VALDIR FURLANETTO

DESENVOLVIMENTO E INSTRUMENTAÇÃO DE
UM CABEÇOTE DE SOLDAGEM A PONTO POR
RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA APLICAÇÃO EM
CONDIÇÕES INDUSTRIAIS

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Ciências Mecânicas

São Paulo
2014

VALDIR FURLANETTO

DESENVOLVIMENTO E INSTRUMENTAÇÃO DE
UM CABEÇOTE DE SOLDAGEM A PONTO POR
RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA APLICAÇÃO EM
CONDIÇÕES INDUSTRIAIS

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Ciências Mecânicas

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica de Projeto e
Fabricação

Orientador:
Professor Doutor
Gilmar Ferreira Batalha

São Paulo
2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo,   de setembro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Furlanetto, Valdir

Desenvolvimento e instrumentação de um cabeçote de solda a ponto por resistência elétrica para aplicação em condições industriais / V. Furlanetto. -- versão corr. -- São Paulo, 2014. 280 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Soldagem por ponto 2.Instrumentação de sistemas 3.Manufatura 4.Qualidade do processo (Monitoramento) 5.Montagem do produto I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

DEDICATÓRIA

A meus pais, Joaquim e Maria, meus primeiros e maiores exemplos de dedicação na luta por uma vida digna, honrada e trabalhadora. Pessoas simples, mas que, com seu amor, incentivo e paciência souberam orientar-me para poder chegar até aqui.

As minhas amadas; minha esposa Neli e minhas filhas Karen e Erika, pela paciência, muita paciência, pelas horas tiradas do convívio familiar, pelo apoio e incentivo com muito amor e dedicação, além da compreensão pelo que isto significa para mim e de quão sacrificante está sendo esta fase de minha vida.

Ao professor que se tornou meu amigo, Gilmar, que me fez chegar até aqui com dedicação, amor, paciência e principalmente muita sabedoria e conhecimento e me mostrou que, apesar de tudo, eu ainda podia contribuir e ser útil para a engenharia, minha paixão profissional.

Aos amigos Marcos Bastos e Marcos Ferreira que compreenderam as razões de que me levaram a empreender tanto esforço e tempo e se dedicaram a me ajudar a completar nesta tarefa.

Que Deus os abençoe e recompense por tudo!

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Gilmar Ferreira Batalha, meu orientador, pelo tempo dispensado de suas inúmeras tarefas e pela competência e disponibilidade no paciente ensinamento não só da engenharia, mas da vida, sempre compreendendo as minhas dificuldades pessoais e profissionais por que passei durante esses anos de convivência.

A FAPESP que me proporcionou condições financeiras, através do programa de incentivo a pequenas empresas (PIPE), permitindo que eu pudesse projetar e construir os aparelhos que precisei para este estudo.

Ao amigo da VW do Brasil, Marcio Batista, que sempre esteve a disposição para escutar minhas teorias, me ajudando e orientando com relação a temas que não tinha pleno domínio do conhecimento.

Ao amigo Peter Daenen da Qoros, China, que sempre me ajudou na carreira profissional e me incentivou a finalizar este estudo, mesmo diante das adversidades que encontramos na indústria.

Ao amigo Michael Palko, da Ford Motors Company em Detroit, pelo apoio e interesse e principalmente por me colocar em contato com o autor do livro que usei como base para este estudo.

Ao professor Hogyang Zhang da universidade de Toledo, EUA, que me recebeu com muita atenção e me orientou em alguns tópicos desta tese.

Ao amigo Tong, que muitas vezes assumiu minhas tarefas para que eu tivesse tempo de me dedicar a este estudo.

Ao meu amigo Joseph, que durante nossas longas jornadas de trabalho me animava a continuar este estudo para que pudéssemos aplicar este conhecimento no chão de fábrica.

A todos da minha empresa, Welding Science, pela paciência e compreensão que tiveram, e a todos que de uma forma ou outra me ajudaram a cumprir mais esta etapa da minha vida.

RESUMO

A crescente exigência do setor automotivo por maior produtividade com redução de custos, aliada aos novos materiais que compõe as carrocerias e seus revestimentos, levou ao estudo da correlação da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação, com a formação do ponto de solda, a fim de qualificar e controlar a soldagem por resistência a ponto. Para o estudo ter validade prática a qualificação da solda, os parâmetros de soldagem e corpos de prova foram definidos conforme norma AWS-SAE D8-9M 2002. Os corpos de prova para os ensaios foram retirados das chapas que compõe uma carroceria veicular. O cabeçote de soldagem foi projetado e construído seguindo os padrões de máquinas industriais. Os instrumentos de medição foram desenvolvidos especificamente para atender as condições industriais da soldagem por resistência. Os ensaios simularam as variações de parâmetros e produção dos pontos de solda conforme ocorre na indústria automobilística. As análises foram realizadas através da comparação gráfica e matemática do comportamento das grandezas medidas com a qualificação dimensional do ponto. A correlação, apresentada, distingue chapas de espessuras diferentes, materiais de revestimento, variação de parâmetros, erros de posicionamento (ponto torto), expulsão de material (*flash*), variações na formação do ponto (*undersize*) e o mais importante, desgaste dos eletrodos. Esta correlação permite criar um sistema de qualificação e controle do ponto de solda.

Palavras chave: Soldagem por Resistência a Ponto, Resistência Dinâmica, Força de Expansão Térmica, Indentação, Correlação da Formação do Ponto.

ABSTRACT

The growing demand from the automotive sector for greater productivity, reduced costs, combined with new materials that make up their bodies and coats, led to the study of the correlation of the dynamic resistance, thermal force expansion and indentation, with the formation of the spot weld, in order to qualify and control the resistance spot welding. For the study to be valid practicing the qualification of spot weld, welding parameters and specimens were define according AWS - 9M SAE D8 2002 standard. The specimens for testing were removed from the sheets that make up a vehicle body. The welding head was designed and built according the standards of industrial machinery. Measuring instruments were developed specifically to meet the conditions of industrial resistance welding. The tests simulated the variations of parameters and production of welding spots as occurs in automotive industry. The analyzes were performed through the graphical comparison and mathematical behavior of measured quantities with dimensional spot qualification. The correlation presented distinguishes sheets of different thicknesses, coating materials, variation of parameters, positioning errors (crooked point), expulsion of material (flash), variations in spot formation (undersize) and most important, wear of the electrodes. This correlation allows to create a system of qualification and control of the spot welding.

Keywords: Resistance Spot Welding, Dynamic Resistance, Thermal Force Expansion , Indentation , Correlation of Spot Formation.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	4
RESUMO	6
ABSTRACT	7
SUMÁRIO	8
LISTA DE SÍMBOLOS	12
ÍNDICE DE FIGURAS	17
ÍNDICE DE TABELAS	29
ABREVIACÕES	30
1 INTRODUÇÃO	32
1.1 Objetivos	33
1.2 apresentação dos capítulos	34
2 CONCEITUAÇÃO DA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	35
2.1 Funcionamento da soldagem	35
2.2 Caracterização do ponto de solda	37
2.2.1 Caracterização geométrica	37
2.2.2 Caracterização metalúrgica	38
2.3 Caracterização dos materiais e revestimentos das chapas usadas na indústria automobilística ...	40
2.3.1 Caracterização dos materiais das chapas	40
2.4 Caracterização dos revestimentos das chapas	41
2.5 Caracterização dos meios produtivos da soldagem a ponto usado na indústria automobilística ..	43
2.6 Caracterização elétrica	46
2.6.1 Conversor	46
2.6.2 Carga (pinça de solda)	49
2.7 Caracterização mecânica da pinça	50
2.8 resistência elétrica da soldagem a ponto	51
2.8.1 Resistência estática	51

2.8.2	Resistência dinâmica	55
2.8.3	Resistência paralela	60
2.9	Força de expansão térmica	62
2.10	Indentação	65
2.11	Caraterização da produção do ponto de solda	68
2.11.1	Pinça de solda	68
2.11.1.1	Alinhamento	68
2.11.1.2	Ortogonalidade	71
2.11.1.3	Rigidez dos braços da pinça	72
2.11.1.4	Escorregamento da pinça	73
2.11.1.5	Martelagem dos eletrodos	74
2.11.1.6	Equalização da pinça	75
2.11.1.7	Posicionamento da pinça	76
2.11.1.8	Fresagem dos eletrodos	76
2.11.1.9	Ângulo de fechamento dos eletrodos	78
2.11.2	Chapas (carroceria veicular)	79
2.11.2.1	Abertura entre as chapas.	79
2.11.2.2	Materiais aderidos à superfície das chapas	80
2.11.2.3	Ondulações superficiais das chapas	81
2.11.2.4	Variação dos revestimentos e espessuras das chapas	81
2.11.2.5	Soldagem com selante interno as chapas	82
2.11.2.6	Soldagem em superfícies não planas	83
2.11.3	Desgaste dos eletrodos	83
2.11.3.1	Compensação de desgaste de eletrodos	87
3	INSTRUMENTAÇÃO APLICADA A SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	88
3.1	Medição da corrente de soldagem	88
3.1.1	Bobina de Rogowski	89
3.1.2	Sensor de efeito hall	95
3.1.3	Resultados práticos	99
3.2	Medição da tensão entre eletrodos	100
3.3	medição da força de expansão térmica	104
3.3.1	Resultados práticos	112
3.3.2	Resultados práticos	115
3.4	Medição da vazão, temperatura e pressão da água de REFRIGERAÇÃO	116
3.4.1	Medição da vazão da água de refrigeração	116
3.4.2	Medição da temperatura da água de refrigeração	117

3.4.3	Medição da pressão da água de refrigeração	119
3.5	Controlador de refrigeração	121
4	CABEÇOTE DE SOLDAGEM.....	127
4.1	Descrição do cabeçote de soldagem.....	127
4.2	Projeto mecânico.....	128
4.3	Medição das grandezas	132
4.4	Cálculo da resistência dinâmica	134
4.5	Cálculo da força de expansão térmica.....	140
4.6	Cálculo da indentação	141
4.7	Cálculos adicionais.....	141
4.8	Gráficos das grandezas.....	141
5	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	144
5.1	Descrição dos ensaios	144
5.2	Corpos de prova	146
5.2.1	Diâmetro de destacamento do ponto.....	147
5.2.1.1	Arrancamento total.....	148
5.2.1.2	Fratura longitudinal.....	148
5.2.1.3	Fratura interfacial, longitudinal e arrancamento parcial.....	149
5.2.1.4	Fratura interfacial e arrancamento parcial.....	149
5.2.1.5	Fratura interfacial e longitudinal.....	149
5.2.1.6	Fratura interfacial.....	150
5.2.1.7	Falha total do ponto de solda.....	150
5.2.2	Macrografia do ponto de solda	151
5.2.2.1	Diâmetro.....	151
5.2.2.2	Penetração (altura do ponto).....	151
5.2.2.3	Indentação	152
5.2.2.4	Porosidades e vazios.....	153
5.2.2.5	Trincas internas	153
5.2.3	Análise visual do ponto de solda.....	154
5.2.3.1	Posição dos pontos.....	154
5.2.3.2	Aspecto superficial.....	154
5.3	Teste de destacamento (arrancamento)	155
5.4	Ensaio Macrografico	156

5.5	Definição dos parâmetros.....	160
6	APLICAÇÃO E ESTUDO DE CASO	161
6.1	Corpos de prova	162
6.2	Condições dos ensaios.....	163
6.3	Medições e qualificação do ponto	164
6.4	Resultados dos ensaios.....	167
6.4.1	Repetibilidade das medições.....	171
6.4.2	Variação do tempo de soldagem	173
6.4.3	Variação da corrente de soldagem	176
6.4.4	Variação da força entre eletrodos	178
6.4.5	Desgaste dos eletrodos (produção do ponto)	181
6.4.6	Erro de ortogonalidade	188
6.4.6.1	Variação da quantidade de chapas.....	194
6.4.6.2	Variação do revestimento das chapas.....	197
6.4.7	Materiais estranhos à superfície da chapa.....	199
6.4.8	Modelagem gráfica dos resultados	202
6.4.8.1	Probabilidade de projeção de material (<i>flash</i>) em relação À área de contato dos eletrodos	202
6.4.8.2	inflexões da força de expansão térmica.....	205
6.4.8.3	Relação do desgaste dos eletrodos	208
6.4.8.4	Erro de ortogonalidade	208
6.4.8.5	Revestimento das chapas.....	208
6.4.9	Sumarização dos resultados	209
6.5	Considerações finais.....	214
7	CONCLUSÕES.....	215
8	TRABALHOS FUTUROS	218
	BIBLIOGRAFIA.....	219
	APÊNDICE 1: CORPOS DE PROVA	225
	Medições simultâneas da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação, qualificação do ponto de solda.	225
	Medições comparativas entre corpos de prova.....	258

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
E	Energia elétrica transformada em calor na resistência elétrica.	Ws
R	Resistência elétrica por onde a corrente elétrica circula.	Ω
I	Corrente elétrica.	A
T	Tempo de circulação da corrente elétrica.	s
d_{p1}, d_{p3}	Diâmetro do ponto respectivamente nas chapas 1 e 3.	mm
p_p	Penetração do ponto.	mm
$d_{ZTA1},$ $p_{ZTA1},$	Diâmetro da ZTA respectivamente nas chapas 1 e 3.	mm
$p_{ZTA2},$ p_{ZTA3}	Penetração da ZTA respectivamente nas chapas 1, 2 e 3.	mm
e_c	Espessura resultante das chapas soldadas.	mm
p_1, p_2, p_3	Penetração do ponto respectivamente nas chapas 1, 2 e 3.	mm
i_1, i_2, i_3	Indentação do ponto respectivamente nas chapas 1, 2 e 3.	mm
$d_{i1}, d_{i2},$ d_{i3}	Diâmetro da indentação respectivamente nas chapas 1, 2 e 3.	mm
a_{c12}, a_{c23}	Abertura ente as chapas 1 e 2 e as chapas 2 e 3.	mm
R_{Ech_x}	Resistência estática da chapa.	Ω
ρ_{ch_x}	Resistividade do aço a 25°C.	Ωm
e_{ch_x}	Espessura da chapa.	mm
S_{el_y}	Área de contato do eletrodo na chapa.	mm^2
x, y	Respectivamente, identificação da chapa e do eletrodo.	adimensional
ρ_1	Resistividade do material da chapa 1.	Ωm
ρ_2	Resistividade do material da chapa 2.	Ωm
N	Número de contatos por unidade de área.	adimensional
A	Raio médio dos contatos.	mm

L	Distância média entre os centros dos contatos.	mm
ρ_{T_t}	Resistividade a temperatura t .	adimensional
$\rho_{T_{20}}$	Resistividade a 20°C.	Ωm
α_T	Coefficiente de acréscimo de temperatura.	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
T_t	Temperatura t .	$^{\circ}\text{C}$
$\sigma \equiv \frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{\sigma}_{liq}}$	Condutividade elétrica adimensional.	adimensional
$\tilde{\sigma}_{liq}$	Condutividade elétrica das chapas	$(\Omega\text{m})^{-1}$
$\sigma_f \equiv \frac{\tilde{\sigma}_f}{\tilde{\sigma}_{liq}}$	Condutividade elétrica adimensional superficial.	adimensional
$H_v \equiv \frac{\tilde{H}_v}{\tilde{H}_{v0}}$	Dureza superficial.	HRC
$\tilde{H}_{v0}$	Dureza superficial inicial.	HRC
S	Espessura da rugosidade superficial.	mm
R_0	Resistência estática.	Ω
x, y	Respectivamente número da chapa e número do ponto.	adimensional
$R_{P_{x,y}}$	Resistência paralela.	Ω
$\rho_{x,y}$	Resistividade da chapa x ou y .	Ωm
$L_{x,y}$	Distância do ponto y da chapa x até o próximo ponto.	mm
$e_{x,y}$	Espessura da chapa x ou y .	mm
d_{face}	Diâmetro da face de contato dos eletrodos.	mm
R_1, R_7	Resistência dos eletrodos.	Ω
R_2, R_6	Resistência de contato dos eletrodos com as chapas.	Ω
R_3, R_5	Resistência das chapas respectivamente x e y .	Ω
R_4	Resistência de contato entre as chapas x e y .	Ω
I_S	Corrente de soldagem.	A

I_{Dy}	Corrente de desvio do ponto y .	A
ΔV_{exp}	Taxa de expansão volumétrica.	adimensional
V_i	Volume inicial.	l
V_f	Volume final.	l
F_z	Força resultante.	N
P_z	Pressão resultante.	Pascal
S_{xy}	Projeção no plano xy da área dS .	mm^2
i_{cond}	Corrente elétrica que flui pelo condutor filiforme	A
H_{bob}	Campo magnético.	A/m
a_{bob}	Ângulo entre a direção do campo e do pequeno pedaço da linha.	Graus
dl	Pequeno pedaço de linha ao longo da linha fechada.	adimensional
$\partial\Phi_{\text{bob}}$	Fluxo magnético da secção A_{bob} .	Wb
A_{bob}	Secção transversal da bobina.	mm^2
$n_{\text{bob}}dl$	Pequeno pedaço de linha ao longo da linha fechada.	mm
μ_0	Permeabilidade magnética no ar.	H/m
B_{ext}	Campo magnético externo.	A/m
d_H	Distancia entre os pontos da diferença de potencial.	mm
n_H	Número de cargas por unidade de volume.	adimensional
q_H	Carga elétrica.	C
A_H	Área da secção transversal do condutor.	mm^2
Q_F	Calor retirado pelo lado frio do módulo Peltier.	J
P_{EPt}	Potência elétrica de entrada do módulo Peltier.	W
I_{Pt}	Corrente do módulo Peltier.	A
R_{Pt}	Resistência do módulo Peltier.	Ω
K_{Pt}	Condutividade térmica do módulo Peltier.	W/(mK)
T_F	Temperatura lado frio	$^{\circ}\text{C}$

T_Q	Temperatura lado quente.	°C
ρ_n, ρ_p	Respectivamente resistividade elétrica da pastilha semicondutora n e p .	Ωm
K_n, K_p	Respectivamente condutividade térmica da pastilha semicondutora n e p .	W/(mK)
Z_{Pt}	Coeficiente de mérito	adimensional
P_{SPt}	Potência de saída do módulo Peltier.	W
Q_Q	Calor gerado pelo lado quente do módulo Peltier.	J
R_{din}	Resistência dinâmica.	Ω
$V_{el\ RMS}$	Tensão eficaz (RMS) entre os eletrodos.	V
$I_{s\ RMS}$	Corrente de soldagem eficaz (RMS).	A
v_{el}	Tensão instantânea entre os eletrodos.	V
i_s	Corrente instantânea de solda.	A
F_{et}	Força de expansão térmica.	N
f_m	Força instantânea de compressão entre os eletrodos (servo motor).	N
f_{et}	Força instantânea de expansão térmica entre os eletrodos.	N
$n_{offsetF}$	Intervalo para cálculo da média de <i>offset</i> (valor médio aplicado pelo motor após estabilidade da força de compressão).	N
n_{cicloF}	Ciclo após iniciada a solda. Intervalo para cálculo da média de um ciclo	s
Ind	Indentação do ponto de solda.	mm
ind_m	Posição do deslocamento ao aplicar a força (antes de soldar).	mm
ind_s	Posição do deslocamento a partir do início da solda.	mm
$n_{offsetI}$	Intervalo para cálculo da média de <i>offset</i> (valor médio do deslocamento após estabilidade da força de compressão).	mm
n_{cicloI}	Intervalo para cálculo da média de um ciclo (valor médio de cada ciclo após iniciada a solda).	mm
D	Diâmetro do ponto de solda.	mm

P	Penetração (altura) do ponto de solda.	mm
T_s	Tempo de soldagem.	s
F_m	Força aplicada entre as chapas pelo servo motor.	N
F_{et}	Força de expansão térmica.	N
γ	Constante de proporcionalidade.	adimensional
d	Diâmetro da face de contato do eletrodo em milímetros.	mm
c	Constante de adição.	adimensional

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Resistências elétricas entre os eletrodos. [ARO do Brasil, 2013].	36
Figura 2-2. Caracterização geométrica do ponto de solda para duas chapas.	37
Figura 2-3. Caracterização geométrica do ponto de solda para três chapas.	37
Figura 2-4. Caracterização geométrica do ponto de solda para três chapas. [Zhang, 2012]	39
Figura 2-5. Tipos de aço usados na carroceria de um veículo. [Zhang, 2012].	40
Figura 2-6. Vista em corte da chapa de aço com o revestimento de zinco com deposição eletrolítica. [ThyssenKrupp, 2013].	41
Figura 2-7. Pinça de solda manual com transformador acoplado. [ARO Brasil, 2013].	44
Figura 2-8. Pinça de solda manual com transformador suspenso. [ARO Brasil, 2013].	44
Figura 2-9. Máquina estacionária para soldagem manual ou robotizada. [Marimax, 2013].	44
Figura 2-10. Controlador de solda em corrente alternada. [ARO Brasil, 2013].	45
Figura 2-11. Componentes básicos de uma pinça de solda. [ARO Brasil, 2013].	45
Figura 2-12. Tensão e corrente instantânea na resistência dinâmica em uma soldagem real com conversor CA.	46
Figura 2-13. Potência instantânea na resistência dinâmica em uma soldagem real com conversor CA.	47
Figura 2-14. Tensão e corrente instantâneas na resistência dinâmica numa soldagem real com do conversor MFDC.	47
Figura 2-15. Potência instantânea no conversor MFDC, na resistência dinâmica em uma soldagem real.	48
Figura 2-16. Comparação da potência na resistência dinâmica do conversor CA e MFDC.	48
Figura 2-17. Comportamento da resistência dinâmica para conversor CA e MFDC [Li, 2004].	49
Figura 2-18. Circuito elétrico equivalente da pinça de solda.	49

Figura 2-19. Simulação de aplicação de força para cálculo de flexão e escorregamento. [Centerline do Brasil, 2013].....	50
Figura 2-20. Diagrama elétrico de medição da resistência estática. [Srikunwong, 2005].	52
Figura 2-21. Resistência estática de contato em diferentes condições superficiais. [Zhang, 2012].	53
Figura 2-22. Resistência estática pela pressão aplicada nas chapas pelos eletrodos. [Srikunwong, 2005].	53
Figura 2-23. Histerese da resistência estática no fechamento e abertura da pinça de solda. [Srikunwong, 2005].	54
Figura 2-24. Histerese da resistência estática pela temperatura das chapas. [Srikunwong, 2005].	54
Figura 2-25. Resistividade calculada e real do aço e cobre [Wang, 2009].	55
Figura 2-26. Resistência de contato pela temperatura. [Vogler, 1993].....	56
Figura 2-27. Resistência dinâmica correlacionada com a formação do ponto de solda. [Dickinson, 1980].....	58
Figura 2-28. Diagrama elétrico da resistência paralela do ponto adjacente.....	61
Figura 2-29. Formação da força contrária a dos eletrodos pela pressão interna do ponto. [Zhang, 2012].	62
Figura 2-30. Coeficiente de expansão térmica em função da temperatura. [Zhang, 2012].	63
Figura 2-31. Representação volumétrica do metal fundido (ponto de solda). [Zhang, 2012].	64
Figura 2-32. Simulação da força de expansão térmica em função da temperatura do ponto. [Zhang, 2012].	65
Figura 2-33. Comportamento empírico da indentação em chapas sem revestimento. [Gedeon, 1986].....	66
Figura 2-34. Comportamento empírico da indentação em chapas com revestimento <i>galvanealing</i> . [Gedeon, 1986].	66
Figura 2-35. Comportamento empírico da indentação em chapas com zincagem a fogo. [Gedeon, 1986].	67
Figura 2-36. Curva genérica do comportamento da indentação. [Gedeon, 1986].	67

Figura 2-37. Desalinhamento em pinças de solda.....	69
Figura 2-38. Tipos de alinhamento e desalinhamento de pinças de solda.	69
Figura 2-39. Área de contato em pinças desalinhadas. [Zhang, 2012].	70
Figura 2-40. Distribuição da pressão no contato entre as chapas para eletrodos alinhados e desalinhados. [Zhang, 2012].	71
Figura 2-41. Erro de ortogonalidade em pinças de solda.....	71
Figura 2-42. Força de expansão térmica com braço de alta flexão e baixa flexão. [Zhang, 2012].	72
Figura 2-43. Momento da expulsão com braço de alta flexão e baixa flexão. [Zhang, 2012].	72
Figura 2-44. Força durante a soldagem com e sem escorregamento dos eletrodos. [Zhang, 2012].	73
Figura 2-45. Macrografia do ponto “A” sem escorregamento e “B” com escorregamento. [Zhang, 2003].	73
Figura 2-46. Martelagem dos eletrodos com força de repique 93% da força média estabilizada.	74
Figura 2-47. Comparação da resposta da força de pinças servo e pneumática.	75
Figura 2-48. Erros de equalização das pinças de solda.	75
Figura 2-49. Erros de posicionamento em flanges e bordas.	76
Figura 2-50. Perfil do eletrodo usado na indústria automobilística. [Kappen, 2013].	77
Figura 2-51. Fresadora e lâmina de fresagem usados na indústria automobilística. [Kappen, 2013].	77
Figura 2-52. Lâminas de fresagem limpa e entupida.	78
Figura 2-53. Eletrodos com problemas de fresagem (A e B) e eletrodo com fresagem correta (C).	78
Figura 2-54. Decomposição de força e escorregamento em pinças com eletrodos. ..	79
Figura 2-55. Abertura entre as chapas em uma carroceria veicular.	80
Figura 2-56. Substâncias estranhas nas superfícies das chapas soldada.	80
Figura 2-57. Pontos de solda em superfície ondulada em uma carroceria veicular. ..	81
Figura 2-58. Revestimento alterado na mesma peça de uma carroceria veicular.	82
Figura 2-59. Excesso de selante entre as chapas de uma carroceria veicular.	82
Figura 2-60. Ponto de solda produzido em superfície curva.....	83

Figura 2-61. Sistema de refrigeração do eletrodo de uma pinça industrial.....	83
Figura 2-62. Temperatura do eletrodo durante a soldagem. [Yeung, 1999].	84
Figura 2-63. Desgaste dos eletrodos em função da temperatura e vazão da água de refrigeração. [Hirsch, 2013].	85
Figura 2-64. Desgaste dos eletrodos em relação a distância do tubo interno de refrigeração à base do eletrodo. [Hirsch, 2013].	85
Figura 2-65. Redução do ponto de solda ao longo da produção em função da vazão e temperatura da água de refrigeração. [Hirsch, 2013].	86
Figura 2-66. Redução do ponto de solda ao longo da produção em função da distância do tubo interno da água de refrigeração. [Hirsch, 2013].	86
Figura 2-67. Ponto de solda como corpo adiabático.	87
Figura 3-1. Representação da linha fechada e grandezas envolvidas. [Ward, 1993].	90
Figura 3-2. Instalação da bobina de Rogowski em uma pinça de solda.	91
Figura 3-3. Circuito básico de um integrador analógico.	92
Figura 3-4. Sinal na saída do integrador para entrada diferente de zero.	93
Figura 3-5. Circuito analógico de integração do sinal da bobina de Rogowski.....	93
Figura 3-6. Especificações do amplificador usado na integração do sinal da bobina de Rogowski.	94
Figura 3-7. Rejeição de ruído em modo comum da bobina de Rogowski.	95
Figura 3-8. Efeito Hall. [Zanatta, 2013].	96
Figura 3-9. Sensor de efeito Hall com amplificador integrado. [LEM, 2013].	97
Figura 3-10. Instalação do sensor de efeito. Figura-LEM, 2013.	98
Figura 3-11. Amplificador com alto CMRR.	98
Figura 3-12. Pinça industrial usada nos testes.	99
Figura 3-13. Bobina de Rogowski instalada na pinça industrial de testes.	99
Figura 3-14. Sinais de corrente em pinça industrial e no cabeçote.	100
Figura 3-15. Amplificador diferencial.	101
Figura 3-16. Especificações do amplificador diferencial INA132.....	101
Figura 3-17. Amplificador diferencial para tensão entre os eletrodos.	102
Figura 3-18. Sinal de tensão sem o amplificador diferencial.....	102
Figura 3-19. Sinal de tensão com o amplificador diferencial.	103
Figura 3-20. Sensor de tensão instalado em uma pinça industrial.	103

Figura 3-21. Sinais de tensão em pinça industrial e no cabeçote.	104
Figura 3-22. Ruído gerado pelo campo eletromagnético sobreposto ao sinal da força em sensores convencionais.	105
Figura 3-23. Sensor de força tipo resistivo (FSR). [Interlink Electronics, 2013]. ...	106
Figura 3-24. Dispositivo de redução de força e sensor FSR.	106
Figura 3-25. Comportamento da resistência em função da força de um FSR.	107
Figura 3-26. Erro de digitalização de um sensor FSR.	107
Figura 3-27. Divisor resistivo.	108
Figura 3-28. Resposta do sensor como divisor resistivo.	108
Figura 3-29. Diagrama elétrico de blocos do amplificador logarítmico. Figura- Analog Devices, 2013.	109
Figura 3-30. Diagrama matemático de blocos do amplificador logarítmico. Figura- Analog Devices, 2013.	110
Figura 3-31. Esquema do amplificador logarítmico do FSR.	111
Figura 3-32. Sensor de força instalado em uma pinça industrial.	112
Figura 3-33. FSR em formato toroidal. Figura- Interlink Electronics, 2013.	113
Figura 3-34. Sinais da força de expansão térmica em pinça industrial e no cabeçote.	114
Figura 3-35. Amplificador do sensor potenciométrico de deslocamento linear.	115
Figura 3-36. Medidor Signet 9900. Foto-GF Piping Systems, 2013.	116
Figura 3-37. Especificação do sensor de vazão de água.	117
Figura 3-38. Sensor de temperatura em encapsulamento TO-46. Foto-Texas Instruments, 2013.	117
Figura 3-39. Características do sensor de temperatura.	118
Figura 3-40. Circuito do conversor temperatura.	119
Figura 3-41. Especificação do sensor de pressão. Foto-Honeywell Sensing and Control, 2013.	119
Figura 3-42. Circuito do sensor de pressão.	120
Figura 3-43. Pastilha de transmissão de calor Peltier. [WellenTech, 2013].	121
Figura 3-44. Trocador de calor tipo Peltier.	126
Figura 3-45. Circuito do controlador de temperatura.	126
Figura 4-1. Vista geral dos componentes do cabeçote de soldagem.	127

Figura 4-2. Especificação da flexão de uma pinça usada na indústria automobilística. [CenterLine do Brasil, 2013].....	129
Figura 4-3. Estrutura do cabeçote e seus componentes.....	129
Figura 4-4. Sensor de tensão com cabo diferencial.....	130
Figura 4-5. Sensor de efeito Hall para medir a corrente de soldagem.	130
Figura 4-6. Sensor de força para medição da força de expansão térmica.	131
Figura 4-7. Sensor de deslocamento linear para medição da indentação.....	132
Figura 4-8. Ligação esquemática dos sensores e instrumentos de medição.	133
Figura 4-9. Tensão (azul), corrente (verde) e força de expansão térmica (laranja). 133	
Figura 4-10. Equipamentos usados nas medições.....	134
Figura 4-11. Corrente de soldagem em fase com a tensão entre eletrodos.	135
Figura 4-12. Erro de cálculo para valores próximos de zero.	135
Figura 4-13. Resistência dinâmica instantânea com e sem filtro de média móvel. .	136
Figura 4-14. Planilha de cálculo da resistência dinâmica.	136
Figura 4-15. Planilha de cálculo da força de expansão térmica.	138
Figura 4-16. Planilha de cálculo da indentação.	139
Figura 4-17. Planilha de cálculo da potência e energia.....	139
Figura 4-18. Gráfico da resistência dinâmica (R_{din}), força de expansão térmica (F_{et}) e indentação (Ind).....	142
Figura 4-19. Gráfico da potência ativa (P_{din}) e energia elétrica (E_{din}) na formação do ponto de solda.	142
Figura 4-20. Gráfico da corrente de soldagem (I_{din}) e tensão eficaz entre eletrodos (V_{din}).....	143
Figura 5-1. Dimensional do corpo de prova e localização dos pontos para ensaio destrutivo.....	146
Figura 5-2. Dimensional do corpo de prova para ensaio de produção de pontos de solda.	146
Figura 5-3. Medição do ponto de solda destacado. [AWS-SAE D8-9M].....	147
Figura 5-4. Aspecto visual da fratura do arrancamento total. [Accorsi, 2006].....	148
Figura 5-5. Aspecto visual da fratura do arrancamento parcial. [Accorsi, 2006]. ...	148
Figura 5-6. Aspecto visual da fratura longitudinal. [Accorsi, 2006].	148

Figura 5-7. Aspecto visual do arrancamento parcial, longitudinal, e interfacial. [Accorsi, 2006].....	149
Figura 5-8. Aspecto visual da fratura interfacial e arrancamento parcial. [Accorsi, 2006].	149
Figura 5-9. Aspecto visual da fratura interfacial e longitudinal. [Accorsi, 2006]. ..	149
Figura 5-10. Aspecto visual da fratura interfacial. [Accorsi, 2006].....	150
Figura 5-11. Aspecto visual da falha de caldeamento do ponto de solda. [Accorsi, 2006].	150
Figura 5-12. Definição das zonas de medição. [Accorsi, 2006].	151
Figura 5-13. Penetração do ponto. [Accorsi, 2006].	151
Figura 5-14. Indentação do ponto de solda. [Accorsi, 2006].	152
Figura 5-15. Prosidades e vazios do ponto de solda. [Accorsi, 2006].	153
Figura 5-16. Trincas no ponto de solda. [Accorsi, 2006].....	153
Figura 5-17. Aprovação pela posição do ponto. [Accorsi, 2006].	154
Figura 5-18. Trincas permitidas e reprovadas. [Accorsi, 2006].....	154
Figura 5-19. Dispositivo de destacamento do ponto de solda. [DVS2916, 1978]...	155
Figura 5-20. Aspecto do ponto após destacamento.....	155
Figura 5-21. Desenho artístico do corte transversal do ponto.....	156
Figura 5-22. Máquina de corte do ponto de solda. [PT. INTEC Instruments].....	156
Figura 5-23. Politriz do ponto de solda. [Instrumental Instrumentos de Medição] .	157
Figura 5-24. Registro mecanográfico de um ponto de solda por resistência elétrica	157
Figura 5-25. Interpretação dos ecos na análise do ponto de solda. Denisov, 2004..	158
Figura 5-26. Varredura dos 52 sensores do transdutor do ultrassom. Denisov, 2004.	159
Figura 5-27. Visualização do ponto de solda (A) e dos ecos (B). Stocco, 2010.....	159
Figura 5-28. Lóbulo de soldagem para duas chapas de 1,0mm e tempo de soldagem de 10ciclos@50Hz. [DVS 2935-1].	160
Figura 6-1. Corpos de prova e eletrodos usados para os ensaios práticos.	161
Figura 6-2. Classificação dos eletrodos usados nos ensaios.	161
Figura 6-3. Resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação dinâmica do corpo de prova AMNa1.....	165

Figura 6-4. Potência e energia entre os eletrodos do corpo de prova AMNa1.	165
Figura 6-5. Corrente de soldagem e tensão entre eletrodos do corpo de prova AMNa1.....	166
Figura 6-6. Macrografia do ponto de solda do corpo de prova AMNa1.....	166
Figura 6-7. Comportamento da resistência dinâmica relativa com variação do tempo de soldagem.....	167
Figura 6-8. Comportamento da resistência absoluta relativa com variação do tempo de soldagem.....	168
Figura 6-9. Comportamento da força de expansão térmica relativa com variação do tempo de soldagem.....	168
Figura 6-10. Comportamento da força de expansão térmica absoluta com variação do tempo de soldagem.....	168
Figura 6-11. Comportamento da indentação dinâmica relativa com variação do tempo de soldagem.....	169
Figura 6-12. Comportamento da indentação dinâmica absoluta com variação do tempo de soldagem.....	169
Figura 6-13. Comportamento da potência com variação do tempo de soldagem. ...	169
Figura 6-14. Comportamento da potência com variação do tempo de soldagem. ...	170
Figura 6-15. Comportamento da corrente com variação do tempo de soldagem.....	170
Figura 6-16. Comportamento da tensão com variação do tempo de soldagem.	170
Figura 6-17. Diâmetro e penetração dos três corpos de prova.	171
Figura 6-18. Resistência dinâmica nos três corpos de prova.	171
Figura 6-19. Desvio da resistência dinâmica nos três corpos de prova.	171
Figura 6-20. Força de expansão térmica nos três corpos de prova.	172
Figura 6-21. Desvio da força de expansão térmica nos três corpos de prova.	172
Figura 6-22. Indentação nos três corpos de prova.....	172
Figura 6-23. Desvio da indentação nos três corpos de prova.....	173
Figura 6-24. Corpos de prova com eletrodos novos e variação do tempo de soda. .	174
Figura 6-25. Corpos de prova com eletrodos meia vida e variação do tempo de soldagem.	174
Figura 6-26. Comportamento da resistência dinâmica relativa com variação do tempo de soldagem para eletrodos novos e meia vida.	174

Figura 6-27. Comportamento da expansão térmica relativa com variação do tempo de soldagem para eletrodos novos e meia vida.	175
Figura 6-28. Comportamento da indentação dinâmica relativa com variação do tempo de soldagem para eletrodos novos e meia vida.	175
Figura 6-29. Corpos de prova com eletrodos novos e variação da corrente de soldagem.	176
Figura 6-30. Corpos de prova com eletrodos meia vida e variação da corrente de soldagem.	176
Figura 6-31. Comportamento da resistência dinâmica relativa com variação da corrente de soldagem para eletrodos novos e meia vida.	177
Figura 6-32. Comportamento da força de expansão térmica relativa com variação da corrente de soldagem para eletrodos novos e meia vida.	177
Figura 6-33. Comportamento da indentação dinâmica relativa com variação da corrente de soldagem para eletrodos novos e meia vida.	178
Figura 6-34. Corpos de prova com eletrodos novos e variação da força entre os eletrodos.	178
Figura 6-35. Comportamento da resistência dinâmica relativa com variação da força de soldagem para eletrodos novos.	179
Figura 6-36. Comportamento da força de expansão térmica relativa com variação da força de soldagem para eletrodos novos.	179
Figura 6-37. Comportamento força de expansão térmica com variação da força de soldagem para eletrodos meia vidas.	180
Figura 6-38. Comportamento da indentação dinâmica relativa com variação da força de soldagem para eletrodos novos.	180
Figura 6-39. Eletrodos usados na produção dos pontos de solda.	181
Figura 6-40. Comportamento da resistência dinâmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNx2, AMN23 e AMN49).	182
Figura 6-41. Comportamento da resistência dinâmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa10, AMN32 e AMNa50).	182
Figura 6-42. Comportamento da resistência dinâmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova).	183

Figura 6-43. Comportamento da resistência dinâmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa18, AMN40 e AMNa52).	183
Figura 6-44. Comportamento da força de expansão térmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNx2, AMN23 e AMN49).	184
Figura 6-45. Comportamento da força de expansão térmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa10, AMN32 e AMNa50).	185
Figura 6-46. Comportamento da força de expansão térmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa14, AMN35 e AMNa51).	185
Figura 6-47. Comportamento da força de expansão térmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa18, AMN40 e AMNa52).	186
Figura 6-48. Comportamento da indentação dinâmica durante a produção dos pontos de solda. (corpos de prova AMNx2, AMN23 e AMN49).	186
Figura 6-49. Comportamento da indentação dinâmica durante a produção dos pontos de solda. (corpos de prova AMNa10, AMN32 e AMNa50).	187
Figura 6-50. Comportamento da indentação dinâmica durante a produção dos pontos de solda. (corpos de prova AMNa14, AMN35 e AMNa51).	187
Figura 6-51. Comportamento da indentação dinâmica durante a produção dos pontos de solda. (corpos de prova AMNa18, AMN40 e AMNa52).	188
Figura 6-52. Erro de ortogonalidade dos eletrodos.	188
Figura 6-53. Força de expansão térmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMNa49 ortogonal, AMNa53 não ortogonal.	189
Figura 6-54. Força de expansão térmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMNa51 ortogonal, AMNa55 não ortogonal.	190
Figura 6-55. Força de expansão térmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMN a52 ortogonal, AMNa56 não ortogonal.	190
Figura 6-56. Resistência dinâmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMNa49 ortogonal, AMNa53 não ortogonal.	191
Figura 6-57. Resistência dinâmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMNa51 ortogonal, AMNa55 não ortogonal.	191
Figura 6-58. Resistência dinâmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMN a52 ortogonal, AMNa56 não ortogonal.	192
Figura 6-59. Indentação na posição ortogonal e fora de posição.	193

Figura 6-60. Indentação na posição ortogonal e fora de posição.	193
Figura 6-61. Indentação na posição ortogonal e fora de posição.	194
Figura 6-62. Resistência dinâmica para duas e tres chapas (corpo de prova AMNa1-2 chapas, AMNa18-3 chapas).	194
Figura 6-63. Força de expansão térmica para duas e tres chapas (corpo de prova AMNa1-2 chapas, AMNa18-3 chapas).	195
Figura 6-64. Indentação para duas e tres chapas (corpo de prova AMNa1-2 chapas, AMNa18-3 chapas).	195
Figura 6-65. Resistência dianmica de diferentes materiais (corpo de prova AMNx2, AMNa10 e AMNa14).	196
Figura 6-66. Força de expansão térmica de diferentes materiais (corpo de prova AMNx2, AMNa10 e AMNa14).	196
Figura 6-67. Indentação de diferentes materiais (corpo de prova AMNx2, AMNa10 e AMNa14).	197
Figura 6-68. Diferença no comportamento da resistência dinâmica para chapas com e sem zinco.	197
Figura 6-69. Resistência dinâmica de chapas galvanizadas para várias amostras. ..	198
Figura 6-70. Análise visual e por ultrassom do da queima de zinco.	199
Figura 6-71. Resistência dinâmica de corpos de prova com e sem selante. Corpo de prova AMN25 sem selante, AMN29 com selante.	200
Figura 6-72. Força de expansão térmica de corpos de prova com e sem selante. Corpo de prova AMN25 sem selante, AMN29 com selante.	201
Figura 6-73. Indentação de corpos de prova com e sem selante. Corpo de prova AMN25 sem selante, AMN29 com selante.	201
Figura 6-74. F_{et} em função do desgaste de eletrodos (chapas 0,75+0,75).	202
Figura 6-75. F_{et} em função do desgaste de eletrodos (chapas 0,9Zn+0,9Zn).	203
Figura 6-76. F_{et} em função do desgaste de eletrodos (chapas 1,45+1,45).	203
Figura 6-77. F_{et} em função do desgaste de eletrodos (chapas 0,9Zn+0,9Zn+0,9Zn).	204
Figura 6-78. Aumento da força de expansão térmica durante a produção para diferentes espessuras, materiais e revestimentos.	205

Figura 6-79. Força de expansão térmica chapas 0,9Zn+0,9Zn. Eletrodos, a1 novo, 23 meia vida e a49 fim de vida.	206
Figura 6-80. Força de expansão térmica chapas 1,45+1,45. Eletrodos, a13 novo, 35 meia vida e a51 fim de vida.	206
Figura 6-81. Força de expansão térmica chapas 0,9Zn+0,9Zn+0,9Zn. Eletrodos, a18 novo, 40 meia vida e a52 fim de vida.	207
Figura 6-82. Força de expansão térmica chapas 0,75+0,75. Eletrodos, a10 novo, 32 meia vida e a50 fim de vida.	207
Figura 6-83. Curva de dilatação do aço “dual phase” mostrando a expansão- contração-expansão. [Kodama, 2008].	208
Figura 6-84. Aproximação da curva da resistência dinâmica no início da soldagem	210
Figura 6-85. Aproximação da curva da força de expansão térmica na formação do ponto para eletrodos novos.	211
Figura 6-86. Aproximação da curva da força de expansão térmica na formação do ponto para eletrodos meia vida.	211
Figura 6-87. Variação do coeficiente de subida da resistência dinâmica.	212
Figura 6-88. Variação do coeficiente de subida da força de expansão térmica.	213
Figura 6-89. Variação do coeficiente quadrático da curva de máximo da força de expansão térmica.	213

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1. Grandezas físicas mais importantes dos revestimentos.	42
Tabela 3-1. Comparação entre sensor de efeito Hall e bobina de Rogowski.....	88
Tabela 3-2. Erro de medição do sensor de pressão.	120
Tabela 4-1. Componentes do cabeçote de soldagem.	128
Tabela 4-2. Equipamentos usados na medição.	134
Tabela 5-1. Ensaios realizados.	145
Tabela 6-1. Tabela dos corpos de prova.....	162
Tabela 6-2. Tabela das características de produção.	163
Tabela 6-3. Agrupamento dos ensaios conforme características de produção.....	164
Tabela 6-4. Qualificação e parâmetros dos corpos de prova.	181
Tabela 6-5. Qualificação e parâmetros dos corpos de prova.	189
Tabela 6-6. Qualificação e parametrização dos corpos e prova.....	209
Tabela 6-7. Equações aproximadas da resistência dinâmica e força de expansão térmica para predição da formação do ponto de solda.	212

ABREVIACÕES

FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
PIPE	Programa de Incentivo a Pequena Empresa
MTTR	<i>Mean Time To Repair (or Recovery)</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MFDC	<i>Medium Frequency Direct Current</i>
CMRR	<i>Common Mode Rejection Ratio</i>
FSR	<i>Force Sensing Resistor</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZF	Zona de Fusão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
PCI	Placa de Circuito Impresso
RMS	<i>Root Mean Square</i>
LSB	<i>Low Significant Bit</i>
A/D	<i>Analog to Digital</i>
ACU	<i>Real-Time Analog Computational Unit</i>
LPM	Litros por Minuto
COP	Coeficiente de Desempenho
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

USB	Barramento Serial Universal
IF	Isento de interstícios
HSS	Aço de alta resistência mecânica

1 INTRODUÇÃO

Para evidenciar a importância da soldagem por resistência a ponto na indústria automobilística, é preciso mencionar que um veículo tem em média 4.000 pontos de solda [Brown, 2000] e que baseado na produção brasileira de veículos em 2013 com 3,3 milhões de veículos [ANFAVEA, 2013], serão realizados mais de 50 milhões de pontos de solda por dia, contabilizando mais de 13 bilhões por ano. O número de equipamentos instalados no Brasil em estações de trabalho manuais e automáticas (robôs), para que a produção estimada possa efetivar-se, ultrapassam 12.000 unidades [ANFAVEA, 2013].

Apesar de este processo ser usado desde os primórdios da produção automobilística sua relação custo/benefício e produtividade é muito boa, fazendo com que o processo continue a ser pesquisado em universidades, e que indústrias continuem desenvolvendo equipamentos com recursos tecnológicos baseados nestes estudos. As técnicas em uso apresentam deficiências sob diversos aspectos, entretanto, o conteúdo desta pesquisa, permitirá a redução e otimização no consumo de insumos básicos, tais como, energia elétrica e eletrodos (a base de cobre), além do aumento do tempo útil dos equipamentos, redução de *recalls*, aperfeiçoamento das iniciativas de manutenção preventiva e preditiva, elevação dos níveis de segurança estrutural dos veículos, ou bens (demais indústrias), e introdução de novas técnicas que permitam adequar os processos e procedimentos brasileiros às normas, certificações e creditações internacionais.

A dificuldade de medição de grandezas no processo de soldagem a ponto sempre foi uma grande barreira para a melhoria do processo [Sampaio, 2010]. Durante o estudo o sistema de medição foi desenvolvida com o apoio do programa PIPE da FAPESP (processo 2008/52306-8), visando a aplicação específica em soldagem a ponto, incluindo o cabeçote de soldagem. Deste desenvolvimento saíram patentes que estão em análise.

Apesar de a indústria automobilística brasileira importar 100% da tecnologia de soldagem, por não existir fornecedores nacionais que atendam o nível tecnológico

exigido, não há evidências no parque industrial brasileiro de tecnologia e equipamentos que ofereçam produção segundo os parâmetros deste estudo.

Muitos problemas na produção dos pontos de solda provocam perdas de insumos básicos (baixa vida dos eletrodos), energia elétrica e produção, sem falar na qualidade dos pontos de solda que ficam prejudicados afetando a segurança e durabilidade dos veículos. Devido a falta de informação do processo no chão de fábrica, mesmo com uma vasta quantidade de estudos realizados, os engenheiros não conseguem estabelecer as causas de modo confiável, do ponto de vista técnico científico, ficando, portanto, sem solução.

Dos problemas crônicos encontrados no chão de fábrica, veio a necessidade de um estudo prático que revelasse as causas dos problemas para determinação de suas soluções o que levou a esta tese.

Uma vasta pesquisa bibliográfica foi feita para que todos os assuntos abordados pudessem ser bem compreendidos para evidenciar sua importância evitando interpretações práticas sem base científica.

Todas as experimentações relevantes a este trabalho estão no apêndice 1, evidenciando o bom funcionamento do cabeçote experimental.

Este estudo traz como obter o comportamento da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação¹, medidas simultaneamente durante a formação de um ponto de solda, trazendo conclusões práticas e aplicáveis nas indústrias automobilísticas.

1.1 OBJETIVOS

Desenvolver um sistema de medição para medir as grandezas elétricas de corrente, tensão e resistência, mecânicas de força de expansão térmica e indentação do processo de soldagem a ponto por resistência durante a formação do ponto de

---

¹ Palavra usada coloquialmente no meio industrial. Da língua inglesa *indentation*. Entalhe, marcação em profundidade de uma superfície.

solda, de forma confiável e que possa ser usada nas condições reais da produção dos pontos de solda encontradas nas indústrias automobilísticas.

Emular soldagens industriais com o desenvolvimento de um cabeçote instrumentado, mostrando o comportamento real da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação de forma simultânea durante a formação do ponto de solda com materiais e critérios de qualificação usados na indústria automobilística.

Obter resultados experimentais do cabeçote desenvolvido que possam ser usados para análise do comportamento simultâneo da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação durante a formação do ponto de solda, ajudando o entendimento da influência da face de contato dos eletrodos nos parâmetros de solda, consumo de energia, vida útil dos eletrodos, comportamento da resistência dinâmica com materiais revestidos, fatores limitantes para a produção de pontos de solda sem expulsão de material e outros.

Por fim sugerir como trabalho futuro que o cabeçote seja utilizado no estudo de um controle adaptativo da formação do ponto de solda com a inter-relação da resistência dinâmica e força de expansão térmica.

1.2 APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O capítulo 2 apresenta toda a conceituação teórica necessária para o desenvolvimento da tese. O capítulo 3 descreve o sistema de instrumentação com detalhes construtivos e os testes que foram aplicados em sua validação prática. O capítulo 4 mostra como o cabeçote foi construído usando o sistema de medição e os cálculos executados na medição. O capítulo 5 define a qualificação do ponto de solda e os parâmetros de soldagem utilizados. O capítulo 6 apresenta os ensaios realizados nos corpos de prova e o capítulo 7 as conclusões finais.

2 CONCEITUAÇÃO DA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1 FUNCIONAMENTO DA SOLDAGEM

Por meio da passagem da corrente elétrica entre os eletrodos de contato com as peças é gerado, por efeito Joule, calor (equação 2.1) na resistência de contato entre as superfícies provocando a elevação de temperatura iniciando a fusão dos metais [Furlanetto, 2005]. A resistência de contato é relativamente elevada em comparação com a resistência da chapa [Sampaio, 2010] (Figura 2-1), causando o rápido aquecimento nesta interface de contato. Isto se deve a combinação do calor extraído pelos eletrodos refrigerados e aquecimento rápido da superfície de contato fazendo com que a temperatura máxima ocorra em torno desta superfície. Já que o material da chapa próximo à superfície de contato entre elas aquece, o calor gerado nessa região aumenta rapidamente resultando em temperaturas mais elevadas que no restante das resistências e a partir deste processo a fusão entre as chapas é iniciada. [Ta-chien, 2003].

Se a corrente de soldagem cessa antes da formação completa do ponto, ou logo em seu início, a região de contato resfria-se rapidamente sob a influência dos eletrodos refrigerados e faz com que o ponto se solidifique. Desta forma a resistência de contato desaparece, dando lugar a uma única resistência formada pelas chapas já unidas. Uma nova tentativa de fusão (resoldagem) teria que gerar uma quantidade de calor muito superior a anterior, para causar a fusão agora da resistência total das chapas, que causaria a expulsão do material furando as chapas, já que a massa está sujeita a pressão dos eletrodos.

Como os eletrodos aplicam força entre as peças, a massa metálica que está se fundindo fica sob pressão, evitando sua expulsão entre as superfícies de contato. Sendo um processo de união metálica sem adição de outros metais ao metal base, a expulsão de material do núcleo fundido não deve ser permitida, pois pode causar uma série de problemas metalúrgicos e estruturais às peças [Zhang, 2012].

A lei de Joule define a transformação da energia elétrica em calor dada por [Furlanetto, 2005]:

$$E = \int_0^t r(t) i^2(t) dt \quad (2.1)$$

Onde:

E = Energia elétrica transformada em calor na resistência elétrica.

r = Resistência elétrica por onde a corrente elétrica circula.

i = Corrente elétrica.

t = Tempo de circulação da corrente elétrica.

A Figura 2.1 mostra as resistências envolvidas no processo de soldagem.

Figura 2-1. Resistências elétricas entre os eletrodos. [ARO do Brasil, 2013].

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO PONTO DE SOLDA

2.2.1 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

A norma DVS 2916, caracteriza a geometria do ponto de solda em relação a penetração dos eletrodos nas chapas (redução da espessura das chapas no eixo z e diâmetros), denominada indentação, centralização do ponto em relação às faces de contato das chapas (eixo r), diâmetro e altura (penetração) do ponto e da ZTA e por fim, abertura das chapas em torno do ponto (Figuras 2-2 e 2-3).

Figura 2-2. Caracterização geométrica do ponto de solda para duas chapas.

Figura 2-3. Caracterização geométrica do ponto de solda para três chapas.

Onde:

d_{p1}, d_{p3}	Diâmetro do ponto respectivamente nas chapas 1 e 3.
p_p	Penetração do ponto.
d_{ZTA1}, d_{ZTA3}	Diâmetro da ZTA respectivamente nas chapas 1 e 3.
$p_{ZTA1}, p_{ZTA2}, p_{ZTA3}$	Penetração da ZTA respectivamente nas chapas 1, 2 e 3.
e_c	Espessura resultante das chapas soldadas.
p_1, p_2, p_3	Penetração do ponto respectivamente nas chapas 1, 2 e 3.
i_1, i_2, i_3	Indentação do ponto respectivamente nas chapas 1, 2 e 3.
d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}	Diâmetro da indentação respectivamente nas chapas 1, 2 e 3.
a_{c12}, a_{c23}	Abertura ente as chapas 1 e 2 e as chapas 2 e 3.

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA

A microestrutura do ponto é constituída pelo metal base, zona termicamente afetada (ZTA) e zona de fusão (ZF) que depende da composição química do metal, quantidade de calor, espessura das chapas e geometria dos eletrodos. A ZTA é definida como a interface entre o metal base que sofreu aquecimento, mas não ocorreu alteração cristalina e aquele que teve alteração em sua estrutura. Tanto a ZTA como a ZF são formadas por duas fases típicas de transformação do aço quando submetido a fusão e resfriamento, ferrita- α e martensita. O volume da martensita tem um acréscimo rápido do metal base para a ZTA caracterizando bem a linha de limite. Esta formação martensítica tem como causa o rápido resfriamento do ponto de solda [Zhang, 2012].

A Figura 2-4 mostra as microestruturas da formação do ponto relacionadas com o diagrama de mudança de fase do aço de baixo carbono em conjunto com a distribuição da temperatura. A temperatura é determinada pelo cruzamento das linhas verticais que indicam a região do ponto com a curva de temperatura. Neste cruzamento a linha horizontal indica a fase do material. O núcleo tem uma estrutura cristalina típica de material fundido, indicando que ocorreu uma fusão e uma solidificação com a temperatura acima do ponto de liquefação. Próximo a esta região o material foi parcialmente fundido indicado pela formação de grãos colunares. Esta

região corresponde à temperatura entre líquido e sólido. Além desta região não houve fusão, mas ocorreu mudança na estrutura cristalina no formato e tamanho dos grãos [Zhang, 2012].

Figura 2-4. Caracterização geométrica do ponto de solda para três chapas. [Zhang, 2012]

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E REVESTIMENTOS DAS CHAPAS USADAS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

2.3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DAS CHAPAS

As diferenças entre os aços estão na composição química do metal base e tratamentos, para modificar o alongamento e a resistência à tração necessária na estampagem. Os revestimentos são adicionados para aumentar a proteção das chapas à corrosão. A Figura 2-5 mostra o diagrama da porcentagem de alongamento do material pela resistência a tração, usado atualmente na indústria automobilística [Zhang, 2012].

Figura 2-5. Tipos de aço usados na carroceria de um veículo. [Zhang, 2012].

É observado na prática que as características mais importantes dos materiais são dureza, dilatação térmica e superfície após o processo de fabricação, pois influenciam diretamente na definição da força aplicada entre eletrodos, face de contato e composição química.

- **Dilatação térmica:** Quanto maior a dilatação térmica, maior a força de expansão térmica [Zhang, 2012], portanto maior força entre eletrodos.
- **Face de contato dos eletrodos:** Quanto maior a dureza menor a indentação, portanto, a face de contato dos eletrodos deve ter menor raio para que, com pequenas indentações, a área de contato seja suficiente para formar o ponto no diâmetro aprovado.
- **Composição química dos eletrodos:** Maior rugosidade superficial maior resistência de contato, maior calor, maior temperatura entre a face de contato e a peça, com isso aumenta a deposição de material da chapa no eletrodo (contaminação dos eletrodos), portanto, as ligas devem ser escolhidas para minimizar este efeito.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DAS CHAPAS

Para que os veículos tenham uma proteção maior à corrosão as chapas são revestidas com materiais que proporcionam esta característica [ThyssenKrupp, 2013]. Os materiais podem ser depositados por processo eletrolítico ou a fogo [ThyssenKrupp, 2013]. A Figura 2-6 mostra a espessura e formato da deposição de zinco no processo eletrolítico.

Figura 2-6. Vista em corte da chapa de aço com o revestimento de zinco com deposição eletrolítica. [ThyssenKrupp, 2013].

Os materiais mais utilizados como revestimento em aço são [JFE, 2013]:

- ***Zinco e Zinco Ferro***

Aço com deposição eletrolítica ou a fogo de zinco puro ou uma liga de zinco (em geral, 12-15% de ferro) com deposição eletrolítica. O revestimento tem uma aparência semelhante a chapa laminada a frio.

- ***Alumínio Zinco***

Aço revestido com liga de alumínio-zinco por deposição a fogo. A composição nominal do revestimento é 55% de alumínio e 45% de zinco. Uma adição pequena, mas importante de silício está incluído na liga do revestimento.

- ***Zinco Ferro (Galvannealed)***

Revestimento com zinco em ambos os lados por deposição a fogo. Imediatamente quando a chapa sai do banho o revestimento de zinco fundido é submetido a um tratamento térmico em linha, que converte todo o revestimento em uma liga de zinco-ferro. (O ferro do aço se difunde no revestimento). A superfície tem um acabamento fosco muito diferente do que a aparência metálica do revestimento galvanizado. Às vezes, o revestimento pode parecer semelhante ao aço laminado a frio sem revestimento.

A tabela 2-1 traz estas propriedades [JFE, 2013].

Tabela 2-1. Grandezas físicas mais importantes dos revestimentos.

Material	Deposição	Espessura	Resistividade	Condutibilidade térmica 25°C	Temperatura de fusão
Zn	Eletrolítico	5 a 15 µm	59 nΩm	116 W/mk	420°C
Zn	A fogo	7 a 35 µm	59 nΩm	116 W/mk	420°C
Zn + Fe	Eletrolítico	5 a 15 µm	80 nΩm	95 W/mk	1.150°C (Fe)
Zn + Fe	Eletrolítico (<i>Galvannealed</i>)	5 a 15 µm	70 nΩm	95 W/mk	1.150°C (Fe)
Al + Zn	A fogo	7 a 35 µm	45 nΩm	160 W/mk	660°C (Al)

Do ponto de vista pratico, o revestimento altera a força entre eletrodos e corrente de soldagem da seguinte forma:

- **Espessura:** Maior espessura, maior a força entre eletrodos e, portanto, maior corrente de soldagem para a fusão da camada.
- **Composição química:**
  - **Zinco:** Comparado sem proteção superficial, necessita maior força entre eletrodos e, portanto, maior corrente de soldagem, para a fusão da camada.
  - **Ferro zinco:** Comparado com zinco necessita maior força entre eletrodos com menor raio da face de contato e maior corrente, devido a resistividade elétrica, condutibilidade térmica e temperatura de fusão ser maior que a do zinco, necessitando mais calor para a fusão da camada.
  - **Zinco alumínio:** Comparado com zinco necessita ligeiro aumento da força e, portanto, da corrente de soldagem, já que a temperatura de fusão é maior e a resistividade menor, aumentando o calor necessário à fusão da camada.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS PRODUTIVOS DA SOLDAGEM A PONTO USADO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

As máquinas de soldagem são classificadas quanto ao modo de operação (móvel ou fixa), localização do transformador (acoplado à pinça, ou suspenso), forma da corrente de soldagem podendo ser alternada (CA) ou contínua (CC) e por tipo de acionamento das partes móveis (pneumático ou servo motor) [Furlanetto, 2005]. As máquinas usadas na soldagem a ponto são móveis com transformador acoplado (Figura 2-7) ou com transformador suspenso (Figura 2-8) e são denominadas por pinça ou alicate [Furlanetto, 2005]. São movimentadas até a peça para a realização da soldagem de forma manual ou por robôs. A máquina fixa (Figura 2-9), denominada de estacionária [Furlanetto, 2005], é muito utilizada em indústrias

de autopeças, onde a peça é movimentada manualmente ou por robôs até a máquina para a realização da soldagem.

Figura 2-7. Pinça de solda manual com transformador acoplado. [ARO Brasil, 2013].

Figura 2-8. Pinça de solda manual com transformador suspenso. [ARO Brasil, 2013].

Figura 2-9. Máquina estacionária para soldagem manual ou robotizada. [Marimax, 2013].

O controle do acionamento pneumático, corrente, tempo de soldagem, e a função de interface da máquina com o operador ou robô são realizados por um sistema eletrônico denominado comercialmente de “comando de solda” (Figura 2-10) [Furlanetto, 2005].

Figura 2-10. Controlador de solda em corrente alternada. [ARO Brasil, 2013].

Os componentes básicos de uma pinça de solda estão na Figura 2-11 [Furlanetto, 2005].

Figura 2-11. Componentes básicos de uma pinça de solda. [ARO Brasil, 2013].

2.6 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

Do ponto de vista elétrico a máquina de soldagem pode ser analisada em três partes distintas, conversor, transformador e carga [Furlanetto, 2005].

2.6.1 CONVERSOR

Conversor é o dispositivo eletrônico que altera o valor e a frequência da tensão eficaz na entrada do transformador de solda. Também é responsável pelos modos de controle e outras funções de automação. [Furlanetto, 2005]. Em um conversor CA a tensão e a corrente entregues a resistência dinâmica são alternadas em 60Hz (ou 50Hz em alguns países). Como a tensão eficaz depende do ângulo de disparo dos tiristores a potência segue o mesmo comportamento. A Figura 2-12 mostra a tensão e corrente instantâneas na resistência dinâmica em uma soldagem real e a Figura 2-13 mostra a potência instantânea.

Figura 2-12. Tensão e corrente instantânea na resistência dinâmica em uma soldagem real com conversor CA.

Figura 2-13. Potência instantânea na resistência dinâmica em uma soldagem real com conversor CA.

Um conversor MFDC (*Medium Frequency Direct Current*) entrega a resistência dinâmica tensão e corrente contínuas. A Figura 2-14 mostra a tensão e a corrente instantâneas na resistência dinâmica em uma soldagem real e a Figura 2-15 mostra a potência instantânea.

Figura 2-14. Tensão e corrente instantâneas na resistência dinâmica numa soldagem real com do conversor MFDC.

Figura 2-15. Potência instantânea no conversor MFDC, na resistência dinâmica em uma soldagem real.

A potência gerada no conversor CA gera altos picos de calor com tempos sem geração (Figura 2-16). Isto pulsa a temperatura do ponto de solda com vários instantes de diminuição da temperatura (Figura 2-17), enquanto o conversor MFDC tem uma leve pulsação da potência, não interrompendo a geração de calor, fazendo com que a temperatura tenha um crescimento contínuo até a mudança de estado.

Figura 2-16. Comparação da potência na resistência dinâmica do conversor CA e MFDC.

Este comportamento do calor gerado altera o comportamento da resistência dinâmica [Li, 2004], como mostra a Figura 2-17.

Figura 2-17. Comportamento da resistência dinâmica para conversor CA e MFDC [Li, 2004].

2.6.2 CARGA (PINÇA DE SOLDADA)

A carga do transformador de solda ou secundário é composto de partes condutoras como barramentos rígidos e flexíveis, braços, porta eletrodos e eletrodos (Figura 2-11), isto é, a pinça de solda, independentemente do tipo de conversor ou de máquina, pode ser representada pela associação série de todas as resistências e um indutor relativo ao fluxo magnético produzido na área delimitada pela circulação da corrente (garganta da pinça) (Figura 2-11) [Furlanetto, 2005]. A Figura 2-18 representa o circuito elétrico equivalente.

Figura 2-18. Circuito elétrico equivalente da pinça de solda.

2.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA PINÇA

O conjunto transformador, acionamento pneumático ou servo motor e o secundário do transformador são mecanicamente acoplados de forma rígida. As partes do secundário são produzidas em material condutivo e possuem características mecânicas para suportar as forças aplicadas entre as chapas. Estes materiais são normalmente ligas de cobre e ligas de alumínio. Do ponto de vista da formação do ponto de solda as características mecânicas mais importantes são a flexão dos braços e porta eletrodos e o escorregamento dos eletrodos nas chapas [Zhang, 2012]. Devido a importância destas características as indústrias automobilísticas definem em suas normas valores máximos. Para atender esta necessidade os fabricantes de pinças realizam simulações em computadores como parte integrante da documentação do produto como mostra a Figura 2-19.

Figura 2-19. Simulação de aplicação de força para cálculo de flexão e escorregamento. [Centerline do Brasil, 2013].

2.8 RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA SOLDAGEM A PONTO

A resistência elétrica da soldagem a ponto são as resistências presentes entre os eletrodos [Sampaio, 2010]. O valor inicial é denominado resistência estática e comportamento ao longo do tempo é denominado resistência dinâmica [Zhang, 2012]. Cada uma possui características distintas, porém, interdependentes.

2.8.1 RESISTÊNCIA ESTÁTICA

É definida como a resistência elétrica inicial das chapas somada as resistências de contato [Zhang, 2012]. A resistência das chapas é dada pela segunda lei de Ohm:

$$R_{Ech_x} = \rho_{ch_x} \frac{e_{ch_x}}{S_{el_y}} \quad (2.2)$$

Onde:

R_{Ech_x} = Resistência estática da chapa.

ρ_{ch_x} = Resistividade do aço a 25°C.

e_{ch_x} = Espessura da chapa.

S_{el_y} = Área de contato do eletrodo na chapa.

x, y = Respectivamente, identificação da chapa e do eletrodo.

A resistência de contato pode ser calculada segundo a equação 2.3 [Greenwood, 1967].

$$R_C = (\rho_1 + \rho_2) \left(\frac{1}{4na} + \frac{3\pi}{32nl} \right) \quad (2.3)$$

ρ_1 = Resistividade do material da chapa 1.

ρ_2 = Resistividade do material da chapa 2.

n = Número de contatos por unidade de área.

a = Raio médio dos contatos.

l = Distância média entre os centros dos contatos.

Devido à dificuldade de medição destas resistências, na prática mede-se a resistência total entre os eletrodos como mostra a Figura 2-20. Desta forma a resistência estática tem somadas as resistências de contato dos eletrodos com as chapas e do próprio eletrodo.

Figura 2-20. Diagrama elétrico de medição da resistência estática. [Srikunwong, 2005].

A resistência estática depende da pressão aplicada pelo eletrodo na chapa, área de contato do eletrodo, material de revestimento da chapa e condições superficiais diversas, como óleo, oxidação, poeira, etc. [Zhang, 2012]. A Figura 2-21 mostra a variação da resistência estática para quatro condições superficiais de vinte amostras de chapas.

Figura 2-21. Resistência estática de contato em diferentes condições superficiais.

[Zhang, 2012].

Pelo teorema de Pascal a pressão é diretamente proporcional à força aplicada, para uma área de contato definida, portanto, a resistência depende da força aplicada pelo dispositivo de fechamento da pinça. Esta dependência não é linear (Figura 2-22). É observada a histerese no comportamento da resistência quando do aumento da pressão (fechamento da pinça) e diminuição (abertura da pinça) (Figura 2-23). Existe também a histerese do comportamento da resistência em função da temperatura (Figura 2-24) [Srikunwong, 2005].

Figura 2-22. Resistência estática pela pressão aplicada nas chapas pelos eletrodos.

[Srikunwong, 2005].

Figura 2-23. Histerese da resistência estática no fechamento e abertura da pinça de solda. [Srikunwong, 2005].

Figura 2-24. Histerese da resistência estática pela temperatura das chapas. [Srikunwong, 2005].

2.8.2 RESISTÊNCIA DINÂMICA

Com o início do processo de soldagem (passagem de corrente) e com a força de compressão entre eletrodos constante, a resistência estática total vai sendo modificada, não só por sofrer alteração das resistências de contato devido ao aumento da temperatura e da pressão aplicada, mas também por que os materiais têm a resistividade elétrica alterada pela temperatura [Wang, 2009] (Figura 2-25). Observa-se que a resistividade calculada pela equação geral (2.4) tem um erro muito grande.

Figura 2-25. Resistividade calculada e real do aço e cobre [Wang, 2009].

$$\rho_{T_t} = \rho_{T_{20}} (1 + \alpha_T T_t) \quad (2.4)$$

Onde:

ρ_{T_t} = Resistividade a temperatura t .

$\rho_{T_{20}}$ = Resistividade a 20°C.

α_T = Coeficiente de acréscimo de temperatura.

T_t = Temperatura t .

O comportamento empírico da resistência de contato em função da temperatura está mostrado na Figura 2-26 [Vogler, 1993].

Figura 2-26. Resistência de contato pela temperatura. [Vogler, 1993]

A resistência dinâmica considerando a variação da resistência de contato em função da temperatura está expressa pelas equações 2.5 e 2.6 [Wang, 2001].

$$R_C = \frac{R_1}{\sigma} \sqrt{nH_v} + R_2 \frac{snH_v}{\sigma_f} \quad (2.5)$$

Para:

$$R_1 \equiv \frac{1}{2\tilde{R}_0\tilde{\sigma}_{liq}} \sqrt{\frac{\pi\tilde{H}_{v0}}{W}} , \quad R_2 \equiv \frac{\tilde{r}_0\tilde{H}_{v0}}{W\tilde{R}_0\tilde{\sigma}_{liq}} \quad (2.6)$$

Onde:

$$\sigma \equiv \frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{\sigma}_{liq}} = \text{Condutividade elétrica adimensional.}$$

$$\tilde{\sigma}_{liq} = \text{Condutividade elétrica das chapas.}$$

$$\sigma_f \equiv \frac{\tilde{\sigma}_f}{\tilde{\sigma}_{liq}} = \text{Condutividade elétrica adimensional superficial.}$$

$$n = \text{Número de contatos por unidade de área.}$$

$$H_v \equiv \frac{\tilde{H}_v}{\tilde{H}_{v0}} = \text{Dureza superficial.}$$

$$\tilde{H}_{v0} = \text{Dureza superficial inicial.}$$

$$s = \text{Espessura da rugosidade superficial.}$$

$$R_0 = \text{Resistência estática.}$$

Este modelo possui boa precisão, comparando resultados práticos [Gould, 1987] e os obtidos por simulação numérica [Wu, 2010].

A resistência dinâmica tem um comportamento característico identificado há mais de 60 anos [Roberts, 1951] e mais recentemente correlacionada com a formação do ponto de solda como mostra a Figura 2-27 [Dickinson, 1980].

Figura 2-27. Resistência dinâmica correlacionada com a formação do ponto de solda. [Dickinson, 1980].

- **Fase I**

As chapas estão apertadas e imóveis através da força exercida entre elas pelos eletrodos, criando micro áreas de contato na superfície devido as asperezas na superfície entre as chapas. O transformador de solda é ligado e a corrente flui na resistência estática dando início a resistência dinâmica. Uma vez que estes micro contatos estão sob pressão, devido a força aplicada pelos eletrodos, a área total vai aumentando ao longo do tempo, já que a temperatura se eleva pelo efeito Joule, diminuindo a aspereza da superfície, com consequente diminuição da resistência total.

- **Fase II**

Quanto mais aquecida a face de contato das chapas, maior é a área de contato total, e portanto, menor a resistência de contato, porém, juntamente com esta redução a resistência das chapas vai se elevando devido a elevação da resistividade do material causada pelo aumento da temperatura, até o ponto onde a resistência das chapas é maior que a de contato e a resistência total vai agora aumentando.

- **Fase III**

A temperatura continua elevando e a resistência total também devido ao aumento da resistividade das chapas. Começam a aparecer na superfície de contato das chapas os primeiros pontos de liquefação eliminando a resistência de contato. Este ponto de inflexão determinado por $\partial r/\partial t=0$, marca o início da fusão das chapas.

- **Fase IV**

Com o aumento da área de fusão entre as chapas a resistência de contato vai diminuindo, causando a diminuição da resistência total. Este ponto de inflexão determinado por $\partial r/\partial t=0$, marca o início do ponto de solda. Este ponto tem como característica mecânica a diminuição da dureza dos metais de maneira que a pressão aplicada pelos eletrodos é grande o suficiente para iniciar o colapso da superfície das chapas em contato com os eletrodos, causando sua penetração nas chapas (indentação).

- **Fase V**

Após o início do colapso da superfície da chapa a área de contato dos eletrodos com as chapas aumenta, diminuindo a resistência total, ao mesmo tempo em que a resistência de contato vai sendo eliminada pelo crescimento do ponto de solda, aumentando a área de contato. Esta descida final da resistência dinâmica tem um comportamento suave, quase linear, porém se a energia foi demasiada e ocorre a expulsão de material, neste momento a resistência dinâmica cai abruptamente, devido a diminuição da resistência das chapas, já que a massa que foi perdida vai diminuir a espessura total, diminuindo a resistência total.

2.8.3 RESISTÊNCIA PARALELA

A influência da resistência paralela de um ponto de solda já produzido e que está adjacente a um que será formado é a muito tempo bem conhecido [Blair, 1948]. Um ponto realizado subsequente ao primeiro terá uma corrente menor quanto menor for a distância entre eles. Este efeito deve-se ao desvio da corrente pelo ponto anterior, porque eletricamente a chapa superior está ligada à chapa inferior, através do ponto de solda, formando uma resistência paralela (R_s) (Figura 2-28). Isto implica que o segundo ponto será menor (diâmetro e penetração) que o primeiro. Esta resistência paralela é definida pela 2ª lei de Ohm e está descrita na equação (2.7).

$$R_{P_{xy}} = \rho_x \frac{L_y}{e_x \left(\pi \frac{d_{face}^2}{4} \right)} \quad (2.7)$$

Onde:

x, y = Respectivamente número da chapa e número do ponto.

$R_{P_{x,y}}$ = Resistência paralela.

$\rho_{x,y}$ = Resistividade da chapa x ou y .

$L_{x,y}$ = Distância do ponto y da chapa x até o próximo ponto.

$e_{x,y}$ = Espessura da chapa x ou y .

d_{face} = Diâmetro da face de contato dos eletrodos.

R_1, R_7 = Resistência dos eletrodos.

R_2, R_6 = Resistência de contato dos eletrodos com as chapas.

R_3, R_5 = Resistência das chapas respectivamente x e y .

R_4 = Resistência de contato entre as chapas x e y .

I_S = Corrente de soldagem.

I_{Dy} = Corrente de desvio do ponto y .

Figura 2-28. Diagrama elétrico da resistência paralela do ponto adjacente.

Na prática todas as observações feitas até agora sobre a resistência elétrica da soldagem implicam em:

- As chapas devem apresentar sempre as mesmas condições de limpeza superficial.
- Uma vez a pinça fechada o processo deve ser iniciado, não devendo a pinça fechar e abrir mais de uma vez para não alterar a resistência estática.
- Uma vez iniciada a circulação de corrente e dependendo do tempo de em que se encontra circulando, não se deve interromper o processo para não alterar a resistência estática ou dinâmica.
- A soldagem não deve ocorrer em uma mesma área onde uma soldagem já tenha sido tentada.
- Os revestimentos e materiais que compõe as chapas devem sempre ser homogêneos do ponto de vista da composição química e espessura.

2.9 FORÇA DE EXPANSÃO TÉRMICA

O aquecimento das resistências elétricas produz a dilatação das chapas criando pressão interna ao ponto de solda gerando uma força contrária à aplicada pelos eletrodos (Figura 2-29) [Zhang, 2012].

Figura 2-29. Formação da força contrária a dos eletrodos pela pressão interna do ponto. [Zhang, 2012].

A análise do balanço das forças envolvidas na formação do ponto mostra que a força de expansão térmica F_{et} pode ser decomposta em [Zhang, 2012]:

- i) Força de dilatação dos metais sólidos, antes do início da fusão das chapas.
- ii) Força do crescimento do volume do metal líquido.
- iii) . Força de dilatação do metal líquido

A força de dilatação tem seu comportamento e valores ligados ao coeficiente de expansão térmica que determina a taxa de expansão volumétrica (2.8).

$$\Delta V_{\text{exp}} = \frac{(V_f - V_i)}{V_i} \quad (2.8)$$

Onde:

ΔV_{exp} = Taxa de expansão volumétrica.

V_i = Volume inicial.

V_f = Volume final.

O comportamento do aço tem uma mudança abrupta perto da transformação de estado sólido para líquido, evidenciando que se deve levar em consideração o cálculo da força em duas situações, uma na fase sólida e outra na líquida [Zhang, 2012].

Figura 2-30. Coeficiente de expansão térmica em função da temperatura. [Zhang, 2012].

O volume de metal fundido (ponto de solda) é representado como apresentado na Figura 2-31 [Zhang, 2012].

Figura 2-31. Representação volumétrica do metal fundido (ponto de solda). [Zhang, 2012].

A força total resultante é expressa por:

$$F_z = \int dF_z = P \int_S dS_{xy} = P_z S_{xy} \quad (2.9)$$

Onde:

F_z = Força resultante.

P_z = Pressão resultante.

S_{xy} = Projeção no plano xy da área dS .

A simulação por elementos finitos deste modelo matemático mostra que para um ponto de diâmetro de 6mm, penetração de 2,5mm, para o alumínio AA5754 com tempo de soldagem de 160ms, corrente contínua de 28kA e força de 7kN, tem a força

de expansão térmica em função da temperatura mostrada na Figura 2-32 [Zhang, 2012].

Figura 2-32. Simulação da força de expansão térmica em função da temperatura do ponto. [Zhang, 2012].

2.10 INDENTAÇÃO

Desde o início da circulação da corrente elétrica os metais que estão em contato entre eletrodos e chapas e chapas com chapas, vão perdendo a dureza por causa da elevação contínua da temperatura. Com a diminuição da dureza e da espessura sólida das chapas, os eletrodos vão penetrando, diminuindo a espessura total do pacote de chapas. A redução da espessura das chapas é denominada indentação. O comportamento cinético do movimento de penetração dos eletrodos nas chapas é denominado indentação dinâmica [Ji, 2004].

O comportamento da curva de indentação com diferentes revestimentos e diferentes está mostrado nas Figuras 2-33 a 2-36 [Gedeon, 1986]. A Figura 2-36

mostra a correlação genérica da indentação com a formação do ponto [Gedeon, 1986].

Figura 2-33. Comportamento empírico da indentação em chapas sem revestimento. [Gedeon, 1986]

Figura 2-34. Comportamento empírico da indentação em chapas com revestimento *galvanealing*. [Gedeon, 1986].

Figura 2-35. Comportamento empírico da indentação em chapas com zincagem a fogo. [Gedeon, 1986].

Figura 2-36. Curva genérica do comportamento da indentação. [Gedeon, 1986].

Sendo que para o comportamento genérico da indentação tem-se [Gedeon, 1986]:

1. Queda do valor inicial devido a quebra das asperezas superficiais. Este valor pode ser maior se as peças estiverem mal assentadas (abertura entre as chapas).
2. Expansão térmica da camada de zinco bem como do substrato que começam a influenciar o comportamento da curva de indentação. O zinco está sendo empurrado na área de contato pelos eletrodos permitindo a aproximação gerando uma rampa na curva.
3. Durante a fusão do zinco, que agora é empurrado mais rapidamente na área de contato devido a alta temperatura, ocorre uma expansão térmica muito rápida e em seguida se liquefaz modificando a curva.
4. Expansão térmica decorrente do substrato começa influenciar o comportamento da curva de indentação diminuindo a distância entre os eletrodos.
5. O substrato começa a entrar na fase de fusão, tornando-se primeiramente macio e depois líquido, ocasionando a elevação da indentação a partir deste momento.
6. O ponto está formado e se ainda ocorrer aquecimento o material líquido irá vazar por entre as chapas provocando a rápida indentação.

2.11 CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DO PONTO DE SOLDA

Na indústria automobilística a produção do ponto de solda depende de dois fatores que são: (1) máquina de soldagem e (2) configuração da carroceria do veículo.

2.11.1 PINÇA DE SOLDA

2.11.1.1 ALINHAMENTO

O alinhamento dos eletrodos é fundamental para a estabilidade na formação do ponto de solda, pois a área define as resistências de contato e a pressão exercida sob o metal líquido que será formado. A Figura 2-37 mostra o desalinhamento geométrico da pinça. A Figura 2-38 os tipos de pinças alinhadas e desalinhadas normalmente encontrados na indústria automobilística.

Figura 2-37. Desalinhamento em pinças de solda.

Figura 2-38. Tipos de alinhamento e desalinhamento de pinças de solda.

Tanto o desalinhamento axial (d_{exc}) como o radial (α_{exc}) provoca a variação da área de contato conforme definido na equação abaixo [Zhang, 2012] (Figura 2-39).

$$A_{cont} = \frac{2r^2 \arccos\left(\frac{\delta_{exc}}{2r}\right) - 2\delta_{exc} \sqrt{r^2 - \left(\frac{\delta_{exc}}{2}\right)^2}}{\pi r^2} \quad (2.10)$$

Figura 2-39. Área de contato em pinças desalinhadas. [Zhang, 2012].

Em uma simulação numérica por elementos finitos, o desalinhamento axial de 0,75mm e radial de 0,28° para uma força de 2,67kN provoca a modificação na distribuição da pressão de contato entre as chapas como mostra Figura 2-40.

Figura 2-40. Distribuição da pressão no contato entre as chapas para eletrodos alinhados e desalinhados. [Zhang, 2012].

2.11.1.2 ORTOGONALIDADE

A falta de ortogonalidade dos eletrodos em relação ao plano formado pelas chapas pode ocasionar o mesmo efeito de desalinhamento, mesmo com o correto alinhamento dos eletrodos como mostra a Figura 2-41.

Figura 2-41. Erro de ortogonalidade em pinças de solda.

2.11.1.3 RIGIDEZ DOS BRAÇOS DA PINÇA

A aplicação de força para o contato das chapas cria uma flexão nos braços das pinças. Os materiais construtivos dos braços normalmente são de ligas de cobre, ligas de alumínio ou latão. Com a flexão dos braços a pressão interna do ponto ultrapassa a pressão aplicada pelos eletrodos diminuindo a força de expansão térmica como mostra a Figura 2-42, permitindo a expulsão de material, como mostra a Figura 2-43 [Zhang, 2012].

Figura 2-42. Força de expansão térmica com braço de alta flexão e baixa flexão. [Zhang, 2012].

Figura 2-43. Momento da expulsão com braço de alta flexão e baixa flexão. [Zhang, 2012].

2.11.1.4 ESCORREGAMENTO DA PINÇA

A falta de atrito dos eletrodos em relação às chapas causa o escorregamento como consequência aumento da área de contato, diminuindo a resistência estática e modificando a resistência dinâmica. A Figura 2-45 mostra a força durante a soldagem com e sem escorregamento [Zhang, 2012].

Figura 2-44. Força durante a soldagem com e sem escorregamento dos eletrodos. [Zhang, 2012].

Empiricamente este efeito causa diminuição do ponto de solda, como mostram as macrografias dos pontos de solda com escorregamento (B) e sem escorregamento (A) da Figura 2-46, onde o escorregamento reduziu sensivelmente o volume de metal fundido [Zhang, 2003].

Figura 2-45. Macrografia do ponto “A” sem escorregamento e “B” com escorregamento. [Zhang, 2003].

2.11.1.5 MARTELAGEM DOS ELETRODOS

A rápida aproximação dos eletrodos sem que haja uma redução na velocidade de contato com as chapas, provoca o efeito de martelagem ocasionando uma perturbação na força de compressão que pode ultrapassar a força programada da pinça. Este repique de força depende da massa do braço móvel, posição em relação a normal e velocidade de movimentação do braço. A Figura 2-46 mostra uma pinça com força de repique de 3,8kN ou 140% da força estabilizada de 2,7kN.

Figura 2-46. Martelagem dos eletrodos com força de repique 93% da força média estabilizada.

Este efeito causa a diminuição da resistência estática porque provoca um pico de pressão interno deformando a superfície de contato. Também provoca ao longo da produção o aumento mais rápido da área de contato dos eletrodos.

Pinças acionadas por servo motor manipuladas por robôs e controladas pelo seu 7º eixo promovem o rápido e suave fechamento da pinça de solda, já que no programa do robô são definidas a espessura do pacote de chapas e a velocidade de fechamento. Com a correta programação, o efeito da martelagem é totalmente eliminado. A Figura 2-47 mostra o comportamento de fechamento de pinças com servo motor em alguns robôs comparado com fechamento pneumático.

Figura 2-47. Comparação da resposta da força de pinças servo e pneumática.

2.11.1.6 EQUALIZAÇÃO DA PINÇA

Operários e robôs não conseguem evitar a movimentação ortogonal da pinça durante o tempo de soldagem, causando variações na resistência estática, dinâmica, força de expansão térmica e indentação, modificando a formação do ponto de solda. O movimento da pinça está mostrado na Figura 2-48.

Figura 2-48. Erros de equalização das pinças de solda.

2.11.1.7 POSICIONAMENTO DA PINÇA

A soldagem das chapas fora da posição definida no projeto da carroceria provoca a alteração da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação. O erro de posição pode estar em bordas, curvatura das chapas, flanges, etc. A Figura 2-49 mostra esta condição.

Figura 2-49. Erros de posicionamento em flanges e bordas.

2.11.1.8 FRESAGEM DOS ELETRODOS

O desgaste dos eletrodos durante a produção dos pontos de solda requer a troca dos mesmos ou usinagem da face de contato para retornar a geometria original. Tanto soldagens manuais quanto automáticas requerem a mesma prática. São usadas fresas com lâminas de corte com o perfil definido pela indústria automobilística (Figura 2-50). Pelo formato simétrico axial dos eletrodos as lâminas giram no sentido de corte, centradas na face dos eletrodos, usinando a superfície (Figura 2-51).

Figura 2-50. Perfil do eletrodo usado na indústria automobilística. [Kappen, 2013].

Figura 2-51. Fresadora e lâmina de fresagem usados na indústria automobilística. [Kappen, 2013].

O entupimento da fresa (Figura 2-52), falta de corte das lâminas, erro de posicionamento dos eletrodos, desalinhamento da pinça, problemas de fixação da fresadora, etc. podem causar a mudança da área de contato (Figura 2-53).

Figura 2-52. Lâminas de fresagem limpa e entupida.

Figura 2-53. Eletrodos com problemas de fresagem (A e B) e eletrodo com fresagem correta (C).

Os defeitos de fresagem alteram a resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação dinâmica, por alterar a face de contato dos eletrodos com as chapas.

2.11.1.9 ÂNGULO DE FECHAMENTO DOS ELETRODOS

Por limitações de acesso da pinça ao lugar do ponto de solda algumas pinças são projetadas com os eletrodos deslocados axialmente. Estas pinças provocam a decomposição vetorial da força axial (Figura 2-54), reduzindo a pressão interna do ponto, além de criar o escorregamento dos eletrodos na superfície das chapas.

Figura 2-54. Decomposição de força e escorregamento em pinças com eletrodos.

Este tipo de pinça provoca a variação da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação dinâmica, alterando a formação do ponto de solda.

2.11.2 CHAPAS (CARROCERIA VEICULAR)

As condições das chapas influenciam a formação do ponto pela mudança na área de contato, pressão interna, espessura, revestimento, rugosidade, etc.

2.11.2.1 ABERTURA ENTRE AS CHAPAS.

O mau assentamento causado por problemas de estampagem, dispositivos de fixação das peças, dilatação causado por aquecimento na transmissão do calor dos pontos de solda para dentro da peça, etc., causam aberturas entre as chapas que reduzem a pressão interna do ponto, alterando a força de expansão térmica. Para tentar contornar estes problemas é normal aumentar a força aplicada entre as chapas diminuindo a resistência estática e modificando a resistência dinâmica. A Figura 2-55 mostra este problema na indústria automobilística.

Figura 2-55. Abertura entra as chapas em uma carroceria veicular.

2.11.2.2 MATERIAIS ADERIDOS À SUPERFÍCIE DAS CHAPAS

Desde sua fabricação até a linha de produção de soldagem as chapas passam por estágios produtivos, como corte e estampagem e logísticos, como armazenamento e transporte. Durante estas etapas ficam aderidos vários materiais como óleos, poeira, polímeros, óxidos, etc. Estes materiais causam o aumento da resistência estática e dinâmica. A Figura 2-56 mostra algumas chapas encontradas na indústria automobilística com estas características.

Figura 2-56. Substâncias estranhas nas superfícies das chapas soldada.

2.11.2.3 ONDULAÇÕES SUPERFICIAIS DAS CHAPAS

No processo de estampagem as chapas são tracionadas e comprimidas e em algumas partes o material comprimido adquire ondulação. O ponto de solda nesta região terá a resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação dinâmica alteradas pela mudança da área de contato e pressão interna. A Figura 2-57 mostra uma chapa com esta característica.

Figura 2-57. Pontos de solda em superfície ondulada em uma carroceria veicular.

2.11.2.4 VARIAÇÃO DOS REVESTIMENTOS E ESPESSURAS DAS CHAPAS

Os revestimentos em chapas são alterados em sua composição química e espessura (Figura 2-58). Para adquirir o formato desejado a estampagem causa o repuxo das chapas, diminuindo a espessura das chapas e do revestimento. Estas situações causam a alteração da resistência dinâmica e força de expansão térmica.

Figura 2-58. Revestimento alterado na mesma peça de uma carroceria veicular.

2.11.2.5 SOLDAGEM COM SELANTE INTERNO AS CHAPAS

Os veículos utilizam em diferentes partes da carroceria materiais poliméricos para impedir a entrada de água, redução da propagação e geração de ruído e até união estrutural. Estes materiais são normalmente colocados entre as chapas e causam a variação da resistência dinâmica. A Figura 2-59 mostra um ponto de solda produzido com excesso de selante entre as chapas.

Figura 2-59. Excesso de selante entre as chapas de uma carroceria veicular.

2.11.2.6 SOLDAGEM EM SUPERFÍCIES NÃO PLANAS

Varias partes do veículo possuem chapas não planas sejam por estética ou para atender as solicitações mecânicas de projeto. Áreas não planas que recebem pontos de solda têm a resistência dinâmica e força de expansão térmica alteradas. A Figura 2-60 mostra algumas partes não planas de veículos que recebem pontos de solda.

Figura 2-60. Ponto de solda produzido em superfície curva.

2.11.3DESGASTE DOS ELETRODOS

A indústria automobilística usa tipicamente eletrodos e sistema de refrigeração como mostra a Figura 2-61.

Figura 2-61. Sistema de refrigeração do eletrodo de uma pinça industrial.

Durante a soldagem os eletrodos estão exercendo pressão nas chapas através da face de contato e estão sob forte aquecimento. Apesar da água de refrigeração retirar parte do calor, as temperaturas alcançadas são suficientes para diminuir a dureza na região de contato e aliado a alta pressão, a face de contato é deformada, fazendo com que ela aumente ao longo da produção dos pontos de solda [Yeung, 1999].

Figura 2-62. Temperatura do eletrodo durante a soldagem. [Yeung, 1999].

O comportamento do aumento da área de contato ao longo da produção depende do material que compõe os eletrodos, parâmetros de soldagem, revestimento das chapas, vazão, temperatura da água de refrigeração e distancia da saída da água do tubo interno à base dos eletrodos. A influência da vazão e temperatura no desgaste dos eletrodos está mostrada na Figura 2-63 e a distância do tubo na Figura 2-64.

Figura 2-63. Desgaste dos eletrodos em função da temperatura e vazão da água de refrigeração. [Hirsch, 2013].

Figura 2-64. Desgaste dos eletrodos em relação a distância do tubo interno de refrigeração à base do eletrodo. [Hirsch, 2013].

Este aumento da face de contato, com os parâmetros inalterados, faz com que a produção dos pontos tenha o seu tamanho reduzido Figuras 2-65 e 2-66 [Hirsch, 2013].

Figura 2-65. Redução do ponto de solda ao longo da produção em função da vazão e temperatura da água de refrigeração. [Hirsch, 2013].

Figura 2-66. Redução do ponto de solda ao longo da produção em função da distância do tubo interno da água de refrigeração. [Hirsch, 2013].

2.11.3.1 COMPENSAÇÃO DE DESGASTE DE ELETRODOS

O aumento da área de contato dos eletrodos ao longo da produção faz com que a densidade de corrente (A/mm^2) seja reduzida, diminuindo a quantidade de calor por área. Considerando o ponto de solda um corpo adiabático (Figura 2-67) pela lei de Fourier o fluxo de calor é dado por:

$$\phi_{ponto} = K_{chapas} \frac{S_{el} \Delta T_{ponto}}{e_{chs}} \quad (2.11)$$

Figura 2-67. Ponto de solda como corpo adiabático.

Onde:

ϕ_{ponto} = Fluxo de calor no ponto de solda

K_{chapas} = Coeficiente de condutibilidade térmica do metal do ponto de solda.

S_{el} = Secção transversal definido pela área de contato dos eletrodos.

ΔT_{ponto} = Diferença de temperatura entre o centro do ponto e a superfície das chapas.

e_{chs} = Soma das espessuras das chapas 1 e 2.

Da Equação 2.11 se área de contato aumenta para uma mesma quantidade de calor a temperatura diminui, causando a diminuição do ponto de solda. Na produção de veículos, utiliza-se o aumento gradual da corrente de soldagem (*stepper*) para compensar este efeito.

A redução da resistência estática devido ao aumento da área de contato e o aumento do tamanho do ponto contribuem para que a quantidade de calor aumente, necessitando, então a elevação da corrente de soldagem.

3 INSTRUMENTAÇÃO APLICADA A SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Normalmente os pesquisadores que realizam estudos de soldagem por resistência a ponto usam instrumentos comerciais adaptados para uso em máquinas de laboratório e que não podem ser instalados em pinças industriais [Uran, 2004].

Este capítulo mostra que os instrumentos desenvolvidos e usados neste estudo podem ser implantados em pinças de solda industriais.

3.1 MEDIÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM

Como a pinça de solda é do ponto de vista elétrico um circuito série [Furlanetto, 2005], a corrente de soldagem pode ser medida em qualquer condutor, desde a saída do transformador até o contato dos eletrodos com as chapas. Para minimizar os erros que podem ser causados por correntes de desvio, o sensor deve ser colocado o mais próximo possível aos eletrodos. Os sensores devem ser pequenos e facilmente instalados. De todos os sensores de corrente tanto alternada como contínua, os mais indicados são o de efeito Hall e a bobina de Rogowski. As vantagens e desvantagens destes dois tipos estão mostradas na tabela 3-1.

Tabela 3-1. Comparação entre sensor de efeito Hall e bobina de Rogowski.

SENSOR DE CORRENTE	HALL	ROGOWSKI
Custo	Alto	Baixo
Linearidade na faixa de medição	Boa	Muito boa
Capacidade de medição de altas correntes	Boa	Muito boa
Consumo de energia	Medio	Baixo
Saturação em corrente contínua	Sim	Não
Variação com a temperatura	Alta	Muito baixa
Sem corrente valor não é zero (<i>offset</i>)	Sim	Sim
Saturação e histerese	Sim	Não
Erro de amplificação	Baixo	Alto
Relação sinal ruído	Alta	Média

3.1.1 BOBINA DE ROGOWSKI

A bobina de Rogowski funciona sob o efeito do campo magnético no espaço que circunda um condutor e a lei de Ampère que dá a relação entre a corrente que flui por este condutor e o campo magnético em torno dele. Delimitando-se no espaço uma linha fechada qualquer que contém em seu interior o condutor, pela lei de Ampère, a integral de linha é igual à corrente que flui pelo condutor, expressa pela equação 3.1 [Ward, 1993] [Higashi, 2003].

$$i_{cond} = \oint H_{bob} \cos a_{bob} dl \quad (3.1)$$

Onde:

i_{cond} = Corrente elétrica que flui pelo condutor filiforme

H_{bob} = Campo magnético.

a_{bob} = Ângulo entre a direção do campo e do pequeno pedaço da linha.

dl = Pequeno pedaço de linha ao longo da linha fechada.

A Figura 3-1 mostra uma bobina helicoidal, longa, fina, com n_{bob} voltas por metro com uma secção transversal A_{bob} a qual circunda o condutor com corrente i_{bob} . Na secção para o comprimento dl o número de espiras é $n_{bob}dl$ e o fluxo magnético desta secção é expresso por:

$$\partial\Phi_{bob} = \mu_0 H_{bob} A_{bob} n_{bob} dl \cos a_{bob} \quad (3.1)$$

Onde:

$\partial\Phi_{bob}$ = Fluxo magnético da secção A_{bob} .

A_{bob} = Secção transversal da bobina.

$n_{bob}dl$ = Pequeno pedaço de linha ao longo da linha fechada.

μ_0 = Permeabilidade magnética no ar.

Figura 3-1. Representação da linha fechada e grandezas envolvidas. [Ward, 1993].

O fluxo concatenado ao longo da bobina é dado pela Equação 3.3.

$$\Phi_{bob} = \int d\Phi_{bob} = \mu_0 n_{bob} A_{bob} \int H_{bob} \cos \alpha_{bob} dl = \mu_0 n_{bob} A_{bob} i_{cond} \quad (3.3)$$

A tensão da bobina é dada por:

$$v_{bob} = -\frac{\partial \Phi_{bob}}{\partial t} = -\mu_0 n_{bob} A_{bob} \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.4)$$

Assim a tensão na saída da bobina de Rogowski independe do formato da bobina, mas que ela contenha o condutor filiforme. Em termos práticos a indutância mútua entre a bobina e o condutor é dado por:

$$M_{bob-cond} v_{bob} = \mu_0 n_{bob} A_{bob} \quad (3.5)$$

Para se obter o sinal da corrente do condutor, basta integrar o sinal de tensão da bobina conforme expresso na equação 3.6.

$$i_{cond}(t) = \frac{1}{T_{int}} \int_0^{t_{int}} v_{bob} dt \quad (3.6)$$

A bobina feita em uma placa de circuito impresso (PCI) proporciona baixa autoindutância, grande precisão e linearidade, devido à precisão da confecção industrial das PCIs, alta robustez, vários tamanhos e baixo custo. O projeto da bobina é muito rápido e permite a instalação em praticamente qualquer pinça de solda. Em contrapartida a essas vantagens estão a baixa quantidade de espiras, e a influencia de campos magnéticos vizinhos a bobina, porém montando duas PCIs com uma em sentido contrario a outra reduz a sensibilidade aos campos e dobra a quantidade de espiras, resolvendo estas desvantagens [Artero, 2005].

A bobina de Rogowski construída atendendo os critérios de projeto [Weibo, 2006] tem linearidade entre $\pm 0,02\%$ [Ramboz, 2002] [Antona, 2002]. A bobina desenvolvida foi projetada especificamente para instalação em pinças de solda industriais. Como o tamanho deve ser muito pequeno e robusto, construiu-se a bobina em uma placa de circuito impresso (PCI) [Artero, 2005] para instalar no porta eletrodo. A Figura 3-2 mostra a bobina desenvolvida em uma placa de circuito impresso. A instalação foi feita no porta eletrodo.

Figura 3-2. Instalação da bobina de Rogowski em uma pinça de solda.

O integrador pode ser construído analogicamente [Higashi, 2006] ou digitalmente [Zhang Xin, 2010], sendo que o analógico impõe erros no sinal de saída em função da temperatura, *offset* e ruídos elétricos criados pelo próprio integrador, além de um valor constante e crescente que depende do valor inicial de integração, como descreve a equação de funcionamento de um integrador (3.7) [Higashi, 2006] [Ward, 1993].

$$V_{out} = \int_0^{t_{int}} V_{inicial} - \frac{V_{int}}{R_{int} C_{int}} dt \quad (3.7)$$

O circuito básico de um integrador analógico está mostrado na Figura 3-3.

Figura 3-3. Circuito básico de um integrador analógico.

Alguns problemas do integrador analógico:

- Assumindo que a tensão de entrada não tem valor médio igual a zero, porque todo o sinal é composto de duas tensões, sendo uma alternada com valor médio zero e continua de com valor constante. Esse valor constante causa o acréscimo constante tensão de saída ao longo do tempo, já que a integral de um pulso é uma reta crescente (Figura 3-4).
- Mesmo com tensão de entrada igual a zero a diferença de corrente entre as entradas positiva e negativa, pode causar uma pequena diferença de tensão na entrada provocando o mesmo efeito na saída, isto é, crescimento da tensão ao longo do tempo. Este efeito é reduzido colocando um resistor na entrada positiva do amplificador para equalizar as correntes de entrada.

Figura 3-4. Sinal na saída do integrador para entrada diferente de zero.

O circuito final está mostrado na Figura 3-5.

Figura 3-5. Circuito analógico de integração do sinal da bobina de Rogowski.

Para minimizar os problemas expostos, ajusta-se o valor de P1 para que se obtenha a menor tensão de *offset* do amplificador. Uma chave analógica foi adicionada em paralelo ao capacitor de integração para descarregá-lo quando o diferencial de entrada for próximo de zero (U5). Esta chave é comandada por um circuito comparador de tensão de janela (U3 e U4) que abre a chave quando a tensão de entrada ultrapassa um limite (trigger) valor definido em P2, dando início a integração. É claro que o nível de trigger deve ser baixo em relação ao sinal recebido, não devendo ser maior que 1%.

O capacitor de integração (Cint) deve ser preciso em sua capacitância, não maior que $\pm 5\%$ e baixo desvio com a temperatura, por isso sugere-se o uso de capacitores da série NPO. O resistor de integração (Rint) deve ter precisão de 0,1% e baixo desvio com a temperatura. O amplificador (U1) deve ter baixíssimos valores da tensão de saída (*Offset Voltage*) em função da diferença de tensão na entrada (*Input Offset Voltage*), da temperatura (*Offset voltage vs Temperature*), da variação da tensão de alimentação (*Offset voltage vs Power Supply*), corrente de entrada (*Input Bias Current*) e desvio da corrente de entrada em função da temperatura (*Input Offset Current*), além de baixíssimo ruído com a temperatura (*Noise*) e alta relação sinal ruído (CMRR), tudo isto com uma alta impedância de entrada diferencial e baixa capacitância de entrada (*Input Impedance*). O amplificador OPA4336 da Texas Instruments atende estas características (Figura 3-6).

PARÂMETRO	VALOR
TENSÃO DE OFFSET DE ENTRADA	$\pm 60\mu\text{V}$
TENSÃO DE OFFSET DE ENTRADA X TEMPERATURA	$\pm 1,5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
ENTRADA DE CORRENTE DE BIAS	$\pm 1\text{pA}$
DENSIDADE DO RUÍDO DA TENSÃO DE ENTRADA	$40\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
REJEIÇÃO DE MODO COMUM (CMRR)	90dB
IMPEDÂNCIA DE ENTRADA	$10^{13}\Omega$ -2pF

Figura 3-6. Especificações do amplificador usado na integração do sinal da bobina de Rogowski.

Para que o sinal de entrada (bobina de Rogowski) não seja tão atingido pelos ruídos [Artero, 2005] gerando erros no sinal de corrente (saída do integrador) a transmissão do sinal da bobina até o integrador é feita por cabo diferencial blindado. Como a amplitude do sinal de entrada é baixa (centenas de μV) foi implantado um amplificador de instrumentação (U2) que consiste em um amplificador diferencial com ganho de amplificação programável promovendo excelente amplificação com alta relação de rejeição de modo comum (CMRR). A rejeição de modo comum (CMRR) mede a relação de quanto foi amplificado de sinal e quanto foi amplificado de ruído que foi gerado em ambos os cabos atingidos pelo mesma fonte de ruído. A Figura 3-7 mostra o efeito do ruído induzido de modo diferencial nos cabos de transmissão de sinal e o sinal na saída do amplificador de instrumentação com o ruído praticamente zero.

Figura 3-7. Rejeição de ruído em modo comum da bobina de Rogowski.

3.1.2 SENSOR DE EFEITO HALL

O efeito Hall existe quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica e recebe um campo magnético, nestas condições as cargas deste condutor sofrerão uma força. Na Figura 3-8 as cargas positivas se deslocam para a direita sob a ação de uma força magnética agindo de baixo para cima [Zanatta, 2013].

Figura 3-8. Efeito Hall. [Zanatta, 2013].

A força magnética sobre as cargas provoca uma corrente perpendicular a direção de propagação da corrente, acarretando o aparecimento de uma região com concentração de cargas positivas e a outra de cargas negativa, como mostra a Figura 3-8, criando um campo elétrico perpendicular ao campo magnético $\vec{B}$. A corrente cessará quando o balanço de cargas, positivas e negativas criarem uma força elétrica que anule a força magnética sobre as cargas [Zanatta, 2013]. Disto:

$$\vec{F}_e = \vec{F}_m \Rightarrow q_H \vec{E}_H = q_H \vec{v}_q \times \vec{B}_{ext} \quad (3.8)$$

A diferença de potencial entre as partes superior e inferior do condutor é dada por:

$$V_H = E_H d_H = v_q B_{ext} d_H = \frac{i_H B_{ext} d_H}{n_H q_H A_H} \quad (3.9)$$

Onde:

V_H = Diferença de potencial (tensão) transversal sob o condutor.

i_H = Corrente que circula longitudinalmente no condutor.

B_{ext} = Campo magnético externo.

d_H = Distancia entre os pontos da diferença de potencial.

n_H = Número de cargas por unidade de volume.

q_H = Carga elétrica.

A_H = Área da secção transversal do condutor.

Se um material semicondutivo, que sofre o mesmo efeito, for colocado sob a influência de um campo magnético a tensão que aparece em suas extremidades transversais é proporcional a corrente que produz o campo eletromagnético, com o mesmo comportamento ao longo do tempo. Desta forma pode-se medir a corrente aproximando-se este elemento ao condutor que se deseja medir.

O fabricante LEM lançou um circuito integrado (FHS 40-P/SP600) com sensor e amplificador incorporados (Figura 3-9), compensado em temperatura, alto CMRR e linearidade menor que 0,5%.

Figura 3-9. Sensor de efeito Hall com amplificador integrado. [LEM, 2013].

A instalação é feita no porta eletrodo com uma barreira de campo eletromagnético para diminuir seu valor, já que o circuito integrado foi desenvolvido para correntes até 100A e a corrente de soldagem alcança valores em torno de 10 kA. A Figura 3-10 ilustra a posição de instalação do circuito.

Figura 3-10. Ilustração da instalação do sensor de efeito. Figura-LEM, 2013.

Da mesma forma que para a bobina de Rogowski os cabos de transmissão do sinal são induzidos por campos magnéticos indesejáveis presentes em ambiente industrial, gerando ruídos e impondo erro de medição. Foi desenvolvido um amplificador de instrumentação para promover alta relação de rejeição de modo comum (CMRR). O circuito está mostrado na Figura 3-11.

Figura 3-11. Amplificador com alto CMRR.

3.1.3 RESULTADOS PRÁTICOS

O sensor de efeito Hall teve maior dificuldade de implantação em pinças industriais além de apresentar maior dificuldade de calibração por necessitar de um material para limitar o forte campo eletromagnético formado pelo porta eletrodo. Por estas razões a bobina de Rogowski em PCB foi escolhida para o sistema de medição da pinça industrial (Figura 3-12). A Figura 3-13 mostra a instalação.

Figura 3-12. Pinça industrial usada nos testes.

Figura 3-13. Bobina de Rogowski instalada na pinça industrial de testes.

Os sinais obtidos tanto na pinça industrial como no cabeçote mostram que os sinais estão sem ruído e sem deformações (Figura 3-14), a menos do valor RMS, que é calibrado em individualmente. A calibração foi realizada usando um medidor de corrente TECNA modelo TE1600 com resolução de 12bits, precisão de $\pm 1\text{LSB} + 1\%$ (Low Significant Bit). O desvio máximo da calibração foi de 0,5%. Desta forma o conceito de medição com bobina de Rogowski com integrador analógico está aprovado permitindo que as medições de corrente feitas no cabeçote sejam tão confiáveis como se estivessem sendo realizadas no chão de fabrica em pinças industriais.

Figura 3-14. Sinais de corrente em pinça industrial e no cabeçote.

3.2 MEDIÇÃO DA TENSÃO ENTRE ELETRODOS

Como já discutido, a indução de ruídos em cabos de transmissão de sinais em ambientes industriais, principalmente em linhas de soldagem, cria erros de medição indesejáveis [Gedeon, 1987]. A medição de tensão sofre a indução destes ruídos. Para minimiza-los ao máximo a transmissão é feita em cabos diferenciais com blindagem. Para eliminar estes ruídos foi desenvolvido um circuito com amplificador

diferencial de entrada, com alto CMRR, e baixo *offset*, já discutido em 3.1.1. A equação 3.10 define o comportamento do amplificador diferencial da Figura 3-15.

$$V_{out} = V_2 \left(\frac{(R_f + R_1)R_g}{(R_g + R_2)R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_f}{R_1} \right) \quad (3.10)$$

Figura 3-15. Amplificador diferencial.

O amplificador deve ter ganho e linearidade menores que 0,01% para não impor erros nos valores de amplitude do sinal. O valor do ganho deve estar em torno de 1, já que os níveis de tensão entre os eletrodos estão em torno de centenas de mV. O amplificador da Texas Instruments INA132 atende estas especificações conforme mostra a Figura 3-16.

PARÂMETRO	VALOR
TENSÃO DE OFFSET DE ENTRADA	$\pm 150\mu\text{V}$
TENSÃO DE OFFSET DE ENTRADA X TEMPERATURA	$\pm 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
REJEIÇÃO DE MODO COMUM (CMRR)	90dB

Figura 3-16. Especificações do amplificador diferencial INA132.

O circuito de amplificação final está mostrado na Figura 3-17.

Figura 3-17. Amplificador diferencial para tensão entre os eletrodos.

As formas de onda da tensão sem e com o amplificador diferencial estão nas Figuras 3-18 e 3-19.

Figura 3-18. Sinal de tensão sem o amplificador diferencial.

Figura 3-19. Sinal de tensão com o amplificador diferencial.

O circuito desenvolvido para medição da tensão entre os eletrodos foi testado em uma pinça industrial (Figura 3-20).

Figura 3-20. Sensor de tensão instalado em uma pinça industrial.

Os sinais de tensão tanto na pinça industrial como no cabeçote mostram que o circuito funciona sem ruídos ou deformações em ambas as máquinas (Figura 3-21). A precisão da medição depende do conversor A/D. Neste estudo foi usado o osciloscópio Tie Pie modelo HS4-DIFF com resolução de 12bits e precisão de $\pm 0,2\% + 500\mu\text{V}$. Desta forma o circuito de amplificação desenvolvido permite que as medições de tensão entre os eletrodos realizadas no cabeçote sejam tão confiáveis como se estivessem sendo realizadas no chão de fábrica em pinças industriais.

Figura 3-21. Sinais de tensão em pinça industrial e no cabeçote.

3.3 MEDIÇÃO DA FORÇA DE EXPANSÃO TÉRMICA

Os sensores convencionais de medição de força, tais como extensômetros resistivos (*strain gages*) e piezoresistivos, são muito susceptíveis a campos magnéticos e quando submetidos em ambientes industriais, principalmente em linhas de produção de solda, geram ruídos muito grandes e erros de medição [Gedeon, 1987] [Zhang, 2012].

Para que a força medida tivesse precisão na amplitude e tempo de resposta o sensor de força foi desenvolvido para não sofrer deformação na compressão durante a soldagem. O valor de força suportado foi triplicado em relação ao máximo produzido pelo servo motor, isto é, 15.000 N. O aspecto mais importante para a fidelidade do sinal está na imunidade do sensor ao forte campo eletromagnético gerado perto da pinça (Figura 3-22).

Em pinças industriais a força aplicada é medida indiretamente pela corrente do motor que é proporcional ao torque e é calibrada no chão de fábrica pela força medida com instrumentação convencional, portanto, estes equipamentos não conseguem medir a força de expansão térmica.

Figura 3-22. Ruído gerado pelo campo eletromagnético sobreposto ao sinal da força em sensores convencionais.

Para este estudo desenvolveu-se um sensor para aplicação em pinças industriais de soldagem por resistência. Ele consiste em um sensor de força resistivo FSR™ (*Force Sensing Resistor*) de baixa capacidade (até 100N) e um redutor de força. O FSR é composto de micro partículas de prata sob um material adesivo (Figura 3-23), sendo “transparente” ao campo eletromagnético. O redutor de força é uma capsula que transmite a força proporcionalmente ao fator k de compressão,

conforme lei de Hooke (Eq. 3.11). O dispositivo final com o sensor FSR e o redutor de força é mostrado na Figura 3.24.

$$F = k\Delta d \quad (3.11)$$

Figura 3-23. Sensor de força tipo resistivo (FSR). [Interlink Electronics, 2013].

Figura 3-24. Dispositivo de redução de força e sensor FSR.

A variação da resistência em função da carga aplicada ao FSR tem comportamento exponencial, como mostra a Figura 3-15.

Figura 3-25. Comportamento da resistência em função da força de um FSR.

Se o sinal fosse digitalizado diretamente com um osciloscópio de 8 bits, o erro de digitalização baseado na resposta não linear do sensor da Figura 3-25 seria enorme em baixas forças e pequeno em altas forças como mostra a Figura 3-26.

Figura 3-26. Erro de digitalização de um sensor FSR.

Para mudar a relação exponencial do sensor a ligação foi feita como um divisor resistivo (Figura 3-27), tendo-se o comportamento exponencial da carga pela tensão no divisor resistivo como mostrado na Figura 3.28.

Figura 3-27. Divisor resistivo.

Onde R1 é a resistência do sensor R2 é um resistor fixo e Vx é a tensão de saída do divisor resistivo.

Figura 3-28. Resposta do sensor como divisor resistivo.

O sinal foi transmitido por cabos diferenciais blindados por causa do ambiente das linhas de soldagem. Como a amplitude do sinal do divisor resistivo é baixo (alguns mV) foi implantado um amplificador de instrumentação com ganho 20, além de eliminar os ruídos gerados nos fios de transmissão do sinal com alto CMRR. Foi escolhido o amplificador da Texas Instruments INA126.

Para minimizar os erros na escala de medição pela relação não linear do sensor, foi escolhido um circuito analógico que efetua a tarefa de linearização do sinal, já que neste estudo os sinais de corrente, tensão, força e deslocamento, devem todos ser capturados simultaneamente sem atrasos ou rotação de fase. Escolheu-se o circuito integrado da Analog Devices AD538, denominado de unidade computacional analógica em tempo real, ACU (Real-Time Analog Computational Unit).

As Figuras 3-29 e 3-30 mostram o diagrama de blocos elétrico e matemático do AD538.

Figura 3-29. Diagrama elétrico de blocos do amplificador logarítmico. Figura- Analog Devices, 2013.

Figura 3-30. Diagrama matemático de blocos do amplificador logarítmico. Figura- Analog Devices, 2013.

As entradas V_Z e V_X são ligadas diretamente aos amplificadores logarítmicos e subtraídos fornecem tensão de saída proporcional ao logaritmo natural. A saída da subseção B é expressa por:

$$V_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{V_Z}{V_X} \right) \quad (3.12)$$

Para:

$$k = 1,3806 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

$$q = 1,60219 \cdot 10^{-19} C$$

T está em Kelvins

A saída deste bloco está ligada diretamente a uma segunda subseção C, que executa o antilogaritmo de acordo com a função de transferência:

$$V_0 = V_Y e^{\left(V_C \frac{q}{kT} \right)} \quad (3.13)$$

Quando ambas as subseções são usadas elas são conectadas e a função de transferência é:

$$V_0 = V_Y e^{\left[\left(\frac{kT}{Q} \right) \left(\frac{q}{kT} \right) \ln \left(\frac{V_Z}{V_X} \right) \right]} \quad (3.14)$$

O qual se reduz a:

$$V_0 = V_Y \left(\frac{V_Z}{V_X} \right) \quad (3.15)$$

E por fim através do aumento do ganho ou atenuação em conjunto com a razão logarítmica (m) programada através de resistor, a função global de transferência do AD538 é:

$$V_0 = V_Y \left(\frac{V_Z}{V_X} \right)^m \quad (3.16)$$

A Figura 3.31 mostra o circuito final do amplificador do sensor FSR.

Figura 3-31. Esquema do amplificador logarítmico do FSR.

3.3.1 RESULTADOS PRÁTICOS

O sensor de força desenvolvido foi calibrado usando um medidor digital da Myiachi modelo MM-380, com precisão de $\pm 2\%$. O desvio máximo da calibração foi de $\pm 1\%$. Foi instalado em uma pinça industrial (Figura 3-32) para testes de funcionamento. Devido ao formato do FSR o sensor não permitiu a passagem da água de refrigeração e durante a instalação em chão de fábrica não foi possível refrigerar os eletrodos com a ligação externa de mangueiras. Do ponto de vista prático isto não invalida o teste, já que os eletrodos são novos e foram realizados apenas alguns pontos de solda para a aquisição dos dados. O fabricante informou que um modelo de FSR em forma toroidal (Figura 3-33) pode ser construído sob encomenda nas dimensões desejadas, permitindo que a água de refrigeração passe por entre o sensor, resolvendo este problema.

Figura 3-32. Sensor de força instalado em uma pinça industrial.

Figura 3-34. Sinais da força de expansão térmica em pinça industrial e no cabeçote.

A medição do deslocamento em uma pinça de solda industrial foi feito através de sensor resistivos do tipo potenciométrico por ser compacto, facilmente instalado, muito pouco susceptível a campos magnéticos, alcança distancias de milímetros a metros, tem boa linearidade, pequena variação com a temperatura e por último e mais importante, é analógico, isto é, sua medição é contínua em relação ao deslocamento. O sensor instalado em máquinas de soldagem está sujeito a ruídos industriais [Gedeon, 1987], por isso o sinal é transmitido em cabos diferenciais com blindagem. Um gerador de corrente constante de precisão está diretamente ligado ao resistor para a geração da tensão proporcional ao deslocamento, dada pela primeira lei de Ohm. O gerador de corrente escolhido é o Texas Instruments LM334. O sensor é o Gefran LTM0050P com linearidade melhor que 0,2% e desvio de temperatura menor que 0,015mm/°C. A Figura 3-35 mostra o circuito do amplificador do sensor de deslocamento linear.

Figura 3-35. Amplificador do sensor potenciométrico de deslocamento linear.

3.3.2 RESULTADOS PRÁTICOS

As pinças industriais acionadas por servo motor têm a medição da posição dos eletrodos realizada pelo robô, através de *encoder* ou *decoder*, porém os valores da posição ao longo do tempo (indentação dinâmica) não são disponibilizados ao usuário, portanto, não foi possível fazer uma comparação do valor da pinça industrial com o cabeçote.

3.4 MEDIÇÃO DA VAZÃO, TEMPERATURA E PRESSÃO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO.

Medir a vazão e temperatura é fundamental para complementar as informações sobre o comportamento do processo de soldagem, como visto no apêndice 1.

3.4.1 MEDIÇÃO DA VAZÃO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

Dentro os vários tipos de medição de vazão escolheu-se o de turbina, por ter baixa perda de carga, baixo desvio em relação à temperatura, boa linearidade e alta imunidade a campos eletromagnéticos. Foi escolhido o medidor Georg Fischer modelo Signet 9900 (Figura 3-36).

Figura 3-36. Medidor Signet 9900. [GF Piping Systems, 2013].

A medição é baseada na quantidade de impulsos que a turbina produz ao girar em um intervalo de tempo. Ao circular água a turbina gira produzindo um trem de pulsos dado pela quantidade de vezes que a turbina girou. Como a relação giro-volume é conhecida e precisa, a frequência de giro da turbina é diretamente proporcional ao volume. A especificação está mostrado na Figura 3-37.

PARÂMETRO	VALOR
SENSIBILIDADE	80mV@5Hz
FAIXA DE OPERAÇÃO	0,5 a 1500Hz
PRECISÃO	±0,5%
RESOLUÇÃO	1μs
REPETIBILIDADE	±0,2%

Figura 3-37. Especificação do sensor de vazão de água.

3.4.2 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

Para medir a temperatura da água de refrigeração usando o medidor Signet 9900 foi desenvolvido um conversor tensão frequência. O sensor de temperatura é o LM35AH encapsulamento TO-46 (Figura 3-38) da Texas Instruments, com as características mostradas na Figura 3-39.

Figura 3-38. Sensor de temperatura em encapsulamento TO-46. [Texas Instruments, 2013].

PARÂMETRO	VALOR
PRECISÃO (-10°C a 25°C)	±0,2°C
LINEARIDADE	±0,18°C

Figura 3-39. Características do sensor de temperatura.

O desvio do circuito de conversão tensão frequencia está na tabela 3-12.

Tabela 3-2. Erro de medição do sensor de temperatura.

TEMPERATURA								
T _{mín.} (°C)	T _{máx.} (°C)	Pulsos (°C/min)	K _{sensor} (mV/(°C))	T (°C)	f _{medidor} (Hz)	V _{in} (V)	Medido	Desvio
5	50	834,9	10	5,0	69,6	0,25	5,2	4,0%
				10,0	139,2	0,50	10,3	3,0%
				20,0	278,3	1,00	20,1	0,5%
				30,0	417,5	1,50	29,8	-0,7%
				40,0	556,6	2,00	39,2	-2,0%
				50,0	695,8	2,50	48,9	-2,2%

O circuito do conversor está na Figura 3-40.

Figura 3-40. Circuito do conversor temperatura.

3.4.3 MEDIÇÃO DA PRESSÃO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

Para medir a pressão foi desenvolvido um conversor tensão frequência para que o medidor Signet 9900 pudesse ser usado. O sensor de pressão é Honeywell modelo 26PCF de 6,89bar, compensado em temperatura. As especificações estão na Figura 3.41.

PARÂMETRO	VALOR
FAIXA DE MEDIÇÃO	0 - 6,89bar
LINEARIDADE	0,1%
OFFSET	±2,0mV
SENSIBILIDADE	1,0 mV/0,0689bar
SOBRE PRESSÃO	13,789bar

Figura 3-41. Especificação do sensor de pressão. Foto-Honeywell Sensing and Control, 2013.

O erro relativo ao circuito conversor tensão frequência está mostrado na tabela 3-3.

Tabela 3-2. Erro de medição do sensor de pressão.

PRESSÃO								
P _{São Paulo} (bar)	P _{máx} (bar)	Pulsos (bar/min)	K _{Honeywell} (mV/bar)	P (bar)	f _{medidor} (Hz)	V _{in} (V)	Medido	Desvio
1,02	6,0	834,9	14,504	1,0	13,9	0,50	14,1	1,3%
Offset _{São Paulo} (mV)				2,0	27,8	1,00	28	0,6%
14,79				3,0	41,7	1,50	41,6	-0,3%
				4,0	55,7	2,00	55,1	-1,0%
				5,0	69,6	2,50	68,8	-1,1%
				6,0	83,5	3,00	82	-1,8%

O circuito eletrônico está na Figura 3-42.

Figura 3-42. Circuito do sensor de pressão.

3.5 CONTROLADOR DE REFRIGERAÇÃO

A refrigeração dos eletrodos é fundamental para o processo de solda e pode influenciar diretamente nas medições, portanto o controle da vazão e temperatura é muito importante. A vazão foi controlada em 4,0 LPM para cada eletrodo e temperatura de $20,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, como especificado na maioria das indústrias automobilísticas.

Foi desenvolvido um trocador de calor eletrônico com base no efeito Peltier. Seu funcionamento se baseia no efeito observado por Charles Peltier Athanasius em 1834, que quando uma corrente circula por dois materiais dissimilares de diferentes propriedades um gera calor enquanto o outro absorve calor. A partir deste efeito gera-se uma diferença de temperatura. Se o lado que absorve calor for continuamente alimentado de calor e o outro for continuamente retirado estes materiais funcionam como uma bomba de calor, retirando calor do lado frio (menor temperatura) e transferindo para o lado quente (maior temperatura) [Camargo, 2011]. A Figura 3-43 ilustra o funcionamento de um módulo Peltier.

Figura 3-43. Pastilha de transmissão de calor Peltier. [WellenTech, 2013].

Para dimensionar esta bomba de calor parte-se do coeficiente de desempenho (COP) do módulo definido como [Camargo, 2011]:

$$COP = \frac{Q_F}{P_{EPt}} \quad (3.17)$$

Onde:

Q_F = Calor retirado pelo lado frio do módulo Peltier.

P_{EPt} = Potência elétrica de entrada do módulo Peltier

A taxa de retirada de calor é dada por:

$$Q_F = \alpha_{Pt} T_F - \frac{1}{2} I_{Pt}^2 R_{Pt} - K_{Pt} \Delta T_{Pt} \quad (3.18)$$

Onde:

$\alpha_{Pt} = \alpha_P + \alpha_n$, sendo α_{Pt} e α_n são propriedades dos materiais dos semicondutores do módulo Peltier.

I_{Pt} = Corrente do módulo Peltier.

R_{Pt} = Resistência do módulo Peltier.

K_{Pt} = Condutividade térmica do módulo Peltier.

$\Delta T_{Pt} = T_Q - T_F$, onde T_F = Temperatura lado frio e T_Q = Temperatura lado quente.

A potência elétrica é dada por:

$$P_{EPt} = V_{Pt} I_{Pt} = \alpha_{Pt} I_{Pt} \Delta T_{Pt} + I_{Pt}^2 R_{Pt} = \frac{V_{Pt} (V_{Pt} - \alpha_{Pt} \Delta T_{Pt})}{R_{Pt}} \quad (3.19)$$

Para:

$$V_{Pt} = \alpha_{Pt} \Delta T_{Pt} + I_{Pt} R_{Pt} \quad (3.20)$$

O valor do COP para uma geometria otimizada é:

$$COP = \frac{\left[m_{Pt} - \frac{1}{2} m_{Pt}^2 - \left(\frac{\Delta T_{Pt}}{Z_{Pt}} \right) \right]}{\left(m_{Pt} \Delta T_{Pt} + m_{Pt}^2 \right)} \quad (3.21)$$

Onde:

$$m_{Pt} = \frac{I_{Pt} R_{Pt}}{\alpha_{Pt}} \quad (3.22)$$

Onde Z_{Pt} é chamado de coeficiente de mérito e é dado por:

$$COP = \frac{\alpha_{Pt}^2}{\left(\sqrt{\rho_n K_n} + \sqrt{\rho_p K_p} \right)^2} \quad (3.23)$$

Onde:

ρ_n, ρ_p = Respectivamente resistividade elétrica da pastilha semicondutora n e p .

K_n, K_p = Respectivamente condutividade térmica da pastilha semicondutora n e p .

O COP é fortemente influenciado pelo coeficiente de mérito do material do semicondutor. A corrente que maximiza o COP é obtida da derivada da equação acima com m_{Pt} igual a zero e é dada por:

$$I_{PtM} = \frac{\alpha_{Pt} \Delta T_{Pt}}{R_{Pt} (\omega_{Pt} - 1)} \quad (3.24)$$

Onde:

$$\omega_{Pt} = \sqrt{1 + Z_{Pt} T_{Pt}} \quad (3.25)$$

O COP otimizado é dado por:

$$COP_{otim} = \frac{T_F}{\Delta T_{Pt}} \left(\frac{\omega_{Pt} - \frac{T_Q}{T_F}}{\omega_{Pt} + 1} \right) \quad (3.26)$$

O valor da tensão que maximiza o COP é dado por:

$$V_{otim} = \frac{\alpha_{Pt} \Delta T_{Pt} \omega_{Pt}}{\omega_{Pt} - 1} \quad (3.27)$$

A potência de entrada otimizada é dada por:

$$P_{Eotim} = \left(\frac{\omega_{Pt}}{R_{Pt}} \right) \left(\frac{\alpha_{Pt} \Delta T_{Pt}}{(\omega_{Pt} - 1)} \right)^2 \quad (3.28)$$

A corrente otimizada é dada por:

$$I_{otim} = \left(\frac{\omega_{Pt}}{R_{Pt}} \right) \left(\frac{\alpha_{Pt} T_F}{R_{Pt}} \right)^2 \quad (3.29)$$

A máxima transferência térmica é dada por:

$$Q_F = \left(\frac{\alpha_{Pt} T_F}{2R_{Pt}} \right)^2 - K_{Pt} \Delta T_{Pt} \quad (3.30)$$

O rendimento elétrico é outro parâmetro importante do projeto e é dado por:

$$\eta_{Pt} = \frac{P_{SPt}}{Q_Q} \quad (3.31)$$

Onde: P_{SPt} = Potência de saída do módulo Peltier.

Q_Q = Calor gerado pelo lado quente do módulo Peltier.

O calor dissipado pelo quente é:

$$Q_Q = \alpha_{Pt} T_Q I_{Pt} + \frac{1}{2} I_{Pt}^2 R_{Pt} + K_{Pt} \Delta T_{Pt} \quad (3.33)$$

A potência elétrica é dada por:

$$P_{SPt} = I_{Pt}^2 R_{Pt} = V_{Pt} I_{Pt} \quad (3.34)$$

O rendimento final é dado por:

$$\eta_{Pt} = \frac{\left(\frac{\Delta T_{Pt}}{T_Q} \right) (\omega_{Pt} + 1)}{\omega_{Pt} + \left(\frac{T_F}{T_Q} \right)} \quad (3.35)$$

A tensão é dada por:

$$V_{Pt} = \frac{1}{2} \alpha_{Pt} \Delta T_{Pt} \quad (3.36)$$

A corrente é dada por:

$$I_{Pt} = \frac{\alpha_{Pt} \Delta T_{Pt}}{2 R_{Pt}} \quad (3.37)$$

A potência final é dada por:

$$P_{SPt} = \frac{(\alpha_{Pt} \Delta T_{Pt})^2}{4 R_{Pt}} \quad (3.36)$$

Após os cálculos o sistema de troca de calor possui potência máxima elétrica de entrada de 1500W com COP de 0,22 e rendimento de 0,2. Foram usados seis módulos Peltier de 268W da Fulling & CEIEC modelo TEC1-263155050, num total de 1608W. A Figura 3.44 mostra o trocador de calor e suas partes.

Figura 3-44. Trocador de calor tipo Peltier.

Para o controle da temperatura foi desenvolvido um circuito PWM para variação da tensão eficaz aplicada nos módulos. Foi desenvolvido um controlador analógico do tipo proporcional já que o tempo de resposta, isto é, o tempo de variação da temperatura é dezenas de segundos, já que foram produzidos no máximo 10 pontos de solda por minuto. O circuito do controlador de temperatura está na Figura 3.45. O controle de vazão é realizado mecanicamente com um registro de passagem tipo gaveta.

Figura 3-45. Circuito do controlador de temperatura.

4 CABEÇOTE DE SOLDAGEM

4.1 DESCRIÇÃO DO CABEÇOTE DE SOLDAGEM

O cabeçote de soldagem foi projetado com o objetivo de soldar chapas de espessuras, materiais e revestimentos que são usados atualmente nos veículos, dentro dos parâmetros da indústria automobilística, para que a captura do comportamento da resistência dinâmica, expansão térmica e indentação fossem precisas. Para alcançar este objetivo, a concepção foi baseada nas mesmas características mecânicas e elétricas encontradas em qualquer máquina de soldagem utilizada na produção de veículos da indústria automobilística. Para tanto foram utilizadas partes padrão de máquinas de soldagem, como barramentos rígidos e flexíveis, porta eletrodos, eletrodos, transformador e controlador de solda. A Figura 4-1 mostra o cabeçote de soldagem e seus componentes.

Figura 4-1. Vista geral dos componentes do cabeçote de soldagem.

A tabela 4-1 mostra os componentes usados no cabeçote.

Tabela 4-1. Componentes do cabeçote de soldagem.

Equipamento	Descrição
Cabeçote completo Adis	Corpo em Duraluminio, barramentos, porta eletrodos, eletrodos, sistema de refrigeração
Transformador ARO, XCMA 4594	380Vac, 36kVA
Controlador de solda Marimax MCR 50	380Vac, 50kVA, ângulo de disparo fixo
Sensor efeito Hall LEM HAZ14000-SB	AC/DC, 5kHz, 15Vdc
Sensor deslocamento Gefran LTM0050P	Curso 50mm, 0,1%
Servo motor WEG SWA56-8.0-20	Torque 5kN contínuo, 15kN@3s
Driver servo motor WEG SCA05	Controlador de torque, posição e velocidade do servo
Sensor de força	Carga máxima 5kN

4.2 PROJETO MECÂNICO

Os componentes normalmente usados na confecção das máquinas de solda, ou popularmente chamadas pinças de solda, (ligas de cobre, CuCr, CuCrZi, CuCoBe, etc.) provocam a flexão da estrutura da pinça de até 5mm (Figura 4-2) conforme aprovação da indústria automobilística. Isso prejudica a medição da força de expansão térmica [Zhang, 2012], por este motivo o projeto mecânico foi concebido com o objetivo de flexão máxima de 0,1mm à força máxima de 5000N. O corpo em Duralumínio^{TM} foi escolhido por suas características mecânicas apropriadas para esta aplicação. O formato em “C” permite que a força aplicada seja axial, permitindo que mais de 99% da força aplicada seja normal às chapas (Figura 4-2). O componente que recebe o eletrodo faz o contato elétrico com o transformador e conduz a água de refrigeração e é chamado de porta eletrodo. O eletrodo que pertence ao porta eletrodo que está acoplado ao eixo do servo motor é chamado de eletrodo móvel, e o eletrodo que recebe a força aplicada é chamado de fixo (Figura 4-2). O eletrodo fixo tem movimentação livre no sentido axial à força aplicada, através de guias plásticas, para poder reagir à expansão térmica. O porta eletrodo fixo transmite a força de expansão térmica ao sensor de força. Acoplado ao fuso do servo motor está o sensor que mede

o deslocamento absoluto do eletrodo móvel para a determinação da indentação (Figura 4-3).

Figura 4-2. Especificação da flexão de uma pinça usada na indústria automobilística.
[CenterLine do Brasil, 2013].

Figura 4-3. Estrutura do cabeçote e seus componentes.

Para a medição da resistência dinâmica foram instalados conectores nos porta eletrodos para captura da tensão (Figura 4-4) através de cabo diferencial. No barramento rígido foi instalado um sensor de efeito Hall para medição da corrente de soldagem (Figura 4-5) em substituição a bobina de Rogowski testada e aprovada, somente pela segurança de instalação, já que a retirada constante dos eletrodos poderia causar algum dano a bobina de Rogowski.

Figura 4-4. Sensor de tensão com cabo diferencial.

Figura 4-5. Sensor de efeito Hall para medir a corrente de soldagem.

A força é transmitida pela coluna que desliza com mínimo atrito pelas guias de Teflon™ até o sensor de força, que suporta a força de expansão térmica acrescida da força de compressão exercida pelo servo motor (Figura 4-6).

Figura 4-6. Sensor de força para medição da força de expansão térmica.

Onde f_m é a força aplicada pelo servo motor e f_{et} é a força da expansão térmica produzida entre os eletrodos durante a soldagem.

O sensor de deslocamento linear, tipo potenciométrico, foi acoplado ao fuso linear que desloca o eletrodo móvel, medindo a indentação completando o sensoramento do cabeçote (Figura 4-7).

Figura 4-7. Sensor de deslocamento linear para medição da indentação.

4.3 MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS

Para capturar as grandezas de tensão, corrente, força e deslocamento, foram usados dois osciloscópios digitais e desenvolvidos circuitos de amplificação de instrumentação para sensor de força e sensor de deslocamento linear, específicos para a aplicação em soldagem por resistência.

Os sinais capturados pelos conversores A/D dos osciloscópios foram transmitidos pela USB ao computador para posterior tratamento matemático. As ligações dos instrumentos aos sensores do cabeçote são mostradas na Figura 4-8.

Figura 4-8. Ligação esquemática dos sensores e instrumentos de medição.

Os sinais captutados pelos osciloscópios (Figura 4-9) foram tratados em planilha Excel^{TM} e filtrados com média móvel ($n=5$) para o cálculo da resistência dinâmica, expansão térmica e indentação. Como resultado adicional também foram calculadas a potência ativa, energia, corrente e tensão eficaz durante a soldagem.

Figura 4-9. Tensão (azul), corrente (verde) e força de expansão térmica (laranja).

Os equipamentos usados estão mostrados na Figura 4-10. A tabela 4-2 descreve os equipamentos usados na medição.

Figura 4-10. Equipamentos usados nas medições.

Tabela 4-2. Equipamentos usados na medição.

Equipamento	Descrição
Osciloscópio TiePie HS4	DSO, 4 canais diferenciais, 20MHz, memória 100k pontos
Osciloscópio Owon PDS5022S	DSO, 2 canais, 25MHz, memória 5k pontos
Computador Asus EEEPC	Windows XP
Sensor efeito Hall LEM HAZ14000-SB	AC/DC, 5kHz, $\pm 15V_{dc}$
Sensor deslocamento Gefran LTM0050P	Curso 50mm, 01%, 5k Ω
Amplificador de instrumentação WS	2 canais diferenciais, $G=1000$, CMRR $>80db$, $\pm 10V_{dc}$

4.4 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DINÂMICA

A máquina de soldagem é, do ponto de vista elétrico, a associação de resistências e indutores [Furlanetto, 2005]. Na medição entre os eletrodos a indutância é desprezada [Furlanetto, 2005], então o circuito elétrico equivalente é formado por uma única resistência e seu cálculo se resume a aplicação da primeira

lei de Ohm. Ao fazer o cálculo da divisão da tensão e corrente instantanea um forte erro surge nos instantes em que são praticamente zero (B). Como esta divisão resulta valores muito grandes esse erro incorporado ao valor total mascara o resultado. A Figura 4-11 mostra os instantes de sinal igual a zero e a Figura 4-12 mostra os erros da divisão da tensão pela corrente nestes instantes.

Figura 4-11. Corrente de soldagem em fase com a tensão entre eletrodos.

Figura 4-12. Erro de cálculo para valores próximos de zero.

Para solucionar este problema os valores perto de zero foram desprezados do cálculo. Para corrigir os erros de ruídos e *offset* impostos pelo osciloscópio, foi implementado um algoritmo para a tensão e corrente usando média móvel como filtro digital, nível de comparação para a retirada do ruído residual, e cancelamento dos níveis de *offset* para eliminar erros no cálculo da integral dos valores *RMS*. A Figura 4-13 mostra o valor instantâneo da resistência dinâmica ($r(t)=v(t)/i(t)$) com e sem filtro de média móvel. A seguir estão detalhados todos os cálculos da planilha utilizada na construção dos gráficos (Figura 4-14).

Figura 4-13. Resistência dinâmica instantânea com e sem filtro de média móvel.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
													T+	T-	Fator LEM Myiachi	I=1303,6 v(t) + 137,36					1 ciclo	Tam	Tint	I _{RMS} (kA)	T solda prog (ciclos)
													(kA)	(kA)	1,3036						833	2,E-05	10000	5,4	12
Ch1	Ch2	Ch3													0,00000	0									
			média móvel i(t) kA	média móvel v(t) V	média móvel f(t) N	∑ i (t)	∑ v (t)	Offset i(t)	Offset v(t)	t (s)	Sinc	r (t) (μΩ)	Conta média ∑ r (t)	R _{RMS} (μΩ)	Semi ciclo	Edge ciclo	T (C)	T (ms)	R _{RMS} (μΩ)	Conta média	R _{RMS} (%)	Offset R _{médio}	Borda	T semi ciclos	
						0,00	0,00	0,02	0,00	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	1	0%	223	0	0	
0,02	0,01	-3,39				0,02	0,01			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	2	0%	223	0	0	
0,02	0,01	-3,39				0,04	0,02			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	3	0%	223	0	0	
0,02	0,02	-3,37				0,06	0,04			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	4	0%	223	0	0	
0,02	-0,04	-3,35				0,08	0,00			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	5	0%	223	0	0	
-0,02	0,01	-3,39	0,0	0,0	1529	0,06	0,00			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	6	0%	223	0	0	
0,02	0,00	-3,40	0,0	0,0	1529	0,08	0,01			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	7	0%	223	0	0	
0,01	0,02	-3,39	0,0	0,0	1529	0,09	0,03			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	8	0%	223	0	0	
0,04	0,00	-3,40	0,0	0,0	1527	0,13	0,03			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	9	0%	223	0	0	
0,05	0,00	-3,40	0,0	0,0	1523	0,18	0,03			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	10	0%	223	0	0	
0,01	0,01	-3,40	0,0	0,0	1523	0,19	0,04			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	11	0%	223	0	0	
0,00	-0,02	-3,40	0,0	0,0	1523	0,19	0,02			0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	223	12	0%	223	0	0	

Figura 4-14. Planilha de cálculo da resistência dinâmica.

As colunas A, B e C são os dados capturados pelo osciloscópio dos instrumentos de medição desenvolvidos especialmente para soldagem por resistência, respectivamente, corrente de soldagem, tensão entre eletrodos e força entre eletrodos.

As colunas D, E e F, fazem a média móvel cancelando o *offset* da seguinte forma:

$$=(((\text{MÉDIA}(A6:A10))-\$I\$5)*\$P\$2)+\$P\$3$$

As colunas G e H, fazem a somatória para cálculo do *offset*, respectivamente e as colunas I e J apresentam o valor médio, da somatória e *offset*.

$$=A6+G5 \quad \text{e} \quad =B6+H5$$

$$=G50005/50000 \quad \text{e} \quad =H50005/50000$$

A coluna K mostra o tempo decorrido desde o início da corrente determinada na coluna L

$$=SE(L6=0;(SE(K5=0;0;(K5+0,00002))));(K5+0,00002))$$

$$=(SE(D6>\$N\$2;1;0)+SE(D6<\$O\$2;1;0))$$

As colunas M, N e O, executam respectivamente os cálculos da resistência instantânea, contador de numero de amostras para o cálculo do valor médio e somatória da resistência para o cálculo da integral *RMS* para cada semi ciclo da corrente.

$$=SE(L6=0;0;((E6/D6)*1000))$$

$$=SE(L6>0;(N5+1);0)$$

$$=SE(L6=0;0;(M6+O5))$$

A coluna P efetua o cálculo da integral *RMS*.

$$=SE((L7-L6)=0;0;SE((L7-L6)=1;0;(O6/N6)))$$

As colunas restantes servem para a montagem em gráficos referenciados ao tempo inicial da corrente, calculado em ciclos e semi ciclos. Também é calculado o valor relativo (percentual) da resistência dinâmica para posterior comparação entre os vários corpos de prova.

As células N2 e O2 apresentam os valores de comparação mínimos para a eliminação do ruído residual da corrente e tensão.

As células P2 e P3 apresentam o fator de calibração do sensor de efeito Hall em relação ao medidor padrão Miyachi MM315.

As células V2, W2, X2, Y2 e Z2 mostram os valores da quantidade de amostras por ciclo, tempo da conversão A/D, tempo de integração de cada semi ciclo para o valor RMS da corrente, valor médio RMS de cada ciclo e tempo de soldagem.

Para a força de expansão térmica e indentação foi usada a mesma técnica desenvolvida para a resistência dinâmica. (Figuras 4-15 a 4-17).

AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM
F real (N)	F prog	Prog	V	F=403,27 v(t) + 2892,4							
1514	2000	-150	-0,21	403,27	2892,4	-1E+07	1E+07		I _{Di} RMS		
Σ f (t)	Offset	Conta	Σ f (t)	F _{médio}	F _{médio graf}	ΔF _{exp graf}	F _{médio graf}	T	F _{solda graf}	ΔF _{solda graf}	F _{solda graf}
Offset		média		(daN)	(N)	(N)	(%)	(ciclos)	(N)	(N)	(%)
0	0	0	0	0	1514	0	0%	0,0	1514	0	0%
0	0	0	0	0	1514	0	0%	0,0	1514	0	0%
0	0	0	0	0	1514	0	0%	0,0	1514	0	0%
0	0	0	0	0	1514	0	0%	0,0	1514	0	0%
0	0	0	0	0	1514	0	0%	0,0	1514	0	0%
1529	0	0	0	0	1514	0	0%	0,0	1514	0	0%
3058	0	0	0	0	1514	0	0%	0,0	1514	0	0%
4587	0	0	0	0	1514	0	0%	0,0	1514	0	0%

Figura 4-15. Planilha de cálculo da força de expansão térmica.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	V	W	X
			Ind (t)	t			T	T	T	T	Conta			Conta		Ind	Ind med	Ind	Ind	Ind	Ind	Ind
N	CH1	CH2	(mm)	(ms)	Sinc	Borda	(ms)	semi	ciclos	(ciclos)	solda	offset	Σ offset	offset	média	Σ ind	med	(mm)	Ind graf	Ind solda	Ind med	Ind graf
1	280	-200	0,056	0,2	0	0	0,0	0	0,0	0,0	1	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
2	280	-200	0,056	0,4	0	0	0,0	0	0,0	0,0	2	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
3	220	-400	0,047	0,6	0	0	0,0	0	0,0	0,0	3	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
4	240	0	0,051	0,8	0	0	0,0	0	0,0	0,0	4	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
5	200	-200	0,043	1	0	0	0,0	0	0,0	0,0	5	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
6	220	-200	0,047	1,2	0	0	0,0	0	0,0	0,0	6	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
7	220	-200	0,047	1,4	0	0	0,0	0	0,0	0,0	7	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
8	200	-200	0,043	1,6	0	0	0,0	0	0,0	0,0	8	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%

Figura 4-16. Planilha de cálculo da indentação.

Também foram calculadas as potências e energia.

AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	
$i^2(t)$	$\sum i^2(t)$	I_{RMS}	I_{RMS}	$v^2(t)$	$\sum v^2(t)$	V_{RMS}	V_{RMS}	R_{RMS}	R_{RMS}	R_{RMS}	Offset	$R_{RMS}(\%)$	p(t)	$\sum p(t)$	P	P Gráfico	E	
(kA)		(kA)	Gráfico (kA)	(V)		(V)	Gráfico (V)	(μΩ)	Gráfico (μΩ)	(μΩ)	Gráfico	Gráfico	R_{RMS}	Gráfico	(kW)	(kW)	(kW)	Gráfico (kJ)
0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	205	205	205	0,00	0,00	0	0	0,00	0	
0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	205	205	205	0,00	0,00	0	0	0,00	0	
0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	205	205	205	0,00	0,00	0	0	0,00	0	
0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	205	205	205	0,00	0,00	0	0	0,00	0	
0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	205	205	205	0,00	0,00	0	0	0,00	0	
1E-04	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	205	205	205	0,00	0,00	0	0	0,00	0	
1E-04	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	205	205	205	0,00	0,00	0	0	0,00	0	
2E-04	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	205	205	205	0,00	0,00	0	0	0,00	0	

Figura 4-17. Planilha de cálculo da potência e energia.

As equações a seguir definem os cálculos usados.

$$V_{el\ RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{el}^2(t) dt} \quad (4.1)$$

$$I_{s\ RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_s^2(t) dt} \quad (4.2)$$

$$R_{din} = \frac{V_{el\ ef}}{I_{s\ ef}} \quad (4.3)$$

Onde:

R_{din} = Resistência dinâmica.

$V_{el\ RMS}$ = Tensão eficaz (RMS) entre os eletrodos.

$I_{s\ RMS}$ = Corrente de soldagem eficaz (RMS).

v_{el} = Tensão instantânea entre os eletrodos.

i_s = Corrente instantânea de solda.

4.5 CÁLCULO DA FORÇA DE EXPANSÃO TÉRMICA

A força de expansão térmica foi calculada através do valor médio da força a cada ciclo a partir do início da corrente de soldagem, descontada a força aplicada pelo motor, calculada pela média a cada ciclo antes de iniciar a solda (*offset F*). A equação 4.4 define este cálculo.

$$F_{et} = \left(\frac{\sum_0^T f_m(t)}{n_{offsetF}} \right) - \left(\frac{\sum_0^T f_{et}(t)}{n_{cicloF}} \right) \quad (4.4)$$

Onde:

F_{et} = Força de expansão térmica.

f_m = Força instantânea de compressão entre os eletrodos (servo motor).

f_{et} = Força instantânea de expansão térmica entre os eletrodos.

$n_{offsetF}$ = Intervalo para cálculo da média de *offset* (valor médio aplicado pelo motor após estabilidade da força de compressão).

n_{cicloF} = Intervalo para cálculo da média de um ciclo (valor médio de cada ciclo após iniciada a solda).

4.6 CÁLCULO DA INDENTAÇÃO

A indentação foi calculada através do valor médio a cada ciclo ao iniciar a corrente de soldagem, descontada a posição alcançada pelo eletrodo móvel antes do início da solda, calculada pela média a cada ciclo (*offset I*). A equação 4.5 define este cálculo.

$$Ind = \left(\frac{\sum_0^T ind_m(t)}{n_{offsetI}} \right) - \left(\frac{\sum_0^T ind_s(t)}{n_{cicloI}} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

Ind = Indentação do ponto de solda.

ind_m = Posição do deslocamento ao aplicar a força (antes de soldar).

ind_s = Posição do deslocamento a partir do início da solda.

$n_{offsetI}$ = Intervalo para cálculo da média de *offset* (valor médio do deslocamento após estabilidade da força de compressão).

n_{cicloI} = Intervalo para cálculo da média de um ciclo (valor médio de cada ciclo após iniciada a solda).

4.7 CÁLCULOS ADICIONAIS

Potência ativa (Watts): $P_s = \frac{1}{T} \int_0^T v_{el}(t) i_s(t) dt \quad (4.6)$

Energia elétrica (Joule): $E_s = P_s T_n \quad (4.7)$

4.8 GRÁFICOS DAS GRANDEZAS

Com os cálculos realizados a planilha gerou os seguintes gráficos para cada ponto de solda realizado nos corpos de prova. (Figuras 4-18, Figura 4-19 e Figura 4-20)

Figura 4-18. Gráfico da resistência dinâmica (R_{din}), força de expansão térmica (F_{et}) e indutância (Ind).

Figura 4-19. Gráfico da potência ativa (P_{din}) e energia elétrica (E_{din}) na formação do ponto de solda.

Figura 4-20. Gráfico da corrente de soldagem (I_{din}) e tensão eficaz entre eletrodos (V_{din}).

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Usando o cabeçote experimental desenvolvido e construído para este estudo, possibilitado pelo programa PIPE da Fapesp (processo 2008/52306-8), os corpos de prova foram soldados em diversas condições conforme as características reais da produção de pontos de solda na indústria automobilística.

Os corpos de prova foram retirados de peças e sobras de estampagem que são usados nas indústrias automobilísticas. Suas dimensões e montagem para a soldagem seguiram a norma AWS-SAE D8-9M.

Os lóbulos e parâmetros de soldagem dos corpos de prova seguiram a norma DVS 2935-1.

Os parâmetros foram aprovados em ensaios destrutivos dos corpos de prova conforme norma AWS-SAE D8-9M. Antes da análise macrográfica, foram examinados com ultrassom de imagem Tessonic^{TM} para evitar perda de trabalho na confecção das amostras. As macrografias foram realizadas em laboratório credenciado e financiadas pelo projeto PIPE da Fapesp. Nem o ensaio destrutivo nem a análise usando ultrassom estão apresentadas neste trabalho, já que a macrográfica informa com maior precisão e detalhes a qualificação quantitativa do ponto de solda, que por esta razão foi usada como medição principal para os resultados conclusivos.

5.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram definidos através das características de produção encontradas no chão de fábrica, no trabalho de identificação dos problemas de solda, análise das causas e efeitos, estudo, desenvolvimento e implantação de soluções. Pela concepção construtiva do cabeçote experimental, o ensaio de flexão dos braços das pinças e escorregamento dos eletrodos, não foi realizado. Como o cabeçote utiliza servo motor para o acionamento das partes móveis, o efeito de martelagem desaparece. A tabela 5.1 mostra os ensaios realizados.

Tabela 5-1. Ensaios realizados.

ENSAIO	REALIZADO	
	SIM	NÃO
Alinhamento dos eletrodos	X	
Ortogonalidade dos eletrodos	X	
Flexão dos braços		X
Escorregamento dos eletrodos		X
Martelagem dos eletrodos		X
Equalização da pinça	X	
Posicionamento da pinça	X	
Fresagem dos eletrodos	X	
Ângulo de fechamento dos eletrodos	X	
Abertura entre as chapas.	X	
Materiais aderidos à superfície das chapas.	X	
Ondulações superficiais.	X	
Variação da espessura da chapa e revestimentos.	X	
Soldagem com <i>sealer</i> interno as chapas.	X	
Soldagem em superfícies não planas.	X	
Desgaste dos eletrodos.	X	
Corrente paralela entre pinça e peças ("fuga de corrente")	X	
Corrente paralela entre os pontos de solda (<i>shunt</i>)	X	
Influência da corrente na formação do ponto de solda	X	
Influência do tempo na formação do ponto de solda	X	
Influência da força na formação do ponto de solda	X	

5.2 CORPOS DE PROVA

A norma AWS-SAE D8-9M determina as dimensões dos corpos de prova e posição dos pontos de solda nos ensaios. As Figuras 5-1 e 5-2 mostram estas especificações.

Figura 5-1. Dimensional do corpo de prova e localização dos pontos para ensaio destrutivo.

Figura 5-2. Dimensional do corpo de prova para ensaio de produção de pontos de solda.

5.2.1 DIÂMETRO DE DESTACAMENTO DO PONTO

Nos testes destrutivos o ponto de solda destacado deve ser medido conforme mostra a Figura 5-3.

Figura 5-3. Medição do ponto de solda destacado. [AWS-SAE D8-9M].

A medida final é dada pela equação 5.1:

$$d_{\text{ponto}} = \frac{D_{\text{máx}} + D_{\text{mín}}}{2} \quad (5.1)$$

O destacamento pode provocar os seguintes tipos de fraturas

5.2.1.1 ARRANCAMENTO TOTAL.

Figura 5-4. Aspecto visual da fratura do arrancamento total. [Accorsi, 2006].

Figura 5-5. Aspecto visual da fratura do arrancamento parcial. [Accorsi, 2006].

5.2.1.2 FRATURA LONGITUDINAL.

Figura 5-6. Aspecto visual da fratura longitudinal. [Accorsi, 2006].

5.2.1.3 FRATURA INTERFACIAL, LONGITUDINAL E ARRANCAMENTO PARCIAL.

Figura 5-7. Aspecto visual do arrancamento parcial, longitudinal, e interfacial. [Accorsi, 2006].

5.2.1.4 FRATURA INTERFACIAL E ARRANCAMENTO PARCIAL.

Figura 5-8. Aspecto visual da fratura interfacial e arrancamento parcial. [Accorsi, 2006].

5.2.1.5 FRATURA INTERFACIAL E LONGITUDINAL.

Figura 5-9. Aspecto visual da fratura interfacial e longitudinal. [Accorsi, 2006].

5.2.1.6 FRATURA INTERFACIAL.

Figura 5-10. Aspecto visual da fratura interfacial. [Accorsi, 2006].

5.2.1.7 FALHA TOTAL DO PONTO DE SOLDA

Figura 5-11. Aspecto visual da falha de caldeamento do ponto de solda. [Accorsi, 2006].

5.2.2 MACROGRAFIA DO PONTO DE SOLDA

Na qualificação por macrografia são analisados os itens:

5.2.2.1 DIÂMETRO

Figura 5-12. Definição das zonas de medição. [Accorsi, 2006].

O diâmetro mínimo do ponto é dado em relação à chapa de menor espessura:

$$d_{\min} = 4\sqrt{e_{CH}} \quad (5.2)$$

5.2.2.2 PENETRAÇÃO (ALTURA DO PONTO)

Figura 5-13. Penetração do ponto. [Accorsi, 2006].

A penetração mínima do ponto é de 20% em cada chapa e é calculada pela equação abaixo.

$$P_{CH} = \frac{a_{CH}}{e_{CH}} 100\% \quad (5.3)$$

5.2.2.3 INDENTAÇÃO

Figura 5-14. Indentaço do ponto de solda. [Accorsi, 2006].

A indentaço mxima de 30% em cada chapa e calculada pela equao abaixo.

$$I_{CH} = \frac{i_{CH}}{e_{CH}} 100\% \quad (5.4)$$

5.2.2.4 POROSIDADES E VAZIOS

Figura 5-15. Porosidades e vazios do ponto de solda. [Accorsi, 2006].

Condições de aprovação:

- Soma das áreas ($P1+P2+\dots$) $<15\%$ da área do ponto.
- Soma dos comprimentos ($L1+L2+\dots$) $<25\%$ da largura do ponto.
- Poros ou cavidades dentro da área limitada de 15% da periferia da zona de fusão.

5.2.2.5 TRINCAS INTERNAS

Figura 5-16. Trincas no ponto de solda. [Accorsi, 2006].

Condições de aprovação:

- Soma dos comprimentos na zona de fusão ($L_1+L_2+\dots$) $< 25\%$ da área do ponto.
- Trincas na área de 15% dentro da zona de fusão.
- Trincas dentro da ZTA não são permitidas.

5.2.3 ANALISE VISUAL DO PONTO DE SOLDA.

Os pontos são analisados em sua posição e aspecto superficial.

5.2.3.1 POSIÇÃO DOS PONTOS.

Figura 5-17. Aprovação pela posição do ponto. [Accorsi, 2006].

5.2.3.2 ASPECTO SUPERFICIAL.

Figura 5-18. Trincas permitidas e reprovadas. [Accorsi, 2006].

5.3 TESTE DE DESTACAMENTO (ARRANCAMENTO)

A norma AWS-SAE D8-9M determina que o destacamento do ponto de solda seja realizado usando força de tração para rompimento das chapas e medição do ponto. Não é permitido criar forças de torção e para isso é indicado o dispositivo da Figura 5-19.

Figura 5-19. Dispositivo de destacamento do ponto de solda. [DVS2916, 1978].

Após o destacamento o aspecto do corpo de prova fica semelhante ao da Figura 5-20.

Figura 5-20. Aspecto do ponto após destacamento.

5.4 ENSAIO MACROGRAFICO

O ensaio macrográfico é realizado através do corte transversal do ponto de solda (Figura 5-21) em um equipamento de corte específico para este fim (Figura 5-22) que enquanto realiza o corte fino das chapas, promove a refrigeração do ponto para que não haja mudança na estrutura cristalina do metal a não ser a provocada pelo aquecimento e formação do ponto de solda [Stocco, 2010].

Figura 5-21. Desenho artístico do corte transversal do ponto.

Figura 5-22. Máquina de corte do ponto de solda. [PT. INTEC Instruments].

Após o corte o pequeno corpo de prova normalmente 25mm x 25mm, é embutido em um invólucro de resina para cilíndrico de aproximadamente 50 x 50mm para manipulação e polimento da face cortada. O polimento é feito em varias etapas, diminuindo-se a cada etapa a granulação das lixas (Figura 5-23) [Stocco, 2010].

Figura 5-23. Politriz do ponto de solda. [Instrumental Instrumentos de Medição]

Após o lixamento a face de corte é atacada com Nital para “revelar” a estrutura cristalina que sofreu o aquecimento e fusão. O corpo de prova é então colocado em um microscópio de aumento de até 50 vezes para as medições. O aspecto final do corpo de prova, cortado, embutido, lixado, atacado mecanograficamente e sob o microscópio produz a imagem do ponto como mostra a Figura 5-24 [Stocco, 2010].

Figura 5-24. Registro mecanográfico de um ponto de solda por resistência elétrica.

O ensaio por ultrassom revela menos detalhes que a macrografia e é menos preciso em suas medições, porém como não destrói o corpo de prova é muito usado no chão de fábrica para análises rápidas do diâmetro, indentação e falhas internas do ponto de solda.

Um cristal tipo piezelétrico emite uma onda sonora ortogonal a face do ponto de solda que se propaga até encontrar a interface da chapa com o ar, quando então parte da onda retorna ao cristal e parte se propaga pelo ar para fora da chapa. Se por onde a onda se propagou houve fusão o som irá até o fundo da chapa inferior retornando uma pare e outra se propaga para fora da chapa. Se ao contrario não houver a fusão das chapas a onda ao encontrar a interface entre as chapas que contém ar, retorna faz parte da onda retornar. A diferença entre o tempo de emissão e retorno da onda sonora indica se as chapas estão unidas ou não. Sabendo-se o tempo de ida e volta da onda para as chapas não fundidas, se o tempo aumentar indica que houve fusão e o som foi até o fim da chapa inferior. A Figura 5-25 ilustra o funcionamento do ultrassom usado no estudo [Stocco, 2010].

Figura 5-25. Interpretação dos ecos na análise do ponto de solda. Denisov, 2004.

O equipamento usado é o mais moderno usado nas indústrias automobilísticas, possuindo uma matriz de emissores/receptores de som de 52 elementos (Figura 5-26). O equipamento varre os 52 elementos (Figura 5-27) e um software interpreta o sinal dos ecos (Figura 4-28-B) colorindo o pixel com verde, se houve fusão, ou amarelo se não houve, formando uma imagem que representa a imagem transversal do ponto, podendo-se medir o diâmetro (Figura 4-28-A).

Figura 5-26. Varredura dos 52 sensores do transdutor do ultrassom. Denisov, 2004.

Figura 5-27. Visualização do ponto de solda (A) e dos ecos (B). Stocco, 2010.

5.5 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

A norma DVS 2935-1 traz os parâmetros básicos para soldagem de chapas de diferentes espessuras, (tabela 5-1). Também apresenta o lóbulo de limites dos parâmetros (Figura 5-28).

Tabela 5-1. Parâmetros de solda para aço tipo IF (H240LA)

	AÇO H240LA						
Espessura da chapa (mm)	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Diâmetro do eletrodo (mm)	16				20		
Diâmetro da face de contato (mm)	5,0	7,5	8,0	10,0	10,0	12,0	14,0
Raio da face de contato (mm)	75						
Tempo de solda (ciclos@50Hz)	5	8	10	14	18	22	24
Corrente de solda (kA)	6,5	8,0	9,0	10,0	13,0	15,0	17,0
Força entre eletrodos (kN)	2,0	2,5	3,0	3,5	5,5	7,0	8,0

Figura 5-28. Lóbulo de soldagem para duas chapas de 1,0mm e tempo de soldagem de 10ciclos@50Hz. [DVS 2935-1].

6 APLICAÇÃO E ESTUDO DE CASO

Para abranger de forma prática a soldagem automotiva foram ensaiados 200 corpos de prova que consumiram cerca de 50 conjuntos de eletrodos Figura 6.1. Os eletrodos foram classificados conforme face de contato (Figura 6.2). Todos os ensaios seguiram a qualificação e parâmetros já descritos. A condição de refrigeração dos eletrodos foi de 4,0LPM @ 20°C, similar a das indústrias automobilísticas. Os corpos de prova para macrografia recebiam 2 pontos de solda e o restante até 30 pontos, para aproveitamento máximo de material. Foram realizados cerca de 5.000 pontos de solda.

Figura 6-1. Corpos de prova e eletrodos usados para os ensaios práticos.

Figura 6-2. Classificação dos eletrodos usados nos ensaios.

6.1 CORPOS DE PROVA

A tabela 6.1 sumariza os corpos de prova que são compostos por três tipos de chapas:

- **Tipo 1-** Chapa zincada (eletrolítico), espessura 0,9mm, aço IF.
- **Tipo2-** Chapa sem revestimento, espessura 0,75mm, aço HSS.
- **Tipo 3-** Chapa pré-fosfatizada, espessura 1,45mm, IF.

Tabela 6-1. Tabela dos corpos de prova.

Corpos	Eletrodo	Isolda (kA)	Tsolda (ciclos)	Força (N)	Espessura chapa 1 (mm)	Espessura chapa 2 (mm)	Espessura chapa 3 (mm)	Tipo da chapa
AMNa1	Novo	5,4	12	1514	0,9	0,9	-	1
AMNa4	Novo	5,8	12	1706	0,9	0,9	-	1
AMNa5	Novo	6	12	1723	0,9	0,9	-	1
AMNa6	Novo	4,7	12	1539	0,9	0,9	-	1
AMNa9	Novo	6,1	8	1861	0,9	0,9	-	1
AMNa10	Novo	4,8	12	1714	0,75	0,75	-	2
AMNa13	Novo	6,8	16	2615	1,45	1,45	-	3
AMNa14	Novo	6,8	20	2374	1,45	1,45	-	3
AMNa18	Novo	6,5	16	2365	0,9	0,9	0,9	1
AMNx	Novo	5,4	12	1824	0,9	0,9	-	1
AMNx2	Novo	5,4	12	1815	0,9	0,9	-	1
AMNx3	Novo	5,4	12	2276	0,9	0,9	-	1
AMNx4	Novo	5,3	12	1875	0,9	0,9	-	1
AMNy	Novo	5,4	8	1872	0,9	0,9	-	1
AMNz	Novo	5,4	16	1749	0,9	0,9	-	1
AMNa45	Novo	5,6	12	1678	0,9	0,9	-	1
AMN23	Meia vida	8,4	12	1990	0,9	0,9	-	1
AMN24	Meia vida	8,5	8	1981	0,9	0,9	-	1
AMN25	Meia vida	8,3	16	1978	0,9	0,9	-	1
AMN26	Meia vida	9,5	12	2007	0,9	0,9	-	1
AMN27	Meia vida	10,1	12	1999	0,9	0,9	-	1
AMN28A	Meia vida	7,4	12	1972	0,9	0,9	-	1
AMN29	Meia vida	8,4	16	1996	0,9	0,9	-	1
AMN32	Meia vida	7,5	12	1630	0,75	0,75	-	2
AMN35	Meia vida	8,1	16	2485	1,45	1,45	-	3
AMN40	Meia vida	8,4	16	2408	0,9	0,9	0,9	1
AMNa49	Fim	9,8	49	1756	0,9	0,9	-	1
AMNa50	Fim	8,1	12	1977	0,75	0,75	-	2
AMNa51	Fim	9,7	16	2628	1,45	1,45	-	3
AMNa52	Fim	9,8	16	2422	0,9	0,9	0,9	1
AMNa53	Fim	9,5	12	1852	0,9	0,9	-	1
AMNa54	Fim	8,1	12	1439	0,75	0,75	-	2
AMNa55	Fim	9,7	16	2916	1,45	1,45	-	3
AMNa56	Fim	10	16	2533	0,9	0,9	0,9	1

6.2 CONDIÇÕES DOS ENSAIOS

As características de produção que definem as condições dos ensaios estão mostradas na tabela 6-2. Algumas características repetem os ensaios e por este motivo um único ensaio serviu para mais de uma característica de produção. Desta forma as características de produção foram agrupadas para os mesmos ensaios. Este agrupamento está mostrado na tabela 6-3. Cada corpo de prova analisado teve comprovação da repetibilidade de medição em no mínimo três corpos de prova idênticos ensaiados nas mesmas condições.

Tabela 6-2. Tabela das características de produção.

Características da produção	Núm.
Alinhamento dos eletrodos	1
Ortogonalidade dos eletrodos	2
Equalização da pinça	3
Posicionamento da pinça	4
Fresagem dos eletrodos	5
Ângulo de fechamento dos eletrodos	6
Abertura entre as chapas	7
Materiais aderidos à superfície das chapas	8
Ondulações superficiais	9
Variação da espessura, material e revestimentos	10
Soldagem com <i>sealer</i> interno as chapas	11
Soldagem em superfícies não planas	12
Desgaste dos eletrodos	13
Corrente paralela entre pinça e peças ("fuga de corrente")	14
Corrente paralela entre os pontos de solda (<i>shunt</i>)	15
Variação do tempo de solda	16
Variação da corrente de solda	17
Variação da força entre eletrodos	18

Tabela 6-3. Agrupamento dos ensaios conforme características de produção.

Ensaio	Corpo 1	Corpo 2	Corpo 3	Corpo 4	Condições de ensaio	Agrupamento
A	AMNx4	AMNx	AMNx2	-	Repetibilidade da medição	-
B	AMNx2	AMNy	AMNz	-	Variação do tempo de solda	17
C	AMNa1	AMNa6	AMNa4	-	Variação da corrente de solda	14, 15, 16
D	AMNa1	AMNx4	AMNx3	-	Variação da força entre eletrodos	18, 7
E	AMNx2	AMNa5	-	-	Ponto com e sem expulsão de material	4,16
F	AMNa1	AMNa9	-	-	Tempo menor corrente maior	16,17
G	AMNa1	AMNa10	AMNa13	-	Comparação entre os três tipos de chapas	10
H	AMNa1	AMNa18	-	-	Comparação entre 2 chapas e 3 chapas	10
I	AMNa1	AMN23	AMNa49	-	Desgaste dos eletrodos	5, 13
J	AMNa10	AMN32	AMNa50	-	Desgaste dos eletrodos	5, 13
K	AMNa13	AMN35	AMNa51	-	Desgaste dos eletrodos	5, 13
L	AMNa18	AMN40	AMNa52	-	Desgaste dos eletrodos	5, 13
M	AMNx2	AMNa45	-	-	Erro de ortogonalidade	1, 2, 3, 4, 6, 9, 12
N	AMNa49	AMNa53	-	-	Erro de ortogonalidade	1, 2, 3, 4, 6, 9, 12
O	AMNa50	AMNa54	-	-	Erro de ortogonalidade	1, 2, 3, 4, 6, 9, 12
P	AMNa51	AMNa55	-	-	Erro de ortogonalidade	1, 2, 3, 4, 6, 9, 12
Q	AMNa52	AMNa56	-	-	Erro de ortogonalidade	1, 2, 3, 4, 6, 9, 12
R	AMN23	AMN28A	AMN27	-	Variação da corrente	5, 13, 14, 15, 16
S	AMN23	AMN24	AMN25	-	Variação do tempo	5, 13, 17
T	AMN23	AMN32	AMN35	-	Comparação entre os três tipos de chapas	5, 13, 10
U	AMN23	AMN40	-	-	Comparação com 2 chapas e 3 chapas	5, 13, 10
V	AMN23	AMN28A	AMN27	AMN26	Variação da corrente	5, 13, 14, 15, 16
X	AMN25	AMN29	-	-	Materiais estranhos na superfície das chapas	8, 11

6.3 MEDIÇÕES E QUALIFICAÇÃO DO PONTO

Cada corpo soldado teve as medições de resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação, realizadas simultaneamente. Os resultados dos comportamentos estão superpostos em um único gráfico que contém as três grandezas. Complementarmente foram calculadas a potência ativa, energia elétrica e tensão entre os eletrodos, além da corrente de soldagem. Completando as informações foi realizada macrografia para qualificação do ponto dentro dos critérios já apresentados. Como exemplo as Figuras 6-3 a 6-6 mostram os gráficos vindos dos cálculos de um corpo de prova. Todos os corpos de prova restantes estão no apêndice 1.

Figura 6-3. Resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação dinâmica do corpo de prova AMNa1.

Figura 6-4. Potência e energia entre os eletrodos do corpo de prova AMNa1.

Figura 6-5. Corrente de soldagem e tensão entre eletrodos do corpo de prova AMNa1.

Figura 6-6. Macrografia do ponto de solda do corpo de prova AMNa1.

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,6	1,5	0,2	5,4	12	1514

Onde:

d = Diâmetro do ponto de solda.

p = Penetração (altura) do ponto de solda.

ind = Indentação do ponto de solda.

I_s = Corrente de soldagem.

T_s = tempo de soldagem.

F_m = Força aplicada entre as chapas pelo servo motor.

6.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS

A resistência dinâmica de cada corpo de prova foi agrupada em um único gráfico, conforme a tabela de agrupamento, assim como a força de expansão térmica e indentação. Como complemento a potência, energia, corrente e tensão também foram agrupadas. As Figuras 6-7 a 6-16 mostram os gráficos de um ensaio como exemplo. O restante dos gráficos dos ensaios estão no anexo.

Figura 6-7. Comportamento da resistência dinâmica relativa com variação do tempo de soldagem.

Figura 6-8. Comportamento da resistência absoluta relativa com variação do tempo de soldagem.

Figura 6-9. Comportamento da força de expansão térmica relativa com variação do tempo de soldagem.

Figura 6-10. Comportamento da força de expansão térmica absoluta com variação do tempo de soldagem.

Figura 6-11. Comportamento da indentação dinâmica relativa com variação do tempo de soldagem.

Figura 6-12. Comportamento da indentação dinâmica absoluta com variação do tempo de soldagem.

Figura 6-13. Comportamento da potência com variação do tempo de soldagem.

Figura 6-14. Comportamento da potência com variação do tempo de soldagem.

Figura 6-15. Comportamento da corrente com variação do tempo de soldagem.

Figura 6-16. Comportamento da tensão com variação do tempo de soldagem.

6.4.1 REPETIBILIDADE DAS MEDIÇÕES

Foram ensaiados três corpos de prova de mesmo material e revestimento, com os mesmos eletrodos e parâmetros de solda. As macrografias (Figura 6-17) mostram que o ponto se manteve estável e os gráficos mostram que os desvios em cada corpo de prova são muito pequenos (menor que $\pm 1\%$, na média) (Figuras 6-18 a 6-23).

Figura 6-17. Diâmetro e penetração dos três corpos de prova.

Figura 6-18. Resistência dinâmica nos três corpos de prova.

Figura 6-19. Desvio da resistência dinâmica nos três corpos de prova.

Figura 6-20. Força de expansão térmica nos três corpos de prova.

Figura 6-21. Desvio da força de expansão térmica nos três corpos de prova.

Figura 6-22. Indentação nos três corpos de prova.

Figura 6-23. Desvio da indentação nos três corpos de prova.

6.4.2 VARIAÇÃO DO TEMPO DE SOLDAGEM

O tempo de soldagem foi alterado e os outros parâmetros permaneceram constantes, com eletrodos novos (corpos de prova AMNx2 AMNy, AMNz) (Figura 6-24) e meia vida (corpos de prova AMN23, AMN24 e AMN25) (Figura 6-25). Os comportamentos da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação praticamente não se alteram, tendo somente o complemento da curva ao longo do tempo, observado graficamente nas Figuras 6-26 a 6-28. Os corpos de prova mostram que com eletrodos novos tanto o diâmetro como a penetração permanecem praticamente inalterados após um determinado tempo (Figura 6-26), porém com eletrodos meia vida, com área de contato maior, o tempo de soldagem tem influência direta no tamanho do ponto já que é a área de contato que delimita o diâmetro do ponto. Nota-se também que os pontos de máximo da resistência dinâmica e da força de expansão térmica mudam em relação ao tempo aumentando para eletrodos meia vida em relação a eletrodos novos. Isto pode indicar uma correlação dos pontos de máximo com a formação do ponto de solda.

Figura 6-24. Corpos de prova com eletrodos novos e variação do tempo de soda.

Figura 6-25. Corpos de prova com eletrodos meia vida e variação do tempo de soldagem.

Figura 6-26. Comportamento da resistência dinâmica relativa com variação do tempo de soldagem para eletrodos novos e meia vida.

Figura 6-27. Comportamento da expansão térmica relativa com variação do tempo de soldagem para eletrodos novos e meia vida.

Figura 6-28. Comportamento da indentação dinâmica relativa com variação do tempo de soldagem para eletrodos novos e meia vida.

6.4.3 VARIAÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM

A corrente de soldagem foi alterada mantendo-se os outros parâmetros, com eletrodos novos (corpos de prova AMNa1, AMNa6 e AMNa4) (Figura 6-29) e meia vida (corpos de prova AMN23, AMN28A e AMN27) (Figura 6-30). Os corpos de prova mostram que com a elevação da corrente o tamanho do ponto também aumenta até que ocorra a expulsão de material diminuindo-o devido à quantidade de material retirada de dentro do ponto (expulsão de material, *Flash*) (Figura 6-30, corpo de prova 3). O comportamento tanto da resistência como indentação não tem correlação clara com a variação da corrente (Figuras 6-31 a 6-33), porém a força de expansão térmica (Figura 6-32) mostra nitidamente um comportamento previsível na taxa de subida, instante em que ocorre o ponto de máximo e amplitude. Houve expulsão de material com o aumento da corrente tanto com eletrodo novo como meia vida. É possível determinar o momento da expulsão na curva de resistência dinâmica com eletrodo novo ($I=6,0\text{kA}$), porém não fica claro quando com o eletrodo em meia vida ($I=10,1\text{kA}$) (Figura 6-31). Já na força de expansão térmica é nítido o momento de expulsão quando a força cai abruptamente, tanto em eletrodos novos ($I=6,0\text{kA}$) como em meia vida ($I=10,1\text{kA}$) (Figura 6-32).

Figura 6-29. Corpos de prova com eletrodos novos e variação da corrente de soldagem.

Figura 6-30. Corpos de prova com eletrodos meia vida e variação da corrente de soldagem.

Nota: o corpo de prova 3 (AMN27) foi reprovado pelos critérios de qualificação, e só foi mantido a fim de dar uma ideia de como ficam os pontos produzidos na indústria automobilística quando ocorre expulsão de material.

Figura 6-31. Comportamento da resistência dinâmica relativa com variação da corrente de soldagem para eletrodos novos e meia vida.

Figura 6-32. Comportamento da força de expansão térmica relativa com variação da corrente de soldagem para eletrodos novos e meia vida.

Figura 6-33. Comportamento da indentação dinâmica relativa com variação da corrente de soldagem para eletrodos novos e meia vida.

6.4.4 VARIAÇÃO DA FORÇA ENTRE ELETRODOS

O ensaio da variação da força foi realizado só com eletrodos novos porque o efeito da força é o mesmo independente da área dos eletrodos [Zhang, 2012]. Os outros parâmetros foram mantidos constantes. Os corpos de prova (AMNa1, AMNx4 e AMNx3) mostram que a formação do ponto é alterada em diâmetro e penetração (Figura 6-34).

Figura 6-34. Corpos de prova com eletrodos novos e variação da força entre os eletrodos.

Existe mudança significativa na resistência estática (valor inicial da resistência) (Figura 6-35), porque quanto maior força, menor resistência e vice-versa. A força também modifica a resistência dinâmica quando ocorre a quebra das asperezas, isto é, taxa de descida e subida da resistência nos três primeiros ciclos de solda (Figura 6-36). Nota-se que o instante e amplitude do ponto mínimo são estáveis e previsíveis, enquanto o instante e amplitude do ponto de máximo e taxa de descida, não tem uma característica gráfica para uma conclusão segura (Figura 6-36).

Figura 6-35. Comportamento da resistência dinâmica relativa com variação da força de soldagem para eletrodos novos.

Figura 6-36. Comportamento da força de expansão térmica relativa com variação da força de soldagem para eletrodos novos.

A variação da força aplicada entre as chapas faz com que a força de expansão térmica tenha o instante e a amplitude do ponto de máximo bem distinto. As taxas de subida e descida também são distintas como mostra a Figura 6-37.

Figura 6-37. Comportamento força de expansão térmica com variação da força de soldagem para eletrodos meia vidas.

A indentação não mostra características distintas na variação da força de compressão (Figura 6-38).

Figura 6-38. Comportamento da indentação dinâmica relativa com variação da força de soldagem para eletrodos novos.

6.4.5 DESGASTE DOS ELETRODOS (PRODUÇÃO DO PONTO)

Foram ensaiados corpos de prova zincados de duas e três chapas e pré fosfatizados de duas chapas de mesma composição metalúrgica. Durante a produção foram realizadas três medições da resistência dinâmica e da força de expansão térmica. A primeira foi realizada com eletrodos novos, face semi esférica raio 8mm. A segunda após 300 pontos produzidos, com face de contato diâmetro de 4mm. Por último após 500 pontos, com face de contato diâmetro de 7mm. Os eletrodos estão mostrados na Figura 6-39.

Figura 6-39. Eletrodos usados na produção dos pontos de solda.

Todos os corpos de prova tiveram a corrente de soldagem corrigida para serem aprovados por macrografia, conforme os critérios de qualificação. (Tabela 6-4)

Tabela 6-4. Qualificação e parâmetros dos corpos de prova.

Corpo de prova	Chapas (mm)	Eletrodo	$d_{\min}$ (mm)	d (mm)	p (mm)	I_s (kA)	T_s (ciclos)	F_m (N)
x2	0,9+0,9 Zn	Novo	3,8	4,2	1,5	6,4	12	1816
23	0,9+0,9 Zn	4mm	3,8	4,6	1,1	8,4	12	1990
a49	0,9+0,9 Zn	7mm	3,8	4,8	1,1	9,8	12	1766
a10	0,75+0,75	Novo	3,5	3,8	1	4,8	12	1714
32	0,75+0,75	4mm	3,5	5,2	1,2	7,5	12	1630
a50	0,75+0,75	7mm	3,5	5,4	1,3	8,1	12	1977
a14	1,45+1,45 PO	Novo	4,8	6,1	2,2	6,8	16	2374
35	1,45+1,45 PO	4mm	4,8	6,7	2,2	8,1	16	2486
a51	1,45+1,45 PO	7mm	4,8	6,9	2,1	9,7	16	2628
a18	0,9+0,9+0,9 Zn	Novo	3,8	4,6	2	6,6	16	2366
40	0,9+0,9+0,9 Zn	4mm	3,8	6,6	2,1	8,4	16	2408
a52	0,9+0,9+0,9 Zn	7mm	3,8	6,7	2,1	9,8	16	2422

A resistência dinâmica mostra um comportamento que se repete nos corpos de prova no início da formação do ponto (primeiros 3 ciclos). A taxa de descida é praticamente constante (0 a 1,5 ciclos) dependendo do desgaste dos eletrodos. O mesmo se passa com a taxa de subida inicial (1,5 a 3 ciclos). O tempo de soldagem restante não permite concluir um comportamento repetitivo (Figuras 6-40 a 6-43).

Figura 6-40. Comportamento da resistência dinâmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNx2, AMN23 e AMN49).

Figura 6-41. Comportamento da resistência dinâmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa10, AMN32 e AMNa50).

Figura 6-42. Comportamento da resistência dinâmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova).

Figura 6-43. Comportamento da resistência dinâmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa18, AMN40 e AMNa52).

A força de expansão térmica com eletrodos novos tem o valor máximo entre 40% e 60% do tempo de soldagem. Quando os eletrodos atingem face com diâmetro de 4mm e 7mm o ponto de máximo da força de expansão térmica desloca-se para um tempo maior, atingindo praticamente o fim de solda, com exceção dos corpos de prova do aço HSS que continuam atingindo quase no mesmo instante (entre o 4° e o 5° ciclos). Isto evidencia que chapas com aço de mesma composição metalúrgica, com revestimentos diferentes (zinco e pré-fosfatizado) e quantidade diferentes (2 e 3 chapas) têm o comportamento da força de expansão térmica muito semelhante por pertencerem a mesma família de aços (Figuras 6-44 a 6-47).

Figura 6-44. Comportamento da força de expansão térmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNx2, AMN23 e AMN49).

Figura 6-45. Comportamento da força de expansão térmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa10, AMN32 e AMNa50).

Figura 6-46. Comportamento da força de expansão térmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa14, AMN35 e AMNa51).

Figura 6-47. Comportamento da força de expansão térmica durante a produção dos pontos de solda (corpos de prova AMNa18, AMN40 e AMNa52).

A indentação nos ensaios realizados não mostrou características que se correlacionem com a formação do ponto de solda (Figuras 6-48 a 6-51).

Figura 6-48. Comportamento da indentação dinâmica durante a produção dos pontos de solda. (corpos de prova AMNx2, AMN23 e AMN49).

Figura 6-49. Comportamento da indentação dinâmica durante a produção dos pontos de solda. (corpos de prova AMNa10, AMN32 e AMNa50).

Figura 6-50. Comportamento da indentação dinâmica durante a produção dos pontos de solda. (corpos de prova AMNa14, AMN35 e AMNa51).

Figura 6-51. Comportamento da indentação dinâmica durante a produção dos pontos de solda. (corpos de prova AMNa18, AMN40 e AMNa52).

6.4.6 ERRO DE ORTOGONALIDADE

A área de contato dos eletrodos pode sofrer variações devido a falta de ortogonalidade dos eletrodos a peça, desalinhamento dos braços da pinça, erros de posicionamento, ondulações superficiais ou superfícies curvas das chapas.

Foram produzidos corpos de prova com eletrodos em posição ortogonal as chapas e não ortogonal (Figura 6-52).

Figura 6-52. Erro de ortogonalidade dos eletrodos.

Os ensaios foram feitos com eletrodos desgastados de face 7mm de diâmetro porque na produção se verifica muitos problemas de pontos soltos e pequenos com eletrodos já no fim de vida. Os parâmetros foram mantidos e os pontos produzidos na posição não ortogonal, tiveram o diâmetro reduzido (tabela 6-5 azul), comparado com a posição ortogonal (tabela 6-5 vermelho).

Tabela 6-5. Qualificação e parâmetros dos corpos de prova.

Corpo de prova	Chapas (mm)	Condição do ensaio	d _{mín} (mm)	d (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
a49	0,9+0,9 Zn	Ortogonal	3,8	4,8	9,8	12	1756
a53	0,9+0,9 Zn	Torto	3,8	4,1	9,5	12	1852
a51	1,45+1,45 PO	Ortogonal	4,8	5,9	9,7	16	2628
a55	1,45+1,45 PO	Torto	4,8	4,5	9,7	16	2916
a52	0,9+0,9+0,9 Zn	Ortogonal	3,8	6,7	9,8	16	2422
a56	0,9+0,9+0,9 Zn	Torto	3,8	4,4	10	16	2533

Na força de expansão térmica os graficos das Figuras 6-53 a 6-55 mostram que mesmo com chapas de diferentes espessuras (0,9mm e 1,45mm), revestimento (zinco e pré fosfatizado), e quantidade (2 chapas e 3 chapas), a taxa de subida após o início da solda (0 a 3 ciclos) muda quando os eletrodos não estão ortogonais a chapa.

Figura 6-53. Força de expansão térmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMNa49 ortogonal, AMNa53 não ortogonal.

Figura 6-54. Força de expansão térmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMNa51 ortogonal, AMNa55 não ortogonal.

Figura 6-55. Força de expansão térmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMNa52 ortogonal, AMNa56 não ortogonal.

A resistência estática (valor inicial da resistência dinâmica), em todos os ensaios, é menor quando os eletrodos estão fora da posição ortogonal (Figuras 6-56 a 6-58). No restante do tempo de soldagem o comportamento não caracteriza ao erro de ortogonalidade.

Figura 6-56. Resistência dinâmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMNa49 ortogonal, AMNa53 não ortogonal.

Figura 6-57. Resistência dinâmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMNa51 ortogonal, AMNa55 não ortogonal.

Figura 6-58. Resistência dinâmica na posição ortogonal e fora de posição. Corpo de prova AMN a52 ortogonal, AMNa56 não ortogonal.

No início da soldagem a resistência dinâmica caracteriza melhor os eletrodos fora de posição do que a força de expansão térmica, por ter maior magnitude e precisão, porém a formação do ponto fica mais evidente no restante do tempo na força de expansão térmica que mostra claramente a redução do tamanho do ponto.

A Indentação não apresenta características que possam diferenciar a ortogonalidade dos eletrodos (Figuras 6-59 a 6-61).

Figura 6-59. Indentação na posição ortogonal e fora de posição.

Figura 6-60. Indentação na posição ortogonal e fora de posição.

Figura 6-61. Indentação na posição ortogonal e fora de posição.

6.4.6.1 VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE CHAPAS

A variação da quantidade de chapas é notada na mudança do instante do ponto máximo da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação. Maior a quantidade de chapas maior o tempo para ocorrer o ponto de máximo (Figuras 6-62 a 6-64).

Figura 6-62. Resistência dinâmica para duas e tres chapas (corpo de prova AMNa1-2 chapas, AMNa18-3 chapas).

Figura 6-63. Força de expansão térmica para duas e tres chapas (corpo de prova AMNa1-2 chapas, AMNa18-3 chapas).

Figura 6-64. Indentação para duas e tres chapas (corpo de prova AMNa1-2 chapas, AMNa18-3 chapas).

Os corpos de prova AMNx2 e AMNa14 pertencem a mesma família de aço, porém com espessura e revestimentos diferentes, mesmo assim é possível observar na resistência dinâmica e na força de expansão térmica (Figuras 6-65 e 6-66) que o comportamento da curva têm características semelhantes, que difere do corpo de prova AMN10 por ser de outro tipo de aço. A indentação (Figura 6-67) não apresenta características para diferir os materiais.

Figura 6-65. Resistência dianmica de diferentes materiais (corpo de prova AMNx2, AMNa10 e AMNa14).

Figura 6-66. Força de expansão térmica de diferentes materiais (corpo de prova AMNx2, AMNa10 e AMNa14).

Figura 6-67. Indentação de diferentes materiais (corpo de prova AMNx2, AMNa10 e AMNa14).

6.4.6.2 VARIAÇÃO DO REVESTIMENTO DAS CHAPAS

O comportamento da resistência dinâmica muda em relação a chapas sem revestimento. A Figura 6-68 mostra claramente esta diferença [FURLANETTO, 2011].

Figura 6-68. Diferença no comportamento da resistência dinâmica para chapas com e sem zinco.

O comportamento da resistência dinâmica para chapas galvanizadas tem duas inflexões de descida e duas de subida, enquanto que para chapas nuas existe somente uma inflexão de descida e uma de subida. Observando o comportamento da resistência dinâmica em chapas automotivas concluiu-se que nos primeiros 30 ms as inflexões ocorrem em instantes definidos, para um determinado tipo de revestimento (Figura 6-69).

Figura 6-69. Resistência dinâmica de chapas galvanizadas para várias amostras.

Analisando visualmente a superfície de contato na primeira inflexão de descida (A), subida da resistência (B), segunda inflexão de descida (C) e segunda inflexão de subida (D) (Figura 6-70) é notado que na fase A superfície de contato entre as chapas, no caso zinco com zinco, tem as asperezas diminuídas causando a primeira descida da resistência dinâmica. A fase B mostra que o aquecimento aumenta a resistividade não só da camada de zinco, mas também do aço. Na fase C o zinco é fundido, aparecendo a superfície do aço que com o aquecimento começa a diminuir as ásperas, diminuindo novamente a resistência dinâmica. A partir da fase D o processo segue normalmente o que já foi explicado no apêndice 1.

Figura 6-70. Análise visual e por ultrassom do da queima de zinco.

A característica do comportamento da resistência dinâmica na queima do zinco é de grande importância para a formação do ponto de solda, pois permite que a queima de zinco pode ser feita de forma a não necessitar da técnica de pré queima que precisa de 50 a 100ms de corrente, seguida de uma pausa de 10 a 50ms antes de iniciar a corrente definida de soldagem. A eliminação desta técnica usada na indústria automobilística permite produzir com menor tempo e energia (redução de 2 a 5% no tempo de produção de um ponto de solda e redução de energia de 5 a 10%. Valores práticos).

6.4.7 MATERIAIS ESTRANHOS À SUPERFÍCIE DA CHAPA

Foram ensaiados corpos de prova com e sem material entre as chapas (selante) mantido os parâmetros, com eletrodos em meia vida, já que na prática se observa que os problemas nos pontos de solda com selante ocorrem após certo desgaste dos

eletrodos. O ponto com selante ficou ligeiramente menor em comparação com o sem selante.

Na resistência dinâmica (Figura 6-71) nota-se um pequeno aumento na resistência estática e um pequeno atraso no instante de mínimo, porém estas características não são suficientes para determinar a presença do material estranho entre as chapas.

A força de expansão térmica (Figura 6-72) sofre pouca diferença na taxa de subida e também não caracteriza claramente a presença do selante.

A indentação (Figura 6-73) não caracteriza o selante.

Figura 6-71. Resistência dinâmica de corpos de prova com e sem selante. Corpo de prova AMN25 sem selante, AMN29 com selante.

Figura 6-72. Força de expansão térmica de corpos de prova com e sem selante. Corpo de prova AMN25 sem selante, AMN29 com selante.

Figura 6-73. Indentação de corpos de prova com e sem selante. Corpo de prova AMN25 sem selante, AMN29 com selante.

6.4.8 MODELAGEM GRÁFICA DOS RESULTADOS

6.4.8.1 PROBABILIDADE DE PROJEÇÃO DE MATERIAL (*FLASH*) EM RELAÇÃO À ÁREA DE CONTATO DOS ELETRODOS

A força de expansão térmica mostrou comportamentos diferentes durante a produção dos pontos de solda, independente dos parâmetros, espessuras, materiais ou revestimentos das chapas. Em todos os corpos de prova a expansão térmica cresce ao longo da produção, isto é, a força de expansão térmica aumenta quando a área de contato dos eletrodos aumenta (Figuras 6-74 a 6-77). Isto pode ser explicado pelo aumento da pressão interna causada pela dilatação volumétrica do aço, já que a área de formação do ponto de solda aumenta com o desgaste dos eletrodos e a massa de material também aumenta através do incremento da corrente ao longo da produção (*stepper*) [Zhang, 2012].

Figura 6-74. F_{et} em função do desgaste de eletrodos (chapas 0,75+0,75).

Figura 6-75. F_{et} em função do desgaste de eletrodos (chapas 0,9Zn+0,9Zn).

Figura 6-76. F_{et} em função do desgaste de eletrodos (chapas 1,45+1,45).

Figura 6-77. F_{et} em função do desgaste de eletrodos (chapas 0,9Zn+0,9Zn+0,9Zn).

Os valores máximos da força expansão térmica em relação ao desgaste dos eletrodos para chapas de diferentes espessuras, materiais e revestimentos geram o gráfico da Figura 6-78, evidenciando que o aumento da força de expansão térmica independe das chapas além de ter um comportamento previsível aproximada a uma função logarítmica do tipo:

$$F_{et} = \gamma \ln d + c \quad (5.1)$$

Onde:

F_{et} = Força de expansão térmica.

γ = Constante de proporcionalidade (adimensional=702,01).

d = Diâmetro da face de contato do eletrodo em milímetros.

c = Constante de adição (adimensional=196,22).

Figura 6-78. Aumento da força de expansão térmica durante a produção para diferentes espessuras, materiais e revestimentos.

Essa constatação é importante porque mostra que ao longo da produção a expulsão do material é cada vez mais provável. Sua relevância é grande principalmente para a mais recente técnica de produção denominada *Flash Free*, (nome dado pela Ford Motors Company) onde a otimização do processo produz pontos sem projeção de material.

6.4.8.2 INFLEXÕES DA FORÇA DE EXPANSÃO TÉRMICA

Os corpos de prova apresentaram duas inflexões no comportamento da força de expansão térmica. As inflexões são observadas tanto em soldagens com eletrodos novos como em meia vida e fim de vida, com duas ou três chapas (Figuras 6-79 a 6-82). A primeira inflexão pode ser explicada pela dilatação volumétrica do aço até 720°C e contração até 820°C, voltando a expandir após essa temperatura [Kodama,

2008] (Figura 6-83), [Ferreira 2012]. Com a força de expansão térmica é função direta da expansão e contração do aço pode-se entender que a primeira inflexão ocorre na contração voltando a subir na volta da expansão. Com o aço HSS (chapas 0,75) esta inflexão é bem suave, quase imperceptível. A segunda inflexão pode ser explicada pela redução da expansão térmica no início da fase sólida+líquida (capítulo 2.9, Figura 2-30), isto é, formação do ponto.

Figura 6-79. Força de expansão térmica chapas 0,9Zn+0,9Zn. Eletrodos, a1 novo, 23 meia vida e a49 fim de vida.

Figura 6-80. Força de expansão térmica chapas 1,45+1,45. Eletrodos, a13 novo, 35 meia vida e a51 fim de vida.

Figura 6-81. Força de expansão térmica chapas 0,9Zn+0,9Zn+0,9Zn. Eletrodos, a18 novo, 40 meia vida e a52 fim de vida.

Figura 6-82. Força de expansão térmica chapas 0,75+0,75. Eletrodos, a10 novo, 32 meia vida e a50 fim de vida.

Figura 6-83. Curva de dilatação do aço “dual phase” mostrando a expansão- contração-expansão. [Kodama, 2008].

6.4.8.3 RELAÇÃO DO DESGASTE DOS ELETRODOS

O comportamento inicial da resistência dinâmica caracteriza claramente o estágio de desgaste do eletrodo (variação da área de contato) e a força de expansão térmica determina a formação e qualificação do ponto.

6.4.8.4 ERRO DE ORTOGONALIDADE

A resistência estática e os primeiros ciclos da resistência dinâmica evidenciam bem a condição da área de contato quando os eletrodos não estão ortogonais as chapas e a taxa de subida da força de expansão térmica evidencia o erro de ortogonalidade na formação do ponto de solda.

6.4.8.5 REVESTIMENTO DAS CHAPAS

A resistência dinâmica mostrou claramente a presença de revestimento nos primeiros ciclos de solda quando existem dois valores mínimos e dois máximos durante este tempo inicial.

6.4.9 SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS

O início da solda pode ser caracterizado através da aproximação linear da curva da resistência dinâmica (Figura 6-84), com eletrodos novos e desgastados (face 4mm), correntes variando em torno do valor otimizado (tabela 6-6 vermelho), para corpos de prova de duas chapas com espessura 0,9mm revestidas com zinco.

Tabela 6-6. Qualificação e parametrização dos corpos e prova.

Corpo de prova	Chapas (mm)	Eletrodo	d _{min} (mm)	d _{ponto} (mm)	I _s (kA)	T _s (ciclos)	F _m (N)
x	0,9+0,9 Zn	Novo	3,8	4,2	5,4	12	1514
a6	0,9+0,9 Zn	Novo	3,8	3,5	4,7	12	1539
a4	0,9+0,9 Zn	Novo	3,8	5,1	5,8	12	1706
23	0,9+0,9 Zn	d=4mm	3,8	4,6	8,4	12	1990
28A	0,9+0,9 Zn	d=4mm	3,8	2,9	7,4	12	1972
26	0,9+0,9 Zn	d=4 mm	3,8	5,0	9,5	12	2007

Nota-se no gráfico da Figura 6-84 que a equação de descida da resistência dinâmica é constante, mostrando que ela não depende do desgaste dos eletrodos nem da variação da corrente, podendo ser usada para medir resistência de contato inicial e posicionamento dos eletrodos. A subida tem variação dependente do desgaste de eletrodos e da corrente.

Variando-se a corrente entre o valor otimizado (vermelho) e outro maior (verde) da tabela 6-6, determina-se a condição de desgaste dos eletrodos pela taxa de subida.

Eletrodos novos

(a)

Eletrodos desgastados

(b)

Figura 6-84. Aproximação da curva da resistência dinâmica no início da soldagem

(a) eletrodos novos (b) eletrodos desgastados.

A partir do momento que se tem conhecido o desgaste dos eletrodos e sua posição, pode-se controlar a formação do ponto por meio da força de expansão térmica (Figura 6-85 e 6-86). A tabela 6-7 resume as equações aproximadas.

Figura 6-85. Aproximação da curva da força de expansão térmica na formação do ponto para eletrodos novos.

Figura 6-86. Aproximação da curva da força de expansão térmica na formação do ponto para eletrodos meia vida.

Tabela 6-7. Equações aproximadas da resistência dinâmica e força de expansão térmica para predição da formação do ponto de solda.

Tempo de solda	Condição	Eletrodos	Descida R _{din}		Subida R _{din}		Subida Fet		Máximo Fet			Descida Fet	
			a ₁ X	b ₁	a ₂ X	b ₂	a ₃ X	b ₃	a ₄ X ²	b ₄ X	c ₁	a ₅ X	b ₅
0-3	Início solda	Novos	-48	26	28,3	-62	-	-	-	-	-	-	-
3-12	Formação do ponto		-	-	-	-	3	-3,6	-1,3	14	-28	-3,1	30
0-3	Início solda	½ vida	-48	26	11,7	-62	-	-	-	-	-	-	-
3-12	Formação do ponto		-	-	-	-	6,7	-3,6	-0,6	14	28	-	-

Numa primeira aproximação, a equação de desgaste de eletrodo pode ser linearizada, sendo expressa em função da quantidade de pontos produzidos pela taxa de subida da resistência dinâmica (a_2), dada pelo gráfico da Figura 6-87.

Figura 6-87. Variação do coeficiente de subida da resistência dinâmica.

Da mesma forma procede-se para o coeficiente de subida da força de expansão térmica (a_3) (Figura 6-88).

Figura 6-88. Variação do coeficiente de subida da força de expansão térmica.

Aproxima-se o coeficiente quadrático da curva de máximo da força de expansão térmica (a_4) (Figura 6-89).

Figura 6-89. Variação do coeficiente quadrático da curva de máximo da força de expansão térmica.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento da resistência dinâmica permite determinar no início da soldagem até 50ms, as condições de contato dos eletrodos com as chapas seja no desgaste durante a produção ou no erro de ortogonalidade. Este comportamento é preditivo e pode ser representado por uma equação matemática.

A força de expansão térmica correlaciona muito bem a formação do ponto de solda e é preditiva podendo ser representada por duas equações matemáticas.

A indentação dinâmica mostrou fraca correlação e neste estudo não será usada para correlacionar a formação do ponto de solda.

7 CONCLUSÕES

As medições realizadas no cabeçote comparadas com as realizadas em pinças de solda industriais permitem concluir que o sistema de medição desenvolvida para medição da resistência dinâmica e força de expansão térmica são confiáveis tanto em ambiente de laboratório quanto fabril. A indentação, porém, não teve sua comprovação prática e merece novos estudos.

Os testes realizados nos corpos de prova demonstram que o cabeçote tem a estrutura mecânica e elétrica estáveis, fornecendo informações, através dos instrumentos, de forma a possibilitar a emulação fabril de pontos de solda, portanto, conclui-se que o cabeçote emula pontos de solda nas condições encontradas na indústria automobilística.

Os ensaios permitiram o entendimento para a determinação das causas de problemas encontrados na produção dos pontos de solda, os fatores limitantes do processo de solda na produção, compreender e julgar as novas tecnologias que estão sendo aplicadas hoje na indústria automobilística mundial.

- A expulsão de material depende diretamente da força de expansão térmica, que é maior quanto maior área de contato dos eletrodos, portanto, somente com o aumento da força de compressão entre eletrodos e pinças com baixa flexão dos braços pode-se atingir a tecnologia "*Flash Free*" atualmente em implantação na indústria automobilística.
- A resistência dinâmica caracteriza muito bem graficamente e matematicamente as condições de contato dos eletrodos, seja em seu desgaste durante a produção ou por problemas de erro de ortogonalidade. Já a força de expansão térmica caracteriza a formação do ponto de solda. Estas duas grandezas juntas podem definir os valores iniciais de força entre eletrodos e corrente além de ao longo do tempo modificar seus valores para controlar a formação do ponto de solda.

- O ensaio de revestimento mostrou que o zinco é expulso da superfície das chapas até os 15 primeiros milissegundos do tempo de soldagem,.
- Sistema de controle por resistência dinâmica.
  - Os controladores de solda hoje em dia, controlam a corrente para seguir o comportamento de uma curva de resistência padrão definida pelo usuário, supondo-se que nesta condição os pontos estão sendo produzidos com qualidade e sem projeção de material. O ensaio de desgaste de eletrodo mostra que não é possível estabelecer uma única curva, portanto, estes equipamentos atualmente necessitam de eletrodos de face plana (já desgastados pela fresadora) e poucos pontos de produção para uma nova fresagem para que a face de contato não se altere muito, o que causaria a mudança da curva e por consequência o erro de controle.
  - O ensaio de erro de ortogonalidade mostra que a resistência dinâmica tem seu comportamento alterado e pelos mesmos motivos expostos no item acima, os sistemas adaptativos necessitam uma perfeita ortogonalidade dos eletrodos em relação as chapas, correndo o risco de perda de controle.
  - Os controladores de solda usados hoje na indústria automobilística não mostram em suas curvas de controle o mesmo comportamento do ensaio de revestimento quando a queima do zinco é claramente realizada nos primeiros 15 ms do tempo de soldagem, por terem um tempo morto de controle devido a subida da corrente pelo efeito da indutância criada pela pinça, desta forma, eles não conseguem diferenciar chapas revestidas das não revestidas.
  - O ensaio de material mostra um comportamento distinto para diferentes aços, portanto, os sistemas adaptativos não conseguem adaptar-se a materiais diferentes.

Os resultados deste estudo já estão sendo usados no chão de fábrica. Por exemplo, a força de compressão entre eletrodos é definida maior que a máxima força de expansão térmica, na condição de fim de vida dos eletrodos, e é medida com o sensor desenvolvido neste estudo. O tempo de soldagem é definido pelo comportamento da força de expansão térmica, com seu valor determinado pelo instante em que a força alcança o ponto máximo. A corrente de solda é definida pela taxa de subida da força de expansão térmica, até estar próximo da expulsão de material. A subida da resistência dinâmica, indica o grau de desgaste dos eletrodos ou a falha de ortogonalidade e é medida com o sensor de corrente desenvolvido neste estudo.

8 TRABALHOS FUTUROS

Este cabeçote permite o estudo de um sistema adaptativo para controle da formação do ponto de solda, através da variação da força entre eletrodos e resistência dinâmica.

A força entre os eletrodos pode ser rapidamente alterada através do canal de comunicação entre o *driver* do servo motor e um computador, de forma a conseguir controlar a força de expansão térmica.

A corrente também pode ser alterada por um canal de comunicação, presente na maioria dos controladores de solda usados na indústria automobilística, e um computador. Este controle permite alterar a quantidade de calor gerada pela resistência dinâmica. É importante ressaltar que o controle da corrente se dá ciclo a ciclo, portanto, em soldagem com corrente alternada de 60Hz a corrente só pode ser atualizada a cada 16,67ms, enquanto a soldagem em corrente contínua através de inversores de frequência em 1.000Hz, tem atualização a cada 1ms (apêndice 1). Com tempos de solda variando de 100ms a 500ms (capítulo 4), o controle de corrente em corrente alternada teria de 6 a 30 atualizações por ponto, enquanto a soldagem em corrente contínua teria de 100 a 500 atualizações por ponto.

BIBLIOGRAFIA

ACCORSI I., Automotive Weld Quality: Resistance Spot Welding of Steels, SMWC XII Tutorial, AWS Detroit section, 2006.

ANFAVEA, Anuário da Indústria Automobilística Brasileira, 2013, <http://www.anfavea.com.br/anuario.html>.

ARO DO BRASIL, Manual de produtos, 2013, <http://www.arotechnologies.com>

ARTERO J.A., ARCEGA F.J., Influence of External Currents in Sensors Based on PCB Rogowski Coils, International Conference on Renewable Energies and Power Quality 274, 2005.

BLAIR, R. H., Shunt Circuit Impedance in Spot Welding Mild Steel, Welding Journal 26, 843-848, 1947.

BROWN, L.J., SCHWABER, J.S., Identifying operations conditions from pre-weld information for resistance spot welding, Proceedings of the 2000 Control Conference, vol. 3, 2000, pp. 1535-1539.

BROWNE D. J., CHANDLER H. W., EVANS J. T., JAMES P. S., WEN J., NEWTON C. J., Computer Simulation of Resistance Spot Welding in Aluminum: Part II, WRC Welding Research Supplement Bulletin 417-s, 1985.

CALVA, C. M., EAGAR, T. W., Enhancement of the Weldability in Resistance Spot Welding, AWS Detroit Section Sheet Metal welding Conference IV, 1990.

CAMARGO J. R., OLIVEIRA M. C. C., Principles of Direct Thermoelectric Conversion, Heat Analysis and Thermodynamic Effects, InTech, 2013. www.intechopen.com/books/heat-analysis-and-thermodynamic-effects/principlesof-direct-thermoelectric-conversion

CHANG H. S., CHO H. S., A Study on the Shunt Effect in Resistance Spot Welding, WRC Welding Research Supplement Bulletin 353, 1990.

CHEN J., Fundamental Studies for Development of Real-Time Model Based Feedback Control with Model Adaptation for Small Scale Resistance Spot Welding, Thesis Doctor of Philosophy The Ohio State University, 2005.

CHIEN C.S. CHIEN, KANNATEY-ASIBU E., Investigation of Monitoring Systems for Resistance Spot Welding, Welding Journal 195S, 2002.

CHO H. S., CHO Y. J., A Study of the Thermal Behavior in Resistance Spot Welds, WRC Welding Research Supplement Bulletin 334, 1989.

CHO Y., KIM Y., RHEE S., Development of a Quality Estimation Model Using Multivariate Analysis During Resistance Spot Welding, Proc Inst. Mech Eng Vol 215 Part

B, 1529, IMechE, 2001.

CHO Y., KIM Y., RHEE S., Primary Circuit Dynamic Resistance Monitoring and its Application to Quality Estimation during Resistance Spot Welding, Supplement to The Welding Journal, 2002.

D'ANTONA G., CARMINATI E., LAZZARONI M., OTTOBONI R., SVELTO C., AC Current Measurements Via Digital Processing of Rogowski Coil Signal, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002.

DENISOV, A., Modeling and optimization of Non-Phased 2D Ultrasonic Arrays, Thesis PhD, University of Windsor, 2002. Canadá.

DICKINSON D. W., FRANKLIN J. E., STANYA A., Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring, WRC Welding Research Supplement Bulletin 254, 1989.

DOEBBELIN R., MECKE H., WINKLER TH., HEYDER D., Sources of Electromagnetic Disturbances in Resistance Welding Inverter Topologies and Effective Reduction Techniques, Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetic CEEM, 2000.

FENG, Z., BABU S. S., SANTELLA M. L., RIEMER B. W., GOULD J. E., An Incrementally Coupled Electrical-Thermal-Mechanical Model for Resistance Spot Welding, 5th International Conference on Trends in Welding Research, 1998.

FERREIRA A., Determinação de Pontos de Transformação de Fase nos Aços, Relatório, Universidade do Porto, 2012.

FONSECA E. O. T., BRACARENSE A. Q., Desenvolvimento de um Sistema para Monitoração da Resistência Dinâmica e da Força na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica, XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1999, Curitiba.

FURLANETTO V., BATISTA M., BATALHA G. F., Burned Zinc During Welding Nugget Formation, AMPT 2011, Istanbul Turquia, 13/07/2011.

FURLANETTO, V., Proposta e Validação Experimental de um Modelo para "MÁQUINA DE SOLDAGEM A PONTO CA", dissertação de mestrado, Engenharia Elétrica, EPUSP, 2005.

GALLER M., ERNST W., VALLANT R., ENZINGER N., New Method for Measuring the Electrical Contact Resistance Spot Welding, Institute of Materials Science and Welding, Graz University of Technology, 2013.

GARZA F. J., DAS M., Identification of Time-Varying Resistance During Welding, IEEE, 2000.

GEDEON S. A., EAGAR T. W., Resistance Spot Welding Galvanized Steel: Part II. Mechanisms of Spot Weld Nugget Formation, Metallurgical Transactions B, Vol 17B, 1986.

GEDEON S. A., SORENSEN C. D., ULRICH K. T., EAGAR T. W., Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds, WRC Welding Research Supplement Bulletin 322, 1987.

HA J. W., SONG J. H., HUH H., Dynamic Material Properties of the Heat-Affected Zone (HAZ) in Resistance Spot Welding, International Journal of Modern Physics B, Vol. 22, Nos. 31 & 32, 2008.

HAN Z., OROZCO J., INDACOCHEA J. E., CHEN C. H., Resistance Spot Welding: A Heat Transfer Study, WRC Welding Research Supplement Bulletin 343, 1989.

HIGASHI E. M., Modelagem da Bobina de Rogowski para Medidas de Pulsos de Corrente Elétrica, Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Paraná, 2006.

HIRSCH R. B., LEIBOVITZ R., Influence of Water Temperature and Flow on Electrode Life, Unitrol Electronics, 2013.

HULST, A. P. A. J., A Thermal Model of the spot Welding Process, Thesis Doctor of Philosophy, Technische Hogeschool Te Eindhoven, Holanda, 1969.

JFE STEEL CORPORATION, Manual de produto, Electrogalvanized Steel Sheet, <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/sheets/catalog/b1e-003.pdf>.

JI C. T., ZHOU Y., Dynamic Electrode Force and Displacement in Resistance Spot Welding of Aluminum, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, ASME, 2004.

JONG Y. S., LEE Y. K., KIM D. C., KANG M. J., HWANG I. S., LEE W. B., Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Ultra High Strength Steel Containing Boron, Materials Transactions, The Japan Institute of Metals, Vol. 52, No. 6, pp. 1330 to 1333, 2011.

KAISER J. G., DUNN G. J., EAGAR T. W., The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding, WRC Welding Research Supplement Bulletin, 1982.

KODAMA P. K., Determinação da Região Intercrítica para Produção da Microestrutura Final de Aço Bifásico, TCC, UNIFEI, S. Bernardo do Campo, SP, 2008.

MA Y., WU P., XUAN C., ZHANG Y., SU H., Review on Techniques for On-Line Monitoring of Resistance Spot Welding Process, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 630984, 2013.

METALURGICA MARIMAX, Manual de produtos, 2013, <http://www.marimax.com.br/>

NA S. J., PARK S. W., A Theoretical Study on Electrical and Thermal Response in Resistance Spot Welding, Supplement to The Welding Journal, 1996.

NASCIMENTO V. C., Seleção de Parâmetros de Soldagem a Ponto por Resistência, Baseado na Medição da Resistência Elétrica entre Chapas, Dissertação de Mestrado, UFU,

2008

NINSHU M., HIDEKAZU M. Numerical and Experimental Study on Nugget Formation in Resistance Spot Welding for High Strength Steel in Automobile Bodies, Transactions of JWRI, Vol. 38, No 2, 2009.

NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL, MANUAL de produto , Coated Steel Sheets Hot-dip Galvanized Sheets and Precoated Sheets, 2013, www.nssmc.com.

PARK S. W., NA S. J., A New Current Measurement Method in Resistance Spot Welding, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 39, No 5, 1990.

PARK S. W., NA S. J., A Study on Hybrid Modeling of Electrical Phenomena in Contacts, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 13, No 2, 1990.

RAMBOZ J. D., DESTEFAN D. E., STANT R. S., The Verification of Rogowski Coil Linearity from 200 A to Greater than 100 kA using Ratio Methods, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002.

ROBERTS, W. L., Resistance Variations During Spot Welding, Welding Journal, pp. 1004-1019, 1951.

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

SAVAGE W. F., NIPPES E. F., WASSELL F. A., Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds, WRC Welding Research Supplement Bulletin 224, 1977.

SENKARA J., ZHANG H., HU S. J., Expulsion Prediction in Resistance Spot Welding, Welding Journal 123S, 2004.

SHRIVER J., PENG H., HU S. J., Control of Resistance Spot Welding, Proceedings of the American Control Conference, 1999.

SONG Q., ZHANG W., BAY N., An Experimental Study Determines the Electrical Contact Resistance in Resistance Welding, Supplement to the Welding Journal, 2005.

SRIKUNWONG C., Modelisation du Procédé de Soudage par Points, Thesis Docteur de l'Ecole des Mines de Paris, Mines Paris Collège doctoral, França, 2005.

STOCCO D., Caracterização de Solda por Resistência a Ponto Através de Avaliações não Destrutivas, Dissertação de Mestrado, PPGEM -EPUSP, Sao Paulo, 2010.

SUN T. A. M. A., Fundamental Study of Contact Resistance Behavior in RSW Aluminum, Thesis Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University, EUA, 2003.

TANG H., HOU W., HU S. J., ZHANG H., Force Characteristics of Resistance Spot

Welding of Steels, Supplement to The Welding Journal, 2000.

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.

THYSSENKRUPP STEEL, Manual de produto, Zinc-aluminum coated sheet GALFAN ZA, <http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/tiny/mn/download.pdf>.

TSAI C. L., DAI W. L., DICKINSON D. W., PAPRITAN J. C., Analysis and Development of a Real-Time Control Methodology in Resistance Spot Welding, WRC Welding Research Supplement Bulletin 339-s, 1991.

URAN M., Qualitätsüberwachung beim Widerstandspunktschweißen mittels mehrparametrischer Analyse, Thesis Doctor, Technischen Universität Berlin, Alemanha, 2004.

VOGLER M., SHEPPARD S., Electrical Contact Resistance under High Loads and Elevated Temperatures, WRC Welding Research Supplement Bulletin, 1993.

WANG H., ZHANG Y., CHEN G., Resistance Spot Welding Processing Monitoring Based on Electrode Displacement Curve using Moving Range Chart, Measurement, 42, 1032-1038, 2009, www.elsevier.com/locate/measurement

WANG S. C., WEI P. S., Modeling Dynamic Electrical Resistance During Resistance Spot Welding, Transactions of the ASME, Vol. 123, 2001.

WANG Y., ZHANG P., HOU Z., WU Y., Analysis of the Welding Deformation of Resistance Spot Welding for Sheet Metal with Unequal Thickness, Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009.

WARD D. A., EXON J. LA T., Using Rogowski Coils for Transient Current Measurements, Engineering Science and education Journal, 1993, pg.192.

WEI L., FENG E., Energy Consumption in AC and MFDC Resistance Spot Welding, Sheet Metal Welding Conference XI Sterling Heights, 2004.

WEIBO L., CHENGXIONG M., JIMING L., Some Considerations of design a High Performance Rogowski Coil for Pulsed Current Measurements, Istanbul University - Journal of Electrical & Electronics Engineering, 2006.

WELLENTECH, Manual de produto, Thermocouple Peltier Products, 2013, <http://www.wellentech.com>

WU, T. H., HO J. E., LAN I., WEI P. S., Dynamic Electrical Resistance Effects in Resistance Spot Welding, IMPACT Paper code :TW042-1, 2013.

YEUNG Y. K. S., THORNTON P. H., Transient Thermal Analysis of Spot Welding Electrodes, WRC Welding Research Supplement Bulletin, 1999.

ZANATTA Z., Condutividade elétrica e efeito Hall em semicondutores, Apostila do Laboratório de Ensino do Instituto de Física de São Carlos - USP (2002) - <http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/> (acesso setembro 2013).

ZHANG H., SENKARA J., Resistance Welding: Fundamentals and Applications, Second Edition, CRC Press, 2012.

ZHANG W., Design and Implementation of Software for Resistance Welding Process Simulations, Society of Automotive Engineers, 2003.

ZHANG X., UM L. H., Digital Integrator for Rogowski Coil, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Março 2010, Chengdu, China.

APÊNDICE 1: CORPOS DE PROVA

Medições simultâneas da resistência dinâmica, força de expansão térmica e indentação, qualificação do ponto de solda.

AMNa1

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,6	1,5	0,2	5,4	12	1514

AMNa4

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,8	1,5	0,1	5,8	12	1706

AMNa5

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,2	1,35	0,3	6,0	12	1723

AMNa6

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	3,8	1,35	0,25	4,7	12	1539

AMNa9

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,6	1,35	0,25	6,1	8	1861

AMNa10

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,75+0,75	3,8	1,0	0,15	4,8	12	1714

AMNa13

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
1,45+1,45	5,1	2,2	0,4	6,8	16	2615

AMNa14

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
1,45+1,45	5,15	2,2	0,35	6,8	20	2374

AMNa18

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9+0,9	4,6	2,0	0,35	6,5	16	2365

AMNx

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,5	1,45	0,25	5,4	12	1824

AMNx2

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,6	1,5	0,2	5,4	12	1815

AMNx3

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,2	1,1	0,15	5,4	12	2276

AMNx4

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,5	1,5	0,2	5,3	12	1875

AMNy

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	3,8	1,1	0,1	5,4	8	1872

AMNz

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,2	1,35	0,2	5,4	16	1749

AMN23

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,6	1,1	0,05	8,4	12	1990

AMN24

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	2,9	1,0	0,05	8,5	8	1981

AMN25

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	5,8	1,1	0,1	8,3	16	1978

AMN26

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	5,0	1,5	0,1	9,5	12	2007

AMN27

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	3	1,8	0,5	10,1	12	1999

AMN28A

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	2,9	1,1	0,15	7,4	12	1972

AMN29

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	5,0	1,0	0,05	8,4	16	1996

AMN32

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,75+0,75	5,2	1,2	0,1	7,5	12	1630

AMN35

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
1,45+1,45	5,7	2,2	0,25	8,1	16	2485

AMN40

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9+0,9	5,6	2,1	0,3	8,4	16	2408

AMNa49

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,8	1,1	0,15	9,8	12	1756

AMNa50

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,75+0,75	5,4	1,3	0,05	8,1	12	1977

AMNa51

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
1,45+1,45	5,9	2,1	0,15	9,7	16	2628

AMNa52

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9+0,9	6,7	2,1	0,3	9,8	16	2422

AMNa53

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9	4,1	1,1	0,05	9,5	12	1852

AMNa54

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,75+0,75	3,2	0,5	0,05	8,1	12	1439

AMNa55

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
1,45+1,45	4,5	1,6	0,15	9,7	16	2916

AMNa56

Resumo da qualificação e parâmetros

Chapas (mm)	d (mm)	p (mm)	ind (mm)	Is (kA)	Ts (ciclos)	Fm (N)
0,9+0,9+0,9	4,4	1,6	0,1	10,0	16	2533

Medições comparativas entre corpos de prova.

AMNx2-AMNy-AMNz

AMNx4-AMNx-AMNx2

AMNa1-AMNa6

AMNa1-AMNx4-AMNx3

AMNx2-AMNa5

AMNa1-AMNa9

AMNa1-AMNa10-AMNa13

AMNa1-AMNa18

AMNa1-AMN23-MNa49

AMNa10-AMN32-AMNa50

AMNa13-AMN35-AMNa51

AMNa18-AMN40-AMNa52

AMNx2-AMNa45

AMNa49-AMNa53

AMNa50-AMNa54

AMNa51-AMNa55

AMNa52-AMNa56

AMN23-AMN28A-AMN26

AMN23-AMN24-AMN25

AMN23-AMN32-AMN35

AMN23-AMN40

AMN23-AMN28A-AMN27-AMN26

AMN25-AMN29