazão mínima de água de refrigeração de 4,0l/min a 6,0 l/min.

O posicionamento dos corpos de provas para soldagem foi estabelecido pela AWS (2002) e segue conforme **Figura 3-3**.

Figura 3-3 - Corpos de prova para etapa 2.



| Espessura da chapa | Comprimento da chapa | Largura | Superposição | Comprimento Total | Comprimento Livre | Comprimento a segurar |
|--------------------|----------------------|---------|--------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| | L | W | O | SL | UL | GL |
| 0,6 – 1,29 | 105 | 45 | 35 | 175 | 95 | 40 |

Fonte: AWS (2002) Modificada.

3.1.1. Parametrização da soldagem

Como afirmado anteriormente, o equipamento utilizado permite a regulagem de 15 parâmetros independentes como mostrado no **Quadro 3-1**. O ato de inserir os níveis dos parâmetros no equipamento denomina-se parametrização. Esta variedade de parâmetros, permite uma grande versatilidade para aplicação em materiais distintos. Por outro lado, considerando o estudo em questão somente os parâmetros destacados em negrito foram utilizados.

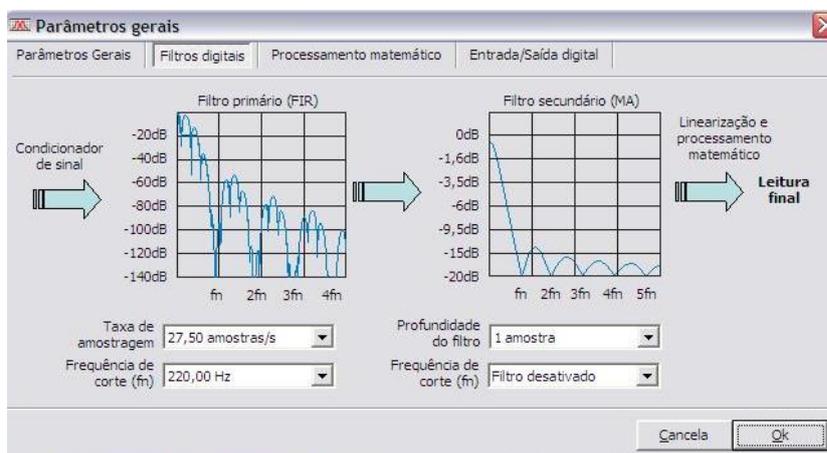
Quadro 3-1 - Parâmetros reguláveis no equipamento de solda ponto.

| | | |
|---------------------------------|---------------------------|---|
| Pré-pressão 1. | Corrente soldagem. | Pós-pressão. |
| Pré-pressão 2. | Intervalo. | Impulsos. |
| Ciclo de Preaquecimento. | Resfriamento. | Subida da corrente. |
| Corrente de aquecimento. | Ciclo revenimento. | Descida da corrente. |
| Ciclo de soldagem | Corrente revenimento. | Pressão da rede de ar comprimido |

Os parâmetros de **pré-pressão 1 e 2** (com intuito de estabilizar a força máxima antes da entrada da corrente), foram fixados em 40 ciclos, constantes para os parâmetros de pré e pós

pressão no experimento, sendo este último considerado por evitar possíveis falhas no ponto soldado após o encerramento da corrente de soldagem (SANTOS, 2016). Os parâmetros pré-aquecimento são utilizados em caso de material com revestimento, não foram contemplados devido o material estar isento de revestimento. Intervalo, Resfriamento, Impulsos e Subida da corrente foram desconsiderados pela pequena espessura do corpo de prova. Justifica-se também a não utilização dos parâmetros de revenimento pela possibilidade de afetar as propriedades magnéticas e de tensão residual pós soldagem, impossibilitando assim uma análise confiável dos resultados. Por último, foram feitos os procedimentos de calibração na tela do software que gerencia o sistema de coleta do sinal de deslocamento do eletrodo de acordo com fabricante *Metrolog®*, ilustrado **Figura 3-4**.

Figura 3-4 - Critério de ajuste para os filtros do sistema de coleta e amostragem.



Fonte: Autor

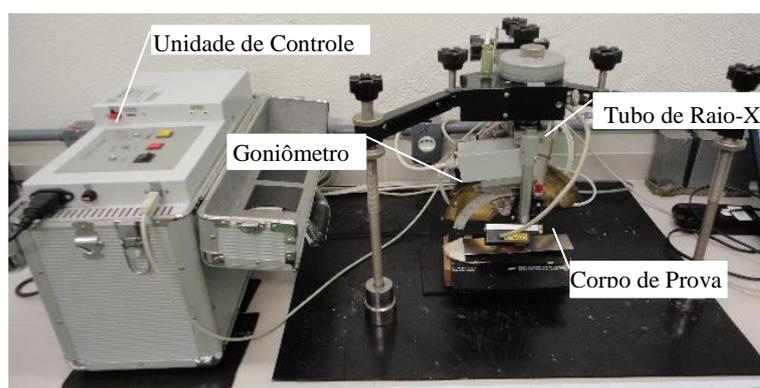
Após estes procedimentos as aquisições serão realizadas e dados referentes aos sinais de deslocamento por unidade de tempo serão gravados. Posteriormente, processados para análises pelo *Excel* que é um aplicativo do pacote *Microsoft Office*. Em todos os experimentos foram utilizados um tempo de aquisição de 10s com uma taxa de amostragem de 27,5 amostras/s e frequência de corte de 220 Hz disposto na tela do software ilustrado pela **Figura 3-4**.

3.2. A caracterização da tensão residual

Após as soldagens as propriedades de tensão residual foram quantificadas na etapa 1 no Laboratório de Materiais da UNIFEI. Foram analisadas por meio do equipamento de difratometria de Raios X modelo X'PERT PRO da PANalytical. Os dados foram coletados

utilizando uma geometria de feixe paralelo e tubo de cobalto, foco pontual, com uma voltagem de 40kV e corrente de 45mA utilizando o método de Ω (Ômega). Na etapa 2, foi realizada no Laboratório de Análise de Tensões (LAT) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense por meio da técnica de difração por Raios X utilizando o método de $sen^2\psi$ (PSI). Na etapa 2, o equipamento conforme mostrado na **Figura 3-5** foi parametrizado pelos dados do **Quadro 3-2**.

Figura 3-5 – Difratorômetro de raios X StressRad.



Fonte: Autor

Quadro 3-2 Parâmetros de medição das tensões residuais.

| <i>Parâmetro</i> | <i>Valor Padrão</i> |
|---|----------------------------|
| Diâmetro do colimador (mm) | 2 |
| Ângulo de incidência 2θ | 156,202 |
| Plano de difração {hkl} | (211) ferrita |
| Radiação | CrK α |
| Comprimento de onda $\lambda_{CrK\alpha}$ (Å) | 2,291 |
| Corrente do tubo de raios X (mA) | 6,7 |
| Tensão do tubo de raios X (kV) | 20 |
| Ângulo de inclinação ψ (grau) | 0°; 20,7°; 30°; 37,8°; 45° |
| Tempo de exposição (s) | 30 |

Ambos os equipamentos dispõem de software para análise e processamento das informações de tensão residual. Para não haver interferências nos resultados de tensão residual nenhum procedimento foi realizado nos corpos de prova após a soldagem. Os corpos de prova foram encaminhados para a medição da tensão residual nas dimensões que foram soldados e seguem conforme **Figura 3-4**.

3.3. A caracterização magnética

Após a análise de tensão residual os corpos de provas da etapa 2 foram cortadas em uma cortadeira metalográfica de precisão refrigerada de baixa velocidade modelo ISOMET DTQ 5 Escolhida com intuito de minimizar a alteração magnética pós soldagem para análise no equipamento magnetômetro de corpos de prova vibrante. Em seguida foram coladas por meio de cola instantânea da marca Loctite®, em um bastão de alumínio e todas arredondadas com diâmetro igual a 5mm mantendo o ponto de soldagem no centro do disco por meio de uma politriz metalográfica AROPOL 2V.

Em seguida, foram pesadas em uma balança de precisão de 0,00001g da marca Shimadzu modelo AY220. Este procedimento, é necessário para a correção do campo desmagnetizante conforme mencionado no Capítulo 2.3.1. Para obtenção da curva de histerese, os experimentos da etapa 1 foram realizados primeiramente no Laboratório de Ensaios da UNIFEI. Posteriormente, para etapa 2, foram realizados no Laboratório de Física da UFSCar. Ambos em um magnetômetro de corpos de prova vibrante (MAV), com um campo máximo aplicado de 14 kG. A **Figura 3-6** mostra uma visão macro do banco de ensaio para caracterização magnética do Laboratório da UNIFEI.

Figura 3-6 - Magnetômetro de Corpos de prova Vibrante Lake Shore.



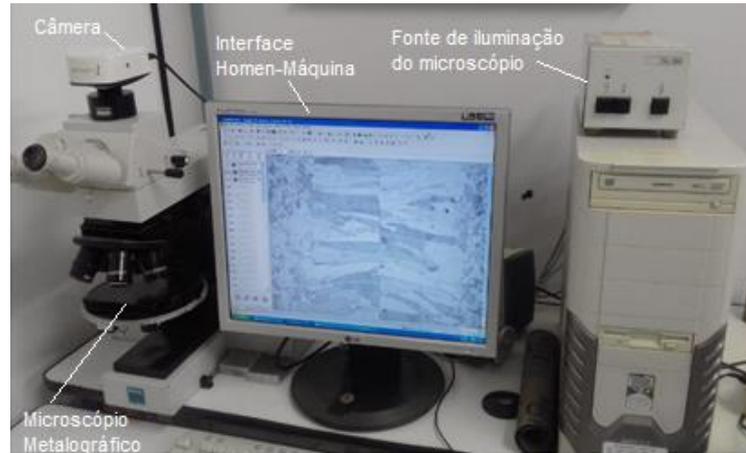
Fonte: SILVA (2011).

Os dados de magnetização foram exportados para o Software OriginPro® 2017 onde, foi possível levantar as propriedades magnéticas do material, como o campo coercivo (H_c), o campo remanente (M_r) e a magnetização de saturação (M_s) por meio da curva de histerese do material após soldagem.

3.4. A caracterização microestrutural

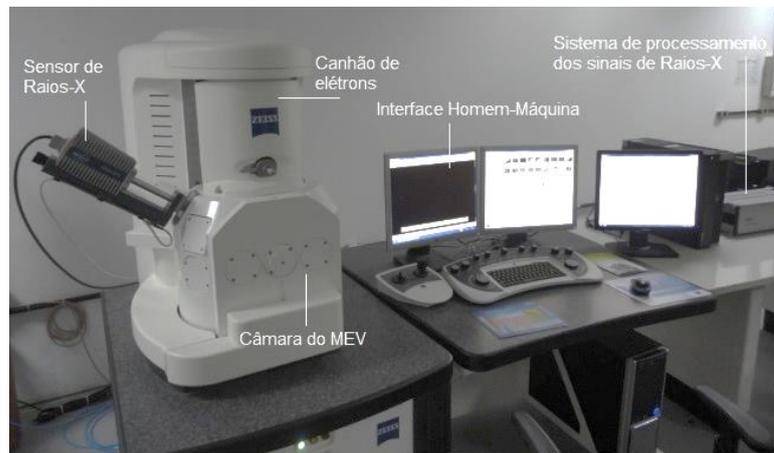
O laboratório de metalografia da UNIFEI foi utilizado para análise e observação da microestrutura. Os corpos de provas foram embutidos com baquelite por meio de um equipamento AROTEC PRE-30Mi, e preparadas com lixas grana: 320, 400, 600, 800, 1200. Girando a corpos de prova 90° em cada mudança de granulação de lixa em uma politriz AROTEC 2V. Em seguida polidas com alumina 0,3micron (com diluição padrão do fabricante) em um pano de veludo flocado e finalizando com polimento de sílica coloidal 0,05micron em um pano específico feito de poliuretano. Para não contaminar os corpos de provas, 2 politrizes AROTEC 2V foram utilizadas sendo uma destinada ao lixamento e outra para o polimento. No polimento foi destinado um prato específico para cada agente de polimento. Após o polimento os corpos de provas foram lavados com água corrente seguidamente por álcool etílico e secada com ar quente e algodão. O ataque químico foi realizado com água régia na proporção de 1:3 de ácido nítrico (HCL) + ácido clorídrico (HNO₃) aguardando o tempo de reação de solução entre 10min a 15min antes de introduzir os corpos de prova na solução. O tempo de ataque foi realizado de 5s em 5s imergindo a corpos de prova em solução ácida dentro de um recipiente de vidro. Os corpos de provas foram novamente lavados com água corrente seguidamente por álcool etílico e secadas com ar quente (sem auxílio do algodão). Após cada ataque (5 segundos) com intuito de acompanhar a revelação da microestrutura utilizou-se o microscópio ótico metalográfico conforme **Figura 3-7**. A determinação dos precipitados foi observada por meio de um MEV (Microscópio eletrônico de varredura) conforme **Figura 3-8**. Este procedimento foi realizado com o intuito de determinar os tamanhos de grão do ponto soldado por meio de um microscópio ótico metalográfico do fabricante ZEISS com software próprio Imaging System Five® do fabricante Olympus. Para determinação do tamanho do grão na **etapa 1** foi utilizado o método de Jeffries (ASTM E112, 2010) em uma única região no centro da foto que abrange parte do metal base, grande parte da zona termicamente afetada e parte da zona fundida.

Figura 3-7 Equipamentos metalográficos: Microscópio metalográfico.



Fonte: Autor

Figura 3-8 – Microscópio eletrônico de varredura ZEISS.



Fonte: Autor.

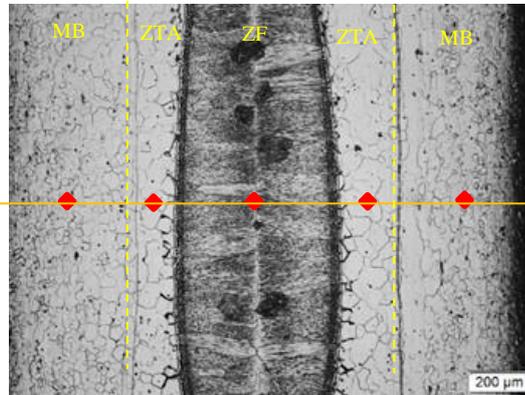
Na **etapa 2**, por realizar uma medição em cada área independente (metal base, zona termicamente afetada e zona fundida) ao considerar o tamanho pequeno destas áreas nos corpos de provas, foi utilizado o método dos interceptos (ASTM E112, 2010).

3.4. Medidas de dureza

Os procedimentos para as medidas de dureza foram realizados segundo norma ASTM E384(2010) no durômetro marca Digimes, modelo TH712. O medida de dureza HV10 (Hardness Vickers) com carga de 0,49 N, foi realizado nas diferentes regiões do ponto soldado. Como exemplo no MB(metal base), na ZF(zona fundida) e da ZTA(zona termicamente afetada)

das corpos de provas. Para a melhor quantificação, em cada ponto foram feitas 2 medições em cada região, e na ZF com 3 medições, conforme **Figura 3-9**. Seguidamente, feita a média das medidas em cada região.

Figura 3-9 – Representação esquemática posições das medidas de dureza.



Adaptado de ASTM E384 (2011).

3.5. Ensaio de cisalhamento.

Após a soldagem os corpos de prova foram submetidos ao teste de cisalhamento para quantificar a força máxima de ruptura, bem como a deformação nesta condição. Tal procedimento foi realizado no Laboratório de Ensaios Destrutivos da UNIFEI, por meio do modo de tração de uma máquina de ensaios da Instron 8874®. Uma célula de carga de 25kN foi adaptada na máquina utilizada para o experimento.

3.6. Procedimento experimental.

Os materiais utilizados neste estudo são fabricados em dois lotes A e B. Para melhor organização do trabalho foram separados sendo lote A para etapa 1 e lote B para etapa 2. Em ambas as etapas os corpos de prova (CP) utilizados foram constituídos de chapas de aço inoxidável AISI 444 com espessura de 1mm, laminada a frio com recozimento segundo fornecedor APERAM (2019). As análises químicas foram realizadas por meio de Spectrofotômetro. Ao considerar que a perda de calor durante a soldagem ocorra também pelo metal base, na etapa 1 as dimensões foram propositalmente escolhidas conforme **Figura 3-10-**

b. Com intuito de maximizar este aporte térmico e como consequência intensificar as alterações nas propriedades magnéticas na **etapa 1**, os corpos de prova foram cortados em tamanhos menores em que está o CP cortado quadrado no formato 7mmx7mm.

Figura 3-10 - Corpos de prova para etapa 1.

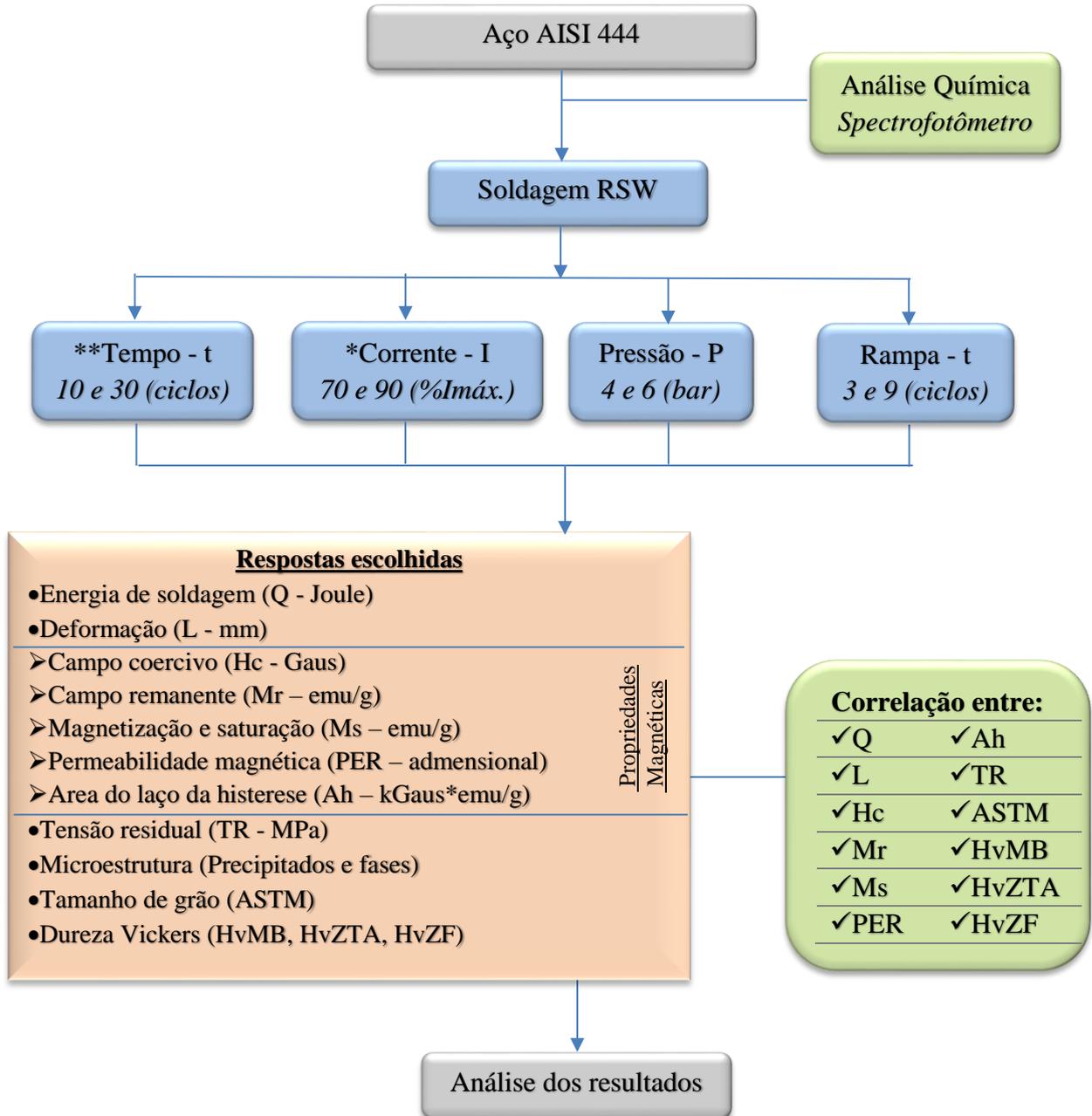


Fonte: Autor.

Seguidamente os CP's foram sobrepostos e soldados pelo processo RSW conforme **Figura 3-10-b**, após análise de tensão residual, os CP's foram arredondados para o diâmetro de 5mm para viabilizar a análise magnética no equipamento conforme **Figura 3-10-c**. Por último a **Figura 3-10-a** ilustra a chapa de aço AISI 444 utilizada na **Figura 3-3**. Na **etapa 1**, com intuito de investigar o comportamento das soldas nos corpos de provas do aço AISI 444 do lote A foram realizados os experimentos. Foi utilizada uma parametrização variada estimada, considerando o comportamento do processo em níveis elevados (motivados por ASSDA, 2007), do tempo (t) e a corrente (I) de soldagem, juntamente a pressão da rede de ar comprimido (P) e a rampa de descida da corrente (R) variados conforme mostrado na **Figura 3-11**. Dentre as respostas escolhidas em cada etapa do experimento está a deformação do material (L), que foi determinada neste estudo pelo sinal de deslocamento do eletrodo. A **Figura 3-11** apresenta um fluxograma do procedimento experimental desenvolvido na etapa 1. A energia de soldagem (Q) demonstrada conforme **Equação 2.1**. Sendo que, o campo coercivo (H_c) indica o campo reverso que deve ser aplicado para reduzir a magnetização (M) à zero, a magnetização remanente (M_r) que é a máxima magnetização residual de um material que é submetido à curva de histerese, a magnetização de saturação (M_s) que é o campo magnético necessário para o alinhamento de todos os domínios magnéticos do material a partir do qual a magnetização não aumenta mais. A permeabilidade magnética (PER) informando o quanto um material é permeável quando submetido a um campo magnético externo, a densidade de corrente (D_c) determinada pela **Equação 2.2** e a área do laço da histerese (A_h) representada pela perda de calor gerada no interior dos corpos de prova quando submetida a um campo magnético externo. A tensão residual (TR) foi quantificada. O tamanho de grão foi medido com intuito de analisar

a influência do campo magnético. Após a soldagem RSW, nesta etapa de experimentos foi empregado a análise de correlação de Pearson conforme descrita no capítulo 2.

Figura 3-11 – Fluxograma da etapa 1.

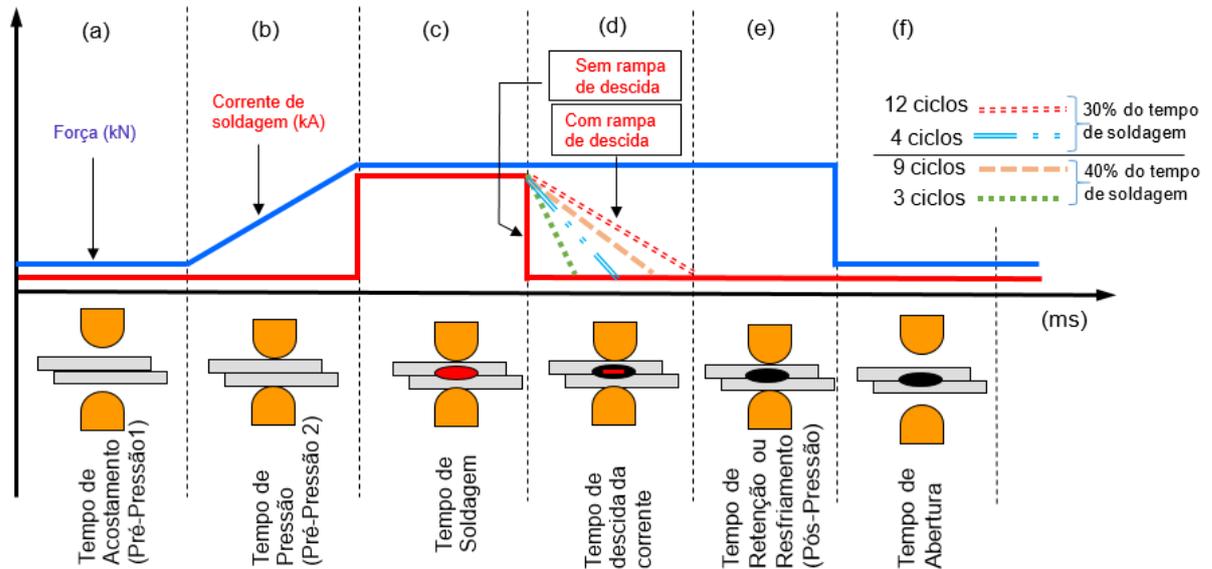


Fonte: Autor. ** 1 ciclo = $1/60 = 0,016666s$. *I=100%=6kA

Na **Figura 3-12**, o tempo de descida da corrente (instante - d) pode ser usado sem rampa (linha contínua no instante - d) ou com vários níveis de rampa (linhas pontilhadas no instante - d). Esta última, ao proporcionar vários tempos de descida da corrente de soldagem, também concede mais energia ao aço aumentando o tempo de resfriamento. Pode-se dizer que os vários

níveis de rampa de descida da corrente de soldagem induz a curvas de resfriamento divergentes. Indaga-se, a possibilidade de alterações magnéticas, microestruturais e de tensão residual do aço pós soldagem.

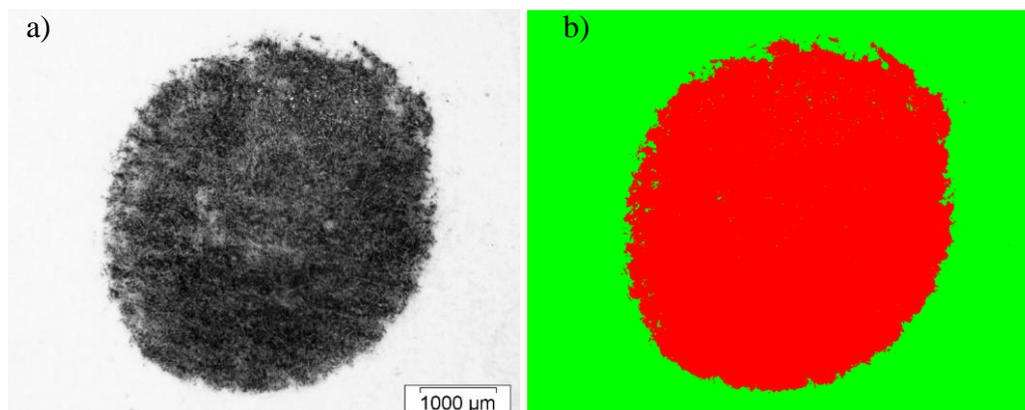
Figura 3-12 – Esboço dos tempo de rampa de descida a corrente de soldagem, etapa 1.



Fonte: Autor

Na **etapa 2**, o desgaste do eletrodo que é um parâmetro incontrolável do processo, (assim como o empenamento da chapa, óxidos e óleos sobre a superfície a ser soldada). A parametrização RSW foi definida com níveis elevados com intuito de amplificar a deformação e o aporte térmico para melhor observar a variação das propriedades magnéticas (ASSDA, 2007). Com o desgaste natural do eletrodo a densidade da corrente elétrica tende a ser alterada. Considerando níveis elevados de parametrização, o desgaste pode aumentar. Em seguida, em um software analisador de imagens (Imaging System Five® do fabricante Olympus) acoplado ao microscópio óptico, a área da ponta do eletrodo foi determinada em cada corpo de prova ante a soldagem, por meio de impressão em papel carbono sobre uma folha de papel A4 com a corrente de soldagem desligada, conforme demonstrado na **Figura 3-13**.

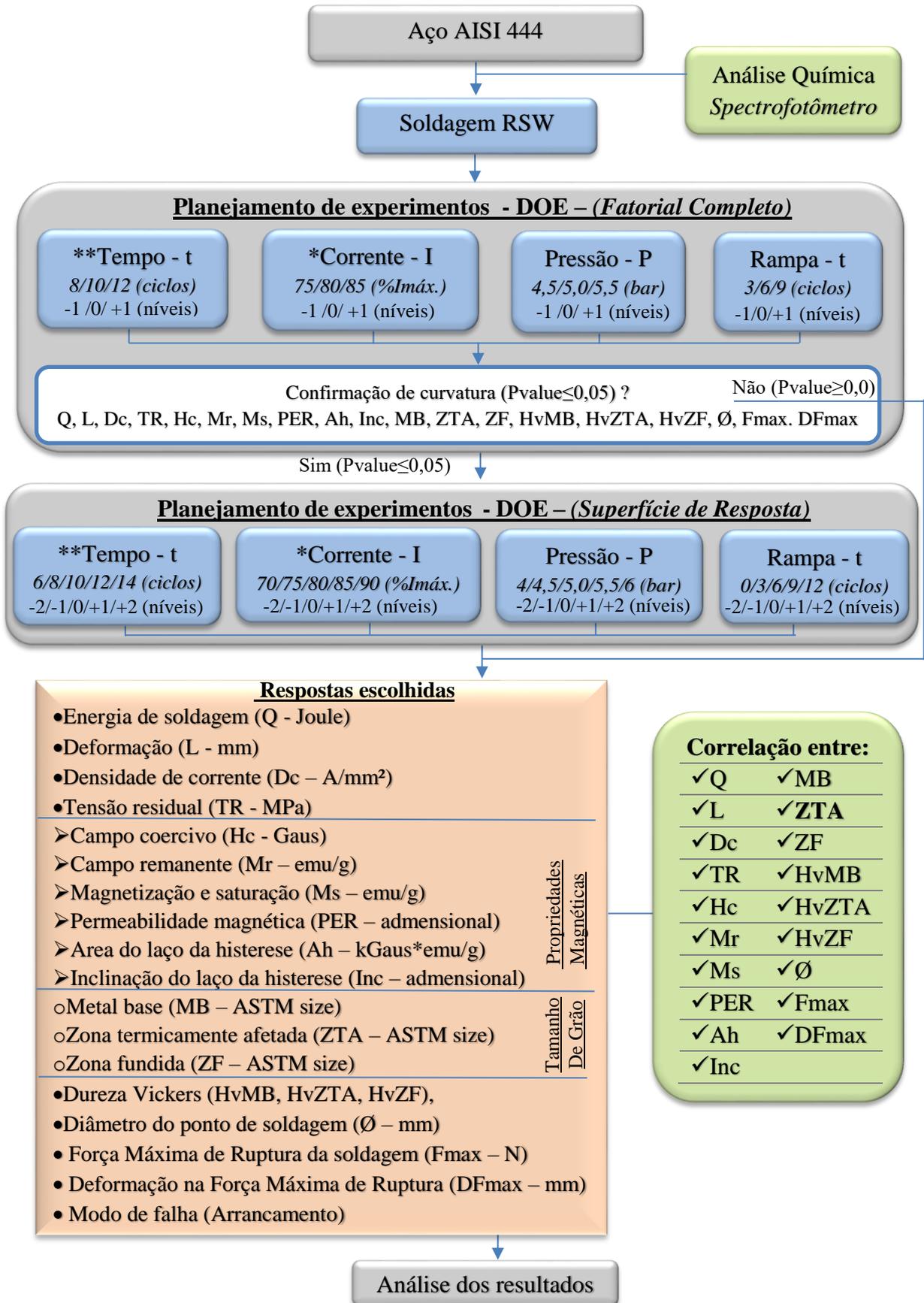
Figura 3-13 – Ponta do eletrodo: a) impressão em papel A4, b) contagem de pixel para determinar a área.



Fonte: Autor

As áreas da ponta do eletrodo (E_a) são utilizadas somente para os cálculos de D_c e o campo magnético (H) coletado para cada valor de M_s foram utilizados para os cálculos de PER não sendo analisados como respostas foram destinados na **Tabela 8-1**. O planejamento dos experimentos foi realizado por meio do DOE (Design of Experiments), seguindo de um arranjo composto central (CCD), utilizando para este fim, um fatorial completo criado para quatro parâmetros em dois níveis ($2^k = 2^4 = 16$) e 4 pontos centrais ($cp = 4$), foi escolhido para comprovar a existência de curvatura nas respostas escolhidas. Para o arranjo CCD, adotou-se uma distância codificada α de 2,0. Levou-se em consideração o conhecimento adquirido das análises realizadas na etapa 1. A parametrização do processo RSW foi estabelecida em níveis mais elevados com intuito de intensificar as modificações das propriedades magnéticas. A **Figura 3-14** apresenta um fluxograma do procedimento experimental desenvolvido na etapa 2. Confirmada a curvatura para as respostas, esta etapa culmina com o estabelecimento de um maior espaço corpos de prova, ao adicionar oito pontos axiais ($2^k = 8$) e mais 3 pontos centrais ($cp = 3$) totalizando em 31 experimentos. Para os parâmetros: tempo, corrente, pressão e rampa, os níveis +1-1 correspondem aos pontos fatoriais, 0 são os pontos centrais, -2 +2 representam os pontos fatoriais. A equação da superfície de resposta ilustradas por meio de um gráfico 3D de interação entre parâmetros será determinada por meio do software Minitab®. O metal base (MB), a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona fundida (ZF) foram investigados com intuito de facilitar sua análise ante a variação das tensões residuais (TR) presentes após o processo de soldagem. A rampa de descida da corrente de soldagem foi realizada como descrito na **Figura 3-12**, considerando os níveis da rampa estabelecidos na **Figura 3-14** para planejamento de experimentos, considerando uma *Superfície de Resposta*.

Figura 3-14 – Fluxograma da etapa 2.



Fonte: Autor. ** 1 ciclo = 1/60 = 0,016666s. *I=100%=6KA.

Capítulo 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados dos testes preliminares - Etapa 1

Esta etapa, é de fundamental importância, não apenas para a qualidade final do ponto de solda, mas também como indícios do caminho dos objetivos propostos. Esta etapa foi explorada com intuito de poder caracterizar de forma mais aprofundada a etapa de deformação e energia de soldagem imposta ao corpo de prova durante a soldagem e os efeitos sobre as propriedades magnéticas e de tensão residual para o aço aqui estudado. A confirmação se mostra pela comprovação de uma correlação estatística. Em função da variação dos parâmetros de pressão dos eletrodos, tempo e corrente de soldagem ajustados no equipamento de soldagem, é possível caracterizar as correlações que se mostrarem influentes e significativas.

Anteriormente o início dos experimentos uma análise química foi realizada para o lote A na **etapa 1** e está descrita na **Tabela 4-1**. Observa-se que a composição química conforme recebido (CR) está dentro dos limites máximos estabelecidos pela ASM 1990. Considerando a **Tabela 4-2** que CP 3 e 6, possuem um mesmo nível de I e t verifica-se um aumento de Q para níveis menores de F, reforçando a influência de F (força entre os eletrodos) na resistência à passagem de corrente entre chapas. Por outro lado, dentro de um mesmo nível de F nota-se o aumento proporcional de Hc e Mr, ao considerar um crescimento da energia de soldagem com exceção para o valor de Mr apresentado entre o CP 2 e CP 3.

Tabela 4-1 – Composição química (conforme recebido - CR) do aço na etapa 1 – lote A.

| Elemento | Fonte da Análise | | |
|----------|------------------|--------------|----------------------|
| | IMBEL(2018) | APERAM(2018) | ASM(1990) |
| %C | 0,0046 | 0,0091 | 0,025 _{max} |
| %Mn | 0,169 | 0,1306 | 1,00 _{max} |
| %Si | 0,52 | 0,349 | 1,00 _{max} |
| %Cr | 19,63 | 17,677 | 17,5-19,5 |
| %Ni | 0,169 | 0,1861 | 1,0 _{max} |
| %P | 0,0010 | 0,0264 | 0,04 _{max} |
| %S | 0,0031 | 0,0032 | 0,03 _{max} |
| %Mo | 1,77 | 1,8141 | 1,75-2,50 |
| %N | ** | 0,0111 | 0,025 _{max} |
| %Ti | 0,169 | 0,1343 | 0.2+4(%C+%N)min |
| %Nb | 0,226 | 0,1855 | - 0.8max(Ti+Nb)* |

**% não registrado pelo equipamento. *% Ti+Nb>0.28%

A **Tabela 4-2** mostra os resultados obtidos para as respostas selecionadas na etapa 1.

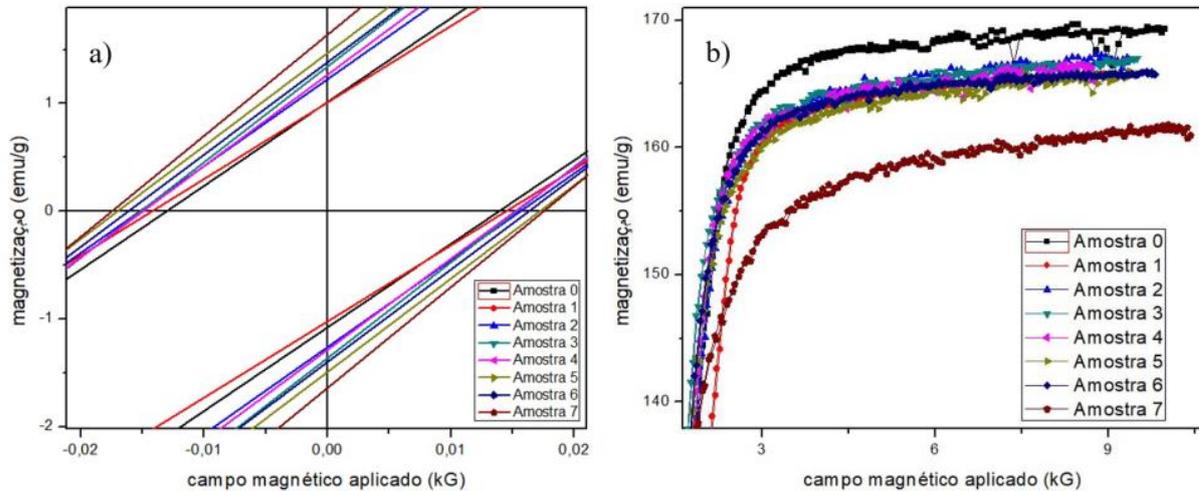
Tabela 4-2– Dados das respostas escolhidas para etapa 1.

| CP | t | I | F | Q | L | TR | Hc | Mr | Ms | PER | Ah |
|----|-------|------|------|--------|------|--------|---------|-------|--------|--------|-----------|
| | s | A | N | J | mm | MPa | kG | emu/g | emu/g | *Adm | kG.emu/g |
| 1 | 0,166 | 4200 | 2000 | 215,25 | 0,13 | -149,1 | 0,01435 | 1,017 | 165,80 | 1,2323 | -15640,24 |
| 2 | 0,500 | 4200 | 2000 | 645,75 | 0,87 | -54,9 | 0,01542 | 1,244 | 167,00 | 1,2109 | -14960,63 |
| 3 | 0,166 | 5400 | 2000 | 355,82 | 1,02 | -242,0 | 0,01525 | 1,354 | 167,00 | 1,2211 | -16832,87 |
| 4 | 0,166 | 4200 | 3015 | 209,75 | 0,37 | -277,3 | 0,01508 | 1,279 | 165,47 | 1,2134 | -15684,53 |
| 5 | 0,500 | 4200 | 3015 | 629,27 | 1,34 | -74,6 | 0,01710 | 1,483 | 165,77 | 1,2125 | -18402,60 |
| 6 | 0,166 | 5400 | 3015 | 346,74 | 1,27 | -42,0 | 0,01623 | 1,391 | 165,90 | 1,2139 | -18565,61 |
| 7 | 0,500 | 5400 | 3015 | 1040,2 | 1,49 | -25,6 | 0,01750 | 1,637 | 161,59 | 1,2040 | -19162,25 |

*Adm = Adimensional

Ambos contemplados na **Figura 4-1-a** pelo posicionamento das linhas referentes as amostras estudadas, quanto mais longe do centro dos quadrantes estiverem a magnetização remanente Mr e o campo magnético coercivo Hc, maior são os valores dos sinais magnéticos apresentados. Neste sentido, limitações em termo de energia de soldagem devem ser levadas em consideração. Observa-se na **Figura 4-1** uma aparente queda dos valores de magnetização de saturação Ms em relação a amostra 0. Mesmo que TR seja uma propriedade sensível a Ms e PER (Vashita & Paul, 2009) na **Tabela 4-2**, não foi observado nenhuma tendência. Aparentemente, maiores valores de Q e L induzem a uma redução da TR de compressão.

Figura 4-1 – Histerese: a) campo coercivo H_c e magnetização remanente M_r , b) magnetização de saturação M_s .



Fonte: Autor

Os estudos indicaram que o campo coercivo (H_c) tende a diminuir com a utilização da rampa de descida da corrente conforme demonstrado na **Figura 4-2-a**. Somente 4 amostras foram escolhidas considerando abrangendo os níveis: baixo, médio e alto da **Tabela 4-2**. O contrário ocorre para PER, M_r , Q e L. A magnetização remanente M_r conforme **Figura 4-2-c** também se mostra influenciável pela rampa de descida da corrente. A magnetização de saturação M_s conforme **Figura 4-2-d** aparentemente está mais influenciada pelos picos de energia de soldagem do que pela rampa. Os valores de H_c na **Figura 4-2-a** continuam aumentando mesmo para deformações acima até 40% da espessura total das duas chapas soldadas conforme **Figura 4-2-f**, indo de encontro ao observado por XU *et al.* (2018). Observa-se também uma oscilação dos valores para a corpos de prova 6 em PER, M_r , M_s apontando para uma tendência de queda dos níveis dos valores. Pode-se auferir que, além da deformação L a energia de soldagem Q também tenha colaborado para a alternância de PER, M_r , M_s no corpo de prova 6 conforme apresentado na **Figura 4-2-b**, **Figura 4-2-c**, **Figura 4-2-d**.

Estas alterações nas propriedades magnéticas sobre os corpos de provas apresentados na **Figura 4-2**, também podem estar relacionadas ao tamanho de grão (Vourna, 2015; Vashita, 2009; Yoshino, 1996) e nos chama a atenção para duas hipóteses de influência. A primeira hipótese é que a rampa de descida da corrente da soldagem aplicada durante o processo RSW, possa ter criado um ambiente favorável ao refinamento dos grãos por aumentar o tempo de calor na soldagem.

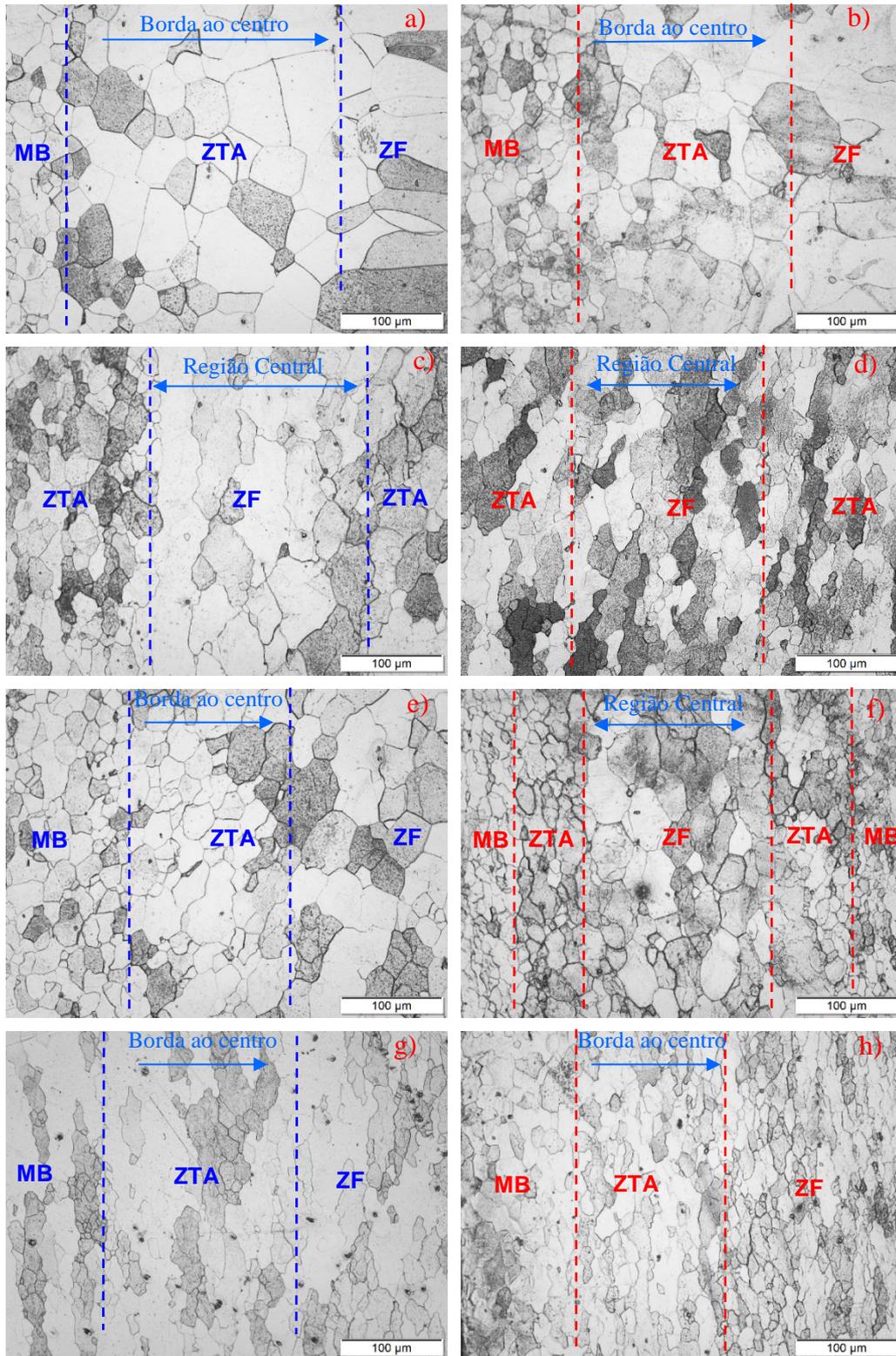
Figura 4-2 – Corpos de provas 1, 2, 3 e 6 pós soldadas RSW com rampa de descida da corrente. (a) campo coercivo Hc, (b) permeabilidade PER, (c) campo remanente Mr, (d) Saturação Ms, (e) Energia de soldagem Q, (f) Deformação L.



Fonte: Autor

A segunda hipótese é que esta rampa, ao fornecer mais tempo de corrente, aumentou o calor e este, possa ter colaborado para o aumento da deformação culminando no refinamento dos grãos. Para elucidar o pressuposto levou-se em consideração a utilização da rampa de descida da corrente com 30% do valor do tempo de soldagem conforme demonstrado na **Figura 4-3-a**, **Figura 4-3-b**.

Figura 4-3 – Microestrutura após RSW com rampa de 30% do tempo de soldagem. CP 1: a) sem rampa e b) com rampa; CP 2: c) sem rampa, e d) com rampa; CP 3: e) sem rampa, e f) com rampa; CP 6: g) sem rampa, e h) com rampa.



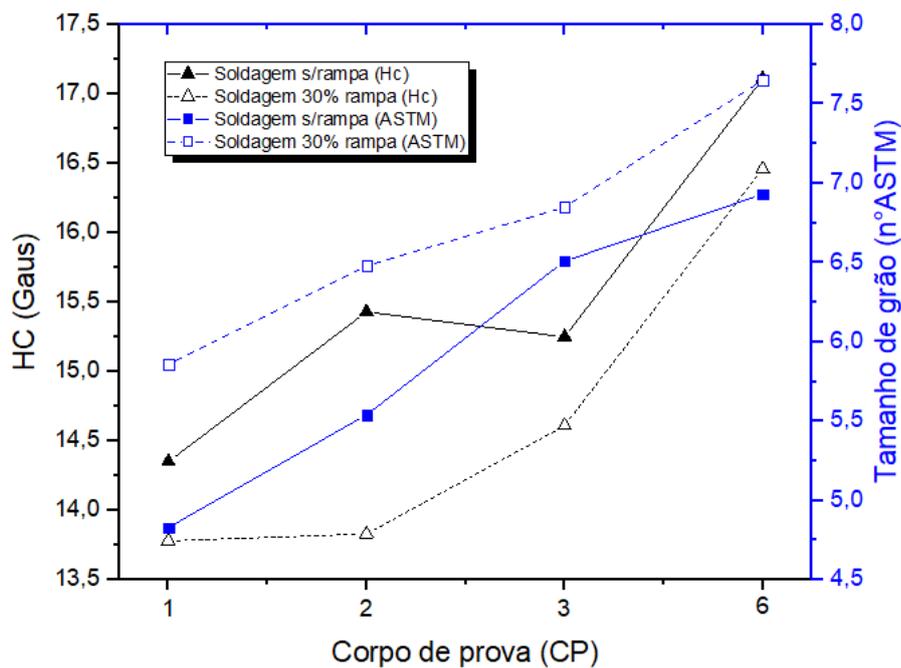
Fonte: Autor

Os corpos de provas (CP) que representam a rampa da descida da corrente de soldagem foram quantificados pelo método planimétrico (Jeffries-ASTM E112) com intuito de determinar o tamanho de grão. Segundo a norma ASTM (2004), quanto maior número ASTM do grão, menor seu tamanho em micron. Este fato pode ser comprovado ao observarmos a diferença do tamanho de grão da **Figura 4-3-a ASTM 4,83** para **Figura 4-3-b ASTM 5,86**. Os valores de Hc em relação a corpos de provas sem rampa estão dispostos na **Tabela 4-3**. Pode-se dizer que a rampa proporciona uma redução de tamanho de grão. Conforme disposto na **Figura 4-4** a aplicação de rampa de descida da corrente durante a soldagem RSW refina o grão (pelo aumento do número ASTM) e este por sua vez, reduz Hc.

Tabela 4-3. Tamanho de grão das corpos de provas segundo norma ASTM (2004).

| | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 6 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Sem rampa | ASTM 4,83 | ASTM 5,54 | ASTM 6,51 | ASTM 6,93 |
| Com rampa | ASTM 5,86 | ASTM 6,48 | ASTM 6,85 | ASTM 7,65 |

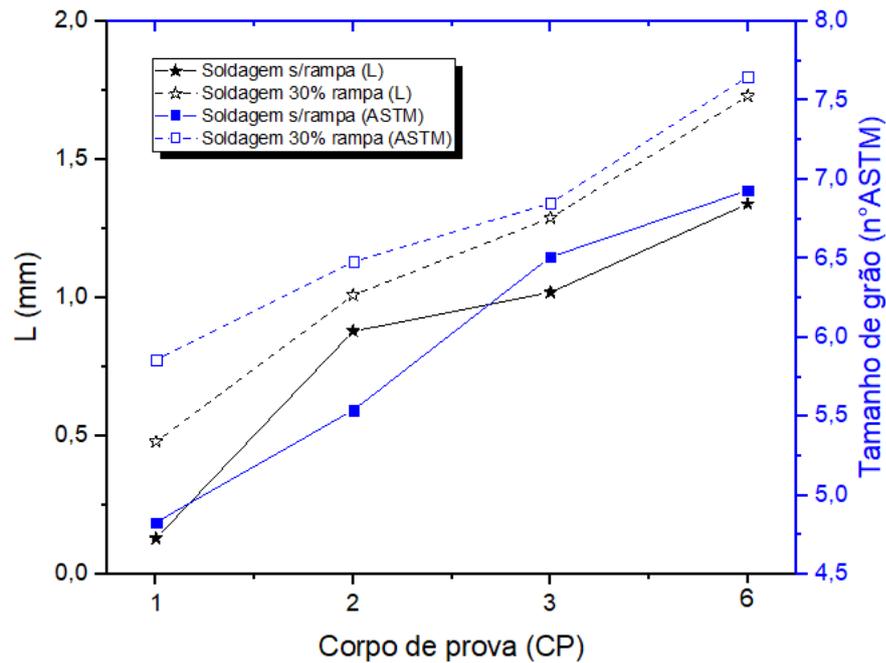
Figura 4-4 – Influência do tamanho de grão sobre o campo coercivo Hc.



Fonte: Autor

Para elucidar o pressuposto da *segunda hipótese* levou-se em consideração, a **Figura 4-5**. Nesta, pode-se observar que, o refinamento de grão tende a aumentar para um aumento da deformação auferida por meio da pressão exercida pelos eletrodos durante a soldagem RSW.

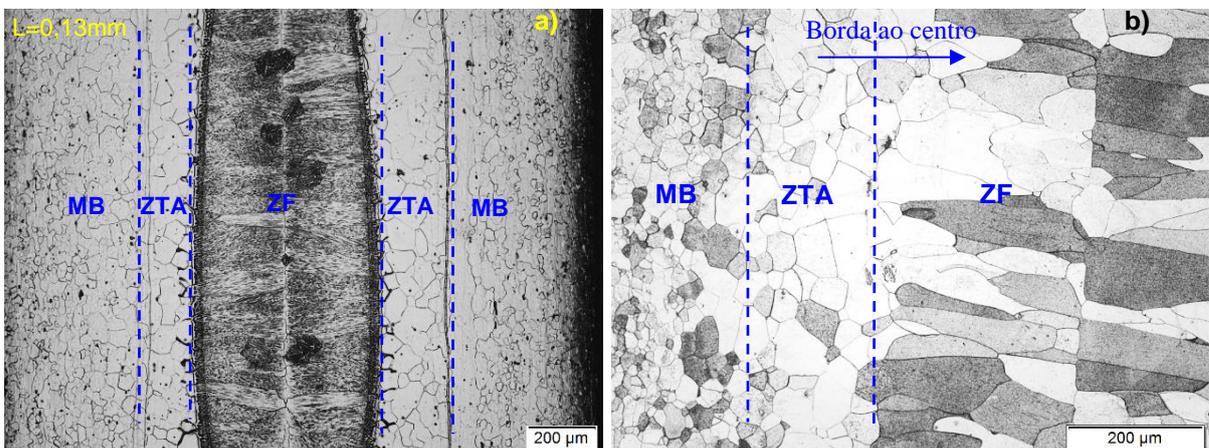
Figura 4-5 - Influência da deformação (L) sobre o tamanho de grão ASTM.

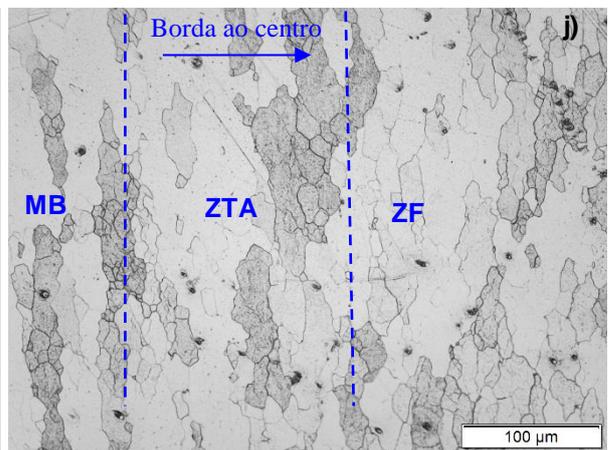
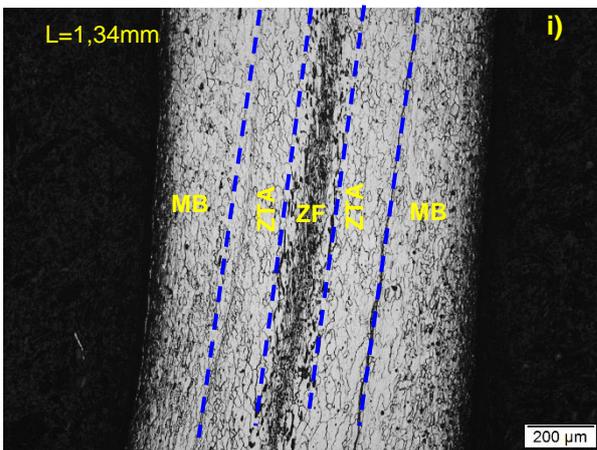
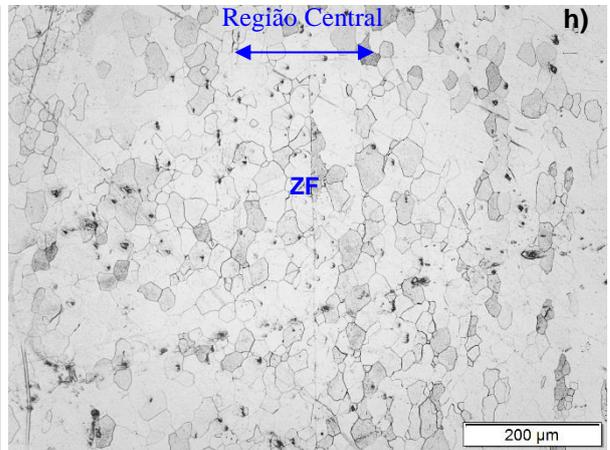
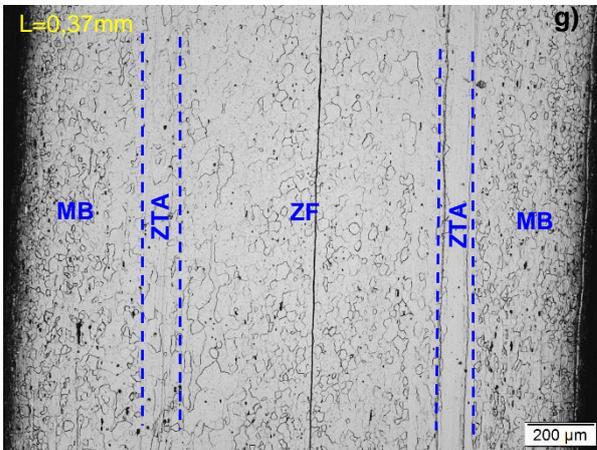
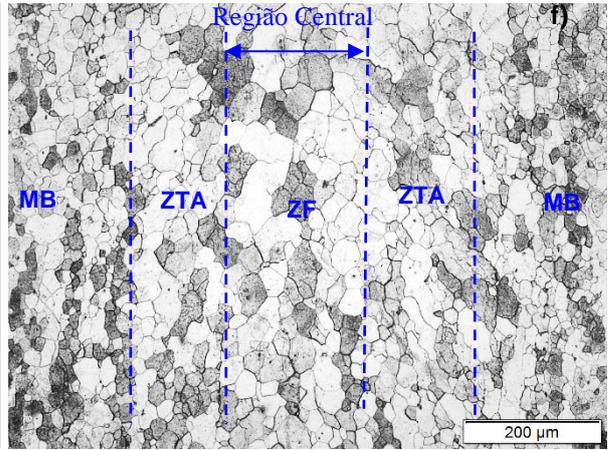
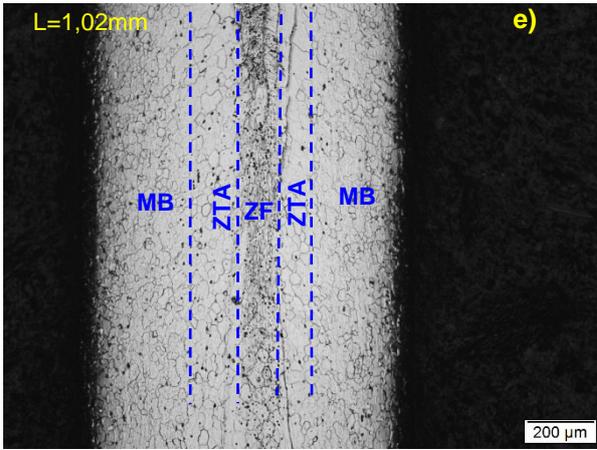
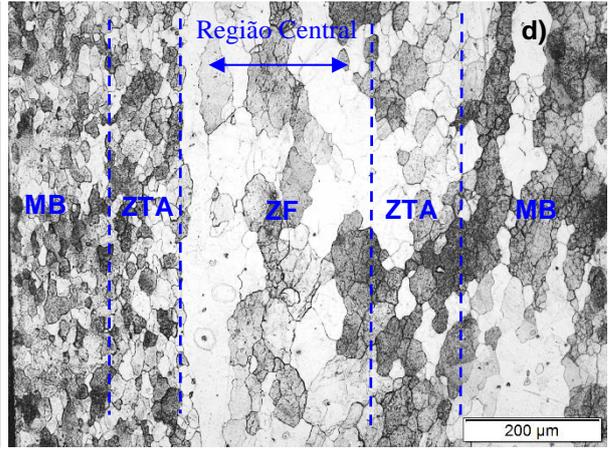
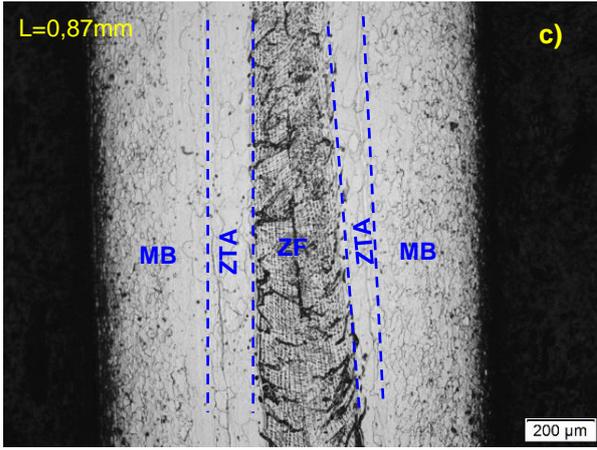


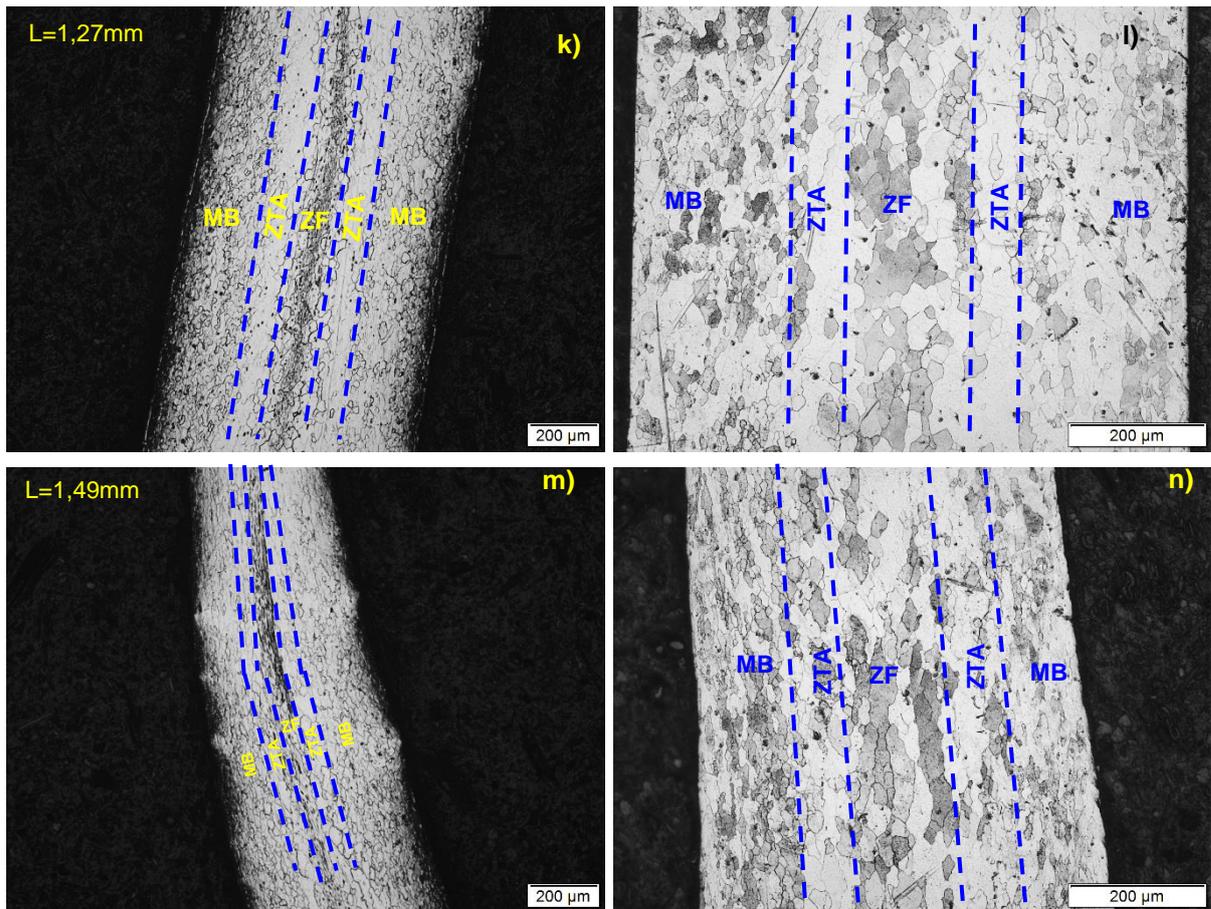
Fonte: Autor

O baixo aporte térmico nos corpos de prova (CP) 1, aliado à baixa deformação também pode ter colaborado para o crescimento dos grãos colunares na **Figura 4-6-a** e **Figura 4-6-b**. Foi observado que, próximo ao centro do ponto de soldagem nos corpos de prova 1, os grãos estão maiores em relação ao metal base (MB). Observa-se uma formação de grãos colunares no centro da ZF. Na ZTA os grãos não apresentaram crescimento colunar; mas estão maiores que no MB. A medida que a deformação L aumenta, os grãos colunares ficam cada vez menores no centro da zona fundida. A linha de junção apresentada no centro da zona de fusão vai desaparecendo conforme demonstrado pelo corpo de prova 2 na **Figura 4-6-e** e **Figura 4-6-f**.

Figura 4-6 –Baixa e alta magnificação da região central do ponto de soldagem: a-b CP1, c-d) CP2, e-f CP3, g-h) CP4, i-j CP5, k-l) CP6, m-n CP7.



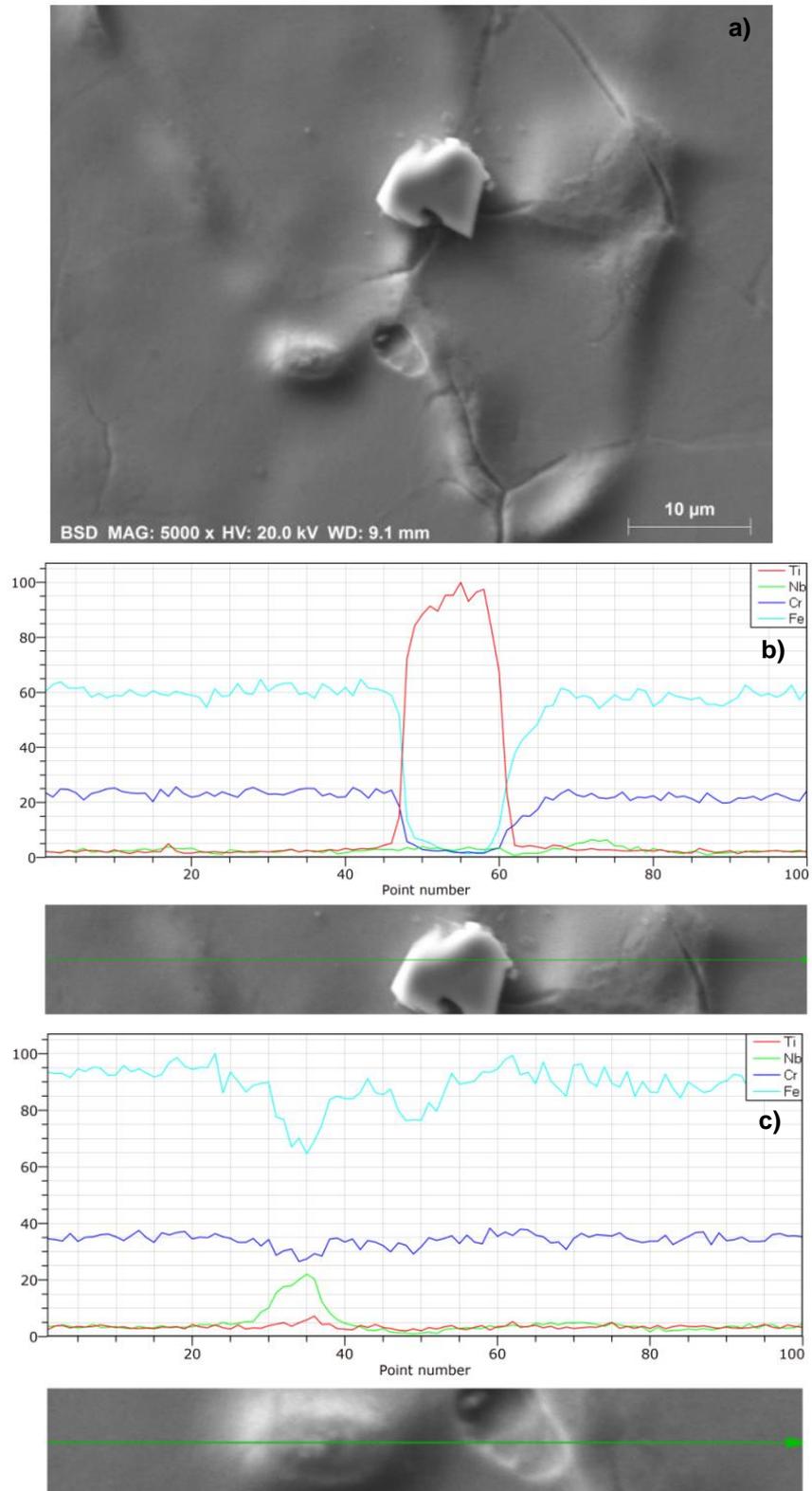




Fonte: Autor

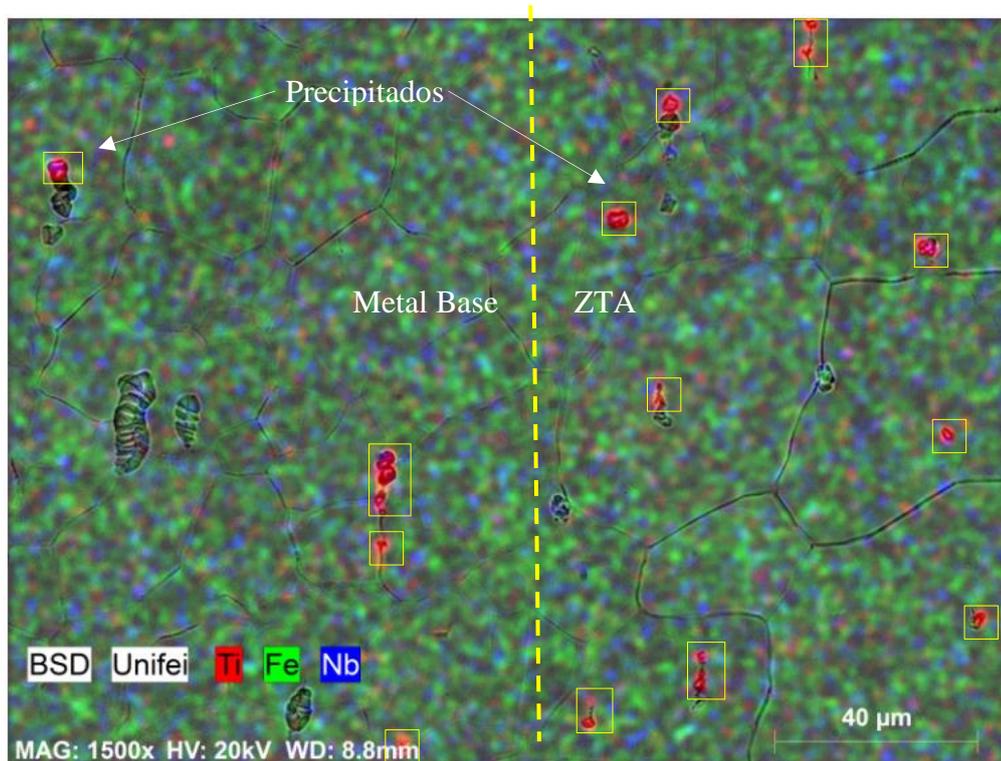
O tamanho de grão também pode ser influenciado por alguns precipitados presentes conforme **Figura 4-7-a**, **Figura 4-7-b**, **Figura 4-7-c**. Para tanto, o CP 3 (corpo de prova 3) foi escolhido por apresentar média deformação. Estes precipitados de $Ti(C,N)$ e/ou $Nb(C,N)$ tem se destacado pelo tamanho e pela quantidade. Em sua grande maioria, o titânio na **Figura 4-7-b** a frente em relação ao nióbio na **Figura 4-7-c**. Apresentando maior concentração à medida que caminhamos para zona fundida (ZF) conforme observado na **Figura 4-8**, os precipitados estão em maior quantidade na ZTA em comparação com o metal base MB.

Figura 4-7 – Imagem do MEV para o aço AISI 444. CP3: a) precipitado, b) Análise química dos precipitados



Fonte: Autor

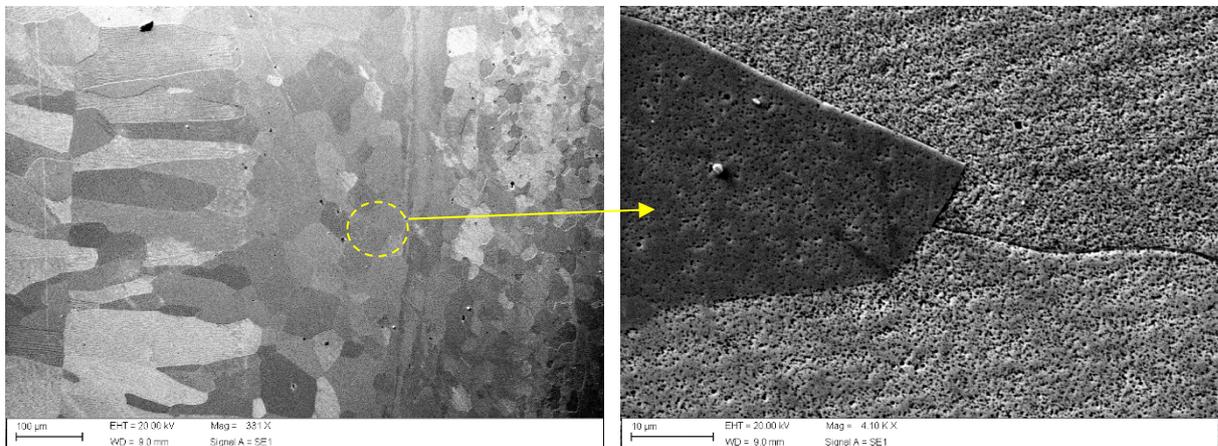
Figura 4-8 – Imagem do MEV para o aço AISI 444, CP 3: Distribuição dos precipitados.



Fonte: Autor

Com intuito de observar se houve formação de novas fases após o processo RSW, por meio do MEV microestrutura foi analisada na **Figura 4-9**, onde não foi observado formação de fases, mas somente crescimento e grãos. Esta característica também foi notada por outros pesquisadores (GONÇALVES et al., 2019) em aços ferríticos estabilizados como exemplo o AISI 430 (Ti+Nb). Pode-se dizer que os precipitados possuem maior microdureza HV em comparação com o metal base.

Figura 4-9 – Imagem do MEV para o aço AISI 444, CP1: microestrutura da ZTA.

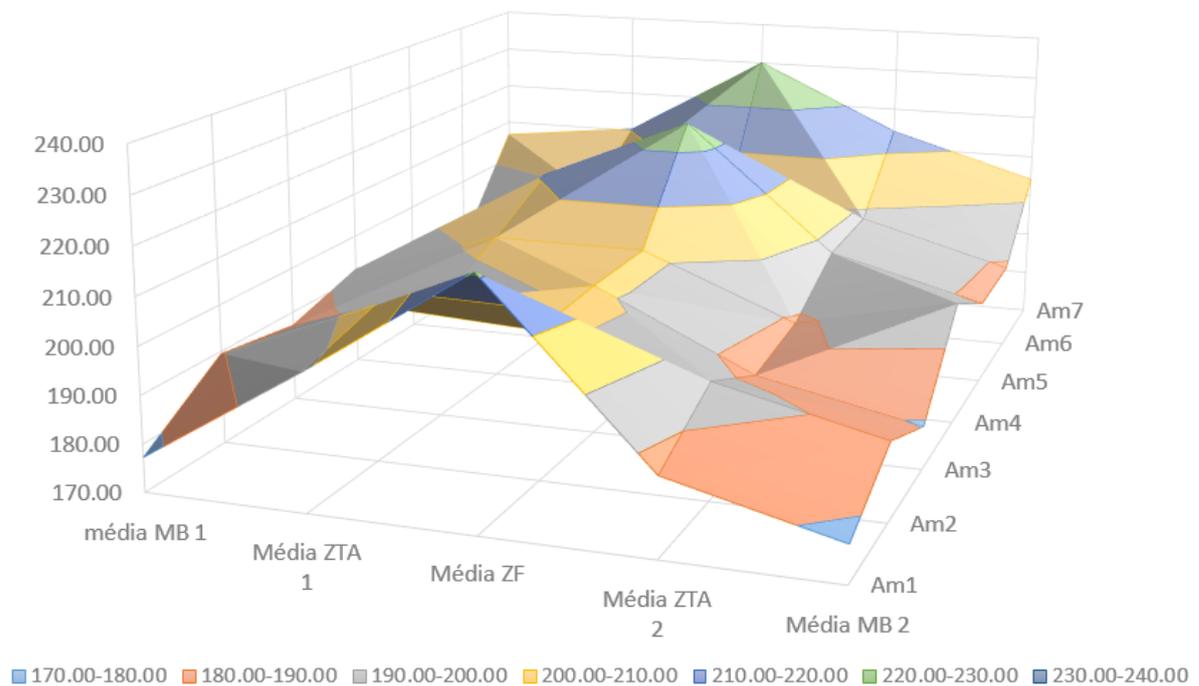


Fonte: Autor

Por meio da **Figura 4-10** observa-se que o nível de microdureza HV aumenta na medida

que caminhamos para o centro de ZF. Este fato, também condiz com o aço 430 (ALISADEH, 2015) exemplificado na **Figura 2-8-f**. Motivado pela observação de Meyer (2013) em que a recristalização de novos grãos para aços ferríticos estabilizados inicia-se após 3 minutos a uma temperatura acima de 850° e que, os precipitados servem como pontos de nucleação na ZF (Gonçalves, 2019) pode-se dizer que a possibilidade de refinamento de grãos nas duas hipóteses anteriores são passíveis de ocorrer durante a soldagem RSW no aço AISI 444.

Figura 4-10 – Níveis de dureza na microestrutura do aço AISI 444 pós soldagem RSW.



| | média MB 1 | Média ZTA 1 | Média ZF | Média ZTA 2 | Média MB 2 |
|-----|------------|-------------|----------|-------------|------------|
| Am1 | 177.25 | 198.45 | 221.07 | 186.25 | 177.75 |
| Am2 | 189.50 | 203.10 | 201.30 | 194.50 | 186.45 |
| Am3 | 187.00 | 195.50 | 202.33 | 186.30 | 179.20 |
| Am4 | 192.05 | 202.50 | 202.43 | 188.90 | 196.65 |
| Am5 | 190.00 | 210.90 | 225.47 | 197.20 | 188.40 |
| Am6 | 183.70 | 198.95 | 197.40 | 198.30 | 188.90 |
| Am7 | 206.60 | 210.35 | 230.10 | 214.25 | 204.20 |

Fonte: Autor

A **Tabela 4-4** mostra os resultados obtidos de correlação entre respostas. Ao analisar todas as correlações por meio do software MINITAB® foi considerado como forte correlação os valores de Pearson correlation $\geq 0,7$ e significativos (intervalo de confiança $\geq 95\%$) os valores de P-Value $\leq 0,05$ (Montgomery, 2005). Os dados com ‘*’ não são aplicáveis pois as correlações estão entre os parâmetros magnéticos, ou seja, ambos são coletados do mesmo laço da histerese. O mesmo vale as correlações entre as respostas de microdureza. Os dados ‘sublinhados’,

apresentam forte correlação e significante. Em ‘**negrito**’, apresentam forte correlação, mas não significante. Observa-se na **Tabela 4-4** que, os valores de correlação entre energia de soldagem (Q), deformação (L), tensão residual (TR), e permeabilidade (PER), sendo inversamente proporcional para esta última, estão próximos de 0,7 podendo assim, caracterizar uma correlação forte, mas não significativa pelo seu valor de $P\text{-Value} \geq 0,05$. Para correlação entre Q, campo coercivo, (Hc), campo remanente (Mr), as durezas Vickers (Hv): no metal base (MB) e zona termicamente afetada (ZTA), apresentam-se fortes e significativas. As propriedades magnéticas de (Hc), (Mr), área do laço da histerese (Ah) apresentam correlação forte e significativa com a deformação (L). A deformação L também apresenta correlação forte, mas não significativa com dureza da ZTA.

Tabela 4-4 – Correlação entre respostas da etapa 1.

| | <i>Hc</i> | <i>Mr</i> | <i>Ms</i> | <i>L</i> | <i>PER</i> | <i>Ah</i> | <i>TR</i> | <i>Q</i> | <i>HvMB</i> | <i>HvZTA</i> |
|--------------|--|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| <i>Mr</i> | 0,937* | | | | | | | | | |
| | 0,002* | | | | | | | | | |
| <i>Ms</i> | -0,633 | -0,616 | | | | | | | | |
| | 0,127 | 0,141 | | | | | | | | |
| <i>L</i> | <u>0,906</u> | <u>0,906</u> | -0,376 | | | | | | | |
| | <u>0,005</u> | <u>0,005</u> | 0,405 | | | | | | | |
| | Conteúdo da Célula: Correlação de Pearson $\geq 0,7$ $P\text{-value} \leq 0,05$ | | | | | | | | | |
| <i>PER</i> | -0,786* | -0,829* | 0,510 | -0,719 | | | | | | |
| | 0,036* | 0,021* | 0,243 | 0,069 | | | | | | |
| <i>Ah</i> | -0,866* | -0,833* | 0,604 | <u>-0,826</u> | 0,479 | | | | | |
| | 0,012* | 0,020* | 0,151 | <u>0,022</u> | 0,277 | | | | | |
| <i>TR</i> | 0,651 | 0,419 | -0,373 | 0,627 | -0,456 | -0,515 | | | | |
| | 0,113 | 0,350 | 0,410 | 0,132 | 0,304 | 0,237 | | | | |
| <i>Q</i> | <u>0,814</u> | <u>0,755</u> | -0,673 | 0,733 | -0,744 | -0,533 | 0,690 | | | |
| | <u>0,026</u> | <u>0,050</u> | 0,098 | 0,061 | 0,055 | 0,218 | 0,086 | | | |
| <i>HvMB</i> | 0,714 | <u>0,785</u> | <u>-0,812</u> | 0,519 | <u>-0,874</u> | -0,483 | 0,277 | <u>0,735</u> | | |
| | 0,072 | <u>0,036</u> | <u>0,026</u> | 0,233 | <u>0,010</u> | 0,272 | 0,548 | <u>0,060</u> | | |
| <i>HvZTA</i> | <u>0,907</u> | <u>0,804</u> | <u>-0,808</u> | 0,705 | <u>-0,802</u> | -0,683 | 0,704 | <u>0,900</u> | 0,836* | |
| | <u>0,005</u> | <u>0,029</u> | <u>0,028</u> | 0,077 | <u>0,030</u> | 0,091 | 0,078 | <u>0,006</u> | 0,019* | |
| <i>HvZF</i> | 0,489 | 0,322 | -0,675 | 0,204 | -0,079 | -0,433 | 0,351 | 0,564 | 0,349 | 0,613 |
| | 0,266 | 0,481 | 0,096 | 0,662 | 0,866 | 0,332 | 0,441 | 0,187 | 0,443 | 0,143 |

*não aplicável. ‘**negrito**’ correlação forte mas não significativa. ‘sublinhados’ correlação forte e significativa.

A tensão residual (TR) apresenta correlação forte, mas não significativa somente com a

dureza da ZTA. Por último observa-se que PER, Ms, Mr e Hc possuem correlação forte e significativa com a dureza da HvZTA e HvMB, sendo que para HvMB e Hc não apresenta significância. Percebe-se que, L e Q podem alterar as propriedades magnéticas do material (ASSDA, 2007). Ao final desta **etapa 1** foi observado que a influência dos parâmetros de soldagem sobre o tamanho de grão culmina na modificação das propriedades magnéticas do aço inoxidável AISI 444. Pode-se dizer o refinamento do tamanho de grão durante a soldagem deste material, reduz o campo coercivo. Motivado pelos resultados, inicia-se a **etapa 2**.

4.2. Planejamento de experimentos DOE – Etapa 2

Como se observou dos resultados obtidos anteriormente, a natureza do processo RSW em aço inoxidável ferrítico é bastante dinâmica uma vez que existem diferentes fases durante todo o processo. Até agora, foi avaliado em caráter preliminar, as influências dos parâmetros de soldagem sobre as propriedades magnéticas, microestruturais e de tensão residual, bem como, a simulação destes resultados. Entretanto, questões relativas à interação das propriedades físico-químicas durante a soldagem aparecem naturalmente e se tornam difíceis de serem respondidas sem considerar uma interação mais robusta, que garanta uma confiabilidade aceitável em uma abrangência maior do espaço corpos de prova. Anteriormente o início dos experimentos uma análise química foi realizada para o lote B na **etapa 2** e está descrita na **Tabela 4-5**. Observa-se que a composição química conforme recebido (CR) está dentro dos limites máximos estabelecidos pela ASM 1990.

Tabela 4-5 – Composição química (conforme recebido - CR) do aço na etapa 2 – lote B.

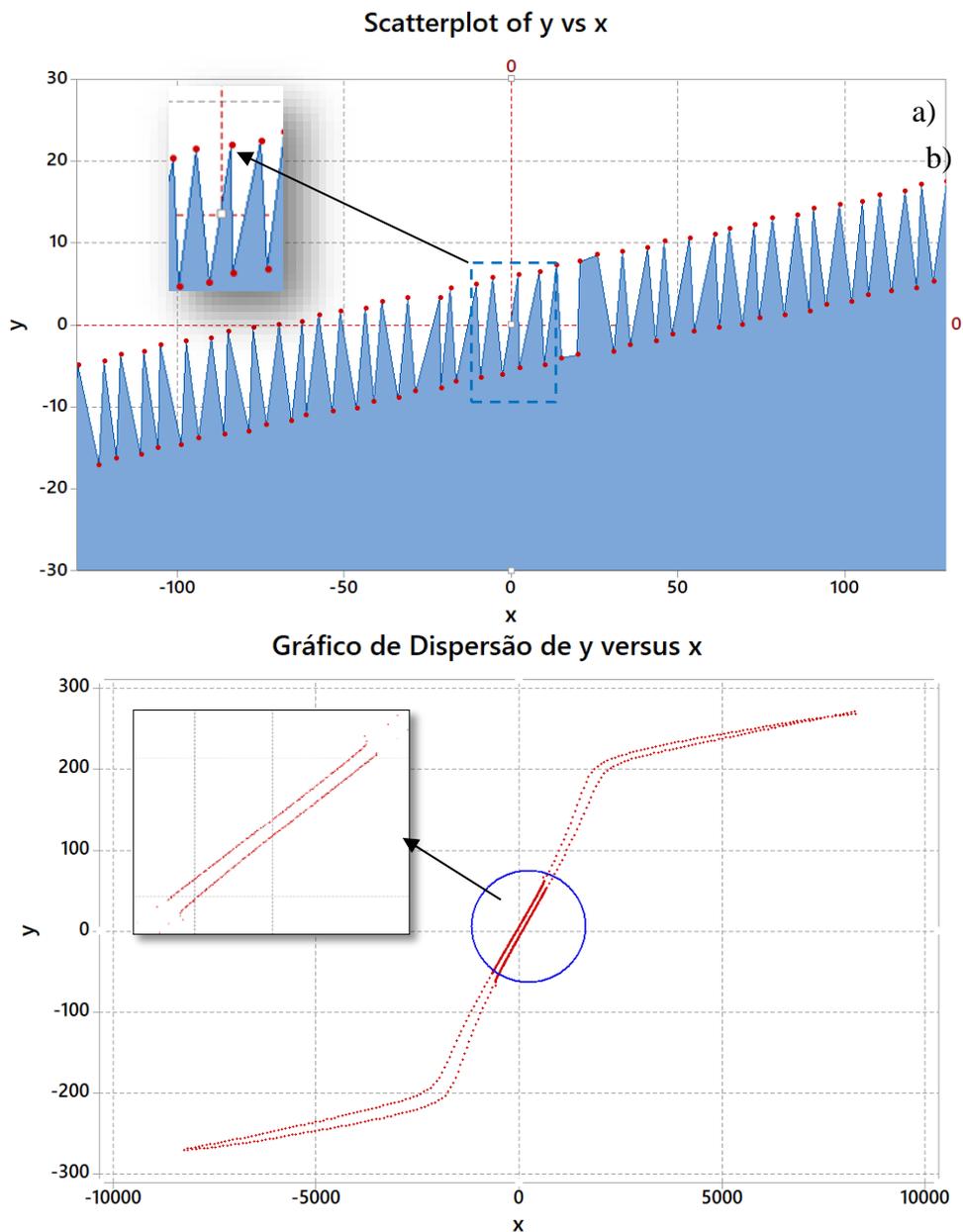
| Elemento | Fonte da Análise | | |
|----------|------------------|--------------|----------------------|
| | IMBEL(2018) | APERAM(2018) | ASM(1990) |
| %C | 0,0020 | 0,0141 | 0,025 _{max} |
| %Mn | 0,147 | 0,138 | 1,00 _{max} |
| %Si | 0,56 | 0,3748 | 1,00 _{max} |
| %Cr | 19,33 | 17,7782 | 17,5-19,5 |
| %Ni | 0,211 | 0,2227 | 1,0 _{max} |
| %P | 0,0010 | 0,0233 | 0,04 _{max} |
| %S | 0,0030 | 0,0008 | 0,03 _{max} |
| %Mo | 1,71 | 1,85 | 1,75-2,50 |
| %N | ** | 0,0142 | 0,025 _{max} |
| %Ti | 0,210 | 0,1669 | 0.2+4(%C+%N)min |
| %Nb | 0,187 | 0,1888 | - 0.8max(Ti+Nb)* |

**% não registrado. *%Ti+Nb>0.28%

4.2.1. A matriz experimental

Ao observar que muitos dos sinais magnéticos de remanência M_r , não coincidem com o eixo vertical central conforme observado na **Figura 4-11 a** do gráfico que dificultando a localização pontual dos resultados, foi avaliada a possibilidade de utilização de uma reta de regressão linear com intuito de aumentar a acuracidade dos dados coletados. Foi observado nas curvas da histerese dos corpos de provas que próximo ao centro conforme **Figura 4-11-b** o comportamento se aproxima de uma reta.

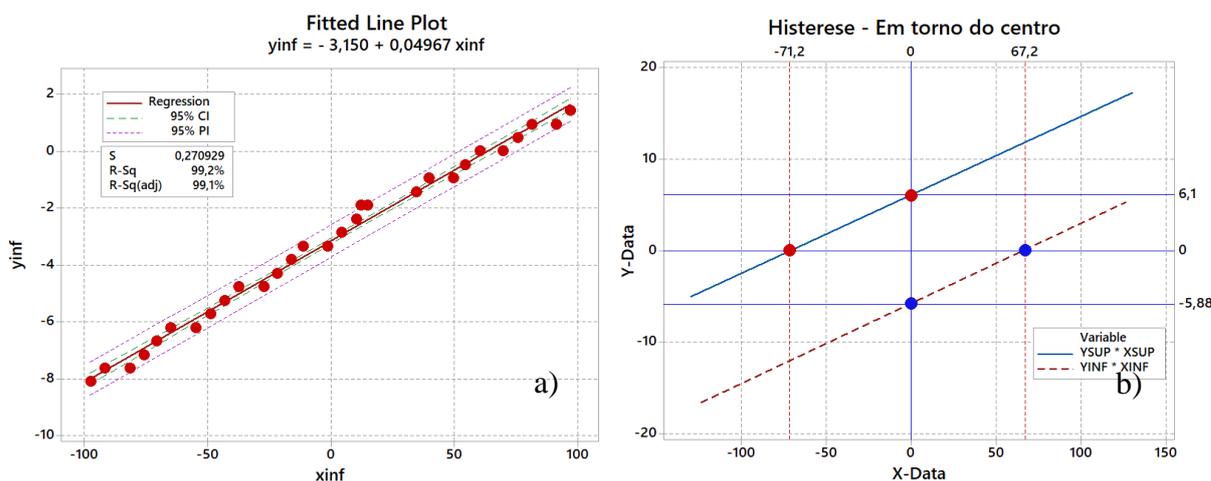
Figura 4-11 –Centro do laço da histerese.



Fonte: Autor

Ao considerar que o modelo matemático de regressão linear consegue representar a realidade com 99% conforme **Figura 4-12-a** uma reta de regressão linear pode coletar com melhor precisão os dados da magnetização demonstrado na **Figura 4-12-b**.

Figura 4-12 – Regressão linear de Mr.



Fonte: Autor

Considerando as informações vistas até o momento, o resultado das medições de todas as respostas fora reunido para compor a matriz experimental na **Tabela 4-6** e **Tabela 4-7**, utilizada como fonte de dados para a modelagem de determinação dos parâmetros influentes. Os dados foram divididos entre Pontos: 1=fatoriais (16 pontos), e 0=centrais (4 pontos), totalizando 20 experimentos do fatorial completo. Nas respostas escolhidas, temos ‘Cp’ que representam os corpos de prova e/ou corpos de provas analisadas. A energia de soldagem ‘Q’ calculada por meio das Equações 2.1. ‘L’ tem-se o sinal de deslocamento do eletrodo representado pela deformação causada pela ação dos eletrodos no material soldado. A densidade da corrente elétrica ‘Dc’ que passa pelo ponto de soldagem. O nível de tensão residual ‘TR’. Os valores negativos de TR representam a tensão residual compressiva, quando positiva representa a tensão de tração. Segundo Moshayed, 2014 a tensão de compressão é bem-vinda visto a possibilidade de inibir falhas do ponto de soldagem por manter a região do ponto soldado comprimida. Na sequência, temos as propriedades magnéticas do aço AISI 444 constituídas pelo campo coercivo ‘Hc’, pela magnetização remanente ‘Mr’, pela magnetização de saturação ‘Ms’. A permeabilidade magnética ‘PER’, e a área da histerese ‘Ah’. Posteriormente tem-se a inclinação do laço da histerese representado por ‘Inc’.

O sinal negativo de ‘Ah’, ‘Mr’ e ‘Ms’ são devidos localização da curva de magnetização no terceiro quadrante de um plano cartesiano qualquer. Os valores de ‘MB’, ‘ZTA’ e ‘ZF’ são

do tamanho de grão pós soldagem RSW, segundo número ASTM padronizados pela norma ASTM E112 (2010). Nestes, quanto maior o número menor será o tamanho do grão em escala micrométrica. Sendo MB representando o metal base, ZTA a zona termicamente afetada e ZF a zona fundida do ponto de soldagem RSW. ‘HvMB’, ‘HvZTA’, ‘HvZF’ representam a microdureza (Vickers) medida no metal base, na zona termicamente afetada e na zona fundida. O diâmetro da pepita de soldagem ‘Ø’, a força máxima de ruptura ‘Fmax’ e a deformação na força máxima de ruptura ‘DFmax’ também coletada pelo teste de cisalhamento, completam as respostas escolhidas para esta pesquisa. ‘P’, ‘t’, ‘%I’, e ‘R’ seguem conforme estabelecidos anteriormente. Ao considerar que o magnetismo seja influenciado pela deformação e calor (ASSDA, 2007) e este último seja intensificado pelo ângulo da ponta do eletrodo conforme **Figura 2-23**, o ângulo de 85° juntamente com o alto nível dos parâmetros intensificaram de forma proposital a energia de soldagem bem como a deformação. Neste contexto, o desgaste natural do eletrodo durante o processo de soldagem foi intensificado impossibilitando a soldagem, necessitando assim, de uma troca do eletrodo durante o experimento. Justifica-se desta forma, algumas oscilações nos pontos centrais. Para o fatorial completo foi escolhido 4 pontos centrais, com intuito de minimizar a oscilação. Mesmo não sendo o ideal um valor de 3 pontos centrais para um experimento de 4 parâmetros, garante uma boa redução da variância para que um modelo fatorial completo represente uma modelagem de confiança (Oliveira *et al*, 2009^b). Alguns dados representados na **Tabela 4-6**, **Tabela 4-7**, **Tabela 4-8** com (*) em frente ao valor da tabela foram removidos em todo o estudo estatístico (*indicados pelo MINITAB®*) por apresentarem grandes resíduos e/ou outliers e a presença dos mesmos poderia influenciar de maneira negativa a modelagem matemática das respostas.

Tabela 4-6 – Parâmetros RSW e respostas do fatorial completo.

| Cp | t ^l | %I | | P | | R ^l | Q | L | Dc | TR | Hc |
|----|----------------|----|----|-----|----|----------------|--------|----------|-----------------|-----------------|----|
| | | Ci | A | Bar | Ci | | | | | | |
| 1 | 1 | 8 | 75 | 4,5 | 3 | 272,275 | 0,1034 | 231,8179 | 62,00 | 65,0389 | |
| 2 | 1 | 12 | 75 | 4,5 | 3 | 457,549 | 0,1811 | 293,6566 | -25,00 | 69,5494* | |
| 3 | 1 | 8 | 85 | 4,5 | 3 | 474,476 | 0,3011 | 370,3288 | 19,00 | 69,7178 | |
| 4 | 1 | 12 | 85 | 4,5 | 3 | 626,463 | 0,8857 | 357,3312 | -206,00 | 69,1732 | |
| 5 | 1 | 8 | 75 | 5,5 | 3 | 351,082 | 0,1119 | 312,1360 | -172,00 | 64,1588 | |
| 6 | 1 | 12 | 75 | 5,5 | 3 | 522,963 | 0,2694 | 343,8264 | -233,00 | 64,1112 | |
| 7 | 1 | 8 | 85 | 5,5 | 3 | 354,538 | 0,4352 | 270,5959 | 184,00 | 71,1211 | |
| 8 | 1 | 12 | 85 | 5,5 | 3 | 558,542 | 0,7536 | 318,0853 | 120,00 | 71,0955 | |
| 9 | 1 | 8 | 75 | 4,5 | 9 | 448,529 | 0,1227 | 249,3643 | -340,00* | 71,1540 | |
| 10 | 1 | 12 | 75 | 4,5 | 9 | 587,296 | 0,1206 | 266,3796 | -43,00 | 71,3737 | |

Continua

Tabela 4-6 (Continuação)

| | | | | | | | | | | |
|----|---|----|----|-----|---|-----------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 11 | 1 | 8 | 85 | 4,5 | 9 | 605,594 | 0,2151 | 299,0673 | 116,00 | 71,2932 |
| 12 | 1 | 12 | 85 | 4,5 | 9 | 798,206 | 0,4326 | 321,7111 | -265,00 | 71,6756 |
| 13 | 1 | 8 | 75 | 5,5 | 9 | 540,552 | 0,1544 | 310,8476 | -77,00 | 71,2566 |
| 14 | 1 | 12 | 75 | 5,5 | 9 | 602,792 | 0,1412 | 277,5918 | -313,00 | 71,5531 |
| 15 | 1 | 8 | 85 | 5,5 | 9 | 646,842 | 0,2152 | 325,8024 | 144,00 | 71,3974 |
| 16 | 1 | 12 | 85 | 5,5 | 9 | 844,558 | 0,6058 | 346,3675 | 205,00 | 71,2584 |
| 17 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 597,692* | 0,4018* | 341,8249* | -236,00* | 70,3600 |
| 18 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 532,739 | 0,3066 | 300,9021 | 6,00 | 70,6308 |
| 19 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 443,587 | 0,2730 | 244,7328 | 15,00 | 69,2968 |
| 20 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 514,281 | 0,2206 | 289,2729 | -120,00 | 68,8742* |

Pontos: 1=fatoriais, 0=centrais. ¹Abreviação de ciclos (Ci). * removidos do estudo.

Tabela 4-7 – Parâmetros RSW e respostas do fatorial completo.

| <i>Cp</i> | | <i>Mr</i> | <i>Ms</i> | <i>PER</i> | <i>Ah</i> | <i>Inc</i> | <i>MB</i> | <i>ZTA</i> |
|-----------|---|-----------------|------------------|----------------|---------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| | | <i>emu/g</i> | <i>emu/g</i> | <i>Adm. '</i> | <i>emu/g x Gaus</i> | <i>Adm. '</i> | <i>número ASTM</i> | <i>número ASTM</i> |
| 1 | 1 | 5,7310 | 126,9555 | 1,2005 | -35078,7635 | 0,0907 | 5,0149 | 4,5477 |
| 2 | 1 | 3,7941 | 86,9565 | 1,1200 | 16356,4697 | 0,0613 | 4,2629 | 4,1217 |
| 3 | 1 | 11,2900 | 235,9133 | 1,4107 | -199312,7983 | 0,1704 | 5,0180 | 4,1458 |
| 4 | 1 | 8,8736 | 152,1631 | 1,2157 | -104348,4436 | 0,1435 | 4,5228 | 4,2269 |
| 5 | 1 | 14,4610 | 216,6667 | 1,3696 | -84036,8613 | 0,2198 | 5,6257 | 4,8124 |
| 6 | 1 | 8,8551 | 157,9276 | 1,2410 | -49317,7949 | 0,1388 | 4,3627 | 4,0395 |
| 7 | 1 | 4,5668 | 141,1711 | 1,1978 | -36490,1439 | 0,0702 | 4,3230 | 4,1462 |
| 8 | 1 | 6,6644 | 182,5980 | 1,2542 | -66476,7173 | 0,1026 | 5,0846 | 4,6368 |
| 9 | 1 | 23,7460 | 187,6676 | 1,3151 | -74003,5124 | 0,3351 | 4,6588 | 3,9911 |
| 10 | 1 | 4,0519 | 128,4234 | 1,1805 | -44737,5682 | 0,0619 | 5,4309 | 4,9807 |
| 11 | 1 | 12,1669 | 154,1219 | 1,2241 | -34332,8351 | 0,1776 | 4,1196 | 3,6867 |
| 12 | 1 | 8,5560 | 154,6742 | 1,2244 | -47868,9026 | 0,1262 | 4,3571 | 4,1756 |
| 13 | 1 | 2,9022 | 82,1429 | 1,1158 | 67,0415 | 0,0468 | 5,0170 | 4,2666 |
| 14 | 1 | 6,3528 | 143,2236 | 1,2097 | -49610,5758 | 0,0933 | 4,8275 | 4,2347 |
| 15 | 1 | 4,0948 | 121,6986 | 1,1737 | -29911,7940 | 0,0638 | 4,5387 | 4,1847 |
| 16 | 1 | 5,9138 | 158,3099 | 1,2223 | -57076,6062 | 0,0910 | 4,8803 | 4,1595 |
| 17 | 0 | 3,1888 | 91,6031 | 1,1260 | -23464,9138 | 0,0495 | 4,0439 | 3,5215 |
| 18 | 0 | 13,1160* | 163,4535* | 1,2843* | -54488,5377 | 0,2020* | 4,4667 | 3,9290 |
| 19 | 0 | 4,2264 | 113,4627 | 1,1641 | -28326,5129 | 0,0676 | 4,4784 | 3,6343 |
| 20 | 0 | 5,0810 | 155,9114 | 1,2290 | -51106,9256 | 0,0814 | 4,4196 | 3,6014 |

Pontos: 1=fatoriais, 0=centrais. ' Abreviatura de Adimensional. * removidos do estudo.

Tabela 4-8 - Parâmetros RSW e respostas do fatorial completo.

| <i>Cp</i> | | <i>ZF</i> | <i>HvMB</i> | <i>HvZTA</i> | <i>HvZF</i> | \emptyset | <i>Fmax</i> | <i>DFmax</i> |
|-----------|---|--------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|-------------|--------------|
| | | <i>número ASTM</i> | <i>HV</i> | <i>HV</i> | <i>HV</i> | <i>mm</i> | <i>N</i> | <i>mm</i> |
| 1 | 1 | 1,7594 | 200.25 | 215.10 | 238.70 | NA | 5874.354 | 1.02187 |
| 2 | 1 | 2,0767 | 203.30 | 215.90 | 230.40 | 4.65 | 6511.055 | 1.22685 |
| 3 | 1 | 2,3806 | 194.65 | 209.85 | 220.50 | 4.85 | 7219.252 | 0.95391 |
| 4 | 1 | 2,3488 | 200.25 | 224.40 | 240.80 | 4.75 | 8105.586 | 1.09038 |
| 5 | 1 | 2,5366 | 191.50 | 210.45 | 230.40 | NA | 5439.309 | 0.79055 |
| 6 | 1 | 2,2333 | 199.02 | 211.02 | 210.36 | 4.71 | 6904.728 | 1.21000 |
| 7 | 1 | 2,5815 | 193.85 | 216.55 | 238.90 | 4.35 | 6273.743 | 0.89753 |
| 8 | 1 | 2,3144 | 201.30 | 220.85 | 224.40 | 4.74 | 8440.317 | 1.42366 |
| 9 | 1 | 2,6345 | 190.85 | 203.85 | 226.40 | 4.29 | 6230.148 | 1.07034 |
| 10 | 1 | 2,8946 | 200.70 | 228.80 | 238.70 | 4.52 | 6715.256 | 1.25462 |
| 11 | 1 | 2,1870 | 185.35 | 196.40 | 202.70 | 4.20 | 8277.307 | 1.37198 |
| 12 | 1 | 2,6441 | 189.25 | 198.60 | 224.40 | 5.04 | 7100.409 | 0.81732 |
| 13 | 1 | 2,7774 | 196.38 | 215.64 | 224.41 | 4.27 | 6397.923 | 1.19309 |
| 14 | 1 | 2,5201 | 197.80 | 202.70 | 214.90 | 4.69 | 6700.452 | 1.27879 |
| 15 | 1 | 2,5864 | 200.75 | 211.60 | 222.40 | 4.84 | 6843.699 | 0.77261 |
| 16 | 1 | 2,7886 | 189.45 | 208.70 | 226.40 | 4.50 | 7813.315 | 1.04387 |
| 17 | 0 | 2,4055 | 194.90 | 207.00 | 218.70 | 3.65* | 7667.199 | 1.24729 |
| 18 | 0 | 2,5874 | 179.70* | 203.55 | 216.80 | 4.95 | 7560.167 | 1.20791 |
| 19 | 0 | 2,0364* | 207.40 | 213.85 | 230.40* | 4.82 | 7317.708 | 1.18766 |
| 20 | 0 | 2,6953 | 197.10 | 222.20* | 224.40 | 4.87 | 7483.519 | 1.25680 |

Pontos: 1=fatoriais, 0=centrais. NA (não houve formação da pepita de soldagem). * removidos do estudo.

A partir dos modelos apresentados na **Tabela 4-9**, **Tabela 4-10** e **Tabela 4-11** observa-se que a maioria das respostas apresenta curvatura ao apresentar o center point $\leq 0,05$.

Tabela 4-9 – Curvatura em cada resposta no fatorial completo.

| <i>Termos</i> | <i>Q</i> | <i>L</i> | <i>Dc</i> | <i>TR</i> | <i>Hc</i> | <i>Mr</i> | <i>Ms</i> |
|---------------------------------|---------------|----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| <i>Constant</i> (coef) | 543,27 | 0,3155 | 305,93 | -28,5 | 69,430 | 8,251 | 151,91 |
| <i>Tempo(A)</i> (coef) | 81,53 | 0,1081 | 9,69 | -66,5 | 0,037 | -1,619 | -6,38 |
| <i>Corrente(B)</i> (coef) | 70,39 | 0,1649 | 20,23 | 68,01 | 1,412 | -0,485 | 10,67 |
| <i>Pressão(C)</i> (coef) | 09,47 | 0,0202 | 7,22 | 10,8 | 0,064 | -1,525 | -1,45 |
| <i>Rampa(D)</i> (coef) | 91,03 | -0,0646 | -6,29 | 2,9 | 1,941 | 0,222 | -10,63 |
| <i>S</i> | 32,1370 | 0,0281 | 18,9342 | 47,6051 | 0,4346 | 1,2792 | 22,1408 |
| <i>R² (%)</i> | 98,28 | 99,56 | 90,67 | 95,76 | 98,82 | 98,59 | 88,40 |
| <i>R²(adj) %</i> | 94,84 | 98,41 | 76,02 | 90,99 | 97,13 | 93,64 | 70,17 |
| <i>CenterPoint</i> (P-value) | 0,062 | 0,040 | 0,053 | 0,886 | 0,047 | 0,007 | 0,058 |

Valores em negrito possuem P-value < 0,05 (significativo)

Tabela 4-10 – Curvatura em cada resposta no fatorial completo.

| <i>Termos</i> | <i>PER</i> | <i>Ah</i> | <i>Inc</i> | <i>MB</i> | <i>ZTA</i> | <i>ZF</i> |
|--|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| <i>Constant</i> (coef) | 1,2306 | -56011 | 0,1245 | 4,7528 | 4,2723 | 2,4540 |
| <i>Tempo(A)</i> (coef) | -0,0221 | 5626 | -0,0222 | -0,0367 | 0,0496 | 0,0236 |
| <i>Corrente(B)</i> (coef) | 0,0104 | -15966 | -0,0064 | -0,1473 | -0,1020 | 0,0249 |
| <i>Pressão(C)</i> (coef) | -0,0064 | 9405 | -0,0212 | -0,0797 | 0,0378 | 0,0833 |
| <i>Rampa(D)</i> (coef) | -0,0219 | 13827 | -0,0001 | -0,0241 | -0,0623 | 0,0175 |
| <i>S</i> | 0,0360 | 12193,4 | 0,0152 | 0,1614 | 0,1572 | 0,0941 |
| <i>R² (%)</i> | 92,95 | 97,14 | 99,24 | 96,22 | 96,49 | 96,79 |
| <i>R²(adj) %</i> | 78,86 | 92,23 | 95,47 | 85,63 | 83,31 | 88,43 |
| <i>CenterPoint</i> (<i>P-value</i>) | 0,044 | 0,045 | 0,009 | 0,007 | 0,002 | 0,126 |

Valores em negrito possuem $P\text{-value} < 0,05$ (significativo).

Tabela 4-11 - Curvatura em cada resposta no fatorial completo.

| <i>Termos</i> | <i>HvMB</i> | <i>HvZTA</i> | <i>HvZF</i> | \emptyset | <i>Fmax</i> | <i>DFmax</i> |
|--|---------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|
| <i>Constant</i> (coef) | 195,92 | 211,90 | 225,923 | 4,574 | 6927,9 | 1,0885 |
| <i>Tempo(A)</i> (coef) | 1,72 | 1,97 | 0,372 | 0,125 | 358,5 | 0,0796 |
| <i>Corrente(B)</i> (coef) | -1,56 | -1,03 | -0,861 | 0,084 | 581,3 | -0,0421 |
| <i>Pressão(C)</i> (coef) | 0,34 | 0,29 | -1,902 | -0,125 | -76,2 | -0,0123 |
| <i>Rampa(D)</i> (coef) | -2,10 | -3,61 | -3,384 | -0,030 | 81,9 | 0,0117 |
| <i>S</i> | 4,3738 | 4,3322 | 3,2498 | 0,0805 | 114,403 | 0,0282 |
| <i>R² (%)</i> | 81,82 | 91,05 | 97,69 | 96,83 | 99,47 | 99,54 |
| <i>R²(adj) %</i> | 38,16 | 73,16 | 89,61 | 89,85 | 97,98 | 97,79 |
| <i>CenterPoint</i> (<i>P-value</i>) | 0,217 | 0,216 | 0,044 | 0,002 | 0,000 | 0,001 |

Valores em negrito possuem $P\text{-value} < 0,05$ (significativo).

Segundo Montgomery (2009) para análise do arranjo experimental por meio de um fatorial completo visualizaram-se o $P\text{-value}$ do center-point com o intuito de observar se o modelo apresenta curvatura e se as variáveis de controle são significativas ($P\text{-values} < 0,05$). As que mostraram significância para o tempo foram: para TR, L, Mr, PER, Q, Inc, Fmax, DFmax. A Corrente mostrou significância para: Dc, TR, L, Hc, Q, Ah, MB, Fmax, DFmax; A Pressão para: L, Mr, Ah, Inc, ZF, HvZF, Fmax. Por último a Rampa apresentou significância para: L, Hc, Q, Ah, ZF, HvZTA, HvZF, Fmax. O índice de curvatura obtido foi abaixo de 0,05 para as respostas L, Hc, Mr, PER, Ah, Inc, MB, ZTA, HvZF, \emptyset , Fmax, DFmax. Por outro lado, Dc, TR, Ms, Q, ZF, HvMB, HvZTA não apresentaram curvatura. Considerando a existência de

curvatura para a maioria das respostas, justifica-se a necessidade de modelagem do efeito não linear de uma forma mais eficaz através de um modelo quadrático completo a todas as respostas. Desta forma, os pontos axiais foram inseridos no modelo, considerando um arranjo CCD completo, tendo em composição para sete pontos centrais, oito pontos axiais, dezesseis pontos fatoriais e 1 replicação, totalizando 31 combinações (OLIVEIRA, 2019^a) mostrados na **Tabela 4-12, Tabela 4-13 e Tabela 4-14.**

Tabela 4-12 – Parâmetros RSW e respostas da superfície de resposta.

| <i>C_p</i> | <i>t^l</i> | <i>%I</i> | <i>P</i> | <i>R^l</i> | <i>Q</i> | <i>L</i> | <i>D_c</i> | <i>TR</i> | <i>H_c</i> | <i>Mr</i> | |
|----------------------|----------------------|-----------|------------|----------------------|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| | <i>C_i</i> | <i>A</i> | <i>Bar</i> | <i>C_i</i> | <i>A/mm²</i> | <i>J</i> | <i>Mpa</i> | <i>mm</i> | <i>Gaus</i> | <i>emu/g</i> | |
| 1 | 1 | 8 | 75 | 4,5 | 3 | 231,8179 | 272,275 | 62,00 | 0,1034 | 65,0389 | 5,7310 |
| 2 | 1 | 12 | 75 | 4,5 | 3 | 293,6566 | 457,549 | -25,00 | 0,1811 | 69,5494 | 3,7941 |
| 3 | 1 | 8 | 85 | 4,5 | 3 | 370,3288 | 474,476 | 19,00 | 0,3011 | 69,7178 | 11,2900 |
| 4 | 1 | 12 | 85 | 4,5 | 3 | 357,3312 | 626,463 | -206,00 | 0,8857 | 69,1732 | 8,8736 |
| 5 | 1 | 8 | 75 | 5,5 | 3 | 312,1360 | 351,082 | -172,00 | 0,1119 | 64,1588 | 14,4610 |
| 6 | 1 | 12 | 75 | 5,5 | 3 | 343,8264 | 522,963 | -233,00 | 0,2694 | 64,1112* | 8,8551 |
| 7 | 1 | 8 | 85 | 5,5 | 3 | 270,5959 | 354,538 | 184,00 | 0,4352 | 71,1211 | 4,5668 |
| 8 | 1 | 12 | 85 | 5,5 | 3 | 318,0853 | 558,542 | 120,00 | 0,7536 | 71,0955 | 6,6644 |
| 9 | 1 | 8 | 75 | 4,5 | 9 | 249,3643 | 448,529 | -340,00* | 0,1227 | 71,1540 | 23,7460* |
| 10 | 1 | 12 | 75 | 4,5 | 9 | 266,3796 | 587,296 | -43,00 | 0,1206 | 71,3737 | 4,0519 |
| 11 | 1 | 8 | 85 | 4,5 | 9 | 299,0673 | 605,594 | 116,00 | 0,2151 | 71,2932 | 12,1669 |
| 12 | 1 | 12 | 85 | 4,5 | 9 | 321,7111 | 798,206 | -265,00 | 0,4326 | 71,6756 | 8,5560 |
| 13 | 1 | 8 | 75 | 5,5 | 9 | 310,8476 | 540,552 | -77,00 | 0,1544 | 71,2566 | 2,9022 |
| 14 | 1 | 12 | 75 | 5,5 | 9 | 277,5918 | 602,792 | -313,00 | 0,1412 | 71,5531 | 6,3528 |
| 15 | 1 | 8 | 85 | 5,5 | 9 | 325,8024 | 646,842 | 144,00 | 0,2152 | 71,3974 | 4,0948 |
| 16 | 1 | 12 | 85 | 5,5 | 9 | 346,3675 | 844,558 | 205,00 | 0,6058 | 71,2584 | 5,9138 |
| 17 | -1 | 6 | 80 | 5,0 | 6 | 258,6952 | 349,311 | -200,00 | 0,1069 | 71,5932 | 2,7579 |
| 18 | -1 | 14 | 80 | 5,0 | 6 | 287,8113 | 639,952 | -132,00 | 0,3490 | 69,6921* | 3,4951 |
| 19 | -1 | 10 | 70 | 5,0 | 6 | 305,2326 | 466,129 | -94,00 | 0,1323 | 69,6921 | 9,1586 |
| 20 | -1 | 10 | 90 | 5,0 | 6 | 382,2803 | 752,396 | 202,00 | 0,6649 | 69,8000 | 4,5064* |
| 21 | -1 | 10 | 80 | 4,0 | 6 | 324,8539 | 577,265 | 63,00 | 0,1168 | 69,9866 | 4,5696 |
| 22 | -1 | 10 | 80 | 6,0 | 6 | 267,9997 | 475,712 | -146,00 | 0,4878 | 70,1879 | 3,8536 |
| 23 | -1 | 10 | 80 | 5,0 | 0 | 320,8724 | 352,772 | -115,00 | 0,1306* | 70,4111* | 3,7187 |
| 24 | -1 | 10 | 80 | 5,0 | 12 | 335,0930 | 807,134 | -63,00 | 0,4156* | 70,6747 | 5,0053 |
| 25 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 343,2732 | 599,990* | -128,00 | 0,1673 | 70,5613 | 3,8154 |
| 26 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 341,8249* | 597,692* | -236,00* | 0,4018* | 70,3600 | 3,1888 |
| 27 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 300,9021 | 532,739 | 6,00 | 0,3066 | 70,6308 | 13,1160* |
| 28 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 244,7328 | 443,587 | 15,00 | 0,2730 | 69,2968 | 4,2264 |
| 29 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 289,2729 | 514,281 | -120,00 | 0,2206 | 68,8742 | 5,0810 |
| 30 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 291,0224 | 517,058 | 270,00* | 0,3474 | 69,5860 | 5,8375 |
| 31 | 0 | 10 | 80 | 5,0 | 6 | 243,3419 | 441,380 | 92,00 | 0,2627 | 69,9940 | 5,4584 |

Pontos: 1=fatoriais, -1=axiais, 0=centrais.¹Abreviação de ciclos (Ci). * removidos do estudo.

Tabela 4-13 – Parâmetros RSW e respostas da superfície de resposta.

| <i>Cp</i> | | <i>Ms</i> | <i>PER</i> | <i>Ah</i> | <i>Inc</i> | <i>MB</i> | <i>ZTA</i> | <i>ZF</i> |
|-----------|----|------------------|----------------|----------------------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | <i>emu/g</i> | <i>Adm. ' </i> | <i>emu/g*Gaus</i> | <i>Adm. ' </i> | <i>número ASTM</i> | <i>número ASTM</i> | <i>número ASTM</i> |
| 1 | 1 | 126,9555 | 1,2005 | -35078,7635 | 0,0907 | 5,0149 | 4,5477 | 1,7594* |
| 2 | 1 | 86,9565 | 1,1200 | 16356,4697 | 0,0613 | 4,2629 | 4,1217 | 2,0767 |
| 3 | 1 | 235,9133* | 1,4107 | -199312,7983 | 0,1704 | 5,0180 | 4,1458 | 2,3806 |
| 4 | 1 | 152,1631 | 1,2157 | -104348,4436 | 0,1435 | 4,5228 | 4,2269 | 2,3488 |
| 5 | 1 | 216,6667 | 1,3696* | -84036,8613 | 0,2198 | 5,6257 | 4,8124 | 2,5366 |
| 6 | 1 | 157,9276 | 1,2410 | -49317,7949 | 0,1388 | 4,3627 | 4,0395 | 2,2333 |
| 7 | 1 | 141,1711 | 1,1978 | -36490,1439 | 0,0702 | 4,3230* | 4,1462 | 2,5815 |
| 8 | 1 | 182,5980 | 1,2542 | -66476,7173 | 0,1026 | 5,0846 | 4,6368 | 2,3144 |
| 9 | 1 | 187,6676 | 1,3151 | -74003,5124 | 0,3351 | 4,6588 | 3,9911 | 2,6345 |
| 10 | 1 | 128,4234 | 1,1805 | -44737,5682 | 0,0619 | 5,4309* | 4,9807* | 2,8946 |
| 11 | 1 | 154,1219 | 1,2241 | -34332,8351 | 0,1776 | 4,1196 | 3,6867 | 2,1870 |
| 12 | 1 | 154,6742 | 1,2244 | -47868,9026 | 0,1262 | 4,3571 | 4,1756 | 2,6441 |
| 13 | 1 | 82,1429 | 1,1158 | 67,0415 | 0,0468 | 5,0170 | 4,2666 | 2,7774 |
| 14 | 1 | 143,2236 | 1,2097 | -49610,5758 | 0,0933 | 4,8275 | 4,2347 | 2,5201 |
| 15 | 1 | 121,6986 | 1,1737 | -29911,7940 | 0,0638 | 4,5387 | 4,1847 | 2,5864 |
| 16 | 1 | 158,3099 | 1,2223 | -57076,6062 | 0,0910 | 4,8803 | 4,1595 | 2,7886 |
| 17 | -1 | 129,4741 | 1,1867 | -39278,3195 | 0,0415 | 5,0846 | 4,7579 | 2,6482 |
| 18 | -1 | 103,6866 | 1,1433 | 12278,0985 | 0,0573 | 4,5081 | 4,2984 | 2,8021 |
| 19 | -1 | 172,3195 | 1,2790 | -57611,6106 | 0,1387 | 4,3987 | 4,0608 | 2,6327 |
| 20 | -1 | 139,0407 | 1,1893* | -45303,3755 | 0,0698* | 4,8005 | 4,0905 | 2,4494 |
| 21 | -1 | 128,0088 | 1,1909 | -38734,9176 | 0,0718 | 4,9787 | 4,1814 | 2,5223 |
| 22 | -1 | 108,6310 | 1,1634 | -25440,7110 | 0,0629 | 5,3438 | 4,5814 | 2,5859 |
| 23 | -1 | 112,6890 | 1,1595 | -32180,8151 | 0,0574 | 4,3230 | 3,8577 | 2,5303* |
| 24 | -1 | 110,4685 | 1,1537 | -28503,6111 | 0,0767 | 4,3987 | 3,3546 | 2,6189 |
| 25 | 0 | 109,8901 | 1,1571 | -28938,7282 | 0,0599 | 4,9595 | 4,0798* | 2,4610 |
| 26 | 0 | 91,6031* | 1,1260 | -23464,9138 | 0,0495 | 4,0439 | 3,5215 | 2,4055 |
| 27 | 0 | 163,4535 | 1,2843 | -54488,5377 | 0,2020* | 4,4667 | 3,9290* | 2,5874 |
| 28 | 0 | 113,4627 | 1,1641 | -28326,5129 | 0,0676 | 4,4784 | 3,6343 | 2,0364* |
| 29 | 0 | 155,9114 | 1,2290 | -51106,9256 | 0,0814 | 4,4196 | 3,6014 | 2,6953 |
| 30 | 0 | 269,9959* | 1,4102* | -237188,7688* | 0,0856 | 4,3230 | 3,6328 | 2,3219 |
| 31 | 0 | 165,1848 | 1,2442 | -122686,8886* | 0,0832 | 3,6945* | 3,5052 | 2,2599 |

Pontos: 1=fatoriais, -1=axiais, 0=centrais. 'Abreviatura de Adimensional. * removidos do estudo.

Da mesma forma, alguns dados representados com (*) em frente ao valor da tabela foram removidos do estudo estatístico (*indicados pelo MINITAB®*) por apresentarem grandes resíduos e/ou outliers e a presença dos mesmos poderia influenciar de maneira negativa a modelagem matemática das respostas.

Tabela 4-14 - Parâmetros RSW e respostas da superfície de resposta.

| <i>C_p</i> | | <i>HMB</i> | <i>HZTA</i> | <i>HZF</i> | \emptyset | <i>F_{max}</i> | <i>DF_{max}</i> | <i>Modo Falha**</i> |
|----------------------|----|----------------|----------------|----------------|--------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| | | <i>HV</i> | <i>HV</i> | <i>HV</i> | <i>mm</i> | <i>N</i> | <i>mm</i> | <i>Arrancamento</i> |
| 1 | 1 | 200.25 | 215.10 | 238.70 | NA | 5874.354 | 1.02187 | Interfacial |
| 2 | 1 | 203.30 | 215.90 | 230.40 | 4.65 | 6511.055 | 1.22685 | Parcial |
| 3 | 1 | 194.65 | 209.85 | 220.50 | 4.85 | 7219.252 | 0.95390 | Parcial |
| 4 | 1 | 200.25 | 224.40 | 240.80 | 4.75 | 8105.586 | 1.09038 | Parcial |
| 5 | 1 | 191.50 | 210.45 | 230.40 | NA | 5439.309 | 0.79055 | Interfacial |
| 6 | 1 | 199.02 | 211.03 | 210.36 | 4.71 | 6904.728 | 1.21000 | Parcial |
| 7 | 1 | 193.85 | 216.55 | 238.90 | 4.35 | 6273.743 | 0.89753 | Parcial |
| 8 | 1 | 201.30 | 220.85 | 224.40 | 4.74 | 8440.317 | 1.42365* | Rasgamento |
| 9 | 1 | 190.85 | 203.85 | 226.40 | 4.29 | 6230.148* | 1.07034 | Parcial |
| 10 | 1 | 200.70 | 228.80* | 238.70 | 4.52 | 6715.256* | 1.25462* | Parcial |
| 11 | 1 | 185.35 | 196.40 | 202.70* | 4.20 | 8277.307 | 1.37198 | Rasgamento |
| 12 | 1 | 189.25 | 198.60 | 224.40 | 5.04 | 7100.409 | 0.81731 | Parcial |
| 13 | 1 | 196.38* | 215.64 | 224.41* | 4.27 | 6397.923 | 1.19309 | Parcial |
| 14 | 1 | 197.80 | 202.70 | 214.90 | 4.69 | 6700.452 | 1.27879 | Parcial |
| 15 | 1 | 200.75 | 211.60 | 222.40 | 4.84 | 6843.699 | 0.77261* | Parcial |
| 16 | 1 | 189.45 | 208.70 | 226.40 | 4.50 | 7813.315 | 1.04387 | Rasgamento |
| 17 | -1 | 201.85 | 215.90 | 228.30 | 4.25 | 6716.452 | 1.17842 | Parcial |
| 18 | -1 | 197.80 | 213.15 | 229.00 | 4.36 | 7943.091 | 1.08057 | Rasgamento |
| 19 | -1 | 199.50 | 206.95 | 213.10 | NA | 5176.964* | 0.64387 | Interfacial |
| 20 | -1 | 185.35 | 214.95 | 220.50 | 4.81 | 6067.796 | 0.57275 | Parcial |
| 21 | -1 | 184.25* | 194.20 | 211.30 | 4.98 | 7628.736 | 1.23523 | Parcial |
| 22 | -1 | 209.85 | 217.00 | 220.50 | 4.93 | 7537.724 | 1.22137 | Parcial |
| 23 | -1 | 186.95 | 213.85 | 207.80* | 5.03 | 7468.696 | 1.15034 | Parcial |
| 24 | -1 | 187.25 | 199.55 | 220.50 | 5.19 | 8081.885 | 1.31632 | Parcial |
| 25 | 0 | 202.00 | 221.85 | 234.50 | 5.06 | 7492.094 | 1.18983 | Parcial |
| 26 | 0 | 194.90 | 207.00 | 218.70 | 3.65* | 7667.199 | 1.24729 | Rasgamento |
| 27 | 0 | 179.70* | 203.55 | 216.80 | 4.95 | 7560.167 | 1.20791 | Rasgamento |
| 28 | 0 | 207.40 | 213.85 | 230.40 | 4.82 | 7317.708 | 1.18765 | Rasgamento |
| 29 | 0 | 197.10 | 222.20 | 224.40 | 4.87 | 7483.519 | 1.2568 | Rasgamento |
| 30 | 0 | 197.00 | 217.85 | 234.50 | 5.10 | 7483.856 | 1.20074 | Rasgamento |
| 31 | 0 | 191.25 | 210.95 | 235.00 | 5.06 | 7559.269 | 1.22731 | Rasgamento |

** informativo, não entra nos cálculos. NA (não houve formação da pepita de soldagem). * removidos do estudo.

Após a verificação das equações dos modelos, estes foram reduzidos pela remoção dos termos não significativos. O critério adotado para a remoção dos termos não significativos foi o aumento do valor de $R^2(\text{adj.}) > 70\%$, a redução do desvio padrão (S) dos modelos e a falta de ajuste $\geq 0,05$.

4.3. Análise dos resíduos

Os resíduos analisados pelo *software* estatístico *MINITAB*® são definidos pela diferença entre o valor previsto do modelo e o valor experimental. Segundo Montgomery (2009) tais valores devem ser normais, aleatórios e não correlacionados. Na **Tabela 4-15** pode-se observar que os resíduos são normais para todas as respostas, visto que apresentaram coeficientes de *Anderson-Darling* (AD) < 1 e, *P-value* > 0,05.

Tabela 4-15 – Análise dos Resíduos

| RESPOSTAS | TESTE DE NORMALIDADE | |
|-----------|----------------------------------|-----------------------|
| | <i>Anderson-Darling</i> (AD) < 1 | <i>P-value</i> ≥ 0,05 |
| Q | 0,396 | 0,348 |
| L | 0,359 | 0,427 |
| DC | 0,266 | 0,666 |
| TR | 0,179 | 0,908 |
| Hc | 0,388 | 0,364 |
| Mr | 0,285 | 0,601 |
| Ms | 0,412 | 0,317 |
| PER | 0,386 | 0,367 |
| Ah | 0,319 | 0,517 |
| Inc | 0,501 | 0,191 |
| MB | 0,249 | 0,724 |
| ZTA | 0,286 | 0,600 |
| ZF | 0,470 | 0,228 |
| HvMB | 0,314 | 0,526 |
| HvZTA | 0,249 | 0,727 |
| HvZF | 0,397 | 0,346 |
| Ø | 0,568 | 0,128 |
| Fmax | 0,370 | 0,401 |
| DFmax | 0,557 | 0,137 |

A análise de aleatoriedade dos resultados foi feito pelo teste Gráfico de Ensaio e/ou *Run Chart* (*Estat/Ferramentas de Qualidade/Gráfico de Ensaio/Coluna Única: “resíduo da resposta a ser analisada”/Tamanho do Subgrupo:”1”*). Sendo o tamanho do subgrupo o número de pontos de soldagem por corpos de prova (Costa, 2004), que neste caso é igual a um. Indicando assim que não há correlação entre os resíduos com exceção para a resposta IS que apresentou valores de Clustering < 0,05. A aleatoriedade é válida para todos os valores maiores que 0,05 para: Agrupado (*Clustering*), Mistura (*Mixtures*), Tendências (*Trends*) e Oscilação (*Oscillation*), descritos na **Tabela 4-16**. Considerando que o experimento em questão não possui séries temporais os resíduos automaticamente podem ser definidos como não correlacionados.

Tabela 4-16 – Indicadores “Run Chart”

| RESPOSTAS | <i>P-value para:</i> | | | |
|-----------|----------------------|----------------|------------------|------------------|
| | <i>Agrupado</i> | <i>Mistura</i> | <i>Tendência</i> | <i>Oscilação</i> |
| Q | 0,717 | 0,283 | 0,325 | 0,675 |
| L | 0,876 | 0,124 | 0,268 | 0,732 |
| Dc | 0,868 | 0,132 | 0,228 | 0,772 |
| TR | 0,876 | 0,124 | 0,780 | 0,220 |
| Hc | 0,221 | 0,779 | 0,007 | 0,993 |
| Mr | 0,027 | 0,973 | 0,022 | 0,978 |
| Ms | 0,650 | 0,350 | 0,780 | 0,220 |
| PER | 0,973 | 0,027 | 0,780 | 0,220 |
| Ah | 0,830 | 0,170 | 0,500 | 0,500 |
| Inc | 0,287 | 0,713 | 0,086 | 0,914 |
| MB | 0,221 | 0,779 | 0,022 | 0,978 |
| ZTA | 0,027 | 0,973 | 0,268 | 0,732 |
| ZF | 0,779 | 0,221 | 0,140 | 0,860 |
| HvMB | 0,876 | 0,124 | 0,621 | 0,379 |
| HvZTA | 0,229 | 0,771 | 0,228 | 0,772 |
| HvZF | 0,938 | 0,062 | 0,268 | 0,732 |
| Ø | 0,917 | 0,083 | 0,215 | 0,785 |
| Fmax | 0,350 | 0,650 | 0,621 | 0,379 |
| DFmax | 0,350 | 0,650 | 0,439 | 0,561 |

4.4. Adequação dos modelos.

Mesmo após redução dos modelos ainda observa-se valores de $R^2(\text{adj.}) < 70\%$ para alguns modelos. Segundo Montgomery (2009) para $R^2(\text{adj.}) < 70\%$ o ajuste é considerado insatisfatório. Neste caso, aplica-se o teste de hipótese conforme **Equação 2.25**. Ante a aplicação do método WLS necessita-se determinar se os resíduos são normais e heterocedásticos conforme descrito anteriormente. Os resíduos bem como os valores ajustados foram determinados pelo MINITAB® (*Estat/DOE/Superfície de Resposta/ Análise de experimento de superfície de resposta/Armazenamento*). Em seguida, é feito o teste de normalidade dos resíduos (*Estat/Estatísticas Básicas/Teste de Normalidade/Variável:*). Confirmando a normalidade dos resíduos ($P\text{value} \geq 0,05$) pela **Tabela 4-15**, ao abrir a pasta worksheet (*planilha de dados*) utiliza-se a calculadora presente no software com intuito de atribuir uma nova coluna (nomeada: RQuad) contendo os resíduos elevados ao quadrado. Logo após, efetua-se uma regressão linear

simples também pelo software (*Estat/Regressão/Regressão/Ajuste de Modelo de Regressão/Respostas: “resíduos elevado ao quadrado”/Preditores contínuos: “Valores Ajustados”*). Posteriormente o **valor R²** provindo da regressão linear é multiplicado pelo número de corpos de provas presentes no experimento. A resultante deve rejeitar H₀ (Equação 2.24) sendo maior que 3,84 (*valor obtido pela tabela Qui-Quadrado (IFSC, 2019) em 5% para 1 grau de liberdade, neste caso, representa um ponto de soldagem feito nos corpos de prova*) provando que os resíduos são Heterocedásticos. Os resultados são mostrados na **Tabela 4-17** e **Tabela 4-18**.

Tabela 4-17 – Melhores modelos adotados

| * <i>Q</i> | <i>L</i> | <i>Dc</i> | <i>TR</i> | <i>Hc</i> | <i>Mr</i> | <i>Ms</i> | <i>PER</i> | <i>Ah</i> | <i>Inc</i> | |
|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|-------|
| 1 | 90,26 | 68,04 | 26,57 | 25,13 | 35,10 | 53,08 | 2,24 | 29,07 | 10,35 | 12,77 |
| 2 | 91,73 | 87,55 | 43,06 | 62,35 | 72,37 | 62,91 | 24,63 | 44,83 | 31,78 | 30,81 |
| 3 | 99,77 | 97,57 | 99,24 | 97,37 | 90,77 | 86,35 | 84,51 | 98,84 | 85,44 | 98,97 |
| 4 | RN | RN | RN | RN | RN | RN | RN | RN | RN | RN |
| 5 | Ho | He | Ho | He | Ho | He | Ho | Ho | He | He |

*R² (adj.): 1=Modelo Completo, 2=Modelo Reduzido. 3=R²(adj) com WLS; 4=Resíduos Normais (RN), 5=Heterocedástico (He) / Homocedástico (Ho).

Tabela 4-18 – Melhores modelos adotados

| * <i>MB</i> | <i>ZTA</i> | <i>ZF</i> | <i>HvMB</i> | <i>HvZTA</i> | <i>HvZF</i> | \emptyset | <i>Fmax</i> | <i>DFmax</i> | |
|-------------|------------|-----------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------|
| 1 | 10,35 | 88,34 | 50,53 | 43,08 | 58,41 | 74,21 | 34,55 | 95,06 | 91,03 |
| 2 | 62,59 | 89,19 | 57,73 | 50,43 | 62,05 | 77,39 | 46,48 | 95,23 | 91,86 |
| 3 | 97,04 | 99,12 | 90,54 | 97,22 | 97,46 | 96,22 | 99,18 | 99,87 | 99,83 |
| 4 | RN | RN | RN | RN | RN | RN | RN | RN | RN |
| 5 | Ho | He | Ho | Ho | Ho | Ho | Ho | Ho | Ho |

*R² (adj.): 1=Modelo Completo, 2=Modelo Reduzido. 3=R²(adj) com WLS; 4=Resíduos Normais (RN), 5=Heterocedástico (He) / Homocedástico (Ho).

Confirmado quais resíduos são heterocedásticos, utiliza-se novamente a calculadora presente no software com intuito de atribuir uma nova coluna (nomeada: W) contendo o inverso dos resíduos elevados ao quadrado conforme **Equação 2.25**. Em seguida, realiza-se novamente a análise da superfície de resposta considerando desta vez como peso a coluna W (*Estat/DOE/Superfície de Resposta/ Análise de experimento de superfície de resposta/Opções/Pesos:*) culminando em níveis de R²(adj.)>70%. Conforme observado na **Tabela 4-17** e **Tabela 4-18**, os resíduos para os corpos de provas: Q, Dc, Hc, Ms, PER, MB, ZF, HvMB, HvZTA, HvZF, \emptyset , DFmax e Fmax são homocedásticos (apresentando “Ho” na linha 5 da **Tabela 4-17** e **Tabela 4-18**), ou seja, sua variância é constante. Decidiu-se aplicar a

técnica WLS também a estas respostas, partindo do princípio que são bons modelos matemáticos uma vez que possuem resíduos normais e não possuem falta de ajuste ($LOF \geq 0,05$). Ainda assim, mesmo sendo homocedásticos e apresentando um valor de R^2 (adj) < 70% para o modelo reduzido conforme valores sublinhados na linha 2 da **Tabela 4-17** e **Tabela 4-18**, as respostas de Dc, Ms, PER, MB, ZF, HvMB, HvZTA e \emptyset mostraram ser modelos satisfatórios, pois apresentam em seu fatorial completo os valores de R^2 adj > 70% (**Tabela 4-9**, **Tabela 4-10** e **Tabela 4-11**) com excessão para HvMB. Os resultados da **Tabela 4-19**, **Tabela 4-20** e **Tabela 4-21** apresentam por meio do *software* estatístico MINITAB® os coeficientes estimados para os modelos matemáticos da superfície de resposta.

Tabela 4-19 – Coeficientes codificados dos parâmetros para superfície de resposta.

| <i>Termos</i> | <i>Q</i> | <i>L</i> | <i>Dc</i> | <i>TR</i> | <i>Hc</i> | <i>Mr</i> | <i>Ms</i> |
|------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| <i>Constant</i> (coef) | 517,79 | 0,2729 | 284,58 | -33,9 | 69,9671 | 4,458 | 131,00 |
| <i>Tempo(A)</i> (coef) | 74,09 | 0,0847 | 8,564 | -40,97 | 0,588 | -0,185 | 0,48 |
| <i>Corrente(B)</i> (coef) | 71,54 | 0,1461 | 19,27 | 69,22 | 0,618 | 1,102 | -1,78 |
| <i>Pressão(C)</i> (coef) | -5,39 | 0,0428 | 3,95 | -15,87 | 0,0962 | -0,311 | 2,02 |
| <i>Rampa(D)</i> (coef) | 95,55 | -0,0664 | -1,52 | 2,96 | 1,339 | -0,504 | -0,86 |
| AA | -5,18 | | | -21,0 | 0,6920 | | |
| BB | 22,87 | 0,0348 | 14,81 | 24,23 | | 2,083 | 9,00 |
| CC | | | | | | | |
| DD | | | 9,71 | | -0,5011 | | |
| AB | 20,50 | 0,0784 | | | -0,578 | | 14,72 |
| AC | -4,74 | | | 31,00 | | 0,885 | |
| AD | -1,17 | -0,0331 | | | -0,414 | 0,239 | |
| BC | | | -14,57 | 110,24 | 0,261 | -1,937 | |
| BD | 15,68 | -0,0425 | | | -0,865 | 0,629 | |
| CD | 23,43 | | 11,00 | | | -0,525 | -24,85 |
| S | 0,9803 | 1,0431 | 1,0246 | 1,0769 | 1,1118 | 1,0949 | 1,1131 |
| R^2 (%) | 99,86 | 98,29 | 99,45 | 98,15 | 94,19 | 91,40 | 88,53 |
| R^2 (adj) % | 99,77 | 97,57 | 99,24 | 97,30 | 90,77 | 86,35 | 84,51 |
| LOF | 0,543 | 0,492 | 0,364 | 0,515 | 0,407 | 0,539 | 0,569 |

Valores em negrito possuem P-value < 0,05 (significativo)

Tabela 4-20 – Coeficientes codificados dos parâmetros para a superfície de resposta.

| <i>Termos</i> | <i>PER</i> | <i>Ah</i> | <i>Inc</i> | <i>MB</i> | <i>ZTA</i> | <i>ZF</i> |
|------------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <i>Constant</i> (coef) | 1,1931 | -36013 | 0,0815 | 4,4663 | 3,5950 | 2,5066 |
| <i>Tempo(A)</i> (coef) | -0,0105 | 2803 | -0,0117 | -0,1398 | -0,0458 | 0,0027 |
| <i>Corrente(B)</i> (coef) | 0,0218 | -11029 | 0,0033 | 0,0338 | -0,0173 | -0,0304 |
| <i>Pressão(C)</i> (coef) | -0,0151 | 5286 | -0,0129 | 0,1554 | 0,1730 | 0,0596 |
| <i>Rampa(D)</i> (coef) | -0,0008 | 4105 | -0,0003 | -0,1328 | -0,1747 | 0,1734 |
| <i>AA</i> | -0,0071 | | | 0,0814 | 0,2680 | 0,0547 |
| <i>BB</i> | 0,0323 | -10675 | 0,0253 | | 0,1340 | |
| <i>CC</i> | | | | 0,1895 | 0,2338 | |
| <i>DD</i> | -0,0092 | | | | 0,0277 | -0,0581 |
| <i>AB</i> | | | 0,0077 | 0,0903 | 0,0618 | 0,0411 |
| <i>AC</i> | 0,0416 | -16553 | 0,0258 | | -0,0641 | -0,0661 |
| <i>AD</i> | | -11154 | | 0,1785 | 0,0483 | 0,0998 |
| <i>BC</i> | | 13382 | | | | |
| <i>BD</i> | -0,0228 | 16412 | | | | -0,0988 |
| <i>CD</i> | | | -0,0249 | | -0,0610 | |
| <i>S</i> | 1,0224 | 1,0593 | 0,9978 | 1,0338 | 1,0760 | 1,0588 |
| <i>R² (%)</i> | 99,22 | 90,12 | 99,26 | 97,92 | 99,51 | 94,04 |
| <i>R²(adj) %</i> | 98,84 | 85,44 | 98,97 | 97,04 | 99,12 | 90,54 |
| <i>LOF</i> | 0,639 | 0,608 | 0,467 | 0,489 | 0,491 | 0,450 |

Valores em negrito possuem P-value<0,05 (significativo)

Tabela 4-21 – Coeficientes codificados dos parâmetros para a superfície de resposta.

| <i>Termos</i> | <i>HvMB</i> | <i>HvZTA</i> | <i>HvZF</i> | \emptyset | <i>Fmax</i> | <i>DFmax</i> |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <i>Constant</i> (coef) | 197,861 | 213,553 | 227,990 | 4,9855 | 7491,61 | 1,2296 |
| <i>Tempo(A)</i> (coef) | -0,250 | -1,194 | -0,272 | 0,0528 | 279,5 | -0,0096 |
| <i>Corrente(B)</i> (coef) | -2,139 | 1,685 | -0,383 | 0,1035 | 594,8 | -0,0133 |
| <i>Pressão(C)</i> (coef) | -0,015 | 3,108 | -0,169 | 0,0007 | -68,57 | 0,0092 |
| <i>Rampa(D)</i> (coef) | -0,139 | -3,659 | -2,488 | -0,0197 | 124,4 | 0,0449 |
| <i>AA</i> | | | | -0,1827 | | -0,0175 |
| <i>BB</i> | -1,828 | | -2,432 | -0,1038 | -652,6 | -0,1514 |
| <i>CC</i> | 2,928 | -2,096 | -2,641 | -0,0090 | | |
| <i>DD</i> | -2,801 | -1,739 | | | 79,1 | |
| <i>AB</i> | | 3,872 | 8,493 | | 101,7 | -0,0662 |
| <i>AC</i> | -2,267 | -3,136 | -10,507 | | 337,2 | 0,0346 |
| <i>AD</i> | -0,856 | -2,390 | 7,149 | 0,0627 | -368,7 | -0,1175 |
| <i>BC</i> | 2,026 | 1,778 | 8,160 | -0,0533 | -70,8 | |

Continua

Tabela 4-21 (Continuação)

| | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <i>BD</i> | -2,167 | -3,161 | -7,445 | 0,0797 | -104,1 | 0,0317 |
| <i>CD</i> | 3,125 | 4,627 | 6,670 | 0,0281 | | 0,0694 |
| <i>S</i> | 1,041 | 1,172 | 1,1769 | 1,0274 | 1,0706 | 1,1192 |
| <i>R² (%)</i> | 98,45 | 98,51 | 97,90 | 99,53 | 99,92 | 99,90 |
| <i>R²(adj) %</i> | 97,22 | 97,46 | 96,20 | 99,18 | 99,87 | 99,83 |
| <i>LOF</i> | 0,378 | 0,319 | 0,338 | 0,630 | 0,335 | 0,357 |

Valores em negrito possuem P-value<0,05 (significativo)

A maioria dos modelos finais desenvolvidos se caracterizam como expressões de grande confiabilidade em representação ao modelo real, por apresentarem valores de $R^2(\text{adj})$ bem acima de 90%, com exceção do Mr, Ms e Ah que apresentaram um valor próximo a 80%. Observa-se que, na maioria das respostas os parâmetros independentes (x_i) representados por A, B, C e D, apresentam uma influência significativa ($P\text{-values} \leq 0,05$) nas respostas de interesse (y). Estes foram marcados em “**negrito**”. Por outro lado, o fato de alguns parâmetros independentes não apresentarem significância isoladamente ($P\text{-values} \geq 0,05$), sua significância aparece dentro das interações com outros parâmetros (MONTGOMERY, 2009). Como exemplo na **Tabela 4-19** para a resposta Dc, onde a pressão isoladamente não apresenta significância, mas a interação BC se mostra significativa.

4.4. Modelagem matemática das respostas.

A partir dos dados experimentais apresentados pela **Tabela 4-19**, **Tabela 4-20** e **Tabela 4-21** foi possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo. Assim, a seção 2.6.1 apresentou a **Equação 2.22** como o modelo de superfície de resposta de segunda ordem utilizado para representar a relação aproximada entre uma dada resposta de interesse e os parâmetros de entrada, discrimina-se a **Equação 4.1** a seguir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 + \beta_{44} D^2 + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{14} AD + \beta_{23} BC + \beta_{24} BD + \beta_{34} CD \quad (4.1)$$

Onde: y = Resposta de interesse

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ = coeficientes a serem estimados ($i = 1, 2, 3, 4$ e $i < j$)

A = Tempo

B = Corrente

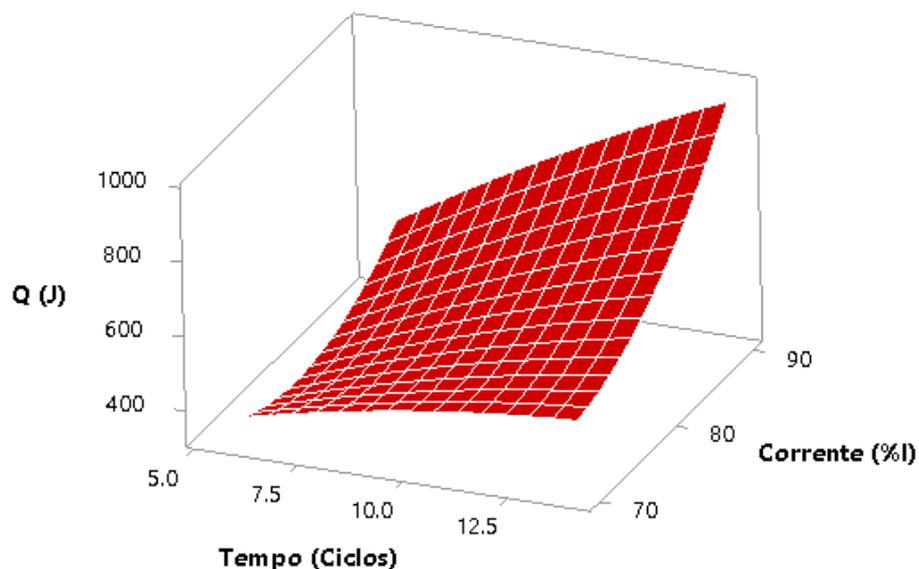
C = Pressão

D = Rampa de descida da corrente

Considerando o processo abordado pelo presente trabalho e de posse dos valores presentes na **Tabela 4-19**, **Tabela 4-20** e **Tabela 4-21** onde são mostrados os efeitos dos coeficientes dos modelos reduzidos, tem-se as **Equações 4.2 a 4.20**. Estas equações apresentam os modelos reduzidos finais obtidos para a densidade de corrente D_c , a tensão residual TR , a deformação L , o campo coercivo H_c , o campo remanente M_r , a magnetização de saturação M_s , a permeabilidade PER , a energia de soldagem Q , a área do laço da histerese A_h , a inclinação do laço da histerese Inc e os tamanhos de grão ASTM representados no metal base MB , zona termicamente afetada ZTA e zona fundida ZF , a microdureza Vickers no metal base $HvMB$, zona termicamente afetada $HvZTA$ e zona fundida $HvZF$, o diâmetro da pepita de soldagem \emptyset , a deformação na força máxima de ruptura DF_{max} e a força máxima de ruptura F_{max} respectivamente pelos coeficientes da **Tabela 4-19**, **Tabela 4-20** e **Tabela 4-21**. As superfícies de resposta ilustram melhor a equação de cada resposta(y).

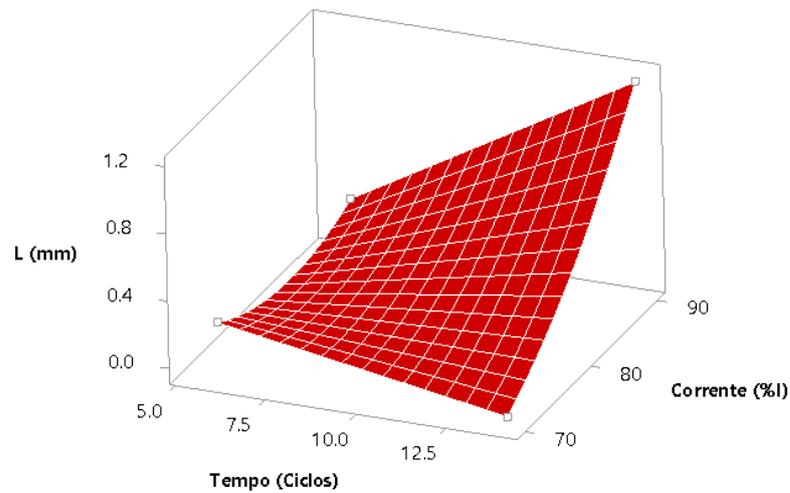
$$\begin{aligned}
 Q = & 517,79 + 74,09 \text{ Tempo} + 71,54 \text{ Corrente} - 5,39 \text{ Pressão} + 95,55 \text{ Rampa} - 5,18 \\
 & \text{Tempo} * \text{Tempo} + 22,87 \text{ Corrente} * \text{Corrente} + 20,50 \text{ Tempo} * \text{Corrente} - 4,74 \\
 & \text{Tempo} * \text{Pressão} - 1,17 \text{ Tempo} * \text{Rampa} + 15,68 \text{ Corrente} * \text{Rampa} + 23,43 \\
 & \text{Pressão} * \text{Rampa}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Figura 4-13 - Superfície de resposta para energia de soldagem (Q). Valores fixos: Rampa=6, Pressão=5.



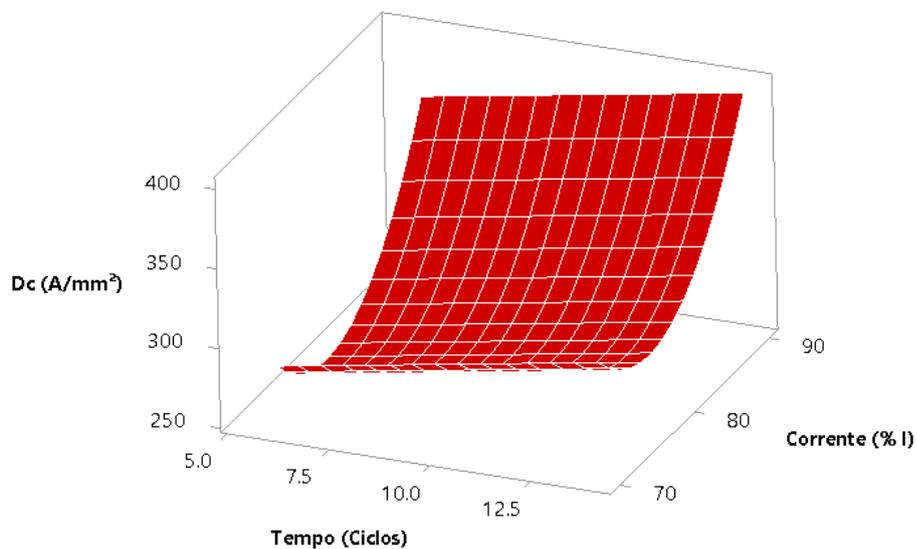
$$\begin{aligned}
 L = & 0,2729 + 0,0847 \text{ Tempo} + 0,1461 \text{ Corrente} + 0,0428 \text{ Pressão} - 0,0664 \text{ Rampa} \\
 & + 0,0348 \text{ Corrente} * \text{Corrente} + 0,0784 \text{ Tempo} * \text{Corrente} \\
 & - 0,0331 \text{ Tempo} * \text{Rampa} - 0,0425 \text{ Corrente} * \text{Rampa}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Figura 4-14 - Superfície de resposta para deformação (L). Valores fixos: pressão=5, Rampa=6.



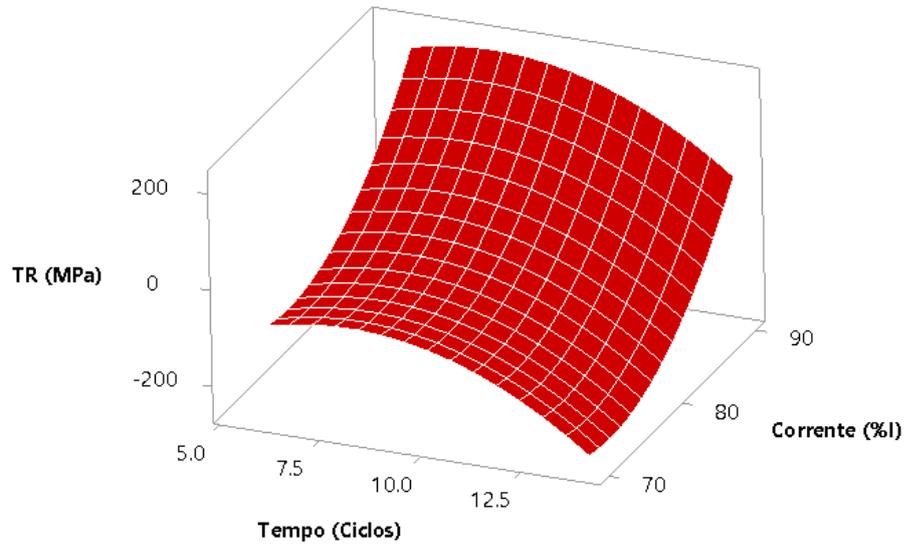
$$\begin{aligned}
 Dc = & 284,58 + 8,564 \text{ Tempo} + 19,27 \text{ Corrente} + 3,95 \text{ Pressão} - 1,52 \text{ Rampa} \\
 & + 14,81 \text{ Corrente*Corrente} + 9,71 \text{ Rampa*Rampa} - 14,57 \text{ Corrente*Pressão} \\
 & + 11,00 \text{ Pressão*Rampa}
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Figura 4-15 –Superfície de resposta para densidade da corrente (Dc). Valores fixos: pressão=5, Rampa=6.



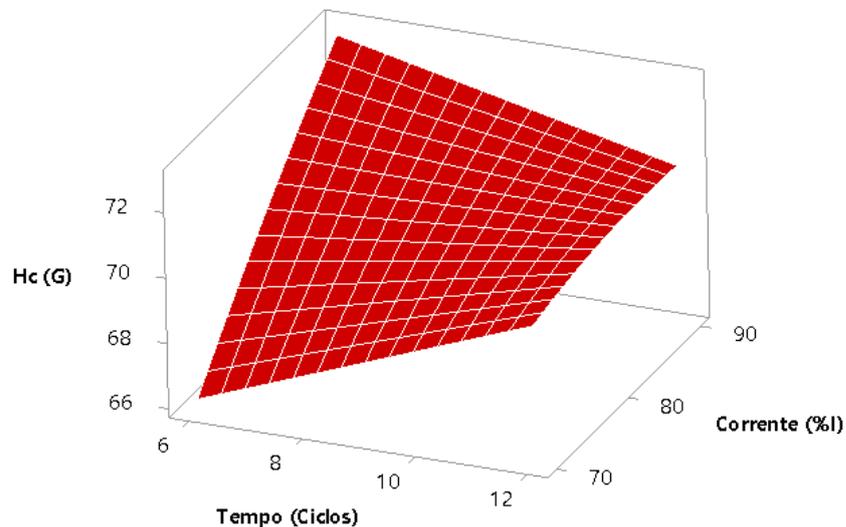
$$\begin{aligned}
 TR = & -33,9 - 40,97 \text{ Tempo} + 69,22 \text{ Corrente} - 15,87 \text{ Pressão} + 2,96 \text{ Rampa} \\
 & - 21,0 \text{ Tempo*Tempo} + 24,23 \text{ Corrente*Corrente} + 31,0 \text{ Tempo*Pressão} \\
 & + 110,24 \text{ Corrente*Pressão}
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Figura 4-16 - Superfície de resposta para tensão residual (TR). Valores fixos: pressão=5, Rampa=6.



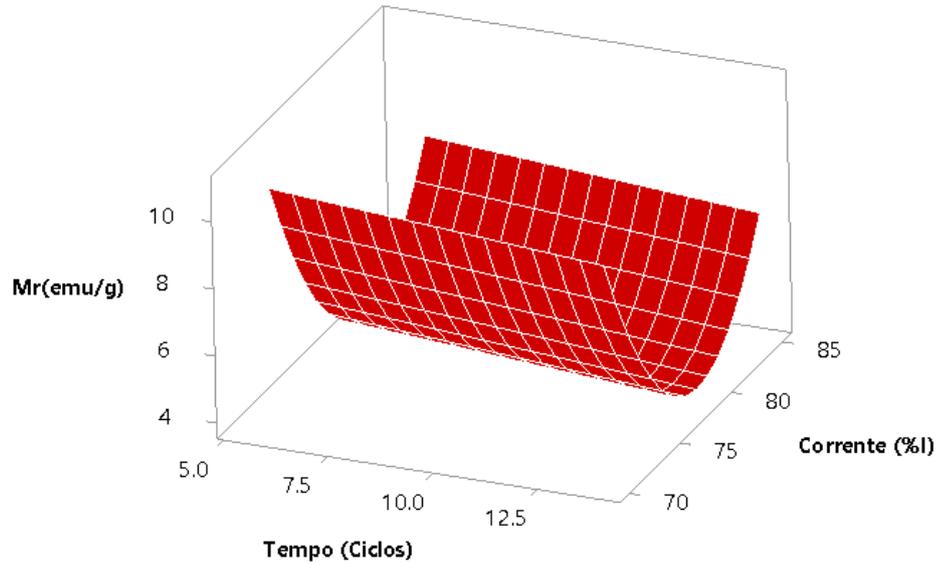
$$\begin{aligned}
 Hc &= 69,9671 + 0,588 \text{ Tempo} + 0,618 \text{ Corrente} + 0,0962 \text{ Pressão} + 1,339 \text{ Rampa} \\
 &+ 0,6920 \text{ Tempo*Tempo} - 0,5011 \text{ Rampa*Rampa} - 0,578 \text{ Tempo*Corrente} \\
 &- 0,414 \text{ Tempo*Rampa} + 0,261 \text{ Corrente*Pressão} \\
 &- 0,865 \text{ Corrente*Rampa}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Figura 4-17- Superfície de resposta para campo coercivo (Hc). Valores fixos: pressão=5, Corrente=80.



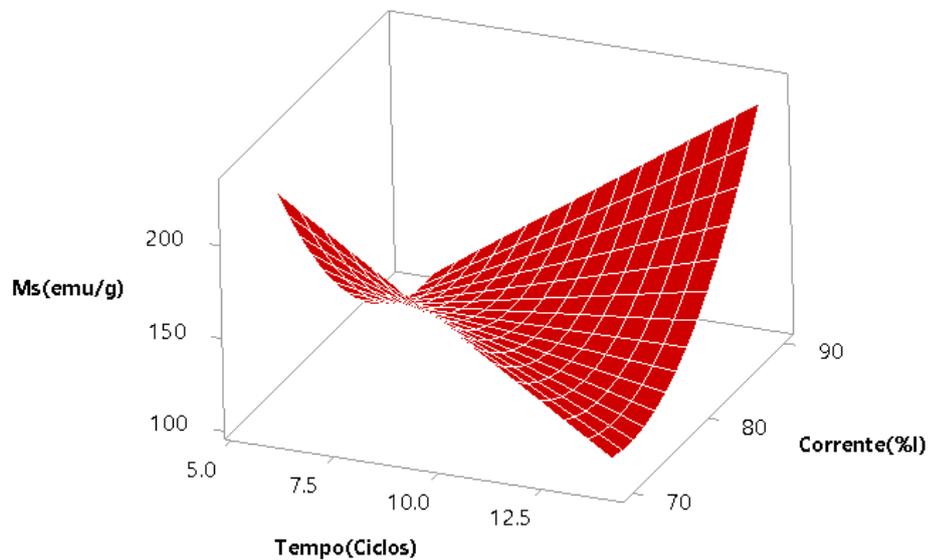
$$\begin{aligned}
 Mr &= +4,458 - 0,185 \text{ Tempo} + 1,102 \text{ Corrente} - 0,311 \text{ Pressão} - 0,504 \text{ Rampa} \\
 &+ 2,083 \text{ Corrente*Corrente} + 0,885 \text{ Tempo*Pressão} + 0,239 \text{ Tempo*Rampa} \\
 &- 1,937 \text{ Corrente*Pressão} + 0,629 \text{ Corrente*Rampa} \\
 &- 0,525 \text{ Pressão*Rampa}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Figura 4-18 - Superfície de resposta para campo remanente (Mr). Valores fixos: tempo=10, Rampa=6.



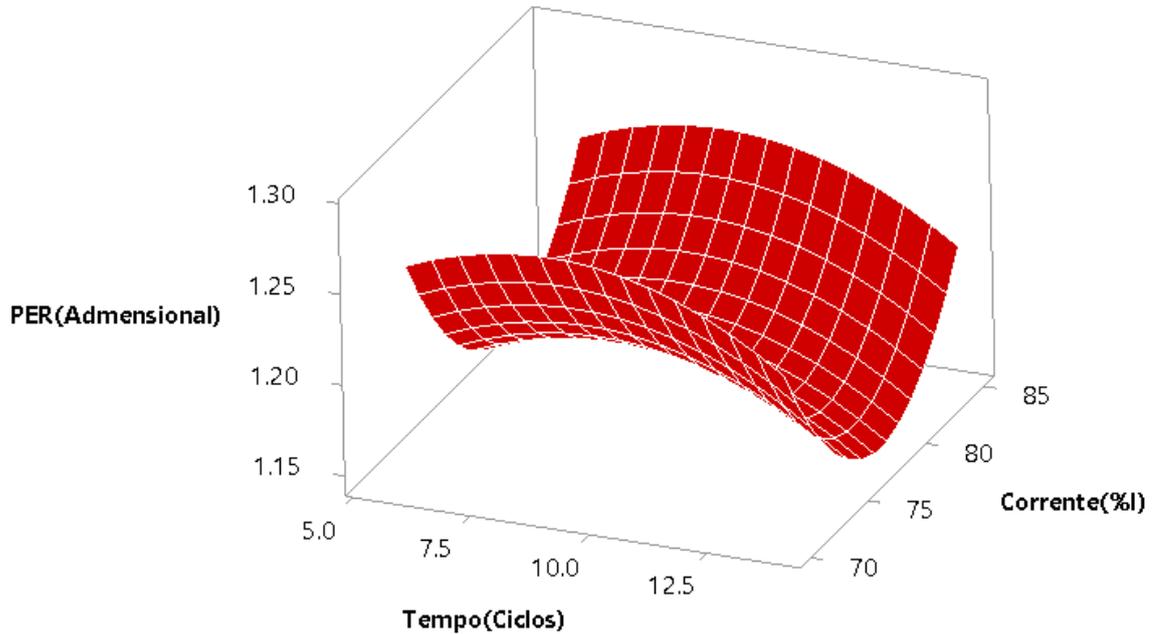
$$\begin{aligned}
 M_r = & 131,00 + 0,48 \text{ Tempo} - 1,78 \text{ Corrente} + 2,02 \text{ Pressão} - 0,86 \text{ Rampa} \\
 & + 9,00 \text{ Corrente} * \text{Corrente} + 14,72 \text{ Tempo} * \text{Corrente} \\
 & - 24,85 \text{ Pressão} * \text{Rampa}
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Figura 4-19 - Superfície de resposta para magnetização saturação (Ms). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



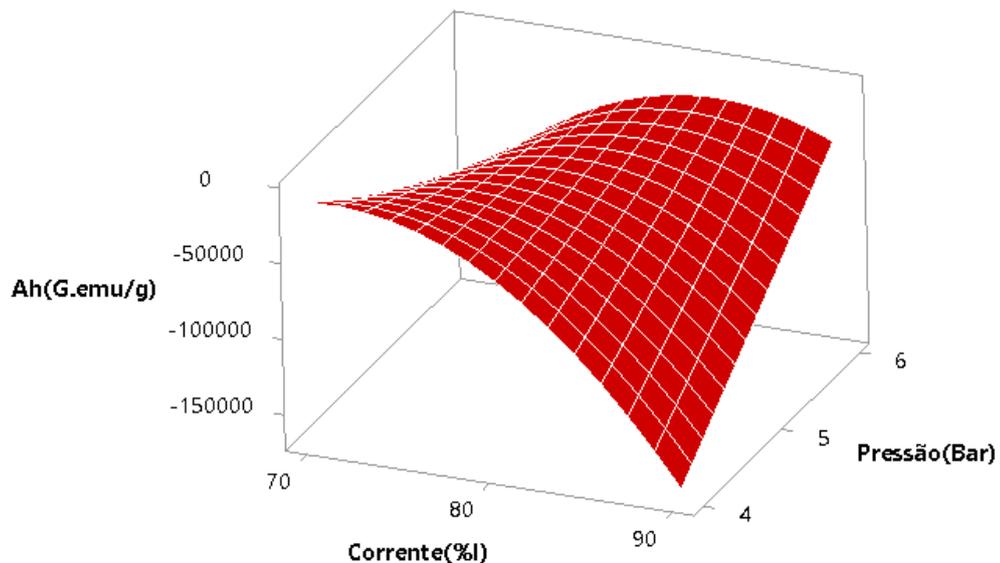
$$\begin{aligned}
 M_s = & 1,1931 - 0,015 \text{ Tempo} + 0,0218 \text{ Corrente} - 0,0151 \text{ Pressão} - 0,0008 \text{ Rampa} \\
 & - 0,0071 \text{ Tempo} * \text{Tempo} + 0,0323 \text{ Corrente} * \text{Corrente} \\
 & - 0,0092 \text{ Rampa} * \text{Rampa} + 0,0416 \text{ Tempo} * \text{Pressão} \\
 & - 0,0228 \text{ Corrente} * \text{Rampa}
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

Figura 4-20 - Superfície de resposta para permeabilidade (PER). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



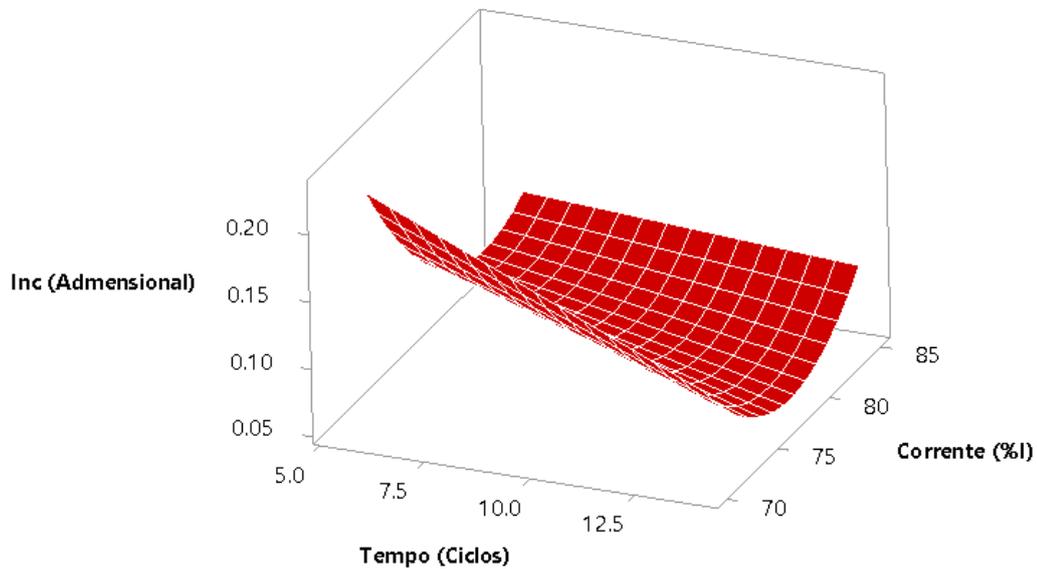
$$\begin{aligned} Ah = & -36013 + 2803 \text{ Tempo} - 11029 \text{ Corrente} + 5286 \text{ Pressão} + 4105 \text{ Rampa} \\ & - 10675 \text{ Corrente*Corrente} - 16553 \text{ Tempo*Pressão} - 11154 \text{ Tempo*Rampa} \\ & + 13382 \text{ Corrente*Pressão} + 16412 \text{ Corrente*Rampa} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Figura 4-21 - Superfície de resposta para área do laço da histerese (Ah). Valores fixos: Tempo=10, Rampa=6.



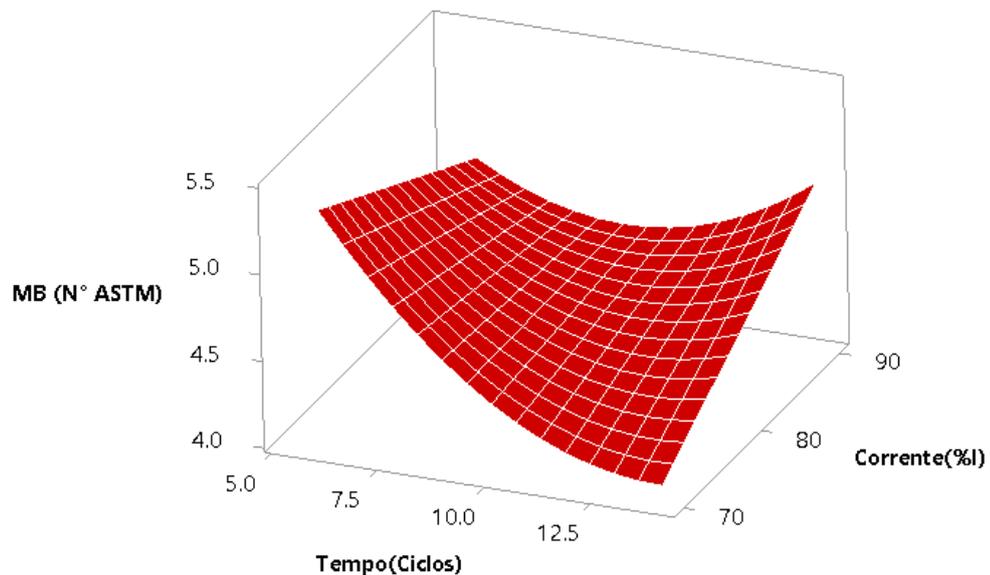
$$\begin{aligned} Inc = & 0,0815 - 0,0117 \text{ Tempo} + 0,0033 \text{ Corrente} - 0,0129 \text{ Pressão} - 0,0003 \text{ Rampa} \\ & + 0,0253 \text{ Corrente*Corrente} + 0,0077 \text{ Tempo*Corrente} + 0,0258 \text{ Tempo*Pressão} \\ & - 0,0249 \text{ Pressão*Rampa} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Figura 4-22 - Superfície de resposta para inclinação do laço da histerese (Inc). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



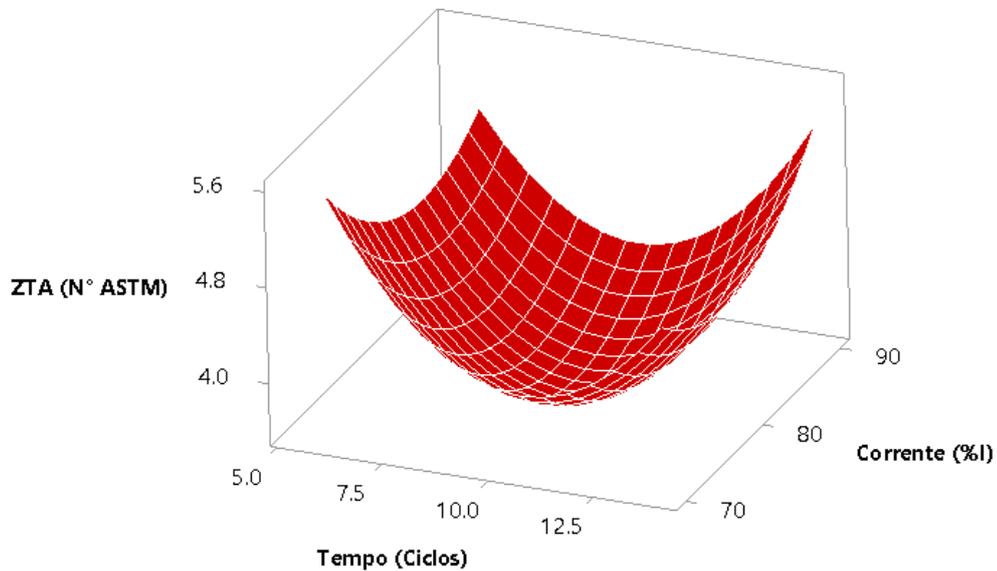
$$\begin{aligned}
 \text{MB} = & 4,4663 - 0,1398 \text{ Tempo} + 0,0338 \text{ Corrente} + 0,1554 \text{ Pressão} - 0,1328 \text{ Rampa} \\
 & + 0,0814 \text{ Tempo*Tempo} + 0,1895 \text{ Pressão*Pressão} + 0,0903 \text{ Tempo*Corrente} \\
 & + 0,1785 \text{ Tempo*Rampa}
 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Figura 4-23 - Superfície de resposta para metal base (MB). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



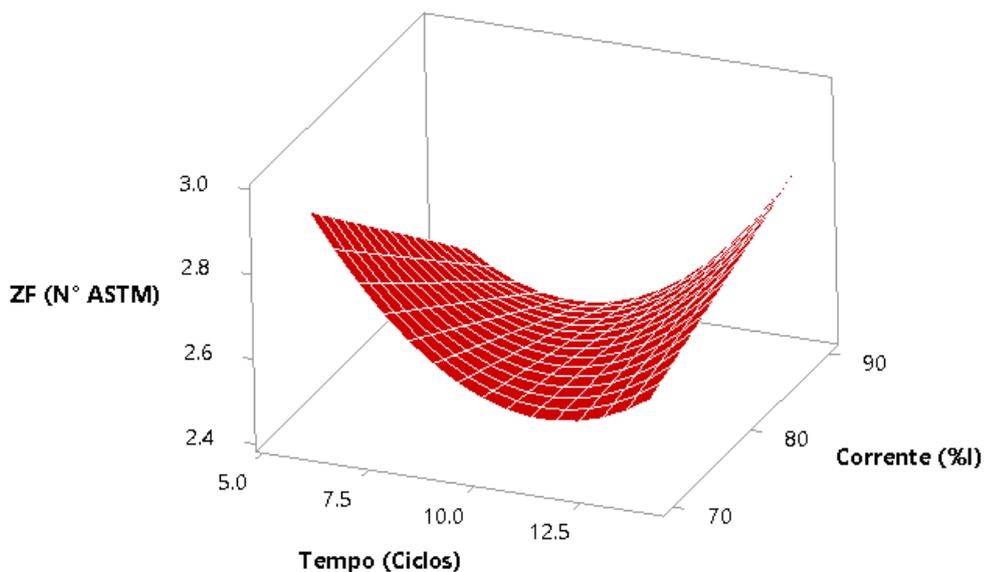
$$\begin{aligned}
 \text{ZTA} = & 3,5950 - 0,0458 \text{ Tempo} - 0,0173 \text{ Corrente} + 0,1730 \text{ Pressão} - 0,1747 \text{ Rampa} \\
 & + 0,2680 \text{ Tempo*Tempo} + 0,1340 \text{ Corrente*Corrente} \\
 & + 0,2338 \text{ Pressão*Pressão} + 0,0277 \text{ Rampa*Rampa} + 0,0618 \text{ Tempo*Corrente} \\
 & - 0,0641 \text{ Tempo*Pressão} + 0,0483 \text{ Tempo*Rampa} \\
 & - 0,0610 \text{ Pressão*Rampa}
 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Figura 4-24 - Superfície de resposta para zona termicamente afetada (ZTA). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



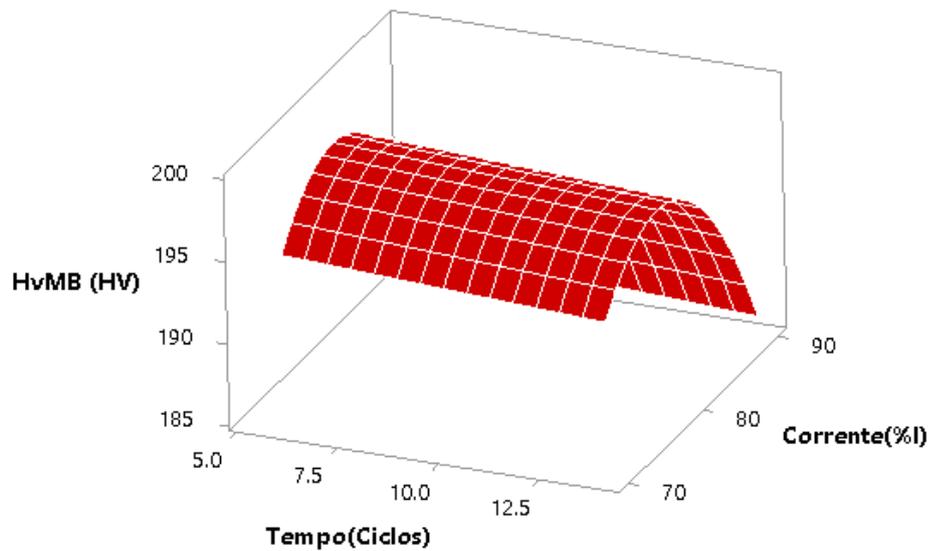
$$\begin{aligned}
 ZF = & 2,5066 + 0,0027 \text{ Tempo} - 0,0304 \text{ Corrente} + 0,0596 \text{ Pressão} + 0,1734 \text{ Rampa} \\
 & + 0,0547 \text{ Tempo*Tempo} - 0,0581 \text{ Rampa*Rampa} + 0,0411 \text{ Tempo*Corrente} \\
 & - 0,0661 \text{ Tempo*Pressão} + 0,0998 \text{ Tempo*Rampa} \\
 & - 0,0988 \text{ Corrente*Rampa}
 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Figura 4-25 - Superfície de resposta para zona fundida (ZF). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



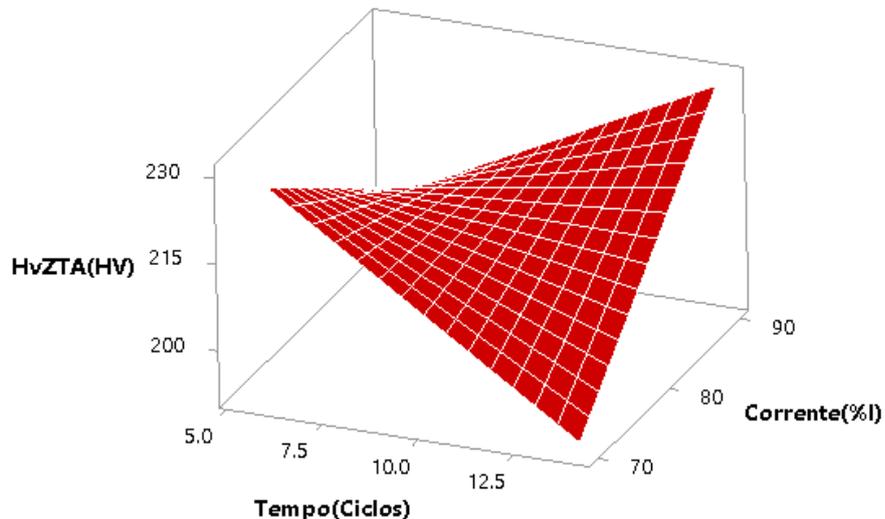
$$\begin{aligned}
 HvMB = & 197,861 - 0,250 \text{ Tempo} - 2,139 \text{ Corrente} - 0,015 \text{ Pressão} - 0,139 \text{ Rampa} - 1,828 \\
 & \text{Corrente*Corrente} + 2,928 \text{ Pressão*Pressão} - 2,801 \text{ Rampa*Rampa} - 2,267 \\
 & \text{Tempo*Pressão} - 0,856 \text{ Tempo*Rampa} + 2,026 \text{ Corrente*Pressão} - 2,167 \\
 & \text{Corrente*Rampa} + 3,125 \text{ Pressão*Rampa}
 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Figura 4-26- Superfície de resposta para zona fundida (HvMB). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



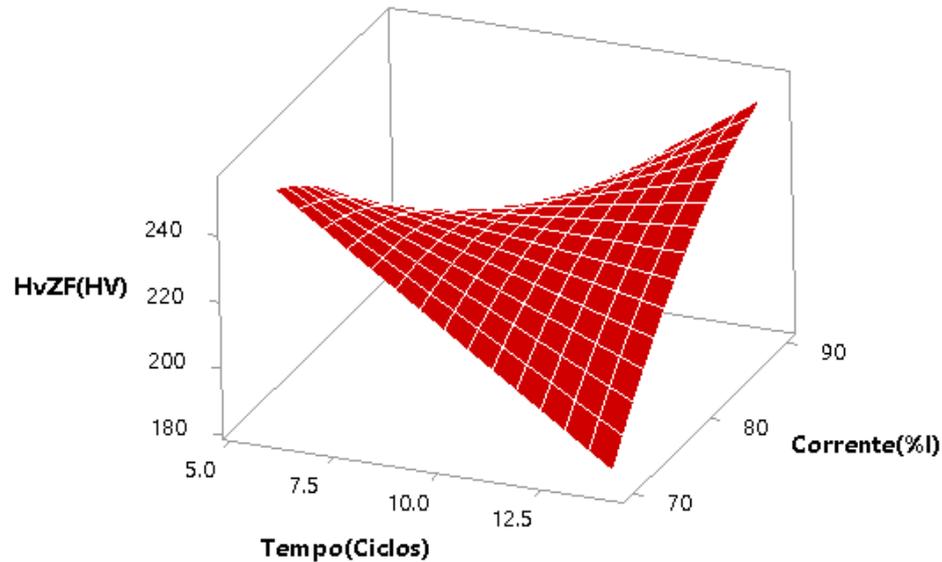
$$\begin{aligned}
 \text{HvZTA} = & 213,553 - 1,194 \text{ Tempo} + 1,685 \text{ Corrente} + 3,108 \text{ Pressão} - 3,659 \text{ Rampa} - 2,096 \\
 & \text{Pressão*Pressão} - 1,739 \text{ Rampa*Rampa} + 3,872 \text{ Tempo*Corrente} - \\
 & 3,136 \text{ Tempo*Pressão} - 2,390 \text{ Tempo*Rampa} + 1,778 \text{ Corrente*Pressão} - 3,161 \\
 & \text{Corrente*Rampa} + 4,627 \text{ Pressão*Rampa} \quad (4.16)
 \end{aligned}$$

Figura 4-27-Superfície de resposta para zona fundida (HvZTA). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



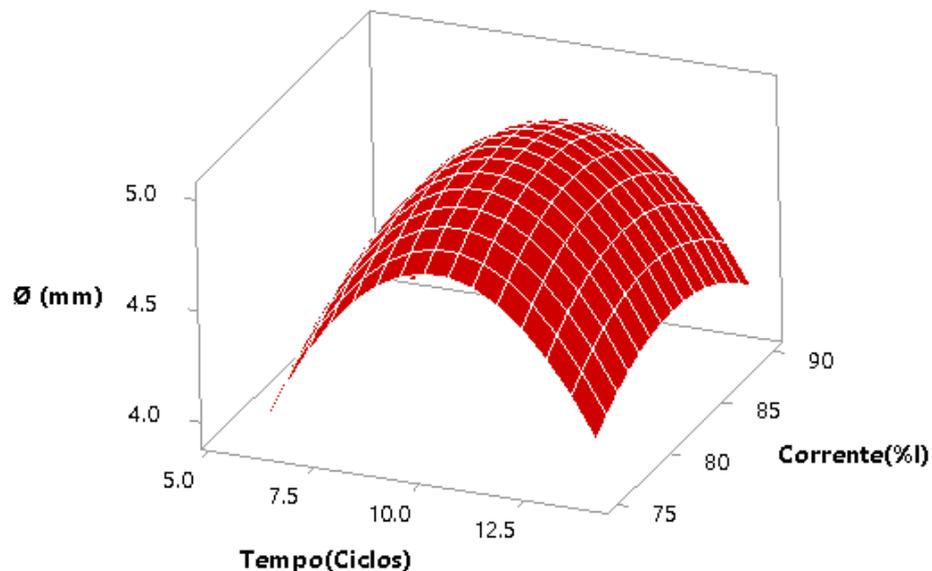
$$\begin{aligned}
 \text{HvZF} = & 227,990 - 0,272 \text{ Tempo} - 0,383 \text{ Corrente} - 0,169 \text{ Pressão} - 2,488 \text{ Rampa} - 2,432 \\
 & \text{Corrente*Corrente} - 2,641 \text{ Pressão*Pressão} + 8,493 \text{ Tempo*Corrente} - 10,507 \\
 & \text{Tempo*Pressão} + 7,149 \text{ Tempo*Rampa} + 8,160 \text{ Corrente*Pressão} - 7,445 \\
 & \text{Corrente*Rampa} + 6,670 \text{ Pressão*Rampa} \quad (4.17)
 \end{aligned}$$

Figura 4-28-Superfície de resposta para zona fundida (HvZF). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



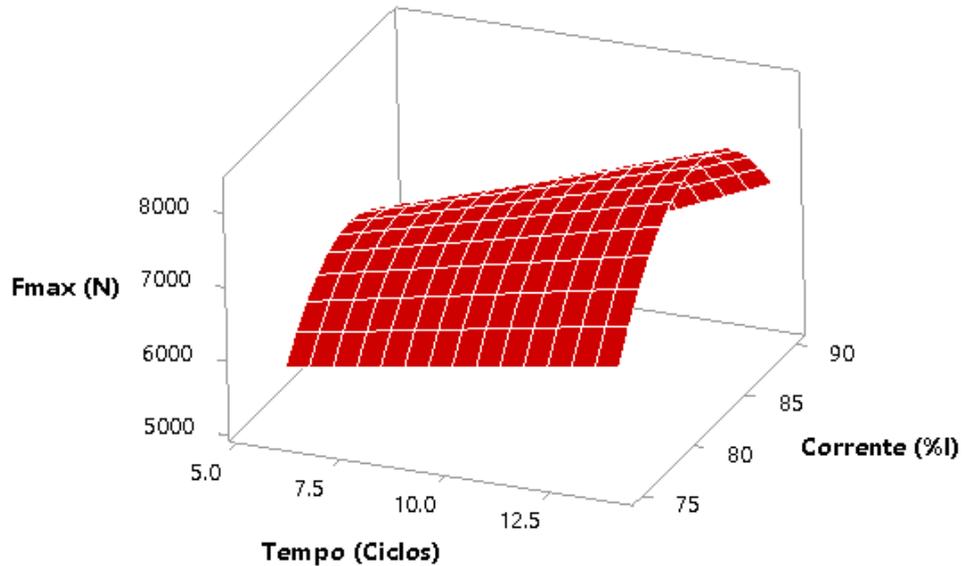
$$\begin{aligned} \emptyset &= 4,9855 + 0,0528 \text{ Tempo} + 0,1035 \text{ Corrente} + 0,0007 \text{ Pressão} - 0,0197 \text{ Rampa} - \\ &0,1827 \text{ Tempo*Tempo} - 0,1038 \text{ Corrente*Corrente} - 0,0090 \text{ Pressão*Pressão} + 0,0627 \\ &\text{Tempo*Rampa} - 0,0533 \text{ Corrente*Pressão} + 0,0797 \text{ Corrente*Rampa} + 0,0281 \\ &\text{Pressão*Rampa} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Figura 4-29 -Superfície de resposta para zona fundida (\emptyset). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



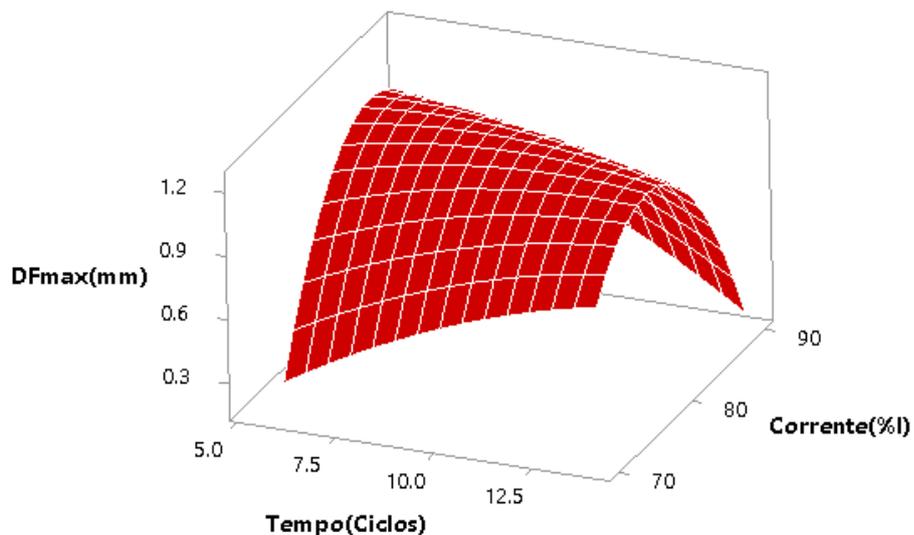
$$\begin{aligned} F_{\max} &= 7491,61 - 279,5 \text{ Tempo} - 594,8 \text{ Corrente} - 68,57 \text{ Pressão} + 124,4 \text{ Rampa} - 652,6 \\ &\text{Corrente*Corrente} + 79,1 \text{ Rampa*Rampa} + 101,7 \text{ Tempo*Corrente} + 337,2 \\ &\text{Tempo*Pressão} - 368,7 \text{ Tempo*Rampa} - 70,8 \text{ Corrente*Pressão} - 104,1 \\ &\text{Corrente*Rampa} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Figura 4-30-Superfície de resposta para zona fundida (Fmax). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



$$\begin{aligned}
 DF_{\max} = & 1,2296 - 0,0096 \text{ Tempo} - 0,0133 \text{ Corrente} + 0,0092 \text{ Pressão} + 0,0449 \text{ Rampa} - \\
 & 0,0175 \text{ Tempo*Tempo} - 0,1514 \text{ Corrente*Corrente} - 0,0662 \text{ Tempo*Corrente} + \\
 & 0,0346 \text{ Tempo*Pressão} - 0,01175 \text{ Tempo*Rampa} + 0,0317 \text{ Corrente*Rampa} + \\
 & 0,0694 \text{ Pressão*Rampa} \quad (4.20)
 \end{aligned}$$

Figura 4-31-Superfície de resposta para zona fundida (DFmax). Valores fixos: Pressão=5, Rampa=6.



Observa-se as superfícies de respostas acima, em sua grande maioria possui inclinação condizente aos gráficos de efeitos principais do capítulo 4.5. Exemplificando a afirmação

anterior podemos usar como exemplo a **Figura 4-15** condiz com a inclinação do gráfico de efeitos principais da **Figura 4-33**.

4.5. Análise dos efeitos principais e interações dos parâmetros.

Ao considerar a influência dos parâmetros independentes (xi) sobre cada resposta (y) quando $Pvalue \leq 0,05$, a inclinação das linhas retas ou parabólicas que representam o nível de influência dos parâmetros (xi) sobre as respostas (y) dentro do gráfico de efeitos e de interação determina a intensidade desta influência. As correlações podem ser observadas na **Tabela 4-22** e **Tabela 4-23**. Os dados com ‘*’ não são aplicáveis pois as correlações estão entre os parâmetros magnéticos, ou seja, ambos são coletados do mesmo laço da histerese. O mesmo ocorre para as correlações de microdureza. Em ‘**negrito e itálico**’, apresentam fraca correlação e significativa.

Tabela 4-22 – Correlação entre as respostas (y)

| | <i>Dc</i> | <i>TR</i> | <i>L</i> | <i>Hc</i> | <i>Mr</i> | <i>Ms</i> | <i>PER</i> | <i>Q</i> | <i>Ah</i> | <i>Inc</i> | <i>MB</i> |
|------------|---------------|-----------|--------------|--------------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|-----------|
| <i>TR</i> | 0,053 | | | | | | | | | | |
| | 0,788 | | | | | | | | | | |
| <i>L</i> | 0,466 | 0,217 | | | | | | | | | |
| | 0,013 | 0,287 | | | | | | | | | |
| <i>Hc</i> | 0,110 | 0,063 | 0,153 | | | | | | | | |
| | 0,584 | 0,763 | 0,456 | | | | | | | | |
| <i>Mr</i> | 0,366 | -0,099 | 0,093 | -0,413* | | | | | | | |
| | 0,060 | 0,631 | 0,659 | 0,040* | | | | | | | |
| <i>Ms</i> | 0,031 | 0,024 | 0,137 | -0,261 | 0,790* | | | | | | |
| | 0,875 | 0,907 | 0,506 | 0,208 | 0,000* | | | | | | |
| <i>PER</i> | 0,178 | 0,131 | 0,103 | -0,034 | 0,772* | 0,995* | | | | | |
| | 0,374 | 0,524 | 0,625 | 0,870 | 0,000* | 0,000* | | | | | |
| <i>Q</i> | 0,574 | 0,089 | 0,490 | 0,493 | 0,021 | -0,063 | -0,076 | | | | |
| | 0,001 | 0,660 | 0,009 | 0,010 | 0,920 | 0,755 | 0,711 | | | | |
| <i>Ah</i> | -0,376 | -0,000 | -0,218 | 0,171 | -0,642* | -0,835* | -0,865* | 0,053 | | | |
| | 0,048 | 0,999 | 0,285 | 0,405 | 0,000* | 0,000* | 0,000* | 0,791 | | | |
| <i>Inc</i> | 0,059 | -0,107 | -0,040 | -0,211 | 0,998* | 0,731* | 0,722* | -0,073 | -0,548* | | |
| | 0,765 | 0,602 | 0,845 | 0,301 | 0,000* | 0,000* | 0,000* | 0,716 | 0,003* | | |
| <i>MB</i> | -0,030 | -0,029 | 0,019 | -0,374 | 0,178 | 0,243 | 0,199 | -0,281 | -0,316 | 0,129 | |
| | 0,883 | 0,890 | 0,928 | 0,065 | 0,395 | 0,241 | 0,340 | 0,164 | 0,109 | 0,530 | |
| <i>ZTA</i> | -0,028 | -0,121 | 0,105 | -0,162 | 0,109 | 0,116 | 0,037 | -0,323 | -0,078 | 0,037 | 0,776* |
| | 0,888 | 0,565 | 0,618 | 0,440 | 0,595 | 0,580 | 0,861 | 0,101 | 0,703 | 0,854 | 0,000* |
| <i>ZF</i> | -0,176 | -0,118 | -0,166 | 0,206 | -0,340 | -0,158 | -0,160 | 0,202 | 0,156 | -0,158 | 0,201 |
| | 0,379 | 0,573 | 0,419 | 0,313 | 0,097 | 0,451 | 0,444 | 0,323 | 0,445 | 0,442 | 0,336 |

Continua

Tabela 4-22 (Continuação)

| | | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------|--------|--------------|---------------|---------------|--------|---------------|--------------|--------|---------------|--------|
| <i>Hv MB</i> | -0,393 | -0,181 | -0,086 | -0,072 | -0,426 | -0,373 | -0,264 | -0,340 | 0,161 | -0,339 | 0,282 |
| | 0,043 | 0,387 | 0,683 | 0,732 | 0,030 | 0,066 | 0,202 | 0,089 | 0,431 | 0,039 | 0,172 |
| <i>Hv ZTA</i> | -0,071 | 0,047 | 0,298 | -0,179 | -0,358 | -0,289 | -0,270 | -0,296 | 0,076 | -0,343 | 0,188 |
| | 0,715 | 0,817 | 0,131 | 0,373 | 0,067 | 0,143 | 0,172 | 0,126 | 0,701 | 0,074 | 0,339 |
| <i>Hv ZF</i> | -0,347 | 0,241 | 0,110 | -0,263 | -0,203 | -0,136 | -0,207 | -0,182 | 0,042 | -0,118 | 0,084 |
| | 0,076 | 0,247 | 0,593 | 0,194 | 0,331 | 0,515 | 0,320 | 0,372 | 0,837 | 0,565 | 0,688 |
| \emptyset | 0,285 | -0,113 | 0,163 | -0,463 | -0,004 | -0,041 | 0,040 | 0,172 | -0,148 | -0,236 | -0,002 |
| | 0,149 | 0,589 | 0,436 | 0,023 | 0,986 | 0,847 | 0,848 | 0,402 | 0,480 | 0,255 | 0,993 |
| <i>DFmax</i> | -0,292 | -0,159 | -0,262 | 0,282 | -0,437 | -0,384 | -0,399 | -0,032 | 0,315 | -0,348 | -0,257 |
| | 0,140 | 0,448 | 0,205 | 0,173 | 0,029 | 0,058 | 0,048 | 0,878 | 0,117 | 0,081 | 0,204 |
| <i>Fmax</i> | 0,154 | 0,052 | 0,419 | 0,488 | -0,097 | -0,015 | 0,140 | 0,424 | -0,041 | -0,100 | -0,366 |
| | 0,444 | 0,799 | 0,037 | 0,013 | 0,636 | 0,943 | 0,503 | 0,031 | 0,841 | 0,626 | 0,066 |

*não aplicável. ‘negrito e *Itálico*’ correlação fraca e significativa.

Na **Tabela 4-22** e **Tabela 4-23** observa-se que Dc possui correlações fracas (Correlação de Pearson $\geq 0,7$) mas significantes (Pvalue $\leq 0,05$) com L, Q, Ah e HvMB sendo as duas últimas uma correlação inversamente proporcional devido ao sinal negativo. As correlações de Q e L com Dc podem ser justificadas pelo desgaste da área da ponta do eletrodo a cada ponto de soldagem realizado, pela linha tracejada ao redor do diâmetro do ponto soldado da **Figura 4-32**.

Tabela 4-23 – Correlação entre as respostas (y)

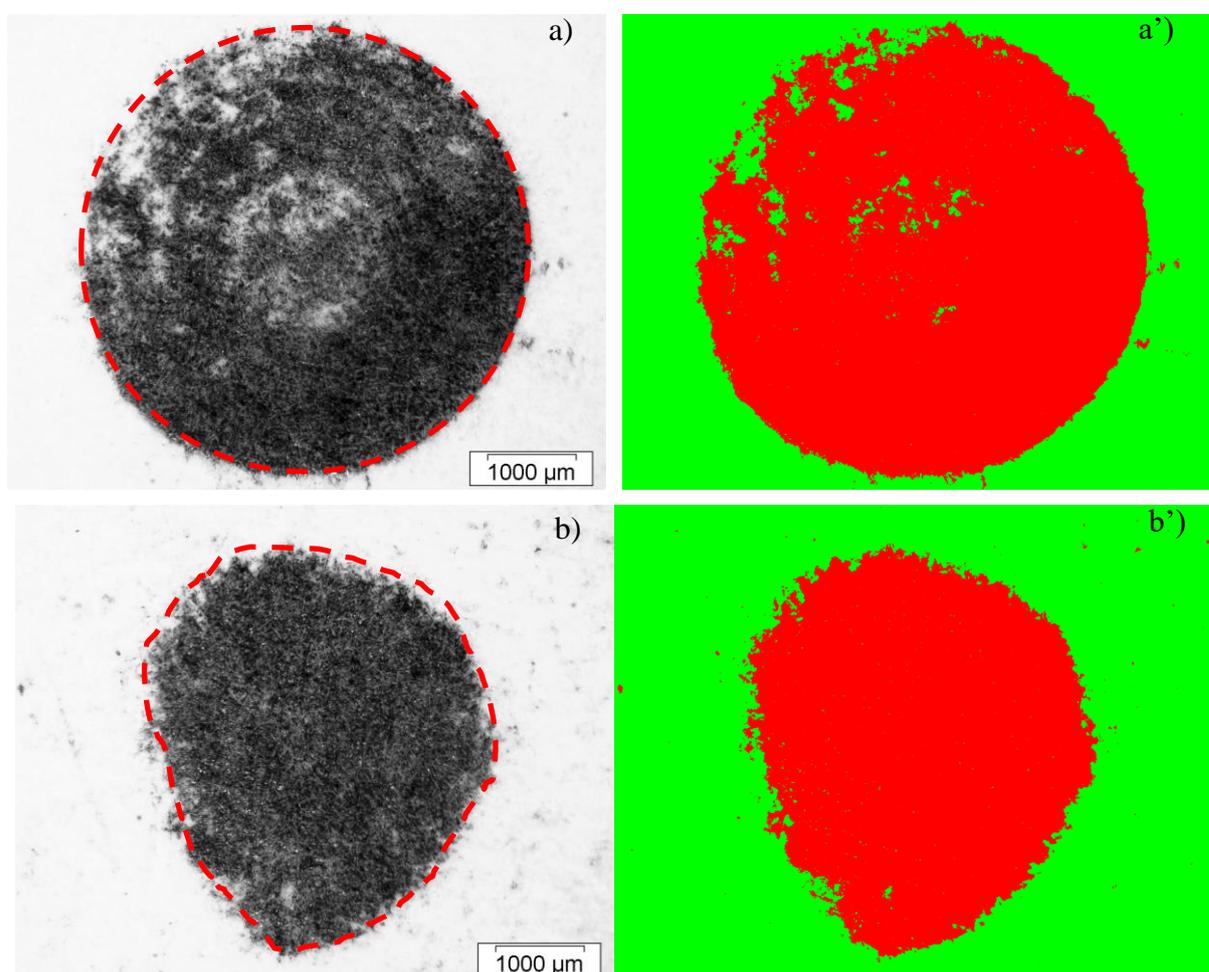
| | ZTA | ZF | HvMB | HvZTA | HvZF | \emptyset | DFmax |
|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|
| <i>ZF</i> | 0,188 | | | | | | |
| | 0,367 | | | | | | |
| <i>HvMB</i> | 0,291 | 0,097 | | | | | |
| | 0,149 | 0,646 | | | | | |
| <i>Hv ZTA</i> | 0,206 | 0,124 | 0,575* | | | | |
| | 0,292 | 0,537 | 0,002* | | | | |
| <i>HvZF</i> | -0,042 | 0,176 | 0,264 | 0,664* | | | |
| | 0,841 | 0,389 | 0,192 | 0,000* | | | |
| \emptyset | -0,442 | -0,244 | 0,016 | -0,078 | -0,119 | | |
| | 0,031 | 0,239 | 0,941 | 0,705 | 0,581 | | |
| <i>DFmax</i> | -0,359 | -0,208 | 0,194 | -0,082 | -0,089 | 0,034 | |
| | 0,071 | 0,318 | 0,353 | 0,679 | 0,673 | 0,874 | |
| <i>Fmax</i> | -0,476 | -0,110 | 0,005 | -0,137 | -0,046 | 0,212 | 0,578* |
| | 0,014 | 0,600 | 0,982 | 0,486 | 0,829 | 0,309 | 0,002* |

*não aplicável. ‘negrito e *Itálico*’ correlação fraca e significativa.

Observe que a **Figura 4-32-a** apresenta o eletrodo usinado para um diâmetro de 5mm. A **Figura 4-32-b** apresenta o diâmetro do eletrodo já desgastado após várias soldagens com parâmetros variados. Na determinação da área por meio do software a’) e b’) são os pontos em preto transformados em vermelhos e o fundo branco em verde com intuito de contagem de pixel

para determinação da área, estes valores foram registrados na **Tabela 8-1**. Por serem valores utilizados na determinação da densidade de corrente, não foram analisados diretamente pelo planejamento estatístico. As correlações de Dc apresentaram-se com L, Q, Ah. Também a correlação Dc com Mr na **Tabela 4-22** que está muito próximo de apresentar significância. Já a correlação com HvMB pode ser explicada ao considerarmos que o primeiro contato da ponta do eletrodo se dá com o MB. Neste instante o calor provocado pela densidade de corrente ao atravessar o metal base pode ter facilitado a dissolução do teor carbono na ferrita (ALISADEH, 2015), podendo aumentar a dureza nessa região da liga de metal após a soldagem.

Figura 4-32 – Área da ponta do eletrodo: a) CP 28=19,6132mm², b) CP 6=13,0880mm²

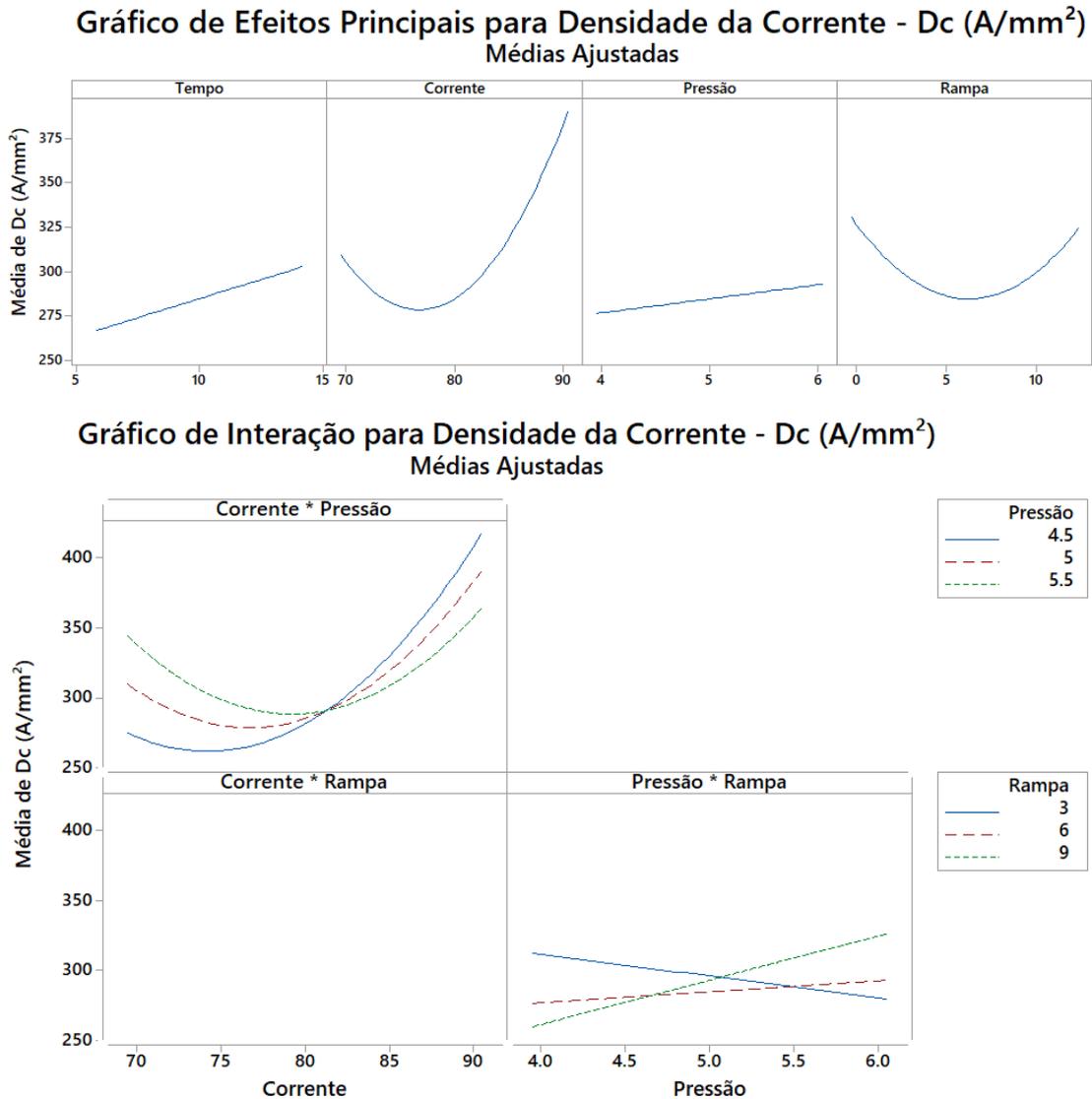


Fonte: Autor

Neste sentido, para a densidade de corrente Dc conforme **Tabela 4-19**, somente o parâmetro de tempo (*A*) e corrente (*B*), e as interações (*B*C*), (*C*D*) apresentaram significância. Para maiores valores de corrente maior será a densidade conforme **Figura 4-33**. Observa-se que (*C*D*) apresentam significância mesmo que (*C*) isoladamente seu $P\text{value} \geq 0,05$. A relação da corrente com a Dc é quadrática, tornando curvo o gráfico dos efeitos principais para a

corrente. Ao considerar que (*D*) se refere a um tempo extra de aplicação da corrente de soldagem e (*C*) seja influente na resistência de contato, justifica-se a significância desta interação.

Figura 4-33 - Efeito dos parâmetros na Densidade de Corrente - Dc



Fonte: Autor

Também o tempo (*A*), a corrente (*B*), a pressão (*C*), e a rampa (*D*) influenciam proporcionalmente em *L* conforme mostrado na **Tabela 4-19**. Com destaque para o tempo e a corrente enfatizado pela maior a inclinação da reta na **Figura 4-34**. Os parâmetros (*A*), (*B*), (*C*), (*D*) e as interações (*A*B*), (*A*D*) e (*B*D*) também apresentaram influência significativa sobre *L*. O aço ao tornar-se macio pelo alto aquecimento provido pela energia de soldagem *Q*, neste momento força do eletrodo vence sua rigidez culminando penetração do eletrodo no metal base causando a deformação *L* na superfície do ponto soldado, denominada indentação.

Figura 4-34 – Efeito dos parâmetros na Deformação – L
Gráfico de Efeitos Principais para Deformação - L (mm)
 Médias Ajustadas

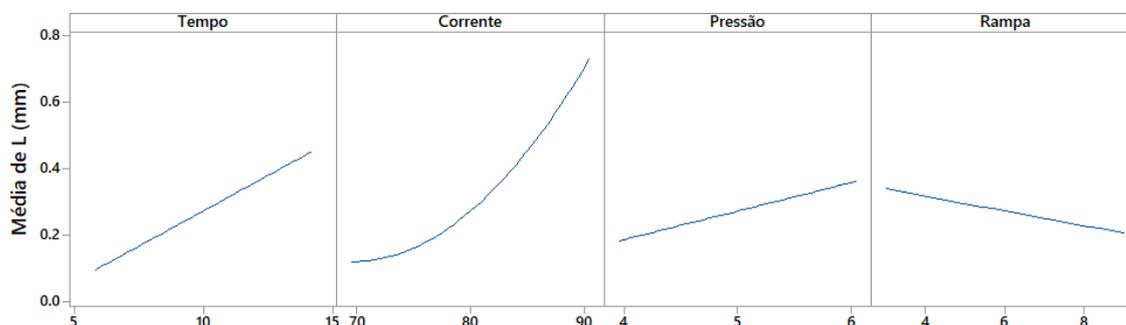
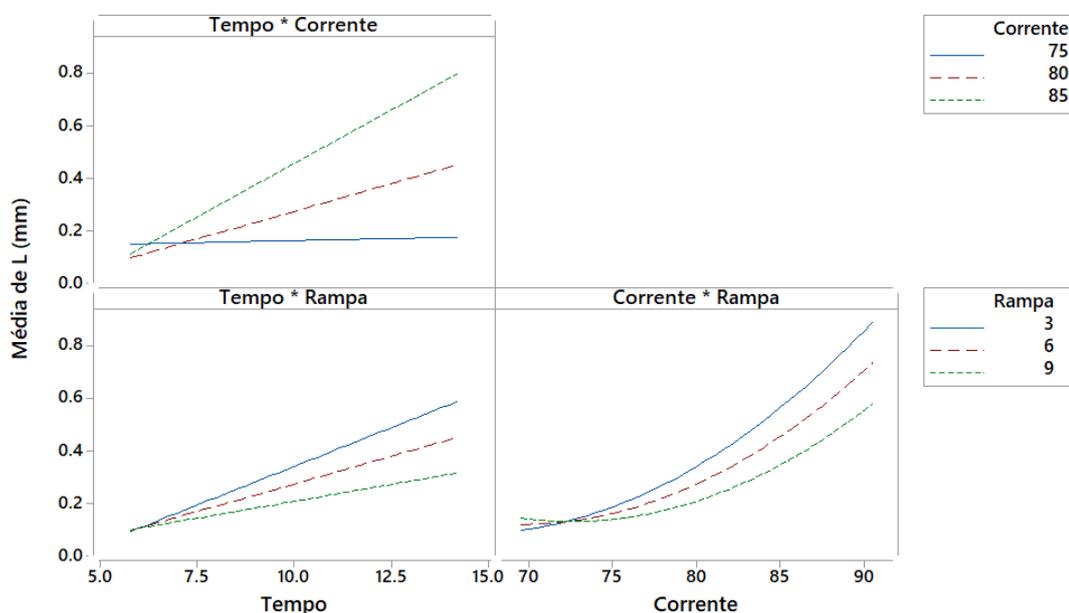


Gráfico de Interação para Deformação - L (mm)
 Médias Ajustadas

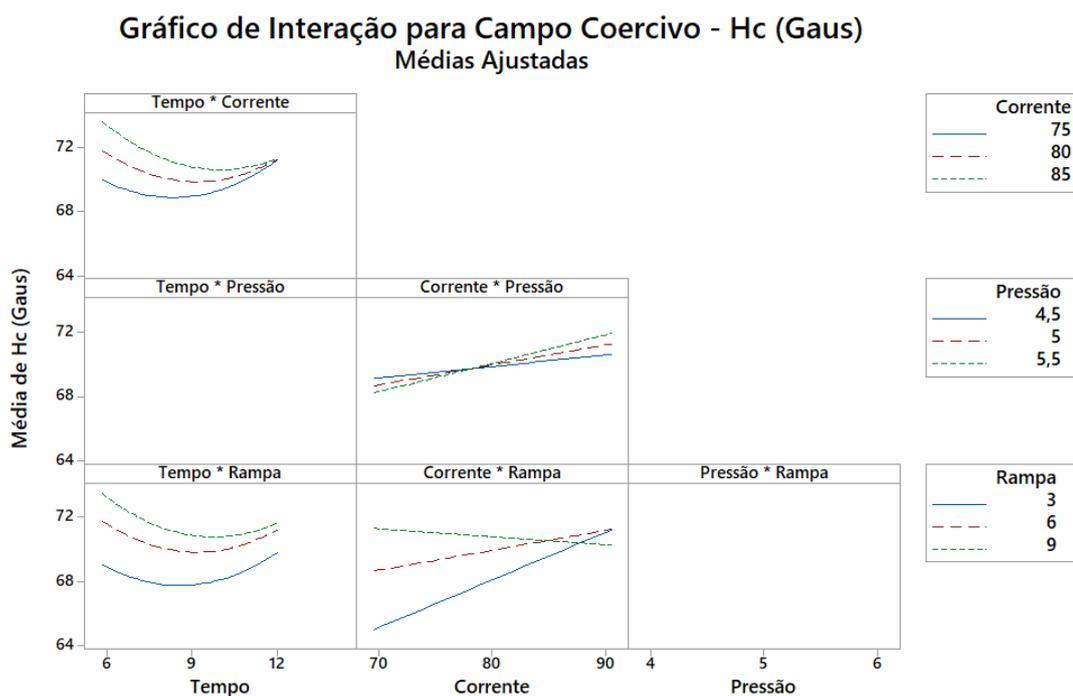
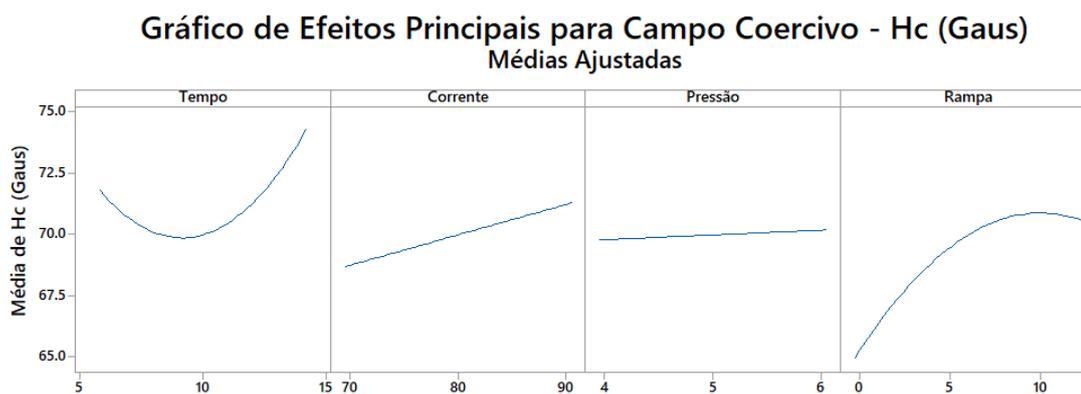


Fonte: Autor

Há também a correlação proporcional de L com F_{max} na **Tabela 4-22**. Considerando que para um aumento de L há um pequeno aumento de F_{max} pode-se dizer que L contribui para a redução do tamanho de grão, bem dos defeitos internos da estrutura cristalina ao deformar os grãos juntamente com calor Q durante a soldagem RSW. Essa redução pode contribuir para o aumento a F_{max} de ruptura da pepita de soldagem. Inversamente proporcional a L, está a rampa de descida da corrente em que seu aumento reflete não somente na redução da deformação conforme **Figura 4-34**, mas também no aumento de H_c conforme **Figura 4-35**. Com relação ao campo coercivo H_c , os parâmetros (A), (B), (D) e as interações (A*B), (A*D), (B*D) tiveram significância conforme demonstrado **Tabela 4-19**. A relação de tempo e rampa com a H_c é quadrática, torna curvo o gráfico dos efeitos principais para a corrente. Observa-se que para

menores valores de (D) tem-se um menor nível de H_c . Com relação as interações, observa-se que $(B*C)$ apresentam significância, mesmo que (C) isoladamente seu $Pvalue \geq 0,05$ conforme **Tabela 4-19**. Neste cenário, para melhor compreender o significado da rampa de descida da corrente dentro da soldagem a **Figura 3-12** ilustra melhor este parâmetro da soldagem RSW.

Figura 4-35 - Efeito dos parâmetros no campo coercivo - H_c

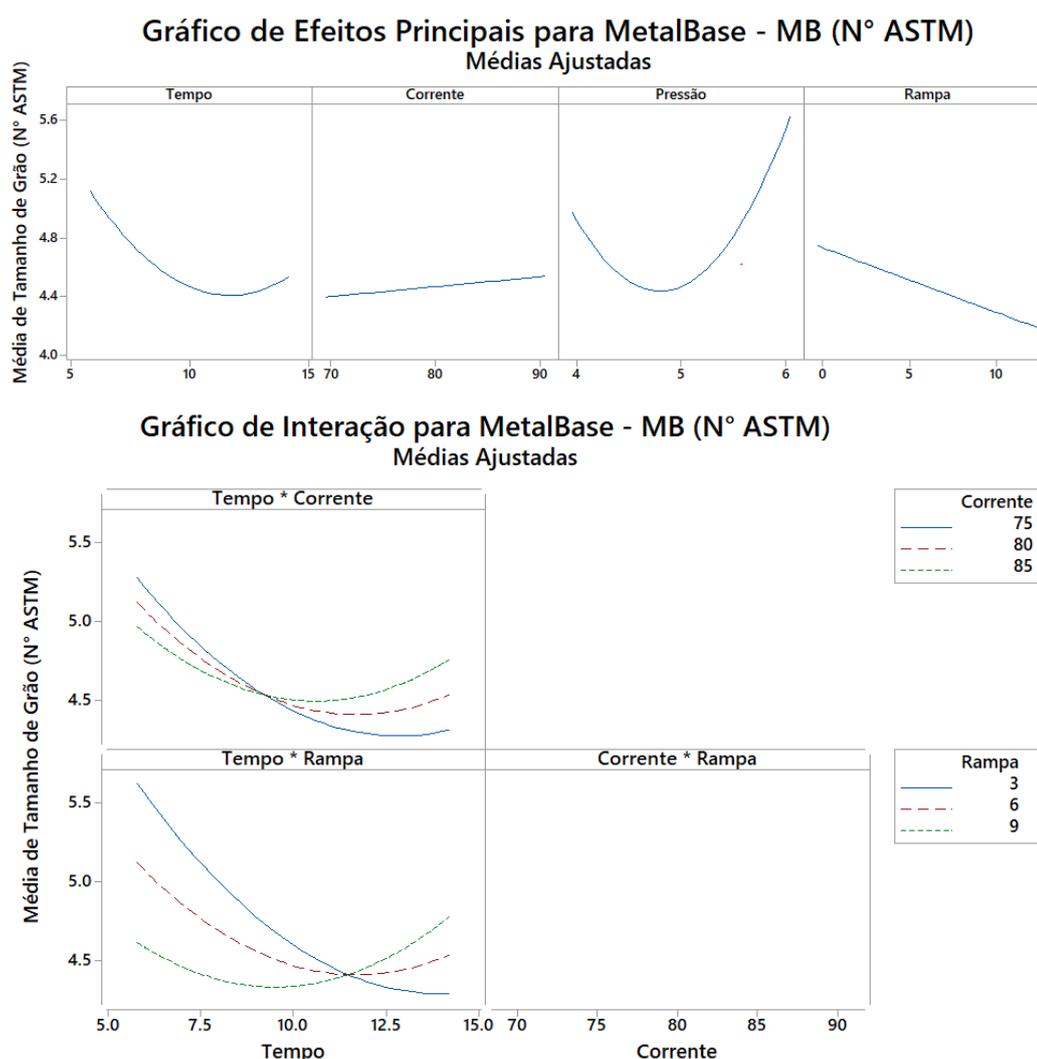


Fonte: Autor

Questões referentes a influência indireta de Q sobre as propriedades magnéticas afloram ao considerar a significativa correlação proporcional entre Q e H_c demonstrado na **Tabela 4-22**. Indaga-se a possibilidade de variação da microestrutura representada pela alteração do tamanho de grão sobre o campo H_c . Este contexto pode ser fundamentado nesta pesquisa ao observarmos a **Figura 4-3** em que, a inclusão da rampa de descida da corrente de soldagem ao influenciar no tamanho de grão conforme **Figura 4-4**, pode refletir em H_c , possibilitando uma relação

indireta deste último com a rampa de descida de corrente de soldagem. Mesmo assim, na **Tabela 4-22** não apresentou nenhuma correlação com microdureza e tamanho de grão contrariando as observações de Kwun (1987) e Yoshino (1996). Por outro lado, ao considerarmos a correlação fraca, mas inversamente proporcional de Hc com MB que está próximo de ser significativa, justifica-se o resultado apresentado na **Figura 4-4**, em que para maiores valores de ASTM tem-se menores valores de Hc. Com relação a qualidade da soldagem observa-se que Hc possui uma relação proporcional significativa com Fmax e inversamente proporcional somente com \emptyset , pode-se dizer que a rampa de descida da corrente de soldagem também influencia na Fmax da soldagem RSW. O tempo, a pressão e a rampa influenciam proporcionalmente em MB conforme mostrado na **Tabela 4-20**. Com destaque para o tempo, pressão e rampa enfatizado pela maior inclinação da reta na **Figura 4-36**.

Figura 4-36 - Efeito dos parâmetros no metal base - MB



Neste sentido quanto menor os níveis de tempo e de rampa, e maior o nível de pressão, maior será o número ASTM indicando um menor tamanho de grão. Os parâmetros (*A*), (*B*), (*C*), (*D*) e as interações (*A*B*), (*A*D*) também apresentaram influência significativa sobre MB. A relação de tempo e rampa com MB é quadrática, torna curvo o gráfico dos efeitos principais para a corrente. Sendo inversamente proporcionais devido ao sinal negativo dos coeficientes presentes na **Tabela 4-20**. O tamanho de grão MB apresenta correlação forte, proporcional e significativa com a ZTA. A influência significativa de (*A*), (*C*) e (*D*) na ZTA com destaque para (*C*) e (*D*) pela maior inclinação das retas na **Figura 4-37**. Com exceção para a corrente (*B*). O tamanho de grão ASTM na ZTA também apresenta correlação fraca, mas inversamente proporcional com \emptyset e com a Fmax na **Tabela 4-23**. Neste caso, grãos mais refinados na ZTA (pelo aumento do NÚMERO ASTM) tendem a diminuir a Fmax e o \emptyset da pepita de soldagem.

Figura 4-37 - Efeito dos parâmetros no zona termicamente afetada - ZTA

Gráfico de Efeitos Principais para Zona Termicamente Afetada - ZTA (N° ASTM)
Médias Ajustadas

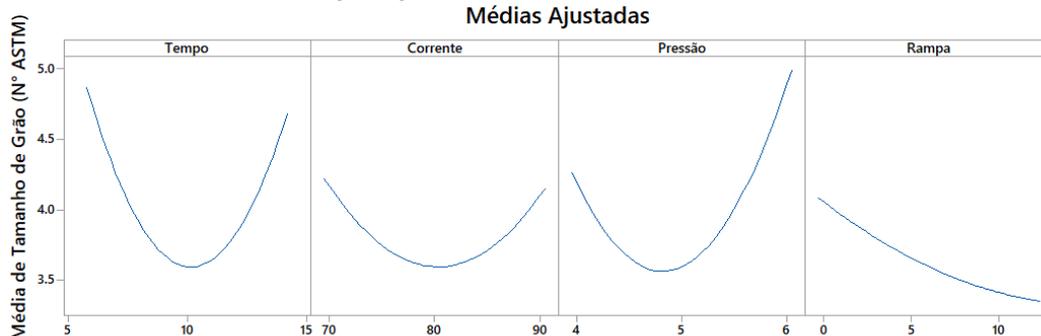
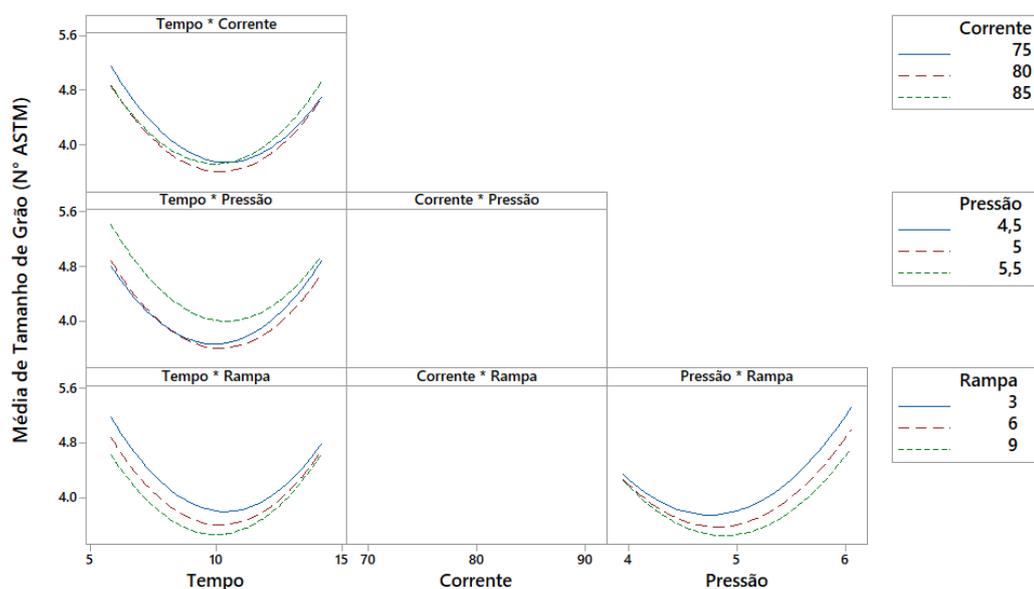


Gráfico de Interação para Zona Termicamente Afetada - ZTA (N° ASTM)
Médias Ajustadas



Fonte: Autor

Na soldagem RSW em aços ferríticos onde não existe fusão do material, para um nível maior de Q o tamanho de grão tende a aumentar na ZTA conforme previsto por alguns autores (ALISADEH, 2015; GONÇALVES, 2019). A correlação inversamente proporcional do tamanho do grão da ZTA com F_{max} , pode ser justificada pela redução da tensão residual com aumento no tamanho de grão (COLOMBO et al; 2019), juntamente a possibilidade de redução dos defeitos internos na estrutura cristalina da ZTA pela ação conjunta de Q e L durante a soldagem RSW.

Na **Figura 4-38**, ao considerar a influência da rampa de descida da corrente de soldagem na zona fundida ZF observa-se que quanto menor a rampa menor será o número ASTM culminando num maior tamanho de grão. Este fato, é o oposto ao que ocorre na ZTA e no MB, mas pode ser justificado pela presença de metal líquido (fusão) na ZF durante a soldagem. Os precipitados de TiN formados na zona fundida tendem a agir como nucleantes para a solidificação heterogênea resultando na nucleação de novos grãos mais finos (GONÇALVES, 2019). Para maiores níveis de rampa maior será a energia de soldagem Q , naturalmente a fusão torna-se inevitável. Porém, ao considerar que a pressão (C) seja significativa ($P_{value} \leq 0,05$) na diminuição do tamanho de grão conforme **Tabela 4-20**, pode se dizer que a aplicação de pressão pode inibir tal crescimento. Por outro lado, o tempo (A) não apresenta influência significativa em ZF. Mesmo assim sua interação com o tempo ($A * B$), ($A * C$) e ($A * D$), apresenta significância. Observa-se também que, mesmo a **Figura 4-3** possa apresentar indícios de correlação entre H_c e tamanho de grão, na **Tabela 4-22** não há correlação forte (Correlação de Person $\geq 0,07$) e significativa ($P_{value} \leq 0,05$) do tamanho de grão em MB, ZTA e ZF com alguma propriedade magnética, mesmo considerando um planejamento de experimento com superfície de resposta. Com exceção para MB e H_c ($P_{value} = 0,065$), ZF e M_r ($P_{value} = 0,097$) ao apresentar valores de P_{value} muito próximos a condição significativa ($P_{value} \leq 0,05$).

Ao observarmos a **Tabela 4-16** que as respostas M_r , H_c , MB e ZTA apresentam problemas com tendências e agrupamentos de resíduos. Ao considerar que a medição do tamanho de grão considera a média dos valores obtidos, pode-se dizer que um número maior de corpos de provas tendência o aumento da significância ($P_{value} \leq 0,05$) na correlação entre tamanho de grão e propriedades magnéticas.

Figura 4-38 - Efeito dos parâmetros no zona fundida – ZF

Gráfico de Efeitos Principais para Zona Fundida - ZF(N° ASTM) Médias Ajustadas

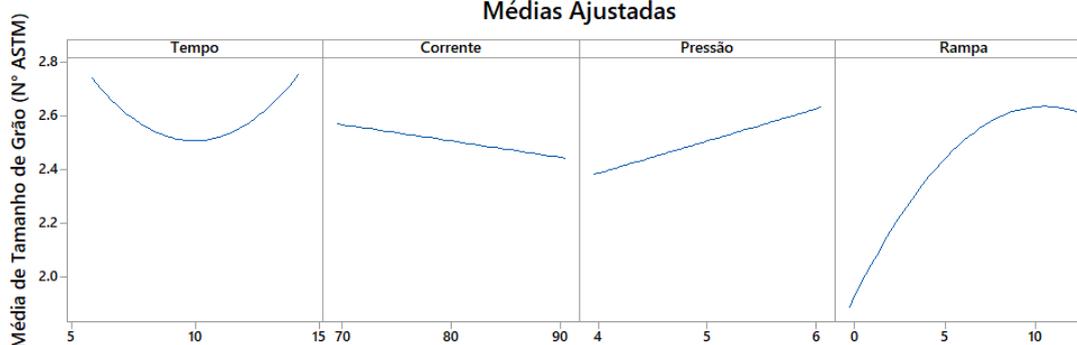
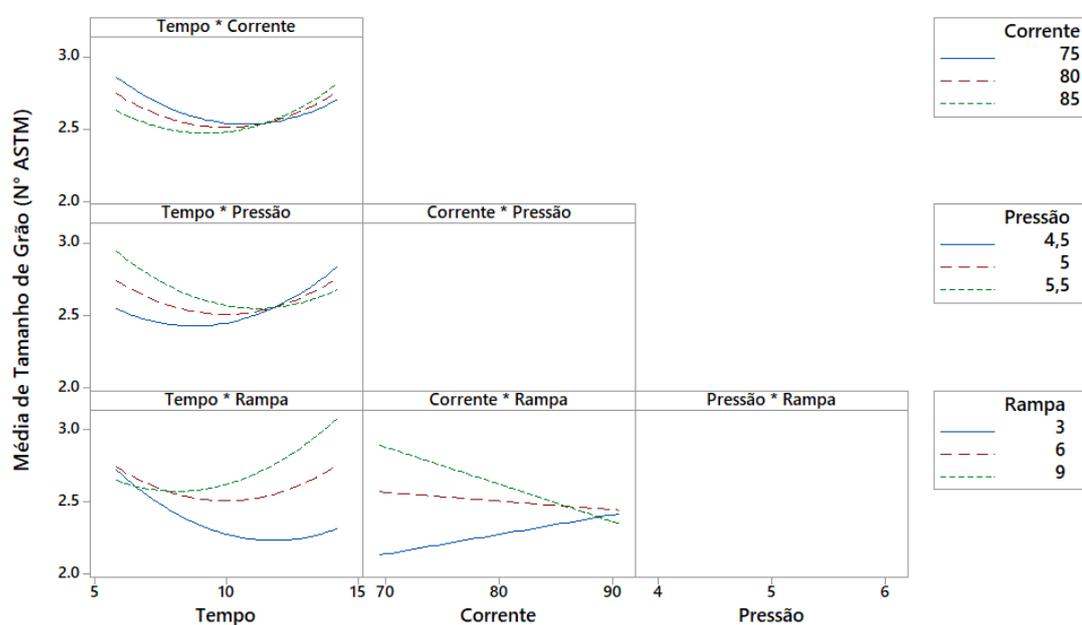


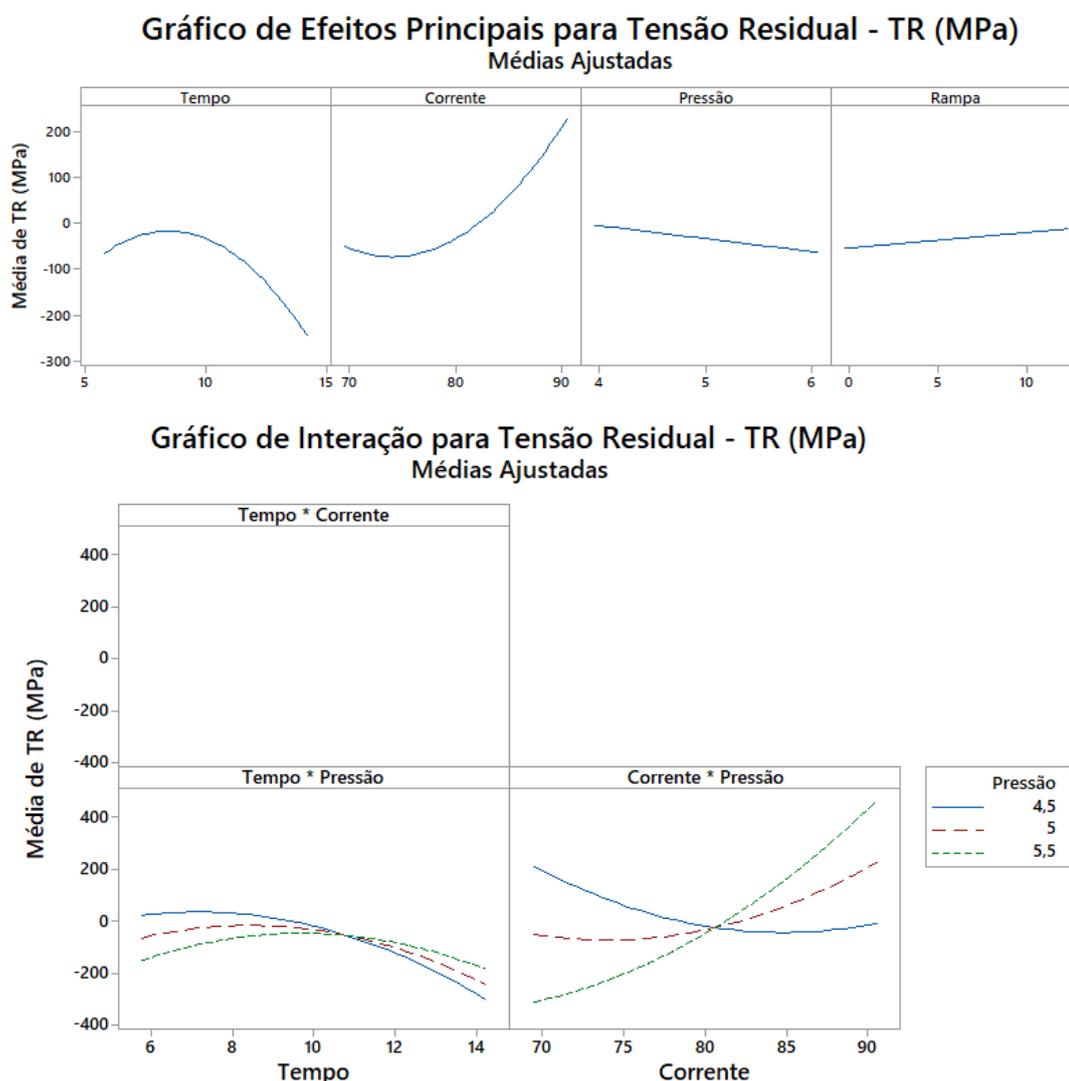
Gráfico de Interação para Zona Fundida - ZF(N° ASTM) Médias Ajustadas



Fonte: Autor

Outros pesquisadores observaram que, além de H_c o tamanho de grão pode ter alguma correlação com outras propriedades como a tensão residual (COLOMBO et al, 2019; Vourna, 2015). A tensão residual de tração (representada pelos valores positivos) aumenta para maiores valores de corrente (Moshayedi, 2014) e diminui para maiores valores de tempo, conforme também observado na **Figura 4-39**. Na **Tabela 4-19** os parâmetros (A), (B) e (C) e as interações (A*C) e (B*C) foram significantes em TR. Contrariamente ao observado por Colombo et al, 2019 a correlação de tensão com tamanho de grão não se manifestou para esta pesquisa.

Figura 4-39 - Efeito dos parâmetros na Tensão Residual.



Fonte: Autor

Para os valores de remanência M_r na **Figura 4-40**, os parâmetros (B) e (C) e as interações $(A * C)$ e $(B * C)$ foram significantes. Neste contexto, os autores Xu (2018) e Perevertov (2007) observaram que M_r é sensível a pressão. A **Tabela 4-19** a mostra que a influência da pressão (C) sobre M_r é inversamente proporcional. Assim, para maiores valores de pressão (C) , menor serão os níveis de M_r . Pela **Tabela 4-22**, a correlação de M_r com H_vMB e DF_{max} apresenta-se fraca e inversamente proporcional para ambas. Já a correlação de M_r com ZF ($P_{value}=0,097$) e H_vZTA ($P_{value}=0,067$) quase estão muito próximas da condição significativa.

Figura 4-40 - Efeito dos parâmetros no Campo Remanente - Mr

Gráfico de Efeitos Principais para Campo Remanente - Mr(emu/g) Médias Ajustadas

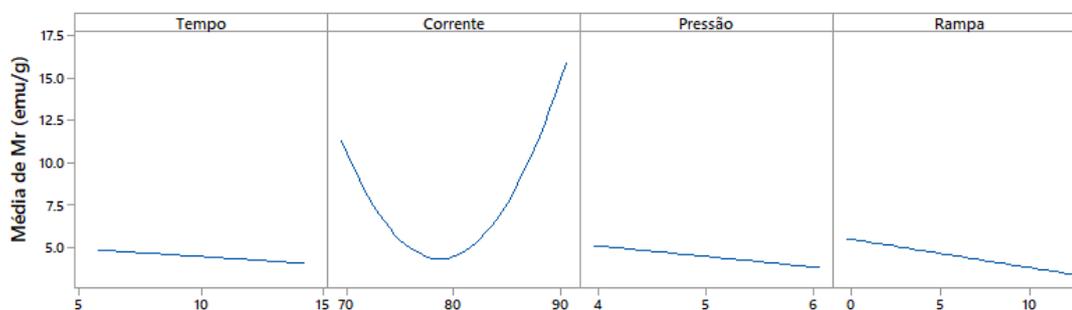
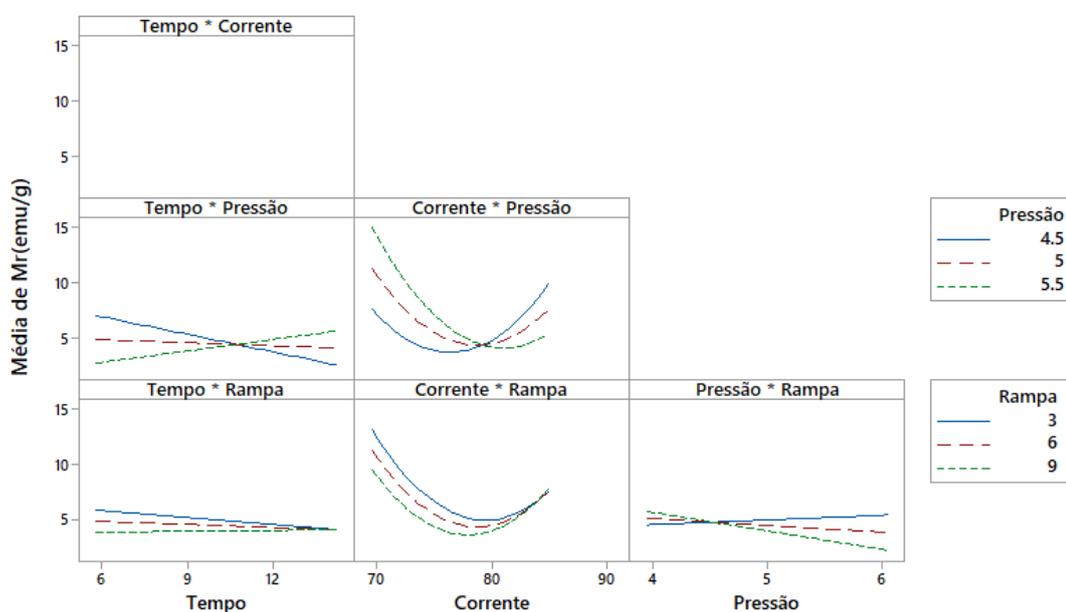


Gráfico de Interação para o Campo Remanente - Mr(emu/g) Médias Ajustadas



Fonte: Autor

Na saturação magnética máxima M_s na **Tabela 4-19**, os parâmetros (A) , (B) , (C) , (D) e as interações $(A*B)$, $(C*D)$ foram significantes. Contrariamente ao observado por Souza *et al.*, (2005), M_s neste modelo não apresentou influência significativa de (B) . Sua significância se manifestou na interação com o tempo $(A*B)$ em que para maiores valores de tempo e menores valores de corrente tem-se baixos níveis de M_s . Com relação a interação de $(C*D)$ para maiores valores de pressão e menores valores de rampa M_s aumenta conforme observado na **Figura 4-41**. Pela **Tabela 4-22** nota-se que M_s não apresentou nenhuma correlação com as outras respostas do experimento. Já a correlação de M_s com DF_{max} está próxima de ser significativa.

Figura 4-41 - Efeito dos parâmetros na magnetização de saturação - Ms

Gráfico de Efeitos Principais para Magnetização de Saturação - Ms (emu/g)
Médias Ajustadas

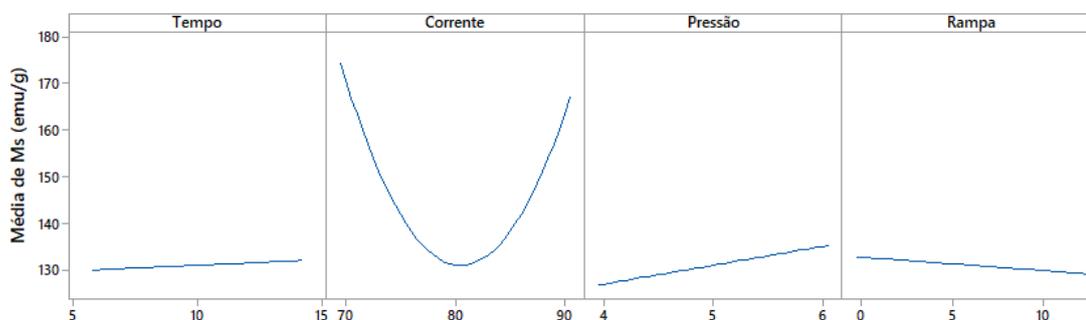
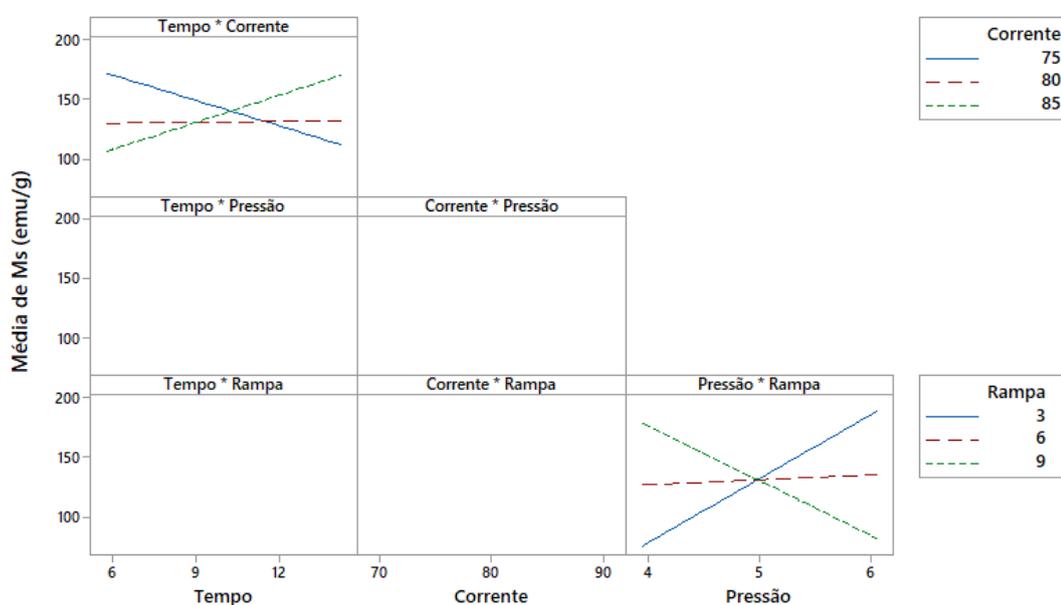


Gráfico de Interação para Magnetização de Saturação - Ms (emu/g)
Médias Ajustadas



Fonte: Autor

A permeabilidade PER conforme **Tabela 4-20**, mostrou significância para (A), (B), (C) sendo somente suas interações (A*C), (B*D) apresentaram significância. Quanto maior for os níveis dos valores de tempo e pressão menores serão os valores de PER, sendo inversamente proporcional a este último está a corrente conforme **Figura 4-42**. Maiores valores de rampa com menores valores de corrente tem-se um aumento da permeabilidade ao considerar a significância da interação (B*D). Pela **Tabela 4-22** nota-se que PER apresentou correlação fraca, mas inversamente proporcional com a DFmax.

Figura 4-42 - Efeito dos parâmetros na permeabilidade - PER

Gráfico de Efeitos Principais para Permeabilidade - PER (Adimensional) Médias Ajustadas

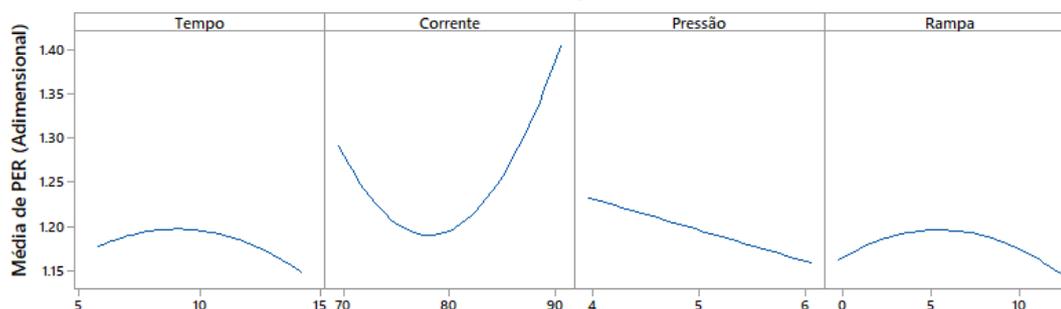
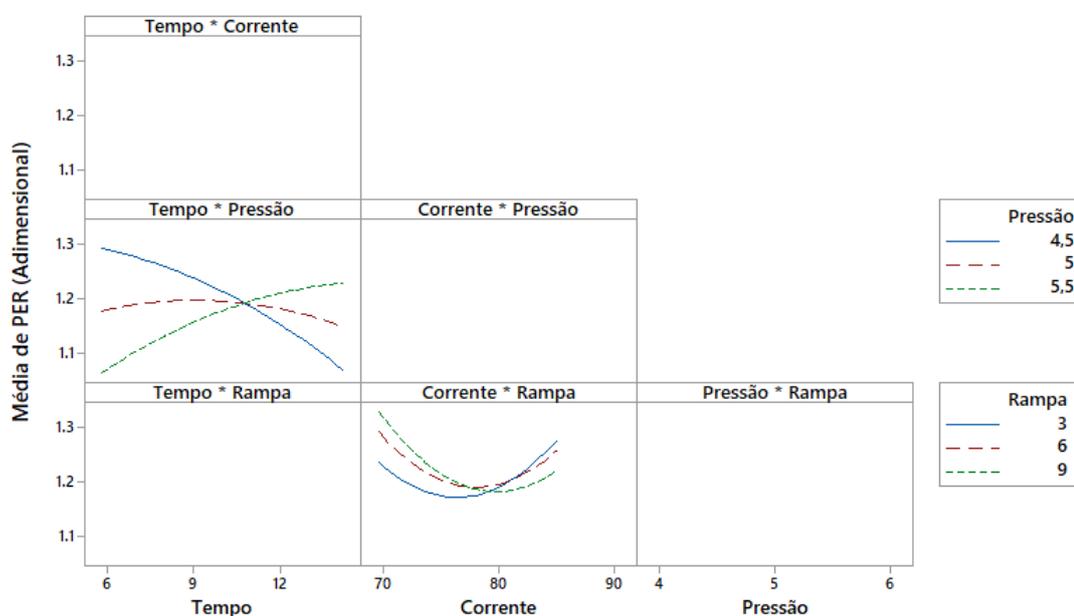


Gráfico de Interação para Permeabilidade - PER(Adimensional) Médias Ajustadas



Fonte: Autor

Para a área do laço da histerese A_h conforme **Tabela 4-20**, os parâmetros (B) e (C) e as interações $(A*C)$, $(B*C)$ e $(B*D)$ foram significativas. Neste sentido, quanto maior for a corrente maior será “ A_h ”, inversamente proporcional está a pressão conforme **Figura 4-43**. A significância do tempo (B) se manifestou juntamente a interação com pressão (C) e rampa (D) , em que, para um maior valor de tempo e um menor valor de pressão tem-se uma menor área do laço da histerese. A correlação de A_h com D_c mostra-se fraca, significativa e inversamente proporcional. Neste sentido, observa-se na **Tabela 4-22** que para um aumento da densidade há redução na área do laço da histerese.

Figura 4-43 - Efeito dos parâmetros sobre Área do Laço da Histerese - Ah
 Gráfico de Efeitos Principais para Área do Laço da Histerese - Ah (Adimensional)
 Médias Ajustadas

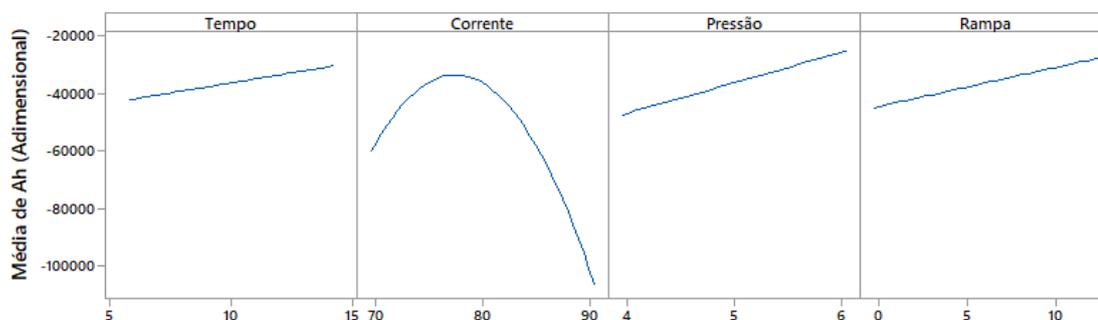
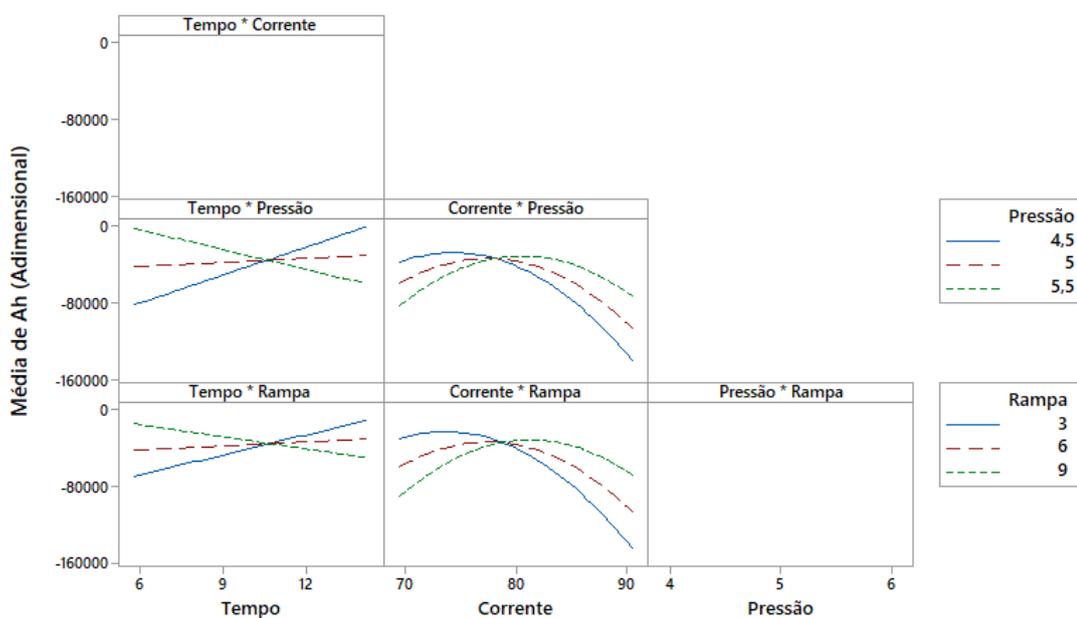


Gráfico de Interação para Área do Laço da Histerese - Ah (Adimensional)
 Médias Ajustadas



Fonte: Autor

A inclinação do laço da histerese representada por Inc conforme **Tabela 4-20**, para os parâmetros (A), (C) e suas interações ($A*C$) e ($C*D$) apresentaram significância. Para maiores valores de tempo e pressão menor será o nível de Inc conforme **Figura 4-44**. A significância de (D) se manifestou na interação com a pressão (C). Contudo, foi observado na **Tabela 4-22** que há correlação fraca e inversamente proporcional de Inc com HvMB. A correlação de Inc com HvZTA e DFmax está próxima de apresentar significante.

Figura 4-44 - Efeito dos parâmetros em inclinação do laço da histerese - Inc
 Gráfico de Efeitos Principais para Inclinação do Laço da Histerese - Inc(Adimensional)
 Médias Ajustadas

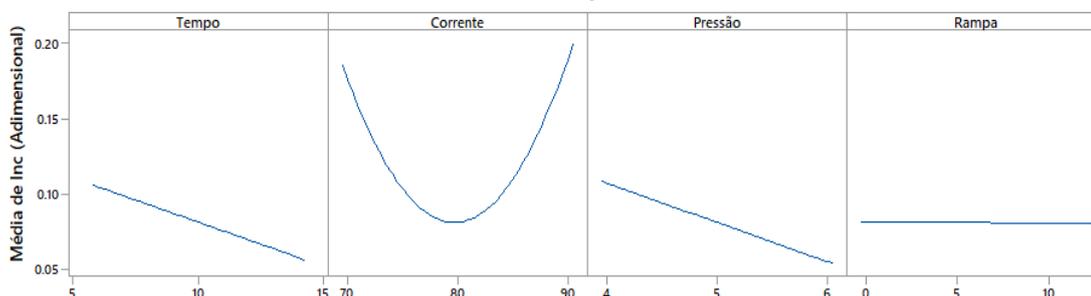
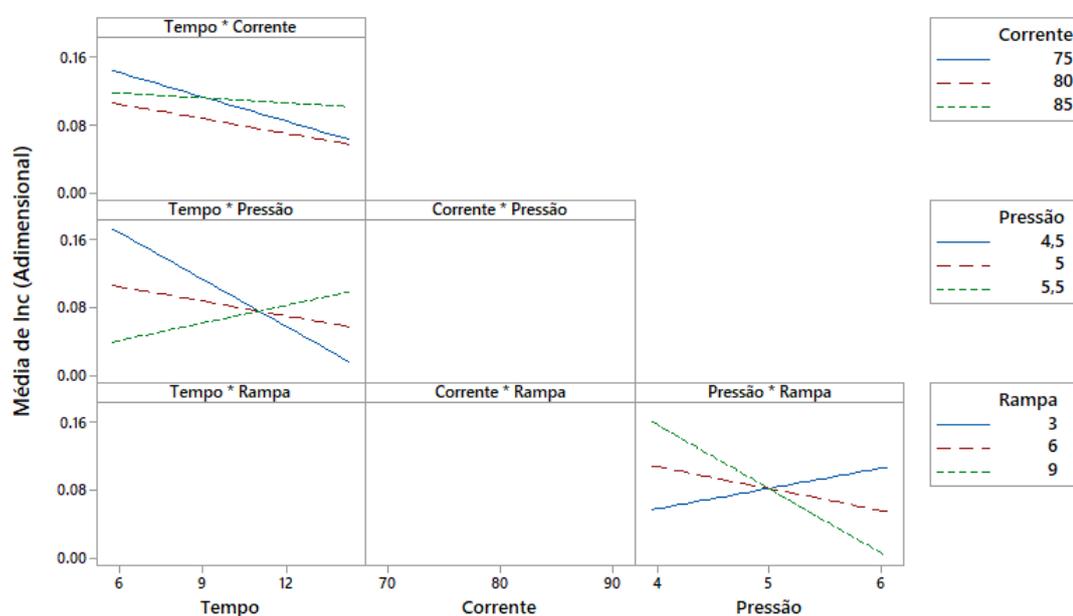


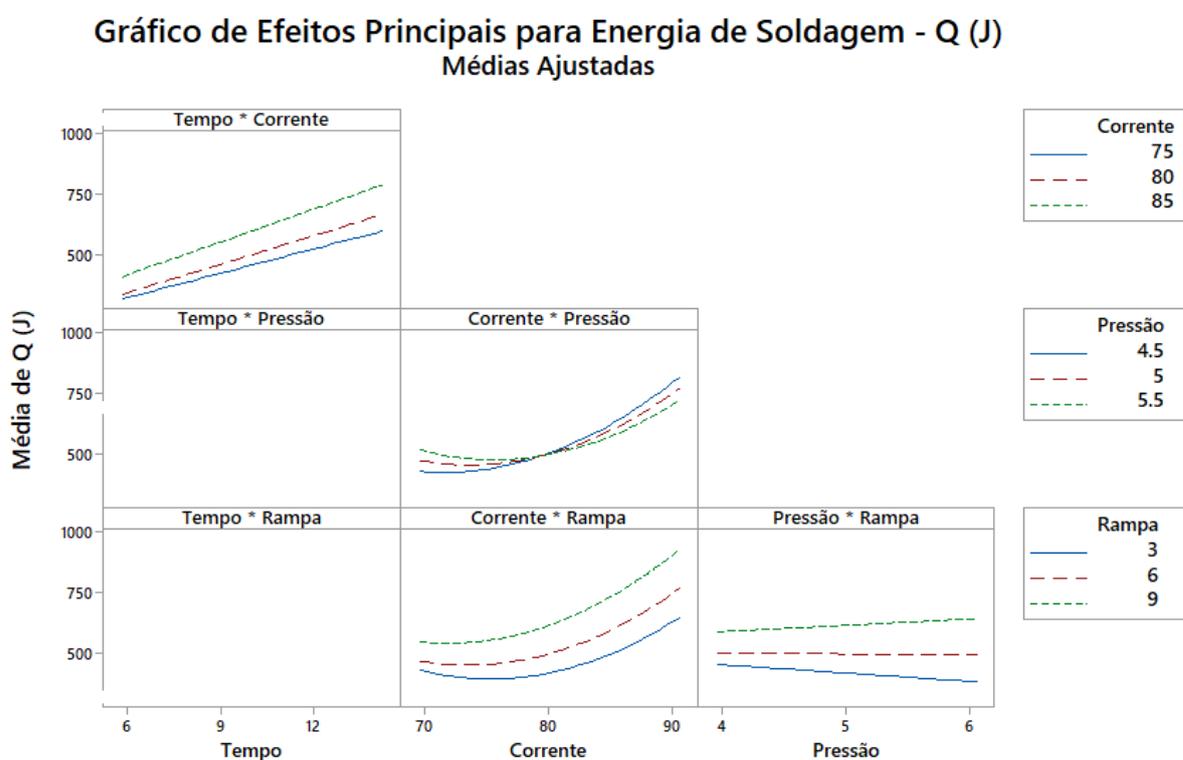
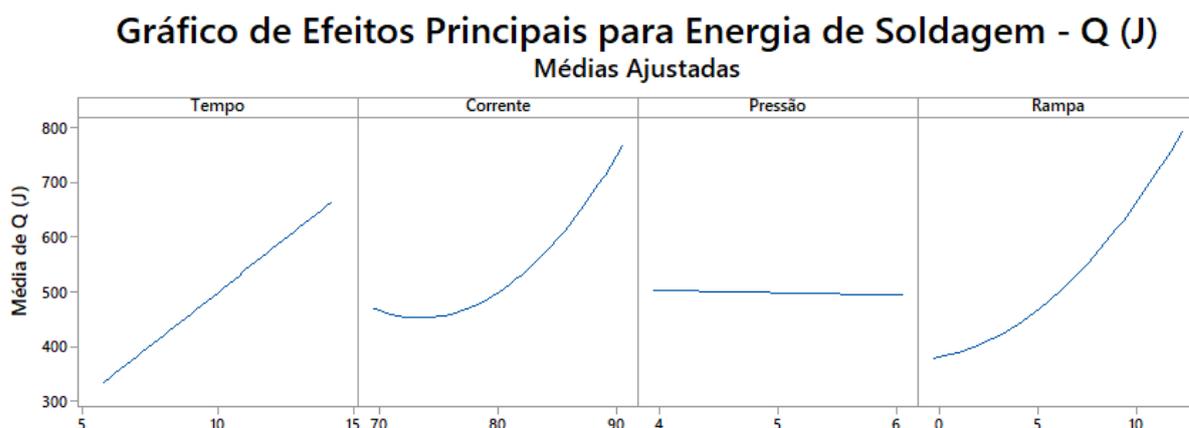
Gráfico de Interação para Inclinação do Laço da Histerese - Inc (Adimensional)
 Médias Ajustadas



Fonte: Autor

Os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a energia de soldagem Q revelam-se pela **Tabela 4-19**. Os parâmetros (A) , (B) , (D) e as interações $(A*B)$, $(B*D)$ e $(C*D)$ mostraram-se significantes. Neste sentido, para maiores valores de tempo, corrente, e rampa maiores serão os níveis de energia conforme **Figura 4-45**. A pressão apresenta significância somente na interação com a rampa. Pela **Tabela 4-22**, sua correlação se mostra significativa com F_{max} , D_c , L e H_c comprovando assim que o calor interfere nas propriedades magnéticas do material, além de aumentar a força máxima de ruptura da soldagem.

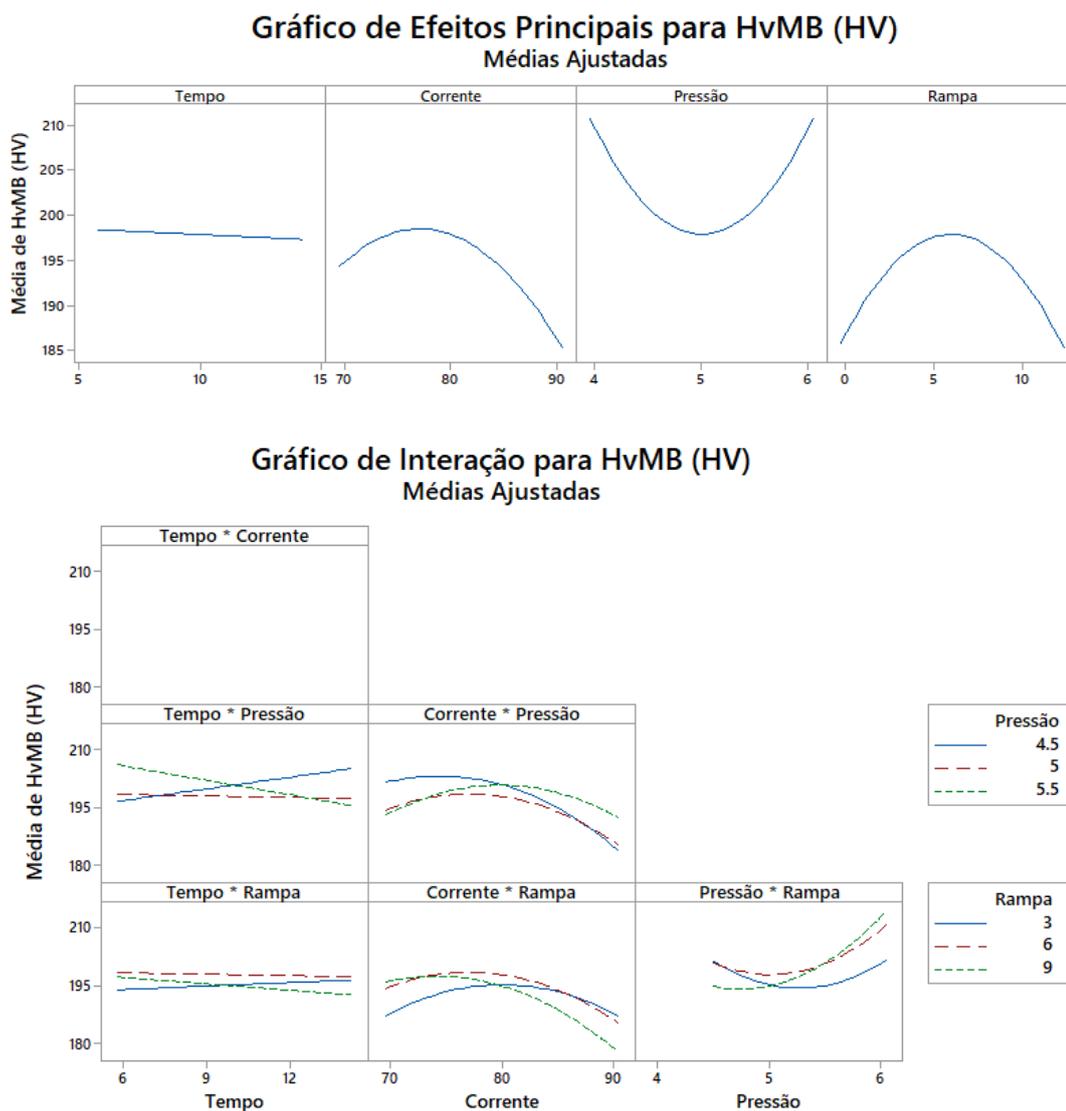
Figura 4-45 - Efeito dos parâmetros em Energia de Soldagem - Q



Fonte: Autor

Os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a micro dureza no metal base HvMB são apresentados pela **Tabela 4-21** onde somente a corrente (*B*) apresenta significância. Os parâmetros isolados de tempo (*A*), pressão (*C*) e rampa (*D*) apresentam significância somente quanto junto as interações (*A*C*), (*B*C*), (*B*D*), (*C*D*). Desta forma, maiores valores de (*B*) menor será o a dureza HV no metal base conforme **Figura 4-46**. Na **Tabela 4-22** HvMB, apresenta correlação com Dc, Mr, e Inc. HvMB também apresenta correlação com as propriedades magnéticas de acordo com a observação de Kwun (1987).

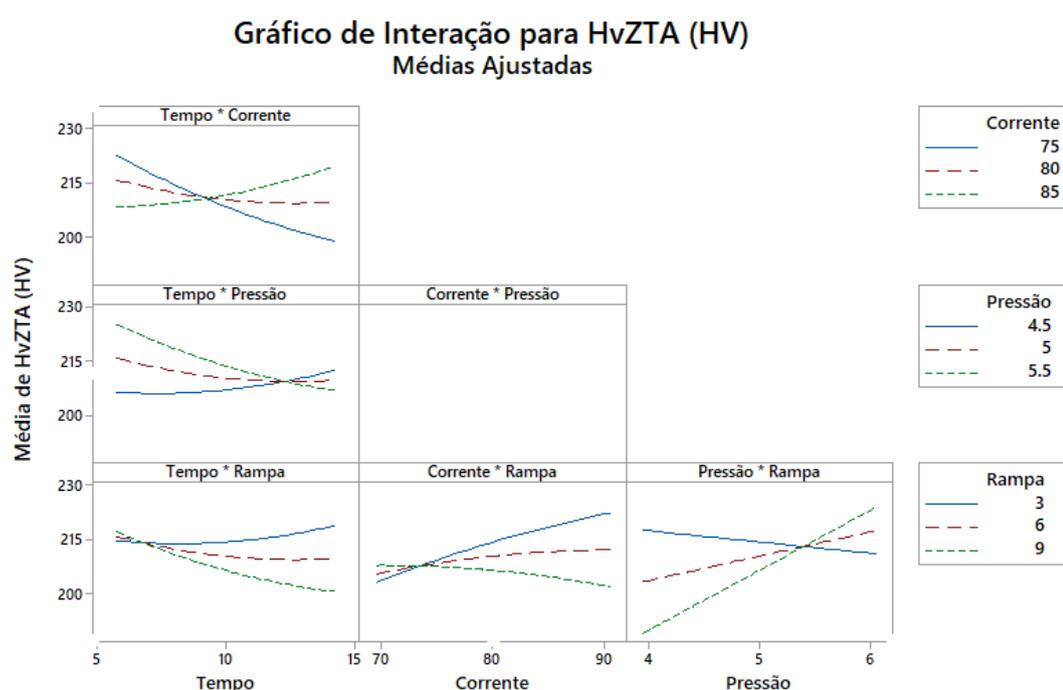
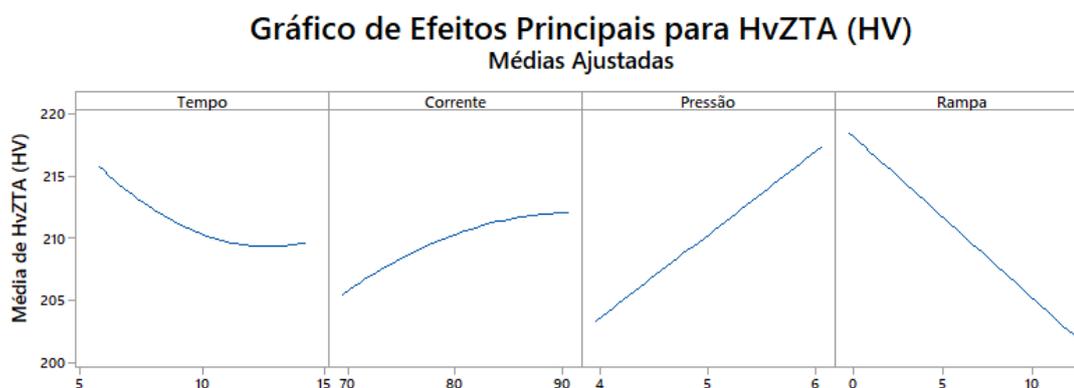
Figura 4-46 - Efeito dos parâmetros em dureza no metal base – HvMB



Fonte: Autor

A micro dureza na zona termicamente afetada HvZTA possui correlação próxima de apresentar uma significância com as respostas de Mr e Inc, conforme **Tabela 4-22**. Pela **Tabela 4-21** observa-se que, todos os parâmetros isolados incluindo as interações apresentam significância. Desta forma, os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre HvZTA podem ser observados pela **Figura 4-47**. Observa-se que para maiores níveis de (D) menor será a dureza HV sobre a ZTA da soldagem.

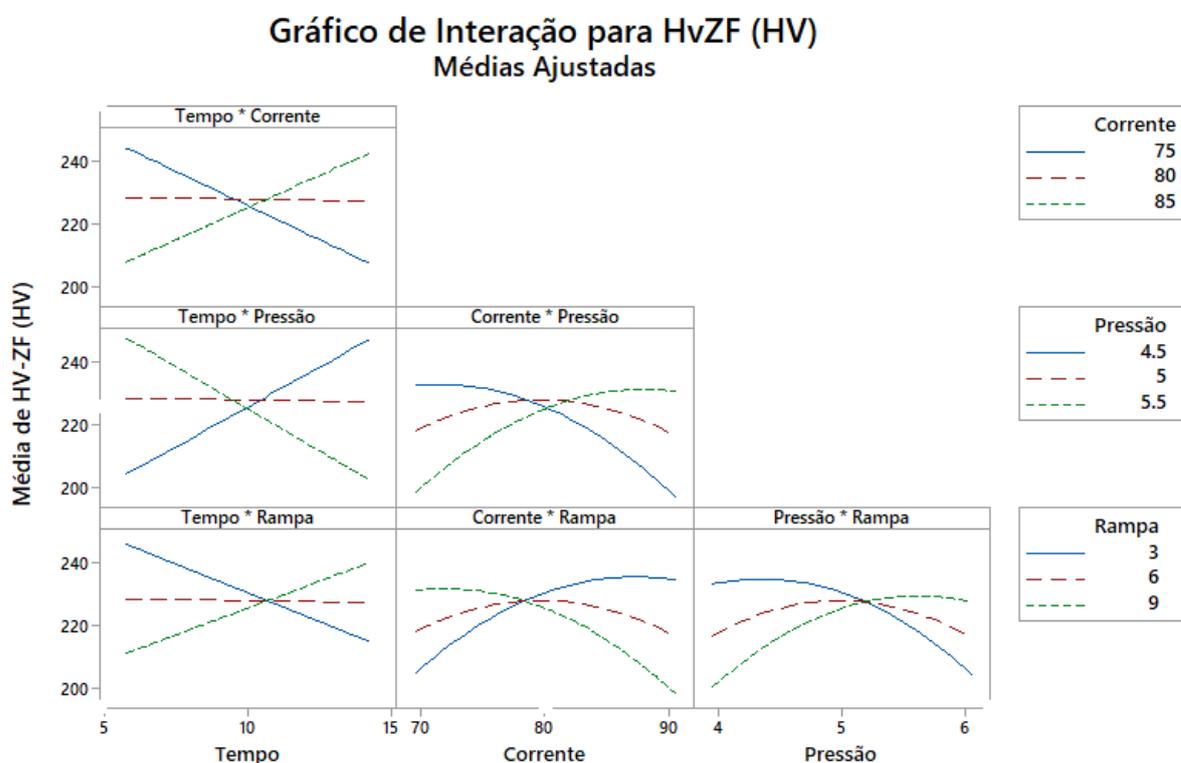
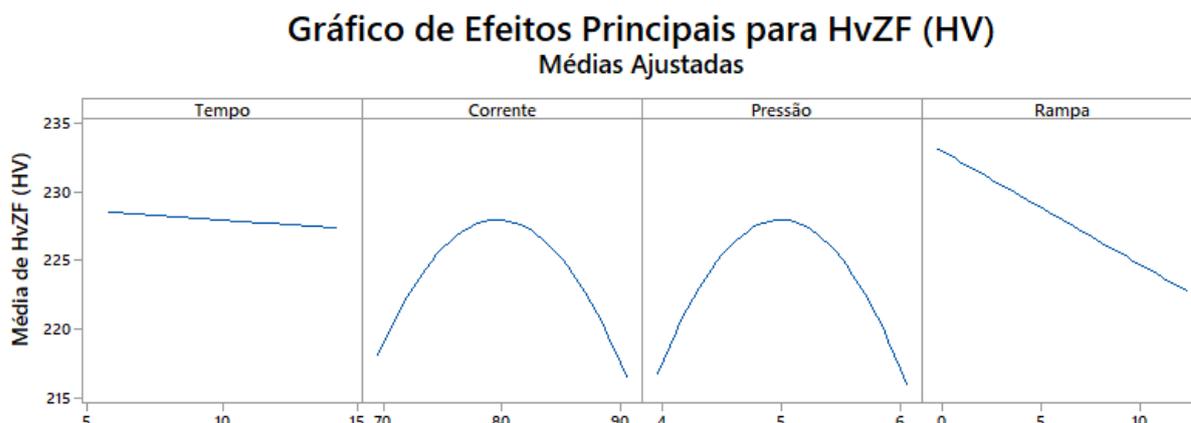
Figura 4-47 - Efeito dos parâmetros em dureza na zona termicamente afetada – HvZTA



Fonte: Autor

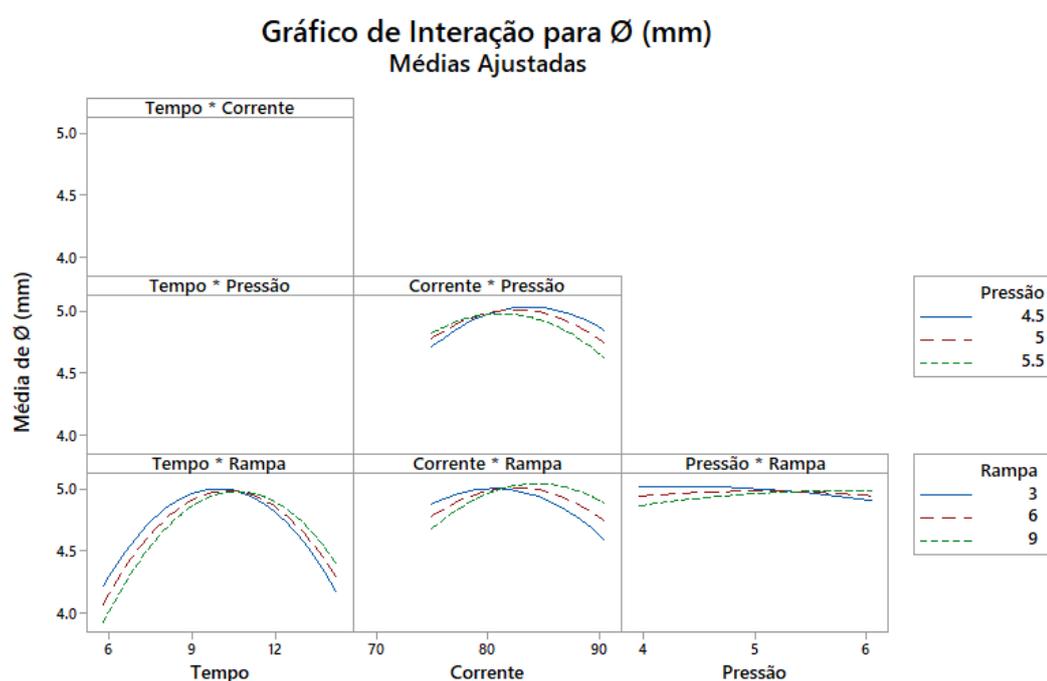
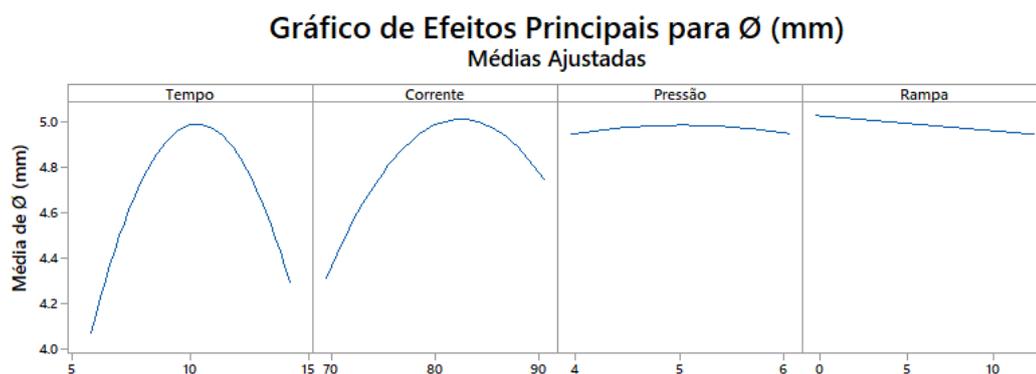
A micro dureza na zona fundida HvZF não possui correlação com nenhuma outra resposta. Por outro lado, sua correlação com Dc está próxima de apresentar significância conforme **Tabela 4-22**. Pela **Tabela 4-21** observa-se que somente a rampa (*D*) possui influência significativa sobre HvMB, por outro lado todas as interações são significantes. Na **Figura 4-48** a interação entre tempo e corrente (*A*B*) mostra que para uma corrente de 85% de I_{max} do equipamento de soldagem utilizado neste experimento ($I_{max}=6000A$) e um tempo de 15 ciclos, a microdureza aumenta. Por outro lado ao considerar uma corrente de 75% de I_{max} para o mesmo tempo, tem-se uma redução na microdureza.

Figura 4-48 - Efeito dos parâmetros em dureza na zona fundida – HvZF



Fonte: Autor

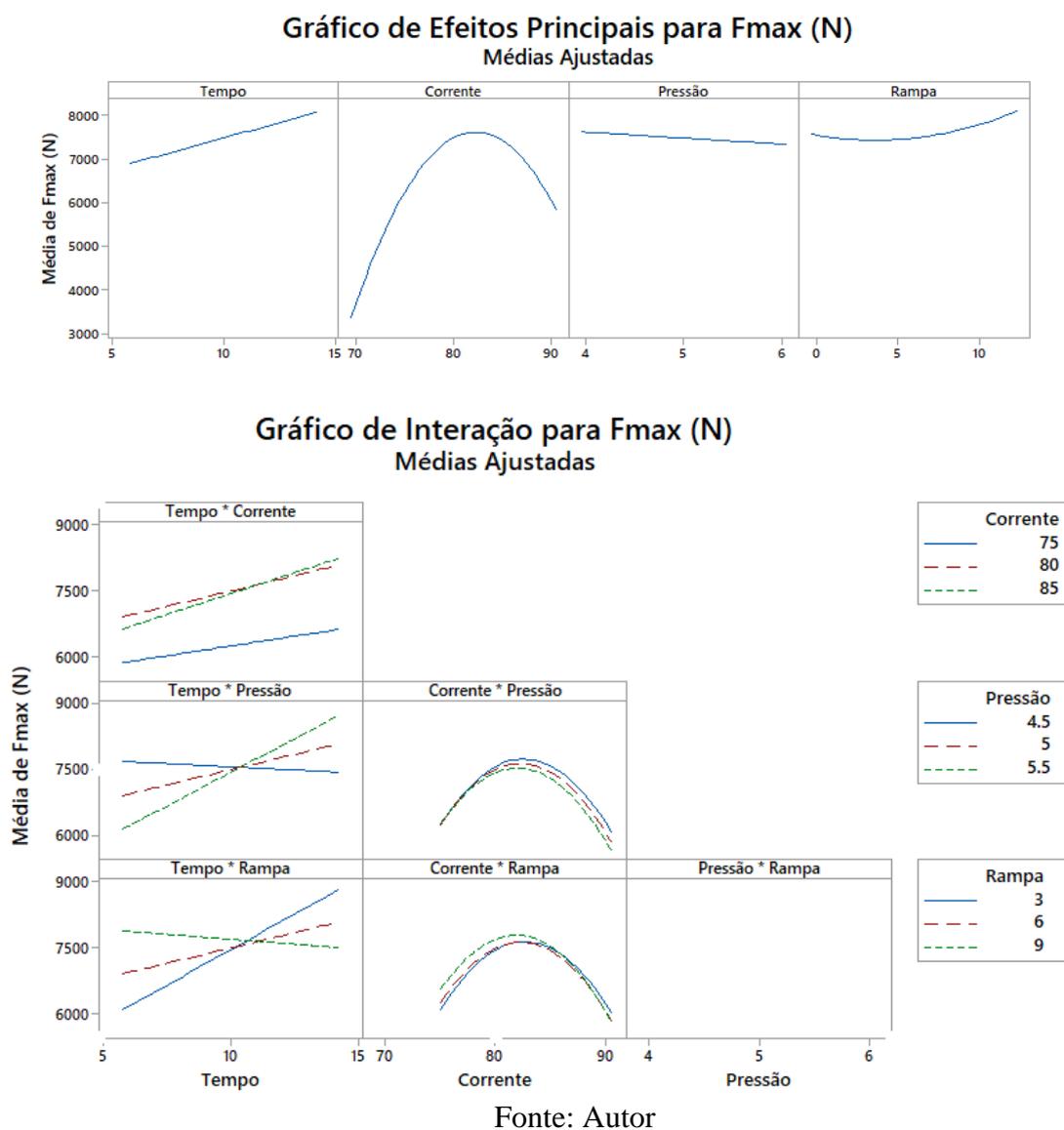
Foi observado na **Tabela 4-23**, que o diâmetro \emptyset da pepita de soldagem possui correlação com Hc e na **Tabela 4-22** com a ZTA, ambas fracas e inversamente proporcionais. Pela **Tabela 4-21** somente o tempo (A) e a corrente (B) apresentaram correlação significativa, as interações (A*D) e (B*D) também mostraram-se significativas. Os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre \emptyset são mostrados na **Figura 4-49**. Observa-se que em níveis médios de tempo e corrente obtêm-se os máximos valores de \emptyset da pepita de soldagem.

Figura 4-49 - Efeito dos parâmetros em diâmetro da pepita – \emptyset 

Fonte: Autor

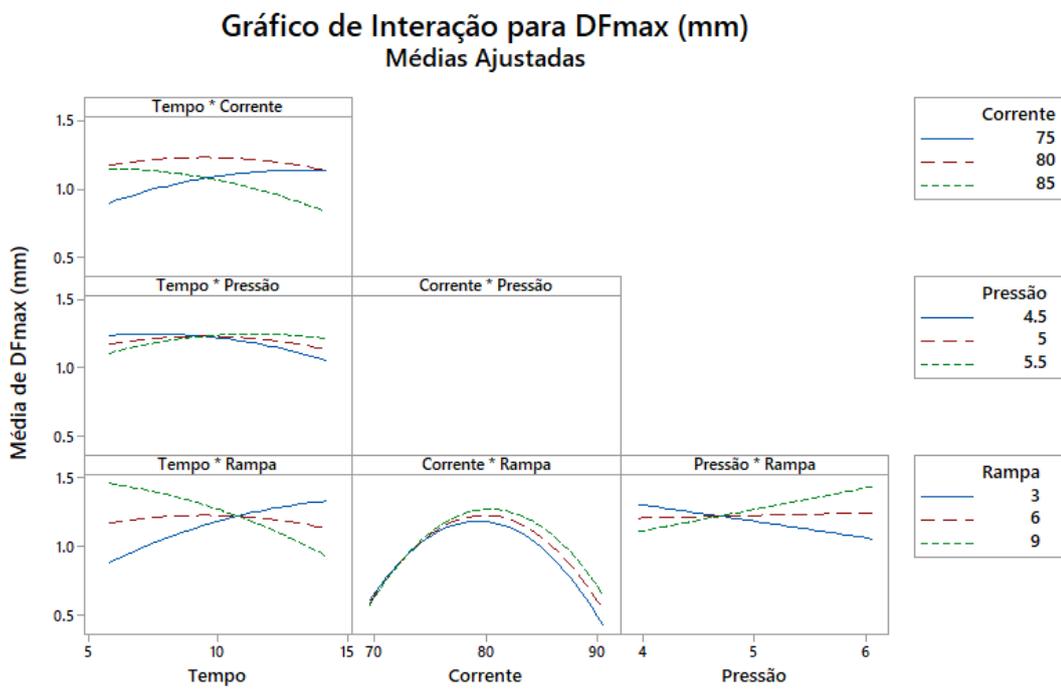
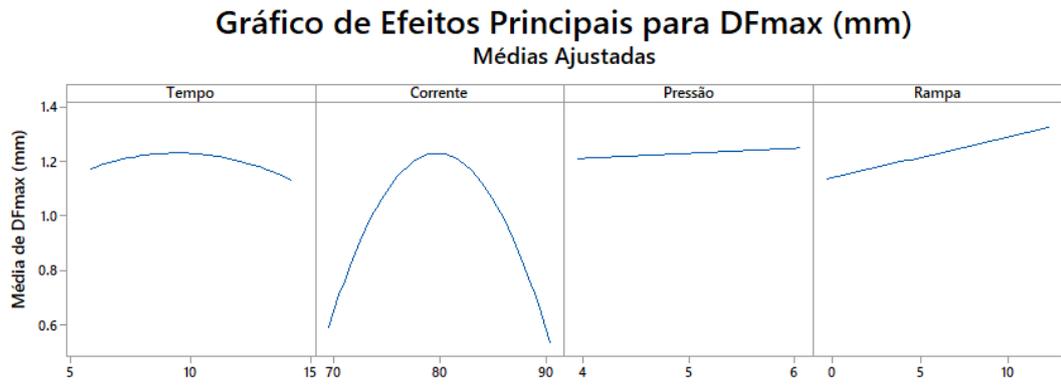
Na **Tabela 4-22** e **Tabela 4-23**, a força máxima de ruptura F_{max} apresenta correlação proporcional fraca mas significativa com L , H_c , Q e o tamanho de grão na ZTA, sendo somente esta última inversamente proporcional. Pela **Tabela 4-21** todos os parâmetros isolados bem como, todas as interações também apresentam significância com F_{max} . Desta forma, para níveis máximos de tempo (*A*) e rampa (*D*), níveis médios de corrente (*B*) e níveis mínimos de pressão (*C*), obtêm-se maiores de F_{max} conforme mostrados na **Figura 4-50**.

Figura 4-50 - Efeito dos parâmetros em força máxima de ruptura – Fmax.



Pela **Tabela 4-22** a deformação do material na força máxima DFmax apresenta correlação fraca mas significativa com Mr e PER e uma correlação perto de significativa com Ms e Inc. Na **Tabela 4-23** apresenta uma correlação próxima de significativa com o tamanho de grão na ZTA. Pela **Tabela 4-21**, observa-se que somente a rampa (*D*) possui influência significativa sobre DFmax, por outro lado todas as interações são significantes. Os valores máximos de (*D*) tendem a aumentar a deformação conforme **Figura 4-51**.

Figura 4-51 - Efeito dos parâmetros em deformação na força máxima de ruptura – DFmax.



Fonte: Autor

Capítulo 5

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões

- A influência da parametrização da soldagem RSW sobre:
 - O tamanho de grão:
 - O tempo apresentou influência significativa para as respostas de MB e ZTA. A corrente para MB e ZF. A pressão e a rampa apresentaram influência para MB, ZTA e ZF.
 - As propriedades magnéticas:
 - O tempo apresentou influência significativa para Hc, PER e Inc. A corrente para Hc, Mr, PER e Ah. A pressão para Mr, PER, Ah e Inc. Por último a rampa apresenta influência significativa somente para Hc.
 - Com relação as respostas Q, L, Dc e TR o tempo e a corrente apresentaram-se significativos. A pressão somente para L e TR. A Rampa somente para Q e L.
 - Com relação a dureza HvZTA, o tempo, a corrente, a pressão e a rampa mostraram-se significativos. Por outro lado, em HvMB somente a corrente e em HvZF somente a rampa apresentaram influência significativa.

- O tempo, a corrente, a pressão e a rampa também apresentaram influência significativa na F_{max} . Somente tempo e corrente apresentaram significância para o \emptyset da pepita de soldagem e a rampa para D_{fmax} .
- Ao considerar a influência significativa da rampa de descida da corrente de soldagem sobre o campo coercivo H_c observa-se que, para níveis de rampa menores tem-se uma redução de H_c além de um refinamento dos grãos em MB e também na ZTA. Desta forma, pode-se dizer que a rampa de descida da corrente de soldagem pode ser usada com intuito de desmagnetizar o aço AISI 444 durante a soldagem RSW.
- As correlações entre respostas apresentaram-se de forma fraca mas significantes. Neste contexto, L apresenta correlação com Q e F_{max} . A energia de soldagem Q apresentou correlação com F_{max} , D_c , L e H_c . Os tamanhos de grãos MB, e ZF não apresentaram correlação com nenhuma resposta, com exceção para ZTA que tem correlação inversamente proporcional com \emptyset e F_{max} . Mesmo sendo a ZTA uma zona crítica na geometria do ponto soldado o refinamento de grãos nesta região não aumenta a F_{max} na soldagem RSW do aço AISI 444. A tensão residual TR não apresentou correlação com nenhuma resposta. Com relação as propriedades magnéticas observa-se que H_c apresentou correlação com Q , F_{max} e \emptyset sendo este último inversamente proporcional. M_r apresenta correlação inversamente proporcional com H_vMB e D_{fmax} . PER apresenta correlação inversamente proporcional com D_{fmax} . Por último Inc apresenta correlação inversamente proporcional com H_vMB .

5.2. Sugestão de Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, ficam as seguintes considerações:

- Utilizar métodos de simulação por elementos finitos para simular a soldagem no aço AISI 444 e desta forma confrontar os dados medidos e previstos de energia de soldagem e tensão residual.
- Estender a metodologia desenvolvida neste trabalho para outros tipos de aços inoxidáveis.
- Utilizar o sinal de deslocamento do eletrodo como monitoramento on line de propriedades magnéticas, tensão residual e tamanho de grãos aceitável.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ACELORMITTAL<<http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>> Acesso em: 04/08/2019.

AKITA, M.; NAKAJIMA, M.; UEMATSU, Y.; TOKAJI, K. Effects of Annealing and Quenching on Fatigue Behaviour in Type 444 Ferritic Stainless Steel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Japan, 2008.

ALISADEH, M.; POURANVARI, M.; MARASHI, S. P. H. Welding metallurgy of stainless steels during resistance spot welding Part II: heat affected zone and mechanical performance. *Science and Technology of Welding and Joining*. No. 6, vol. 20, pp.512-521, 2015.

AMARAL, F. F. Monitoramento da Qualidade na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Galvanizadas Baseado em Análise de Experimentos, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 72p., 2011.

ANTUNES, P. D.; CORREA, E. D.; BARBOSA, R. P.; NASCIMENTO, A. Influência do Metal de Adição na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas do Aço Inoxidável Ferrítico AISI 444. VI CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande – Paraíba - Brasil, 2010.

APERAM<<http://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/A-solução-perfeita-para-o-desenvolvimento-sustentável.pdf>>Acesso em: 04/08/2019.

APERAM SOUTH AMERICA. Laboratório de Corrosão e Superfície. Relatório. Timóteo-MG, 2018.

ASSDA - Australian Stainless Steel Development Association. <<http://www.assda.asn.au/images/PDFs/FAQs/FAQ3.pdf> >Acesso em: 04/08/2019

ASM SPECIALITY HANDBOOK. “Stainless Steel Materials Park”. American Society for Materials, 1994.

ASM HANDBOOK: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International, vol. 2, 1990.

ASTM E384. Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, 2011, DOI: 10.1520/E0384-11E01, www.astm.org.

ASTM E112-10, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org.

AWS. Welding Handbook. Miami: American Welding Society, v.4, p. 233-332, 1998.

AWS/SAE D8.9M. Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials. Florida: American Welding Society, 2002.

BADDOO, N. R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, pp. 1199–1206, 2008.

BALDIM, A.C. Análise do Efeito da Eliminação da Camada de Zinco na Qualidade da Solda a Ponto em Chapas de Aços Galvanizados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. 112 p., 2014.

BINA, M.H.; JAMALI, M.; SHAMANIAN, M.; SABET, H. Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel. *Int J Adv Manuf Technol*.vol.75, pp. 1371-1379.2014.

BINA, M.H.; JAMALI, M.; SHAMANIAN, M.; SABET, H. Effect of Welding Time in the Resistance Spot Welded Dissimilar Stainless Steels. *Trans Indian Inst Met*.vol.68, no.2, pp. 247-255.2015.

BRACARENSE, A. Q. & ROGANA, W. G. Fixadores e Posicionadores para Soldagem Robotizada. *Revista Soldagem e Inspeção, ABS, Belo Horizonte*, v.6, nos. 2 e 3, pp.23-26, 2000.

BRANCO, H. L. O. Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem de Chapas Galvanizadas na Indústria Automobilística. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, 116p, 2004.

CAMPOS M. F. de; Tensões residuais em aços avaliadas por difração de raios X: Diferença entre micro e macro tensões residuais. III Workshop sobre Textura, São Paulo – SP, 2006.

CARBÓ M. H. “Aços inoxidáveis: aplicações e especificações”, ArcelorMittal, 2011.

CINDRA FONSECA, M. P., “Evolução do Estado de Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Tubulação Durante Ciclos de Fadiga”, Dissertação de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, 2000.

CIÊNCIAHOJE<<http://www.cienciahoje.org.br/coluna/histerese-magnetica-perdas-e-ganhos/>> Acesso em: 04/08/2019.

COLOMBO, T.C.A.; REGO, R.R.; OTUBO, J.; FARIA, A.R. Mechanical reability of TWIP steel spot welding's. *Journal of Materials Processing Tech.*, vol 266, pp.662-674, 2019.

COSTA, A. F. B; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. Controle Estatístico de Qualidade. São Paulo. Editora: Atlas. pp. 334, 2004.

CULLITY, B. D.; GRAHAM. C. D. Introduction to Magnetic Materials. 2 ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2009. 544p.

CHUNTÃO, J. & LIPENG, D. Quality Control Based on Electrode Displacement and Force in Resistance Spot Welding. School of Materials Science and Engineering, v.5, no. 4, pp. 412-416, June, 2010.

FENG, J. C. ;WANG Y. R.;ZHANG Z. D. Nugget growth characteristic for AZ31B magnesium alloy during resistance spot welding. Science and Technology of Welding and Joining, no. 2, vol 11, pp 154-162, 2006.

FETTER, J.G., IVANS, V., BENDITT, D.G., COLLINS, J. Digital cellular telephone interaction with implantable cardioverter-defibrillators. J. Am. Coll. Cardiol. Vol.31, No.3, pp.623–628, 1998.

FITZPATRICK, M. E.; FRY, A. T.; HOLDWAY, P.; KANDIL, F. A.; SHACKLETON, J.; SUOMINEN, L., “Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2”, Measurement Good Practice Guide No. 52, Crown, 2005.

FURLANETTO, V., Desenvolvimento e Instrumentação de um Cabeçote de Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica para Aplicação em Condições Industriais, Tese de Doutorado, USP, 2014.

GARDNER, L.; INSAUSTI, A.; NG, K.T., ASHRAF, M. Elevated temperature material properties of stainless steel alloys. Journal of Constructional Steel Research. vol.66, pp. 634–647, 2010.

GEDEON, S.A. & EAGAR, T. W. Resistance Spot Welding of Galvanized Steel, Part I: Material Variations and Process Modifications. Metallurgical Transactions B, v.17b, p.885, 1986.

GONÇALVES CN, MODENESI PJ, ESTEVES L, CAMPOS WRC. Avaliação da adição de Ti, Nb e (Ti+Nb) na microestrutura e susceptibilidade à sensitização de aços inoxidáveis ferríticos submetidos à soldagem TIG. Soldagem & Inspeção. 2019; 24:e2410.

GORDON W, BENNEKOM AV. Review of stabilization of ferritic stainless steels. Materials Science and Technology. 1996;12(2):126-131.

GUIMARÃES, R. F. Avaliação do Desempenho da Soldagem do Aço AISI 444 em Aplicações de Revestimento de Torres De Destilação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, 61 p., 2004.

HUANG, X., WANG. D., YANG, Y. Effect of precipitation on intergranular corrosion resistance of 430 ferritic stainless steel. Journal of Iron and Steel Research, International. v.22, n.11, p.1062-1068, 2015.

ISSF<<http://www.worldstainless.org/statistics>>Acesso em: 05/09/2019.

IFSC<<http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/lavfiswp/flutuacao-estatistica/tabela-qui-quadrado/>>Acesso em: 15/09/19.

Indústria de Material Bélico do Brasil – IMBEL. Departamento de Qualidade. Relatório. Itajubá, 2018.

ISO / DIS 14373. Welding Resistance Spot Welds: Procedure for Spot Welding of Uncoated and Coated Low Carbon and High Strength Steels. *International Standard Organization*, Genebra, October, 2004.

IYOTA, M.; MOCHIZUKI, M. Effects of Welding Condition on Controlling the Residual Stress in Resistance Spot Welds, *Welding Society Proceedings*, Vol. 31, No. 4, pp.-158-162, 2013.

JOU, M. Real Time Monitoring Weld Quality of Resistance Spot Welding for the Fabrication of Sheet Metal Assemblies. *Journal of Materials Processing Technology*, v.132, no. 1-3, pp.102-113, 2003.

KANDIL, F.A.; LORD, J.D.; FRY, A.T.; GRANT, P.V., “A Review of Residual Stress Measurement Methods”, United Kingdom, 2001.

KARCI, F.; KAÇAR, R.; GÜNDOZ, S. The effect of process parameter on the properties of spot welded cold deformed AISI 304 grade austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, no.209; pp. 4011-4019, 2009.

KHANNA, S.K.; LONG, X. Residual stresses in resistance spot welded steel joints. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 13, No. 3, PP.278-288, 2008.

KOCABEKIR, B.; KAÇAR, R.; GÜNDOZ, S.; HAYAT, F. An effect of heat input, weld atmosphere and weld cooling conditions on the resistance spot weldability of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, no.195; pp. 327-335, 2008.

KWUN, H., & BURKHARDT, G.L. Effects of Grain Size, Hardness, and Stress on the Magnetic Hysteresis Loops of Ferromagnetic Steels. *J Appl Phys*, v.61, número.4, February, pp.1-4, 1987.

LI, Y.B.; WEI, Z.Y.; LI, Y. T.; SHEN, Q.; LIN, Z.Q. Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 65, pp. 400–408, 2013.

LIPPOLD, J.C. & KOTECKI, D.J. “Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels”. John Willey & Sons, 356 p., 2005.

MA, C.; BHOLE, S. D.; CHEN, D. L.; LEE, A.; BIRO, E.; BOUDREAU, G. Expulsion Monitoring in Spot Welded Advanced High Strength Automotive Steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 11, no. 4, p.486, 2006.

MADEIRA, R.P. Comunicação pessoal. 2008. (Assistência Técnica Aços Inoxidáveis ArcelorMittal, São Paulo, SP).

MACHERAUCH, E.; KLOOS, K. H., “Origin, Measurement and Evaluation of Residual Stresses”, Proceeding of the International Conference on Residual Stresses, Ed. By Macherlauch, E., Hauk, V., DGM Verlag, pp.3-26, 1987.

MAKAR, J.M; TANNER, B.K. The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Vol. 222, pp. 291-304, 2000.

MARTIN,O.; LOPEZ, M.; TIEDRA, P.; JUAN, M.S. Prediction of magnetic interference from resistance spot welding processes on implantable cardioverter-defibrillator. Journal of Materials Processing Technology, vol. 206, pp. 256–262, 2008.

MALHEIRO, V. N.; SPEAR, R. L. BROOKS, R. A.; MARKAKI, A. E. Osteoblast and monocyte responses to 444 ferritic stainless steel intended for a Magneto-Mechanically Actuated Fibrous Scaffold. Biomaterials vol. 32, pp. 6883 – 6892, 2011.

MBN 10 382. Resistance Spot Welding of Steel, Thickness up to 3mm. Mercedes-Benz, no. 37, 20p, 2005.

MEYER, N.; MANTEL, M.; DUBOIS, P.E.; VERON, M.; BRECHET, Y.; GEOFFROY, O. Influence of Nb stabilization on the recovery and recrystallization kinetics of a ferritic stainless steel with soft magnetic properties for automotive applications. R. Esc. Minas, Ouro Preto, vol. 66, no.2, pp. 159-163,2013.

MODENESI, P.J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. São Paulo, SENAISP, 2001.p.21

MOREIRA, E.B. “Soldagem de Estruturas Pesadas de Aço Inoxidável Ferrítico”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, 106p, 2009.

MOSHAYEDI, H.; SATTARI-FAR, I. Resistance spot welding and the effects of welding time and current on residual stresses. Journal of Materials Processing Technology, vol. 214, pp. 2545–2552, 2014.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 7 ed. New York: John Wiley & Sons, 665 p, 2009.

NASCIMENTO V. C. Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseado na medição da resistência elétrica entre chapas. Dissertação de mestrado. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia; 2008.

NEWBOLD, P. Statistics for Business & Economics. 4th ed. United States of America: Prentice Hall, 1994.

OLIVEIRA, L. G.; PAIVA, A. P.; CAMPOS, P. H. S.; PAIVA, E. J.; BALESTRASSI, P. P. Prediction capability of Pareto optimal solutions: A multi-criteria optimization strategy based on model capability ratios. Precision Engineering. vol. 59, pp. 185-210, 2019^a.

OLIVEIRA, L. G.; PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P.; FERREIRA, J. R.; COSTA, S. S.; CAMPOS, P. H. S. Response surface methodology for advanced

manufacturing technology optimization: theoretical fundamentals, practical guidelines, and survey literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. pp. 1-53, 2019^b.

POURANVARI, M.; ALIZADEH-SH, M.; MARASHI, S. P. H. Welding metallurgy of stainless steels during resistance spot welding Part I: fusion zone. *Science and Technology of Welding and Joining*. No. 6, vol. 20, pp.502-511, 2015.

PODRZAJ, P.; POLAJNAR, I.; DIACI, J.; KARIZ, Z. Overview of Resistance Spot Welding Control. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.13, no. 3, pp. 215-224, 2008.

PEREVERTOV, O. Influence of the residual stress on the magnetization process in mild steel. *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol. 40, pp. 949-954, 2007

SAMPAIO, D. J. B. S. Automação do Monitoramento da Qualidade do Processo de Solda a Ponto Resistiva, Tese de Doutorado, USP, 2010.

SANTOS, F. B. S. Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizada na Indústria Automotiva. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 104p, 2006.

SHANMUGAM, K.; LAKSHMINARAYANAN, A.K.; BALASUBRAMANIAN, V. Tensile and Impact Properties of Shielded Metal Arc Welded AISI 409M Ferritic Stainless Steel Joints. *J Mater Sci Technol.*, Vol.25, No.2, PP.181-186, 2009.

SILVA, E. M. Estudo da Correlação entre o Aporte Térmico, as Propriedades Magnéticas e a Corrosão sob Tensão em Juntas Soldadas de Aço Inoxidável Ferrítico AISI-409, Tese (Doutorado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 187p, 2011.

SOUZA, J.A.; ABREU, H.F.G.; NASCIMENTO, A.M.; PAIVA, J.A.C.; NETO, P.L.; TAVARES, S.M. Effects of Low-Temperature Aging on AISI 444 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol.14, no. 3, pp. 367-372, 2005.

STAINLESS STEEL. ASM International, 1994. Materials Park, Ohio. P 5-20, 146, 176-178.

SUBRAMMANIAN, A.; JABARAJ, D.B; RAJA, V.K.B. Mechanical Properties and Microstructure of Resistance Spot Welded Joints of AISI 409M Ferritic Stainless Steel. *Trans Indian Inst Met.* vol.69, no.3, pp.767-774, 2016.

TAN, W. *et al.* A study of dynamic resistance during small scale resistance spot welding of thin Ni sheets. *Journal of Physics D: Applied Physics*. n 37, pp.1998-2008, 2004.

TANG H., HOU W., HU S. J., ZHANG H.Y., FENG Z., KIMCHI M., Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality, *Welding Journal* 117S, 2003.

TAVARES, S.S.M.; SOUSA, J.A.; HERCULANO, L.F.G. ABREU, H.F.G.; SOUZA Jr., C.M.J. Microstructural, magnetic and mechanical property changes in an AISI 444 stainless steel aged in the 560 °C to 800 °C range. *Materials Characterization*. Vol. 59, pp. 112-116, 2008.

TAVARES, S.S.M.; PARDAL, J.M.; ABREU, H.F.G. Tensile Properties of Duplex UNS S32205 and Lean Duplex UNS S32304 Steels and the Influence of Short Duration 475 °C Aging. *Materials Research*. Vol.15, pp. 859-864, 2012.

THAKUR, A. G.; NANDEDKAR, V. M. Application of Taguchi method to determine resistance spot welding conditions of austenitic stainless steel AISI 304. *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 69, pp. 680-683, 2010.

THAMM, S.; HESSE, J. The remanence of a Stoner—Wohlfarth particle ensemble as a function of the demagnetisation process. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 184, pp. 245-255, 1998.

TSENG, K. H.; CHUANG, K. J. Monitoring Nugget Size of Micro Resistance Spot Welding (Micro RSW) using Electrode Displacement-Time Curve. *Advanced Materials Research*. Vols. 463-464, pp. 107-111.2012.

VARGAS, J. E. Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, 143 p., Universidade de Brasília, 2006.

VARGAS, J. E.; ALFARO, S. C. A.; VILARINHO, L. O. Avaliação das Características Geométricas e de Propriedades Mecânicas do Ponto na Soldagem por Resistência Via Planejamento Robusto. *Soldagem & Inspeção*, v.12, no. 4, pp.262-268, Out/Dez, 2007.

VASHISTA, M.; PAUL, S. Correlation between surface integrity of ground medium carbon steel with Barkhausen Noise parameters and magnetic hysteresis loop characteristics. *Materials and Design* 30 (2009) 1595–1603.

VOURNA, P.; HERVOCHES, C.; VRÁNA, M.; KTENA, A.; HRISTOFOROU, E. Correlation of Magnetic Properties and Residual Stress Distribution Monitored by X-Ray and Neutron Diffraction in Welded AISI 1008 Steel Sheets. *IEE Transactions on Magnetics*, vol.51, no.1, 2015.

VILLAFUERTE, J.C. & KERR, H.W. “Phase Transformations in Stainless Steel Weld Metal and Heat-Affected Zones”. *Key Engineering Materials*, v.69&70, pp.841-854, 1992.

VILLARES METALS<<http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Inoxidaveis/Ferriticos>>Acesso em: 14/01/2016

XU, C.; LIU, X.; XUE, F.; LI, Y.; QIAN, W.; YU, M. Characterization of magnetic properties in a 316 stainless steel after deformation and irradiation. *Fusion Engineering and Design*, vol 133, pp. 125-129, 2018.

WEI, P.S.; WU, T.H. Electrode geometry effects on microstructure determined by heat transfer and solidification rate during resistance spot welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.79, pp.408-416, 2014.

WEINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. *Soldagem: Processos e Metalurgia*. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1992.

YOSHINO M., TANABE H., SAKAMOTO T., SUZUKI N., YAJI Y. Nondestructive measurement of grain size in steel plates by using magnetic coercive force. *Mater Sci Forum*. pp. 210–213, 1996.

ZHANG H., SENKARA J., *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*, Second Edition, CRC Press, 2006.

7. PUBLICAÇÕES REALIZADAS

SILVA, M.R.; BALDIM, A.C.; COSTA, S.C.; MENDONÇA, C.S.P.; SANTOS, M.R.; RIBEIRO, V.A.S. The Welding Power of Influence About Residual Stress as Magnetic Properties of Steel AISI 444 During the RSW Process. X Escola Brasileira de Magnetismo, Belém, PA, Brasil, Junho 2016.

X ESCOLA BRASILEIRA DE MAGNETISMO

CERTIFICADO

O comitê organizador certifica que o trabalho intitulado “**The welding power of influence about residual stress as magnetic properties of steel aisi 444 during the rsw process**“, de autoria de *Manoel Ribeiro da Silva, Adriano Cássio Baldim, Sebastião Carlos da Costa, Claudiney de Sales Pereira Mendonça, Marcos Cirilo dos Santos e Vander Alkmin dos Santos Ribeiro* foi apresentado como pôster por *Manoel Ribeiro da Silva* durante a **X Escola Brasileira de Magnetismo (X EBM)**, realizada de 30 de maio à 3 de junho de 2016 na Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

Ângela Klautau
Ângela B. Klautau
 Coordenadora da X EBM



BALDIM, A.C.; COSTA, S.C; SILVA, M.R.; MENDONÇA, C. S. P.; SANTOS, M.C.; SILVA, G.; RIBEIRO, V.A.S. Influência da Energia de Soldagem do Processo RSW sobre as Propriedades Magnéticas e Tensões Residuais no Aço AISI 444. *Soldagem & Inspeção*, vol. 23, no. 1, pp. 43-51, 2018.

Soldagem & Inspeção. 2018;23(1):43-51
<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2301.05>
 ISSN 1980-6973 (Online)
 ISSN 0104-9224 (Print)

Artigos Técnicos

Influência da Energia de Soldagem do Processo RSW sobre as Propriedades Magnéticas e Tensões Residuais no Aço AISI 444

Adriano Cássio Baldim¹, Sebastião Carlos da Costa², Manoel Ribeiro da Silva³, Claudiney de Sales Pereira Mendonça⁴, Marcos Cirilo dos Santos⁵, Gilbert Silva⁶, Vander Alkmin dos Santos Ribeiro¹

¹ Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Engenharia Mecânica/Laboratório de Soldagem, Itajubá, MG, Brasil.

Recebido: 22 Out., 2017
 Aceito: 14 Mar., 2018

E-mails: adriano_baldim@yahoo.com.br (ACB), sccosta@unifei.edu.br (SCC), mrsilva@unifei.edu.br (MRS), claudiney.sales@unifei.edu.br (CSPM), marcos.cirilo@unifei.edu.br (MCS), gilbert@unifei.edu.br (GS), vanderalkmin@gmail.com (VASR)

Resumo: Os aços inoxidáveis ferríticos vêm ganhando cada vez mais espaço na indústria, devido principalmente a sua grande durabilidade e aplicabilidade. Nos últimos anos, o crescente avanço tecnológico da indústria metal mecânica, possibilitou o desenvolvimento de novas ligas e processos de soldagem deste metal. Em meio a estes processos, a soldagem por resistência tem sido muito utilizada por possibilitar rapidez com custo baixo. Muito embora existam poucas informações disponíveis na literatura, é reconhecido que a união pela mescla da atuação simultânea de calor e deformação, presentes no processo de soldagem por resistência, podem interferir diretamente nas propriedades magnéticas e mecânicas dos aços inoxidáveis ferríticos. Assim, uma avaliação destas características em produtos manufaturados torna-se importante em determinados setores industriais, notadamente nos de equipamentos eletrônicos e metrológicos. O objetivo desse artigo é a observação das tensões residuais e propriedades magnéticas em diferentes níveis de energia de soldagem e deformação no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica em chapas de aço AISI 444. Os resultados mostraram que a energia de soldagem e deformação afetam as propriedades magnéticas, por outro lado não existe influência substancial na tensão residual.

Palavras-chave: Aço inoxidável ferrítico; Energia de soldagem; Tensão residual; Propriedades magnéticas; Soldagem a ponto por resistência.

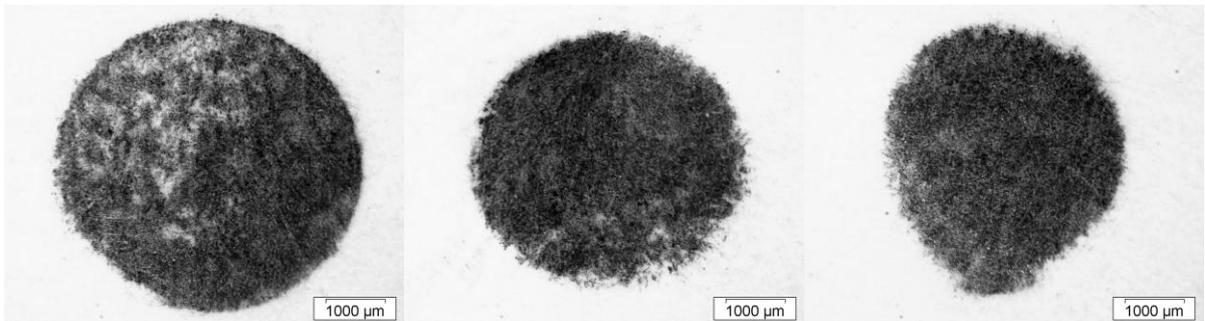
The Influence of the Welding Energy on the Residual Stress and Magnetic Properties of Steel AISI 444 Welded by the RSW Process

Abstract: Ferritic stainless steel has been gaining space in the industry, due mainly to its durability and applicability. In recent years, the growing technological advances of the metalworking industry, enabled the development of new alloys and welding processes of this metal. In the midst of these processes, resistance spot welding has been largely used due to the very short process time with low cost. Although there is a lack of available information in the literature, the union of materials by the mixture of the simultaneous action of heat and deformation, present in the resistance spot welding, can affects the mechanical and magnetic properties directly of ferritic stainless steels. Thus, an evaluation of these characteristics in manufactured products becomes important in certain industrial sectors, especially in electronic and metrological equipment. The main objective of this article is the observation of residual stresses and magnetic properties at different levels of welding energy and deformation in the resistance spot welding process steel AISI 444. The results showed that welding and deformation energy affect magnetic properties, on the other hand there is no substantial influence on the residual stress.

Key-words: Ferritic stainless steel; Welding energy; Residual stresses; Magnetic properties; Resistance spot welding.

8. ANEXOS

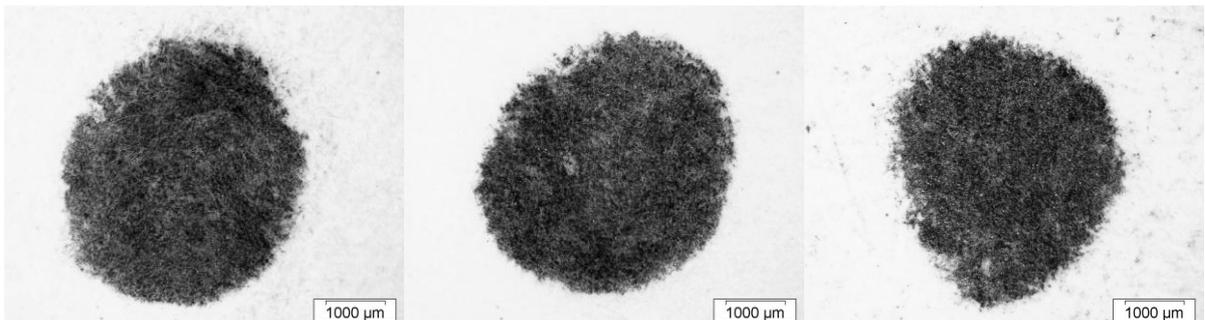
Imagem das áreas dos pontos soldados.



Corpo de prova 1

Corpo de prova 2

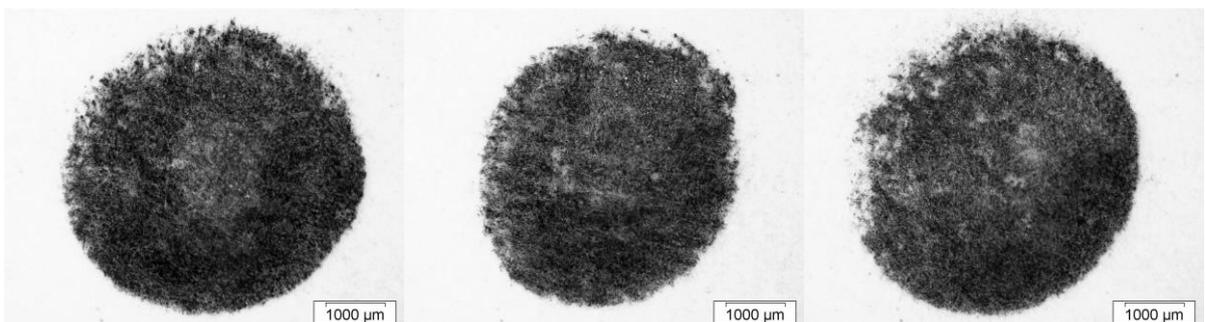
Corpo de prova 3



Corpo de prova 4

Corpo de prova 5

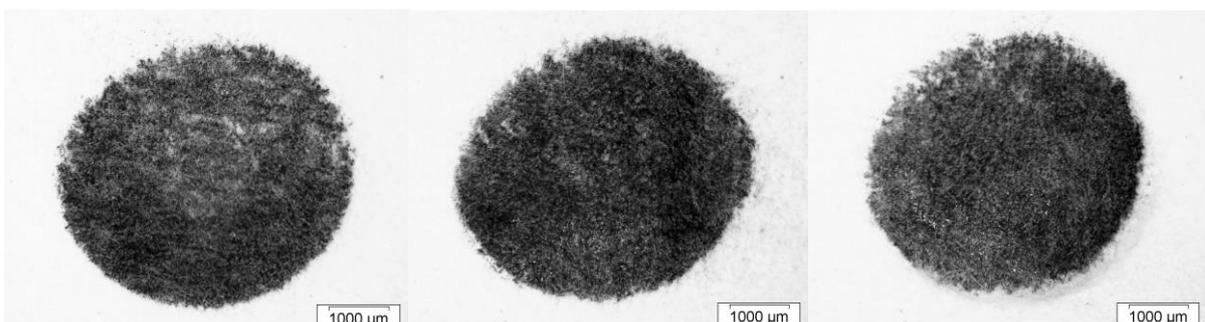
Corpo de prova 6



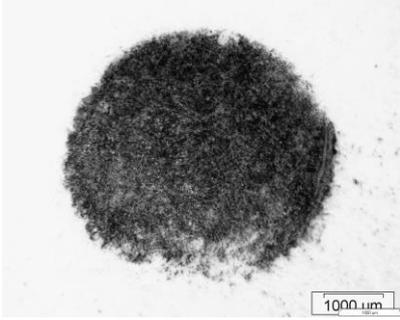
Corpo de prova 7

Corpo de prova 8

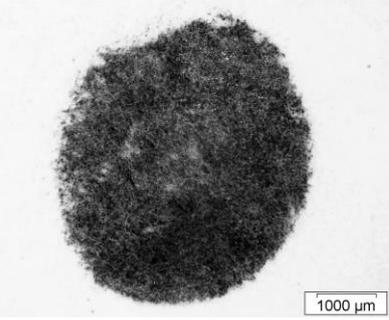
Corpo de prova 9



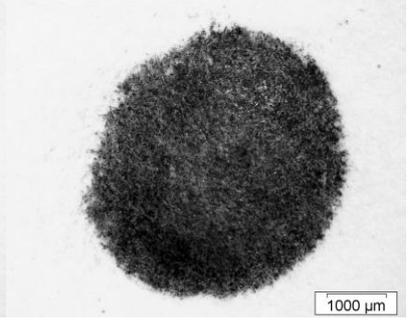
Corpo de prova 10



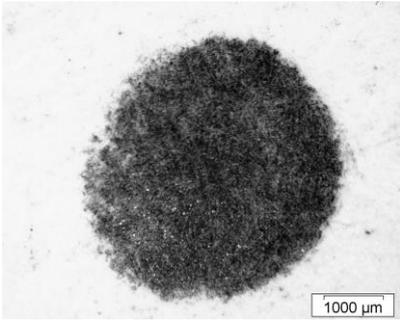
Corpo de prova 11



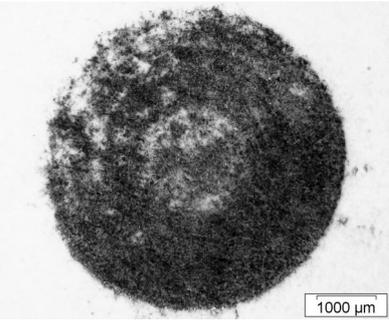
Corpo de prova 12



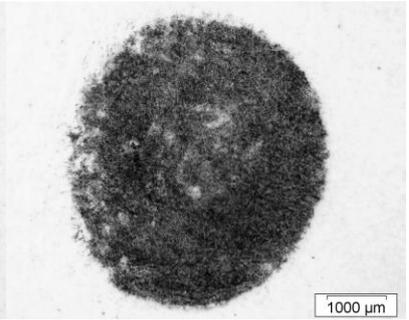
Corpo de prova 13



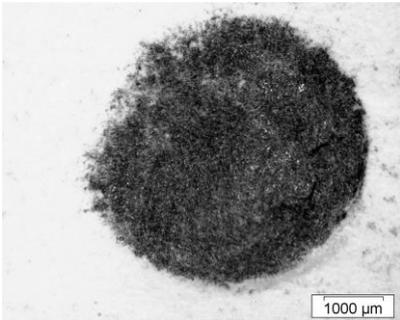
Corpo de prova 14



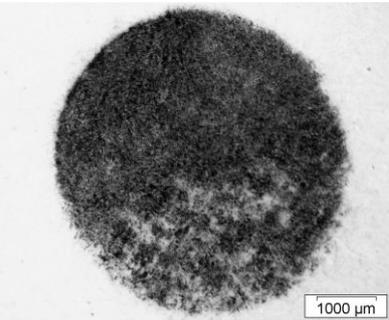
Corpo de prova 15



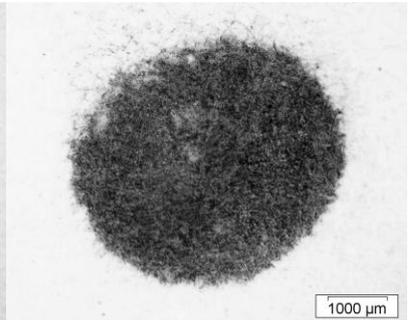
Corpo de prova 16



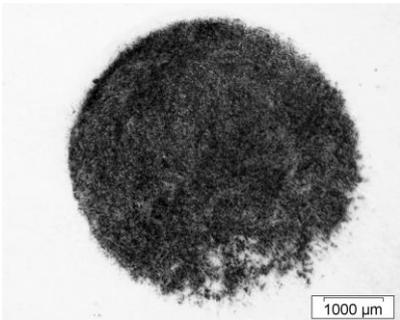
Corpo de prova 17



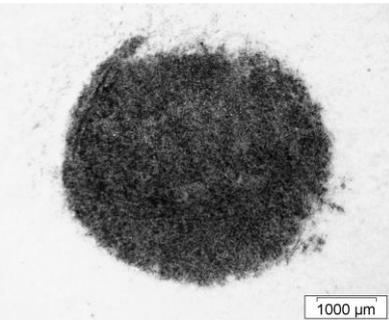
Corpo de prova 18



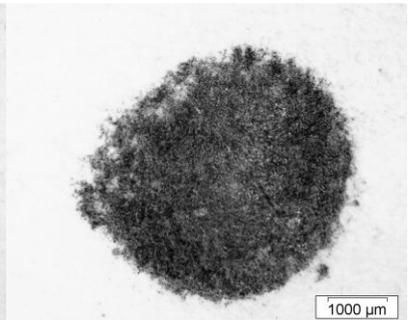
Corpo de prova 19



Corpo de prova 20



Corpo de prova 21



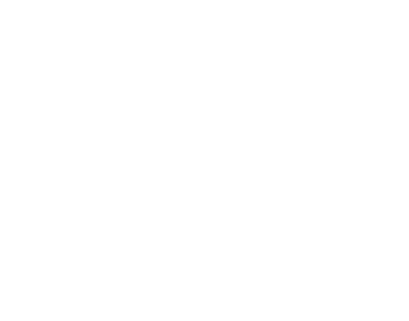
Corpo de prova 22

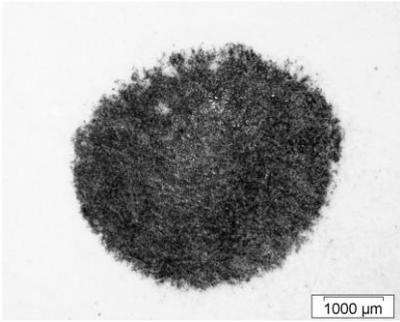


Corposde prova 23

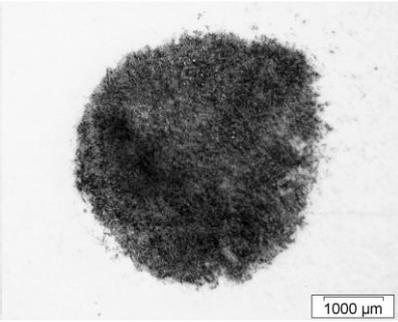


Corpo de prova 24

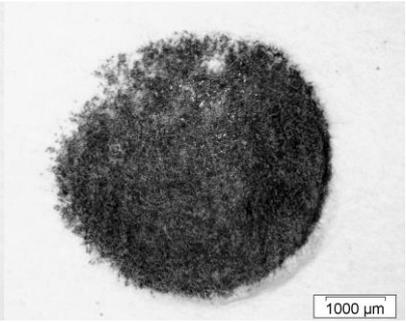




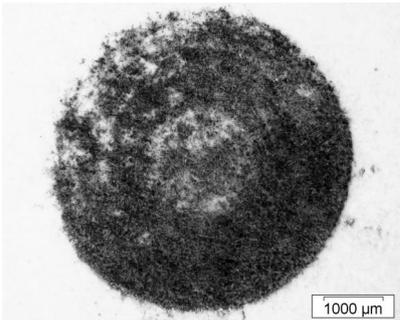
Corpo de prova 25



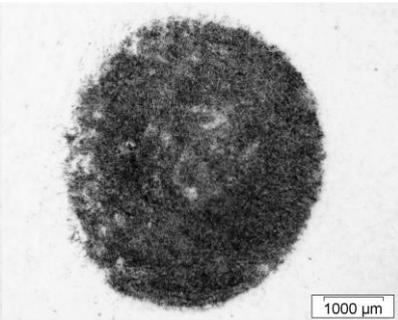
Corpo de prova 26



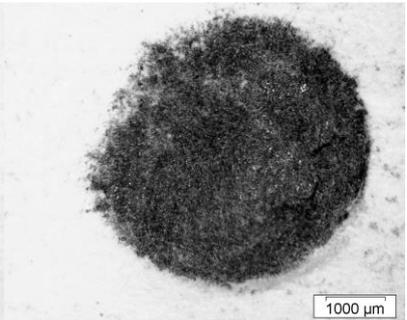
Corpo de prova 27



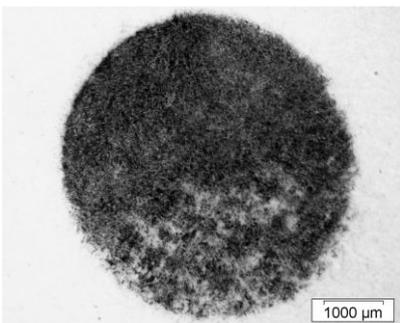
Corpo de prova 28



Corpo de prova 29



Corpo de prova 30



Corpo de prova 31

Tabela 8-1 – Respostas coletadas mas não analisadas na tese.

| <i>Cp</i> | | <i>H</i> | <i>Ae</i> | <i>E</i> |
|-----------|----|-------------|-----------------------|----------|
| | | Gaus | mm² | |
| 1 | 1 | -7956,4049 | 19,4118 | 2 |
| 2 | 1 | -9107,2514 | 15,3240 | 2 |
| 3 | 1 | -7217,6908 | 13,7715 | 2 |
| 4 | 1 | -8864,5920 | 14,2725 | 1 |
| 5 | 1 | -7366,6884 | 14,4170 | 1 |
| 6 | 1 | -8233,5855 | 13,0880 | 2 |
| 7 | 1 | -8967,5580 | 18,8473 | 1 |
| 8 | 1 | -9028,0087 | 16,0334 | 1 |
| 9 | 1 | -7484,6609 | 18,0459 | 1 |
| 10 | 1 | -8941,9694 | 16,8932 | 1 |
| 11 | 1 | -8642,6894 | 17,0530 | 1 |
| 12 | 1 | -8662,7123 | 15,8527 | 2 |
| 13 | 1 | -8911,1007 | 14,4765 | 2 |
| 14 | 1 | -8584,1990 | 16,2109 | 1 |
| 15 | 1 | -8806,7843 | 15,6537 | 1 |
| 16 | 1 | -8947,4102 | 14,7242 | 2 |
| 17 | -1 | -8716,1573 | 18,5547 | 1 |
| 18 | -1 | -9091,0705 | 16,6776 | 1 |
| 19 | -1 | -7760,3867 | 13,7600 | 2 |
| 20 | -1 | -9228,5480 | 14,1258 | 2 |
| 21 | -1 | -8424,3045 | 14,7759 | 1 |
| 22 | -1 | -8354,7811 | 17,9105 | 2 |
| 23 | -1 | -8876,9745 | 14,9592 | 1 |
| 24 | -1 | -9032,5363 | 14,3244 | 2 |
| 25 | 0 | -8787,2870 | 13,9830 | 1 |
| 26 | 0 | -9134,7917 | 14,0423 | 2 |
| 27 | 0 | -7225,6523 | 15,9520 | 2 |
| 28 | 0 | -8686,3887 | 19,6132 | 1 |
| 29 | 0 | -8556,6245 | 16,5933 | 1 |
| 30 | 0 | -8270,7571 | 16,4936 | 2 |
| 31 | 0 | -8500,9461 | 19,7253 | 2 |

Pontos: 1=fatoriais, -1=axiais, 0=centrais. H=campo magnético aplicado para máximo de Ms.
Ae = área da ponta do eletrodo. E=número do eletrodo utilizado na soldagem.