UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

ESTUDO PARAMÉTRICO DE OPTIMIZAÇÃO DE SOLDADURA POR RESISTÊNCIA ELÉCTRICA POR PONTOS

Helena Maria Fazendeiro Pardal Monteiro

Porto, 2000

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

ESTUDO PARAMÉTRICO DE OPTIMIZAÇÃO DE SOLDADURA POR RESISTÊNCIA ELÉCTRICA POR PONTOS

Tese de Mestrado

HELENA MARIA FAZENDEIRO PARDAL MONTEIRO

Licenciada em Engenharia da Produção e Gestão Industrial
pela Universidade da Beira Interior

UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA
N.º
CDU

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

para a obtenção do Grau de Mestre em Manutenção Industrial sob a supervisão do

Professor Doutor António Augusto Fernandes

Porto, Setembro de 2000

A ti Amândio e ao nosso filho Diogo
gerado e nascido ao longo deste trabalho.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor António Augusto Fernandes, pela sua disponibilidade e orientação científica neste trabalho. (FEUP)

Ao Professor Miguel Figueiredo, pela inteira disponibilidade e colaboração na definição do plano de experiêcias realizado e na exploração dos resultados. (FEUP)

Ao Professor Doutor Oliveira Fernandes. (FEUP)

Ao Sr. Franco. (FEUP)

À Direcção do Grupo PSA – Peugeot Citroën Centro de Produção de Mangualde, pela disponibilidade concedida para frequentar esta formação.

Aos meus superiores hierárquicos.

A todos os que me apoiaram nesta aventura, ajudando-me a não desistir, em especial ao meu marido.

RESUMO

ESTUDO PARAMÉTRICO DE OPTIMIZAÇÃO DE SOLDADURA POR RESISTÊNCIA ELÉCTRICA POR PONTOS

Neste trabalho, abordou-se de forma particular a soldadura por resistência eléctrica por pontos. Através da análise dos diferentes parâmetros que podem influenciar a qualidade de um ponto de soldadura, escolheram-se seis dos mais significativos.

A estes parâmetros, ou factores, foram atribuídos dois níveis de variação. Desta forma, através do método de Taguchi, foi possível estabelecer um plano de experiências a realizar. O plano de Taguchi escolhido foi o L^{32}, sendo este o mais adequado uma vez que nos permite estudar as possíveis interacções entre todos os factores a analisar.

Realizaram-se então, 32 ensaios para as condições definidas no plano de experiências, sendo o equipamento utilizado, uma pinça de soldadura móvel com transformador incorporado. Foram efectuadas três repetições dos ensaios para permitir a análise de variância dos resultados.

Estes provetes de ensaio, foram unitariamente sujeitos a ensaios de tracção. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente, obtendo-se desta forma a correlação existente entre os diferentes factores e as respostas estudadas, na forma de gráficos e as interacções entre esses factores.

Demonstrou-se desta forma, como os parâmetros de soldadura intervêm entre si e a sua influência na qualidade da junta soldada, confrontando os valores dos parâmetros experimentais utilizados com os parâmetros teóricos indicados para as condições das soldaduras a efectuar.

Desta forma, foi possível definir os procedimentos do processo e definir as tolerâncias de funcionamento, sabendo em que parâmetros actuar e de que forma, o que nos permitirá diminuir a incidência de defeitos, estabelecendo um plano de manutenção preventiva, para os equipamentos utilizados.

RESUME

ÉTUDE PARAMÉTRIQUE D'OPTIMISATION DE LA SOUDURE PAR RÉSISTANCE ELÉCTRIQUE PAR POINTS

Dans ce travail, nous avons abordé d'une forme particulière la soudure par résistance électrique par points. A travers une analyse des différents paramètres qui peuvent influencer la qualité des points de soudure, six paramètres des plus significatifs ont été choisi.

A ces paramètres, ou facteurs, ont été attribués deux niveaux de variation. De cette forme, et à travers la méthode de Taguchi, il fut possible d'établir un protocole expérimentale. Le protocole de Taguchi choisit fut le L^{32}, étant celui le plus adéquat qui nous permet d'étudier les possibles interactions entre tous les facteurs à analyser.

Il sait alors réaliser, 32 essais dans des conditions bien définies dans le protocole d'expérience. L'equipement utilisé, est une pince à souder à transformateur incorporé. Il a été effectue trois essais répétitifs pour permettre une analyse des variations des résultats.

Ces éprouvettes d'essai, ont été unitairement sujet d'essai de traction. Les résultats obtenus furent traités statistiquement afin d'obtenir de cette forme une correction qui existe entre les différents paramètres, de forme graphique et d'influences dans les facteurs à étudier.

Il a été montrer de cette forme, comment les paramètres de soudure interviennent entre eux et son influence dans la qualité des tôles soudées, en confrontant les valeurs des paramètres expérimentales utilisés avec les paramètres théoriques indiqués pour les conditions de soudures.

De cette manière, il a étè possible de definir les procédures du processus et les tolérances de fonctionnement, pour savoir dans quelles paramétres intervenir et de quelle façon, ce qui permettra la diminuition des défaults, en établissant un plan de mantenance préventif pour les équipements utilisés.

SUMMARY

PARAMETHRICAL STUDY OF THE OPTIMIZATION OF THE RESISTENCE SPOT WELDING

In this work, we have spoken in a particular way of the resistence spot welding. Analysing the different variables that can have an influence on the quality of the weld nugget, we have chosen six of the most significatif.

To this variable, or factors, it was attribuated two variation levels. By that, using the Taguchi méthod, it was possible to establish a plan of experiences. Taguchi's plan chosen were L^{32} , once it was the most adequated, because it allow us to study the possible relationships between all factors.

The equipment used for make the 32 specimens, in the conditions defined by the plan of experiences, was a spot welding gun with transformer.

The tests were repeated three times, to allow the analysis of the results. These test specimens, were all suject to a traction test. The results were treated statistichally, giving us the existing correlation between the different factors and answers that were study and presented in graphical form.

With these tests we have demonstrated the relathionship between the welding variables and their influence in the weld quality, making a comparison between experimental weld variables and the variables defined in these work.

Then it was possible to define the process procedure and the work tolerances, knowing exactly in what variables interfere and how. These allow us to reduce the existence of the weld defects, establishing a plan of preventive maintenance.

Índice

Pág.

Agradecimentos ---------- i

Resumo ---------- ii

Índice ---------- v

Lista de Rubricas ---------- viii

Lista de Figuras ---------- ix

Lista de Tabelas ---------- xii

Introdução ---------- 1

Definição e objectivos do presente trabalho ---------- 2

CAPÍTULO 1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ---------- 3

1.1 - Soldadura por resistência eléctrica ---------- 3

1.1.1 - Fundamentos. Princípio. Definições ---------- 3

1.1.2 - Aplicações ---------- 3

1.1.3 - Importância ---------- 4

1.1.4 - Processos de soldadura por resistência eléctrica ---------- 5

1.1.5 - Economias da soldadura por resistência eléctrica ---------- 6

1.1.6 - Desenho para a soldadura por resistência eléctrica ---------- 7

1.1.7 - Materiais soldáveis por resistência eléctrica ---------- 8

1.1.8 - Limitações da soldadura por resistência eléctrica ---------- 8

1.2 - Soldadura por resistência eléctrica por pontos ---------- 8

1.2.1 - Princípios gerais ---------- 8

1.2.2 - Efeito de Joule e a geração de calor ---------- 14

1.2.3 - Processo de formação de um ponto de soldadura ---------- 17

1.2.3.1 - Período de aquecimento de um ponto de soldadura ---------- 22

1.2.3.2 - Período de arrefecimento de um ponto de soldadura ---------- 24

1.2.4 - Resistências de contacto ---------- 24

1.2.4.1 - Influência da natureza dos metais em contacto e dos estado das superfícies ---------- 26

1.2.4.2 - Influência da temperatura sobre as resistências de contacto ----- 28

1.2.5 - Estudo dos parâmetros de soldadura ---------- 28

Índice

1.2.5.1 - A intensidade da corrente ---------- 31
1.2.5.1.1 - Densidade da corrente de soldadura ---------- 36
1.2.5.1.2 - Ciclos da intensidade da corrente de soldadura ---------- 36
1.2.5.2 - O tempo de soldadura ---------- 36
1.2.5.3 - Força de aperto, esforço de soldadura ou esforço de compressão ---------- 38
1.2.5.3.1 - Os diferentes ciclos do esforço de compressão ---------- 42
1.2.6 - Efeito shunt ---------- 43
1.2.7 - Balanço de calor ---------- 45
1.2.8 - Forma e dimensão dos eléctrodos ---------- 46
1.2.9 - Desenho para a soldadura por resistência eléctrica por pontos ---------- 54
1.2.10 - Materiais soldáveis por pontos ---------- 56
1.2.11 - Economias do processo ---------- 57
1.2.12 - Qualidade de um ponto de soldadura ---------- 58
1.2.13 - Controlo da soldadura por pontos ---------- 61
1.3 – Conclusão do capítulo 1 ---------- 62

CAPÍTULO 2 - IDENTIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS -- 63

2.1 - Aços ---------- 63
2.1.1 - Composição química dos aços ---------- 63
2.1.2 - Estrutura dos aços ---------- 64
2.1.3 - Efeito dos elementos de liga nos aços ---------- 65
2.1.4 - Aços para chapas ---------- 65
2.2 - Características do material utilizado ---------- 69
2.3 - Equipamento ---------- 70
2.3.1 - Pinças de soldadura eléctrica ---------- 70
2.3.2 - Características da pinça de soldadura utilizada ---------- 74
2.4 – Conclusão do capítulo 2 ---------- 75

CAPÍTULO 3 - DEFINIÇÃO DO PLANO DE EXPERIÊNCIAS ---------- 76

3.1 - Procedimento experimental ---------- 76
3.2 - Planeamento das experiências ---------- 76
3.3 – Conclusão do capítulo 3 ---------- 79

Índice

CAPÍTULO 4 - CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE RESULTADOS ---------- 80

4.1 - Ensaios de tracção por corte ---------- 80
4.2 – Análise estatística dos resultados ---------- 83
4.2.1 – Força de ruptura ---------- 85
4.2.2 – Diâmetro do ponto de soldadura ---------- 98
4.3 – Conclusão do capítulo 4 ---------- 109

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES / LIMITAÇÕES / PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS ---------- 111

5.1 – Conclusões---------- 111
5.2 – Limitações---------- ---------- 112
5.3 – Propostas para trabalhos futuros---------- 113

BLIBLIOGRAFIA UTILIZADA ---------- 114

ANEXOS ---------- 116

Lista de Rúbricas

Lista de Figuras

Figura	Designação	Página
1	Representação esquemática da soldadura por pontos	10
2	Soldadura por pontos (Junta sobreposta)	11
3	Temperaturas instantâneas estimadas em graus centígrados	12
4	Zona aquecida da soldadura por pontos	13
5	"Fanning Out" da corrente para sucessivas aumentos de espessura	14
6	Gradiente de temperatura da soldadura por pontos	15
7	Formação de um ponto de soldadura	19
8	Abatimento superficial após um ponto de soldadura	19
9	Efeito de uma sobreposição deficiente	20
10	Formação de um ponto de soldadura em chapas de aço doce	21
11	Montagem para medição das variações de espessuras das chapas	22
12	Vazio interno de um ponto de soldadura realizado com esforço de compressão insuficiente durante o período de aquecimento	23
13	Estado térmico de um ponto de soldadura, no final do período de aquecimento	23
14	Aspecto de duas superfícies metálicas em contacto ampliadas	25
15	Resistências de contacto em frio em função do esforço de compressão	27
16	Variação da resistência de contacto entre chapas, em função da temperatura	28
17	Soldadura por ponto simples	29
18	Variação do diâmetro do ponto em função do tempo de soldadura	32
19	Diagrama de soldabilidade	33
20	Chapas de aço de 1 mm; Intensidade: 7800A	34
21	Chapas de aço de 5 mm; Intensidade: 16500A	34
22	Diagrama das curvas "Diâmetro do ponto em função do tempo de soldadura"	35
23	Ponto de soldadura	36
24	Soldadura com intensidade constante	37
25	Soldadura com recozimento	37
26	Soldadura com pré-aquecimento	37
27	Curva de diminuição dum ponto de soldadura para um aumento do esforço de soldadura	41
28	Pressões especificas em função das densidades da corrente	42
29	Soldadura com esforço de compressão constante	42
30	Soldadura com variação do esforço de compressão	43
31	Diagrama esquemático do efeito "Shunt"	44
32	Variação da razão da corrente shuntada / corrente total de soldadura	45
33	Obtenção de um balanço de calor adequado – Diferentes técnicas	46
34	Soldadura com diâmetro pequeno	50
35	Soldadura com diâmetro muito grande	50
36	Soldadura de chapas grossas	51
37	Eléctrodo de ponta esférica	52
38	Eléctrodo de ponta troncocónica - refrigeração	53
39	Algumas soldaduras por pontos	54
40	Garganta útil de uma pinça de soldadura	55

Lista de Figuras

Figura	Designação	Página
41	Ciclo da soldadura por pontos	61
42	Secção de passagem da corrente pelo revestimento	67
43	Campo e domínio de soldabilidade	68
44	Pinça de soldadura em C	73
45	Pinça de soldadura em tesoura	73
46	Pinça de soldadura utilizada nos ensaios	74
47	Esquema de montagem dos provetes utilizados	76
48	Provete nº5	81
49	Provete nº12	82
50	Provete nº16 - Parte 1	82
51	Provete nº16 - Parte 2	83
52	Efeito do esforço de soldadura	87
53	Efeito do diâmetro da ponta do eléctrodo	87
54	Efeito tempo de soldadura	88
55	Efeito revestimento da chapa	88
56	Efeito espessura da chapa	89
57	Efeito intensidade da corrente	89
58	Efeito esforço de soldadura / tempo de soldadura	90
59	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / tempo de soldadura	91
60	Efeito esforço de soldadura / revestimento da chapa	91
61	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / revestimento da chapa	92
62	Efeito revestimento da chapa / espessura da chapa	92
63	Efeito intensidade da corrente / tempo de soldadura	93
64	Efeito intensidade da corrente / revestimento da chapa	93
65	Efeito intensidade da corrente / espessura da chapa	94
66	Efeito tempo de soldadura / revestimento da chapa	94
67	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / espessura da chapa	95
68	Efeito esforço de soldadura / intensidade da corrente	95
69	Efeito esforço de soldadura / espessura da chapa	96
70	Efeito tempo de soldadura / espessura da chapa	96
71	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / esforço de soldadura	97
72	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / intensidade da corrente	97
73	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo	98
74	Efeito intensidade da corrente	99
75	Efeito revestimento da chapa	100
76	Efeito espessura da chapa	100
77	Efeito tempo de soldadura	101
78	Efeito esforço de compressão	101
79	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / intensidade da corrente	102
80	Efeito tempo de soldadura /espessura da chapa	102
81	Efeito intensidade da corrente / revestimento da chapa	103
82	Efeito esforço de soldadura / intensidade da corrente	103
83	Efeito intensidade da corrente / tempo de soldadura	104
84	Efeito esforço de soldadura / revestimento da chapa	104
85	Efeito esforço de soldadura / espessura da chapa	105

Lista de Figuras

Figura	Designação	Página
86	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / tempo de soldadura	105
87	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / esforço de soldadura	106
88	Efeito revestimento /espessura da chapa	106
89	Efeito tempo de soldadura / revestimento da chapa	107
90	Efeito intensidade da corrente / espessura da chapa	107
91	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / espessura da chapa	108
92	Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / revestimento da chapa	108
93	Efeito esforço de soldadura / tempo de soldadura	109

Lista de Tabelas

Tabela	Designação	Página
1	Classificação dos processos de soldadura eléctrica por resistência	5
2	Determinação da espessura de referência "e"	49
3	Atribuição dos níveis dos factores	77
4	Matriz ortogonal L_{32} (2^{31})	78
5	Respostas obtidas	80
6	Análise da variância para a força de ruptura	84
7	Análise da variância para o diâmetro do ponto de soldadura	85

INTRODUÇÃO

Com a descoberta da soldadura por resistência eléctrica, abriu-se um leque de possibilidades de soldar os mais diversos materiais até à data impossíveis de soldar, quer pela sua composição, quer pelas suas dimensões. De facto, este método, através dos seus diversos tipos de realização, veio dar um grande contributo no desenvolvimento industrial de então. A sua principal vantagem além da sua rapidez de execução, é o facto de não necessitar de material de adição, tornando-se um processo bastante económico.

O processo baseia-se no Efeito de Joule, ou seja, na energia calorífica gerada numa resistência, pela passagem de uma corrente eléctrica. Esta resistência eléctrica, neste caso, é formada pelas próprias peças a soldar. É também nas peças que se desenvolve o calor necessário para obter uma fusão local e consequentemente, uma soldadura.

Uma das formas mais utilizadas da soldadura por resistência eléctrica, é a soldadura por pontos. Este tipo de soldadura tem tido uma utilização importante por parte dos construtores de automóveis, pois a maior parte dos automóveis modernos requer entre 3000 e 5000 soldaduras por pontos. Embora tenha aplicações noutra indústrias, esta é sem dúvida aquela onde é mais utilizada.

A qualidade deste processo, é assegurada através da combinação perfeita dos factores ou parâmetros de variação do processo. Da escolha rigorosa destas variáveis, dependem as características mecânicas e o aspecto dos pontos de soldadura. As principais variáveis são a intensidade da corrente, o tempo de soldadura e a força de compressão aplicado às peças a soldar através de eléctrodos.

As formas mais comuns de controlar a soldadura por pontos, continuam a ser, por um lado, os ensaios destrutivos, onde através de máquinas pneumáticas se separam as peças soldadas, avaliando-se assim, os diâmetros dos pontos de soldadura resultantes e por outro os ensaios não destrutivos, onde com uma talhadeira se bate entre as peças na zona dos pontos, verificando-se se existe fusão das peças ou não.

Apesar de existirem outros métodos de controlo, inclusivé métodos para controlar as variáveis durante a produção, nenhum deles apresenta um grau de confiança aceitável.

Desta forma, torna-se fundamental a máxima compreensão de todas as variáveis que afectam o processo, saber a forma como estas influenciam a qualidade do ponto de soldadura e conhecer as correlações existentes entre si. Só assim, será possível definir estas variáveis para cada soldadura particular, tendo em conta as características das peças a soldar e o nível de qualidade pretendido.

DEFINIÇÃO E OBJECTIVOS

Uma correcta definição das variáveis de soldadura e o seu controlo preciso, com uma combinação adequada da preparação da superfície, permite-nos obter soldaduras de qualidade. É por isso fundamental definir os parâmetros de soldadura da melhor forma possível, para cada caso particular. Encontram-se frequentemente tabelas, quer em normas, quer em livros e documentos alusivos à soldadura por pontos, que definem para determinadas características das peças a soldar, quais os parâmetros de soldadura a utilizar. Estas tabelas foram construídas após a realização de inúmeras experiências, cujos resultados foram tratados e dos quais se puderam estabelecer correlações e "regras de soldadura".

O propósito deste trabalho, foi precisamente, através da realização de experiências, estabelecer as correlações dos parâmetros de soldadura escolhidos com a qualidade do ponto de soldadura obtido e averiguar a forma como estes se relacionam entre si, para assim poder avaliar a importância de cada um. Desta forma, poderemos obter dados, que permitam a definição de procedimentos de soldadura e estabelecer as tolerâncias de funcionamento. Podemos ainda, saber em que parâmetros poder actuar e qual o efeito da sua modificação, o que nos permitirá diminuir fortemente a incidência de defeitos.

Uma vez que os parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes de ensaio são diferentes dos indicados pelas normas e referenciais de soldadura, pretendeu-se também averiguar, se a soldadura é possível e com que grau de qualidade.

Assim, fixando todas as outras variáveis e variando apenas a intensidade da corrente, o tempo de soldadura, o esforço de compressão, o diâmetro da ponta do eléctrodo, a espessura e o revestimento da chapa e analisando os resultados das experiências, tentou-se chegar a novas possibilidades de soldadura, diferentes das indicadas nos documentos existentes para o efeito.

O objectivo deste estudo, foi conseguir encontrar combinações dos parâmetros de soldadura, diferentes dos "parâmetros teóricos" mas que nos permitem soldar com um determinado nível de qualidade. A esses parâmetros chamamos "parâmetros degradados" e serão úteis sobretudo, quando em determinadas circunstâncias, um equipamento de soldadura (por exemplo uma pinça móvel de soldadura) não se encontre a funcionar com os parâmetros requeridos, ou porque a potência insuficiente do seu transformador não permita obter a intensidade da corrente necessária, ou porque o seu cilindro não permita fornecer aos eléctrodos o esforço de compressão pretendido, ou simplesmente porque pretendemos aumentar a cadência e há que reduzir a duração do ciclo de soldadura.

Tentou-se também estudar a soldadura de chapas galvanizadas, com grande utilização no sector automóvel, por conferirem uma garantia anti-corrosão mais alargada.

O conhecimento dos diferentes parâmetros que tornam possível a soldadura para determinadas características dos materiais a soldar, permite-nos definir um domínio de soldabilidade dentro do qual a soldadura será realizada com qualidade e com a resistência mecânica necessária.

CAPÍTULO 1

ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

1.1. SOLDADURA POR RESISTÊNCIA ELÉCTRICA

1.1.1. Definição.

A possibilidade de soldar duas peças fazendo-as atravessar por uma corrente eléctrica de forte intensidade, foi descoberta em 1877 por Elihu Thompson. Conectando dois condensadores previamente carregados, aos bornes de uma bobina secundária de fio fino e deixando as pontas do enrolamento do primário do fio mais grosso, unidas por um simples contacto, a descarga de corrente no enrolamento secundário, originou uma tensão induzida no primário. Desta forma, ao circular pelo circuito primário fechado, a corrente eléctrica provocou uma fusão dos extremos da bobina, deixando os fios soldados um ao outro. [1]

Estava assim descoberto o princípio de um novo método de união por soldadura: A soldadura por resistência eléctrica.

Este tipo de soldadura, consiste em unir duas ou mais peças de metal, sem utilizar qualquer metal de adição, através de pressão e calor. A sua arte reside no facto de o calor de soldadura nas peças a soldar, ser gerado pela resistência oferecida por estas à passagem de uma corrente eléctrica.

Difere de outras formas, por não haver materiais estranhos como fios ou fluxos no seu processo e ainda por utilizar a pressão para unir as chapas aquecidas. O efeito desta pressão é refinar o grão da estrutura, produzindo assim uma soldadura com propriedades físicas, em muitos casos, iguais às do metal de base e até mesmo superiores.

1.1.2. Aplicações

Em 1898 aparece a primeira utilização da soldadura por pontos que é uma forma de soldadura por resistência, sendo utilizada na fabricação de utensílios de cozinha. Mais tarde, em 1915, a construção de carroçarias automóveis em chapas de aço, oferece um novo campo de aplicação à soldadura por resistência trazendo-lhe novos progressos.

Durante a 2ª Guerra Mundial, a necessidade de uma produção massiva na Indústria norte-americana, levou à utilização em grande escala da soldadura por resistência, por exemplo a construção aeronáutica, na qual a produção de uniões soldadas ultrapassa os 30% das uniões efectuadas.

As técnicas de soldadura por resistência são aplicadas em todos os domínios da indústria de transformação de metais e certas fabricações são baseadas inteiramente na utilização destas técnicas, como é o caso da Indústria Automóvel.

Qualquer que seja o formato da peça e o tipo de metal a soldar, existe dentro do processo de soldadura por resistência uma diversidade enorme de possibilidades de

soldar tal material. Mesmo nos casos em que a soldadura é difícil de executar devido à composição das peças a soldar, como por exemplo, para o grupo de ligas de alumínio e magnésio, estes podem soldar-se com bons resultados, com uma combinação adequada da preparação da superfície e um controlo preciso das variáveis de soldadura. [2]

Existe uma grande diversidade de utensílios que contêm soldaduras por resistência eléctrica: canas de pesca, grelhas, electrodomésticos, caixas registadoras, máquinas de calcular, talheres, tubos, enfim, a lista poderia ser alargada, uma vez que cada novo produto em metal, representa uma nova possível aplicação, pois os recentes refinamentos no equipamento e desenvolvimento do processo abriram o caminho para uma produção mais eficiente e uma melhor qualidade do trabalho.

1.1.3. Importância

A importância alcançada pela soldadura por resistência em todos os ramos de actividade, explica-se pelas seguintes razões:

- constitui um dos principais factores técnicos de produtividade no trabalho dos metais;
- é um processo económico;
- possui uma variedade de sub-processos, possíveis de adaptar a cada situação em particular;
- oferece a possibilidade de conjuntar peças que pelas suas formas particulares ou pela sua composição química, não poderiam ser soldadas por nenhum outro processo;
- garante a obtenção de uniões de características mecânicas e metalúrgicas rigidamente determinadas;
- a concepção das máquinas permite fazê-las completamente automáticas e conjuntá-las em cadeias de montagem ou num complexo de automatização;
- permite estampagens mais simples e menos dispendiosas uma vez que possibilita a junção de várias peças, para obter uma peça única de iguais características mecânicas, mas que seria impossível estampar de uma só vez ou seria mais dispendioso;
- evita a acumulação de sujidades, contrariamente a outros processos, como a rebitagem, por exemplo e permite soldaduras sem marcas, em zonas de aspecto, sem que se note a sua existência. Por vezes é necessário levar a cabo operações de acabamento, ou preparação das superfícies a soldar. Para possibilitar as soldaduras invisíveis é necessário um rigoroso controlo das variáveis de soldadura, boas ferramentas e melhores máquinas;

1.1.4. Processos de soldadura por resistência eléctrica

A resistência eléctrica é um processo de soldadura autogénea, no qual não se utiliza metal de adição. As moléculas da zona aquecida à temperatura de fusão misturam-se intimamente. Assim, as uniões obtidas, possuem a mesma natureza metalúrgica e as mesmas características físicas dos materiais de base. A soldadura autogénea consiste então em transformar duas redes cristalinas numa única rede. [1]

Na tabela que se segue, podemos observar resumidamente os vários tipos de processos de soldadura por resistência eléctrica:

TIPO DE JUNTA	TIPO DE SOLDADURA	PROCESSO MECÂNICO	FORMA DE AQUECIMENTO
JUNTA SOBREPOSTA	Por pontos	Com um par de eléctrodos	POR RESISTÊNCIA (Efeito de Joule)
		Com um par de eléctrodos de pontas múltiplas	
		Por pontas duplas	
		Pontas múltiplas executadas por um equipamento	
	Contínua	Por roletes	
		Com dois roletes	
		Com um rolete e um suporte	
	Por bossas	Prensa de soldadura	
JUNTA TOPO A TOPO	Por resistência	Equipamento de soldadura topo a topo	Por resistência
			Por faíscamento
	Por faiscamento		Misto por resistência e por faíscamento
JUNTA	EM T	Máquinas de soldadura por pontos	Por Resistência
		Máquinas de soldadura Topo a Topo	Por Faíscamento

Tab. 1
Classificação dos processos de soldadura eléctrica por resistência [3]

- **Junta sobreposta**: Soldadura em que as diferentes peças a soldar se encontram sobrepostas.

- **Junta topo a topo**: Junta em que a soldadura é realizada em toda a superfície de contacto entre as peças a soldar.

- **Junta em T**: Trata-se de um tipo de soldadura intermédio entre a soldadura topo a topo e a soldadura sobreposta.

Dentro da soldadura com junta sobreposta temos:

- **Soldadura por pontos**: Trata-se de uma soldadura em que as peças são soldadas entre si apenas através de porções limitadas das suas respectivas superfícies, isto é, apenas por "pontos de soldadura".

- **Soldadura Contínua**: Soldadura realizada com recurso a eléctrodos (roletes) que se deslocam relativamente às peças a soldar, formando uma linha de pontos de soldadura.

- **Soldadura por bossas**: Soldadura entre peças em que pelo menos uma, possui umas pequenas saliências (bossas), as quais permitem realizar, utilizando apenas um par de eléctrodos, um número de pontos de soldadura igual ao número de bossas existentes.

1.1.5. Economias da soldadura por resistência eléctrica

A natureza diversificada da soldadura por resistência e das variáveis que afectam a sua aplicação, tendo em vista a qualidade do produto e a economia de produção, tornam imperativa a investigação de vários aspectos fundamentais em conexão com qualquer projecto extensivo envolvendo estes processos. No entanto, não existem regras rígidas para a selecção do processo e do equipamento, embora os aspectos gerais relativos aos factores económicos sejam úteis.

O custo laboral, é muitas vezes o factor determinante na selecção de qualquer operação de soldadura. As máquinas de soldar por pontos manuais (pinças de soldadura), usam-se quando é mais económico mover a pinça à peça, do que meter a peça numa máquina estacionária. Isto é especialmente verdade, quando uma única máquina não é suficiente para realizar todas as soldaduras. Outro factor que contribui para a utilização de pinças portáteis, é a necessidade de conjuntar as peças componentes em maquetas, onde vários operadores podem trabalhar no mesmo conjunto simultaneamente, ou um operador pode utilizar uma ou mais pinças de soldadura - cada pinça desenhada para uma determinada parte das peças a soldar.

A selecção do operador de soldadura por resistência, não é tão simples quanto parece, pois as várias formas de soldadura requerem diferentes graus de aptidão e habilidade. Depende do tipo de operação e do tipo de equipamento utilizado. Os resultados dependem muito da habilidade e experiência do operador uma vez que a velocidade e qualidade da operação dependem em grande parte do seu desempenho, o que tem grande influência no custo unitário do produto.

Trabalhos em grande escala, podem ser rentabilizados utilizando robots, operando com variáveis controladas automaticamente, onde a tarefa do operador consiste apenas na correcção do posicionamento das peças, pressionando um botão ou calcando um pedal; obtendo-se desta forma grandes ganhos de produtividade e qualidade.

Do ponto de vista económico, a característica mais significativa da soldadura por resistência eléctrica, é sem dúvida, a sua rapidez de execução. Na verdade, as soldaduras individuais são realizadas em pequenas fracções de segundo, pelo que a taxa de produtividade será determinada sobretudo pelo tempo de colocação das peças na máquina e sua posterior remoção.

Outras economias, são por exemplo os ganhos no material, comparado com o material que é perdido noutros processos. Ganhos devido ao facto de não haver junção de material estranho no processo (rolos de fio, fluxos, rebites ou outros materiais adicionais). Podem ainda existir ganhos nas operações de acabamento após a soldadura, relativamente às operações de rebitagem, fusão ou soldadura a fio.

O custo final de qualquer operação de soldadura por resistência depende consideravelmente do custo e da instalação do equipamento. Por sua vez, o custo do equipamento depende bastante dos requisitos da produção.

Têm-se feito grandes progressos nos últimos anos, na uniformização dos tipos e tamanhos das máquinas de soldadura, o que tem trazido o custo destas máquinas para um preço mínimo. Os custos de instalação, dependem do tamanho e localização.

1.1.6 - Desenho para a soldadura por resistência eléctrica

Em geral, o propósito da soldadura por resistência na indústria é obter alta qualidade do produto com significativas economias de fabrico. O custo das operações necessárias para preparar as peças a soldar (forma, limpeza da superfície), é semelhante ao de outros métodos de junção, mas o tipo de acabamento desejado, pode influenciar a selecção do processo. Há que ter em conta que dentro da soldadura por resistência, existem vários métodos e o desenhador deve ponderar e considerar todos os factores, para assim poder fazer uma escolha acertada, tendo em conta as condições locais e os requisitos específicos do produto. Deve ainda considerar as condições peculiares do trabalho individualmente, tais como:

- a especificação do processo de controlo;
- os limites de identação permitidos na superfície;
- as dimensões ou tolerâncias finais;
- a provável deformação;
- a utilização de maquetas e calibres;
- a sequência de soldadura e de operação;
- saber se vai utilizar máquinas estacionárias ou pinças de soldadura portáteis;
- conhecer a localização da soldadura e sua acessibilidade;
- etc.

Um desenho adequado dos componentes de um produto, não só assegura maior facilidade em fazer boas soldaduras, como torna possível alcançar a maior rapidez de produção e qualidade da soldadura, de uma máquina de soldadura por resistência. Um desenho deficiente, pode até tornar impossível a realização da soldadura. Na maioria dos casos, as diferenças entre um desenho bom e um desenho mau são tão pequenas que parecem triviais, sendo no entanto de grande importância. [2]

1.1.7 - Materiais soldáveis por resistência eléctrica

Não é possível dizer com convicção que materiais podem ou não ser soldados por resistência eléctrica, por um ou outro dos vários processos de soldadura por resistência. A principal razão para tal facto, é que não há uma definição aceitável ou compreensão, do que é que constitui uma soldadura "satisfatória". Uma soldadura que pode ser satisfatória para uma aplicação, mas pode não o ser para outra.

Muitos dos metais comuns podem ser rapidamente soldados por resistência. As principais excepções são a prata, o cobre, o chumbo e o zinco. Mesmo estes, podem ser soldados sob certas condições especiais. No entanto, a principal dificuldade com o cobre e a prata, é que devido à sua alta conductividade térmica e eléctrica, o material solda-se rapidamente aos próprios eléctrodos. Se utilizar-mos como material dos eléctrodos, o tungsténio ou o molibdénio, a resistência da junta entre os eléctrodos e as chapas, é maior do que a resistência, entre as duas peças a ser soldadas. O resultado é a marcação severa das superfícies a soldar e a identação, de tal forma que torna o trabalho final inaceitável. [2]

1.1.8 - Limitações da soldadura por resistência

Considerando as vantagens dos vários processos de soldadura por resistência, não devemos esquecer algumas das suas limitações. O trabalho de soldadura, ou fazer uma soldadura para um determinado objectivo, é prático se tivermos a máquina de soldar por pontos adequada. Algum equipamento é frequentemente utilizado e com bastante vantagem, em estruturas de carros, aviões, cabinas e outras estruturas, mas não existe equipamento satisfatório para as reparar de forma semelhante ao processo inicial utilizado. Máquinas de soldar portáteis, pinças de soldadura e maquetas são essencialmente máquinas de produção e não podem justificar a sua despesa para pequenas escalas de produção.

1.2 - SOLDADURA POR RESISTÊNCIA ELÉCTRICA POR PONTOS

1.2.1 - Princípios gerais

Como atrás referido, a soldadura por resistência eléctrica por pontos, é um processo de soldadura autogénea, sem metal de adição e no qual o efeito de Joule da corrente eléctrica que atravessa durante um determinado tempo, a resistência óhmica e a resistência de contacto de duas peças, se utilizam como fonte calorífica, para levar um volume de material à temperatura de soldadura. A passagem da corrente é localizada nos eléctrodos que transmitem no momento próprio, um esforço de compressão. [1]

O objectivo deste processo, é realizar, mediante pontos de soldadura, a união por recobrimento, de elementos metálicos cuja espessura é relativamente pequena em relação às suas restantes dimensões.

O ponto de soldadura, é formado por um núcleo de metal aquecido até à sua fusão no local de contacto entre as duas chapas. Após a sua solidificação, constitui uma união

localizada entre elas. Esta união é perfeitamente contínua e com as mesmas características físicas e metalúrgicas que os metais de base. O núcleo de soldadura tem como plano de simetria o plano de separação das duas peças. [1]

O calor necessário para a soldadura é gerado por efeito de Joule nas peças a soldar, em vez de se recorrer a um método exterior de aquecimento. As peças são colocadas uma sobre a outra em cima do eléctrodo inferior, provocando-se de seguida o descer do eléctrodo superior, ficando estas submetidas a uma pressão entre os eléctrodos.

As faces exteriores das chapas estão em contacto com os eléctrodos, numa superfície delimitada pelas pontas destes. Estes eléctrodos em contacto de pressão com as peças a soldar, estão conectados aos bornes do secundário de um transformador eléctrico cuja missão é fornecer uma corrente eléctrica de elevada intensidade e baixa voltagem. Estando desta forma o circuito secundário fechado pelas peças a soldar, provoca-se a passagem de uma corrente eléctrica através do mesmo durante um tempo determinado.

Como sabido da electrotécnia, a libertação de calor por efeito de Joule ($Q = KRI^2t$) em cada uma das partes do circuito será proporcional à resistência óhmica de cada uma delas. [1]

A resistência própria e a resistência de contacto, das duas pequenas porções de chapa, compreendidas entre os eléctrodos, são muito elevadas em comparação com as resistências das outras partes do circuito. Nestas porções de chapa produz-se então uma libertação intensa de calor. Um núcleo de secção mais ou menos elíptica, pertencente a ambas as peças, entra em fusão na zona do seu contacto. Passado algum tempo, interrompe-se a corrente eléctrica que circula no circuito, enquanto o esforço de compressão continua a ser aplicado sobre as peças, por intermédio dos eléctrodos. O núcleo fundido, chamado ponto de soldadura, solidifica-se assim, sob pressão. O fim da operação de soldadura consiste na elevação do eléctrodo superior. [1]

Os factores mais importantes a considerar serão os seguintes: [1]

- os metais a soldar: suas características e dimensões;
- a intensidade de corrente de soldadura;
- o tempo de soldadura;
- o esforço de compressão, aplicado sobre o ponto de soldadura pelos eléctrodos.

Considerem-se duas chapas T1 e T2 sobrepostas (Fig. 1) e colocadas entre dois eléctrodos conectados electricamente ao secundário de um transformador. Aplicando um esforço de compressão suficiente aos eléctrodos, produz-se sob estes um contacto franco entre as duas chapas. Fazendo circular uma corrente eléctrica pelo circuito secundário, constituido pelos eléctrodos e pelas chapas, numa primeira aproximação, pode admitir-se que a corrente eléctrica atravessa a porção cilindrica ABCD das duas chapas, compreendida entre os eléctrodos, em que as bases deste cilindro são as superfícies das pontas dos eléctrodos.

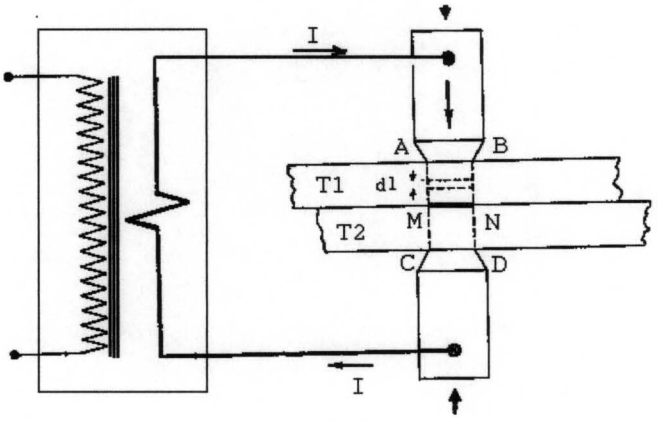


Fig. 1
Representação esquemática da soldadura por pontos [1]

Fora desta zona o contacto entre as duas chapas é muito mau ou inexistente. A corrente eléctrica atravessa então a zona de contacto MN das duas chapas. No seio da chapa entre AB e MN e entre CD e MN, a resistência óhmica oposta à passagem da corrente por uma espessura infinitesimal dl é : [1]

$$\frac{\rho}{S} dR = dl$$

ρ = resistividade

S = secção de passagem da corrente nas chapas

A união MN, constituída pela zona de contacto entre as superfícies das duas chapas, opõe à passagem da corrente uma certa resistência, mesmo se as peças estiverem completamente limpas, planas e aplicadas uma contra a outra. A resistência desta região de contacto, de espessura muito pequena, é pouco elevada, mas muito superior à resistência de uma parte de chapa, da mesma espessura, considerada em pleno cilindro ABCD. [1]

A soldadura por pontos baseia-se na existência desta resistência óhmica elevada, concentrada na zona de contacto entre as duas peças. As resistências de contacto dependem de vários factores que serão estudados mais adiante. O efeito de Joule manifesta-se com muito mais intensidade na zona de contacto, do que no próprio corpo das peças entre AB e MN, ou CD e MN.

A energia eléctrica dissipada na zona de contacto transforma-se em energia calorífica e as calorias assim libertadas, elevarão a temperatura das peças na vizinhança dessa zona. Como consequência desta elevação local de temperatura, o calor propaga-se, por condução, às peças e aos eléctrodos e por radiação, no ambiente. Podem observar-se os seguintes casos: [1]

- **Primeiro caso**: A quantidade de calor desenvolvida, dispersa-se, à medida que se vai produzindo nas chapas, nos eléctrodos e no ambiente e a temperatura da

união não se eleva o suficiente, estabilizando-se a um valor inferior à temperatura de soldadura dos metais.

- **Segundo caso**: A quantidade de calor transmitida por condução e radiação é inferior à desenvolvida na união e a temperatura eleva-se, sobretudo na união e nas suas proximidades, onde já no princípio da operação, era a mais alta. Neste local chega-se ao ponto de fusão. Se a corrente eléctrica continua a passar, o volume de material em fusão próximo da união aumentará. Este volume de material fundido, comum às duas chapas, constitui quando arrefecido, o ponto de soldadura. Dois princípios fundamentais são então a base deste processo de soldadura por pontos:

  1. A existência de uma resistência óhmica de contacto elevada, na união de duas peças metálicas, que dá lugar a um desenvolvimento intenso de calor por efeito de Joule.

  2. O processo de aquecimento por efeito de Joule que deve ser rápido e dinâmico.

Um tempo de soldadura curto e uma intensidade de corrente suficiente permitem alcançar rapidamente a temperatura de fusão na zona de contacto.

É necessário no entanto, que o calor desenvolvido na zona de contacto por efeito de Joule, seja superior às perdas de calor, por condução e por radiação. Esta condição será assegurada, dando à corrente de soldadura, um valor apropriado.

Nesta soldadura, as peças são soldadas entre elas apenas em porções limitadas das suas superfícies, como se pode observar na Fig. 2, em baixo.

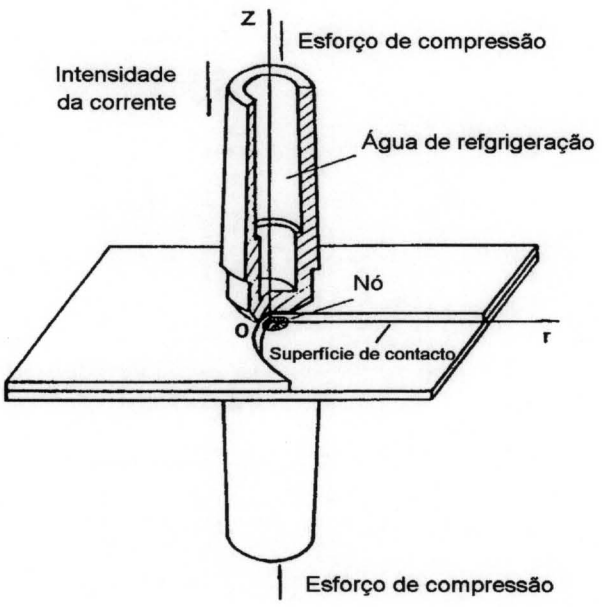


Fig. 2
Soldadura por pontos (junta sobreposta) [4]

O processo mais usual de realizar a soldadura por pontos é utilizar um par de eléctrodos (Fig.2). Este é o processo mais fácil de executar e também o que produz melhores resultados. [3]

Na sua aplicação mais simples, a soldadura por pontos, consiste meramente em colocar duas ou mais peças de metal em chapa, entre dois eléctrodos de ligas de cobre e passar uma corrente eléctrica, de força suficiente, através das peças, para provocar a soldadura destas. A corrente circula através do secundário do transformador, cabos e tranças, braços, eléctrodos e peças. O calor é gerado em todas as porções do circuito de acordo com a seguinte relação: [2]

$$H = I^2RT$$

em que:

T - medida do tempo, em que a corrente está a fluir
I - intensidade da corrente
R - resistência

No entanto, rejeitando as perdas de calor devidas à condução e radiação, o aço entre os eléctrodos será aquecido a uma dada temperatura, em 1/32000 do tempo requerido, para o braço alcançar a mesma temperatura e 1/2000 do tempo para o eléctrodo. No entanto, há outros factores envolvidos, que também devem ser tidos em consideração. A Fig. 3 mostra uma carta de cálculo da temperatura instantânea: [2]

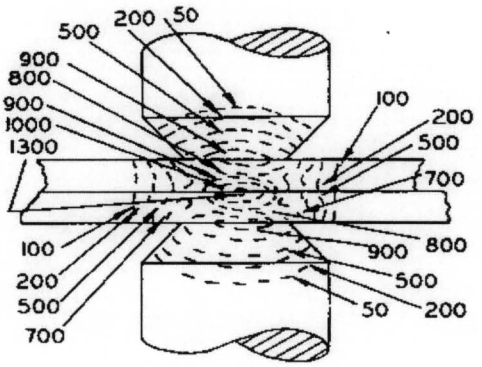


Fig. 3
Temperaturas instantâneas estimadas em graus centígrados [2]

Como se pode observar na Fig. 4, há três zonas de alta geração de calor - a superfície de contacto entre as chapas de aço e as outras duas, no contacto da chapa com o eléctrodo. A conductividade calorífica do aço é aproximadamente 1/10 da do cobre, logo, o calor gerado ao longo da superfície A, não pode irradiar rapidamente, enquanto que o calor gerado em B, pode irradiar rapidamente aos eléctrodos. O resultado é que a superfície A, é a primeira a alcançar uma temperatura de fusão, podendo ocorrer uma soldadura. A zona aquecida, pode ser controlada pela aplicação própria do tempo, corrente e pressão. [2]

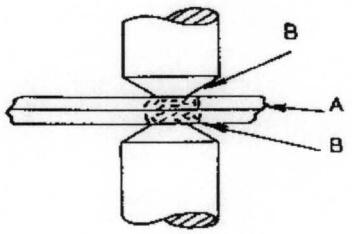


Fig. 4
Zona aquecida da soldadura por pontos. [2]

O calor total gerado, é um produto do tempo, da corrente ao quadrado e da resistência, aos quais deve ser adicionada uma variavel, representando a radiação e condução de calor. Referindo-nos à Fig. 4, as linhas curvas, devem ser consideradas como ondas sucessivas de calor, no instante em que a corrente é aplicada. Se a corrente é fraca, a geração de calor será lenta e a radiação relativamente rápida. Então, enquanto o centro é aquecido o suficiente para fundir, a espessura do metal torna-se incandescente, os eléctrodos serão embutidos profundamente no metal e mesmo o metal fora dos eléctrodos pode tornar-se incandescente e queimado. Como a densidade da corrente aumentou, o tempo requerido diminui. Este aumento na corrente, pode conduzir ao caso em que se pode realizar uma soldadura, sem que as superfícies B mostrem indicação de ter atingido temperaturas elevadas. Há no entanto, um limite inferior muito determinado, para valores de corrente empregues, abaixo dos quais não se pode obter a fusão. [2]

Para qualquer pressão de soldadura seleccionada, há também um limite superior de valores da corrente para além do qual surgem expulsões (também conhecidas como "spitting", "squirting" ou "expulsions") de metal quente, em uma ou mais faces do material soldado. As expulsões causam soldaduras de baixa qualidade, mas a fortaleza máxima da soldadura por pontos, é obtida com uma densidade de corrente, inferior apenas, ao valor para o qual a expulsão toma lugar. As vantagens de rapidez e qualidade do trabalho, são óbvias, mas a desvantagem de aumentar o custo do equipamento e o problema de fornecimento da potência requerida deve ser considerado. [2]

A Fig. 5-a mostra duas espessuras de metal entre os eléctrodos, com o efeito adicional "fanning out". A fig. 5-c, mostra esse efeito com seis espessuras de metal. Ou seja, à medida que o número de espessuras aumenta, a densidade da corrente, no centro de contacto da superfície A, diminui. A densidade da corrente pode afastar-se tanto, que a junta A pode não ficar soldada, enquanto que as juntas C ficarão soldadas, com as juntas intermédias mostrando várias soldaduras importantes.

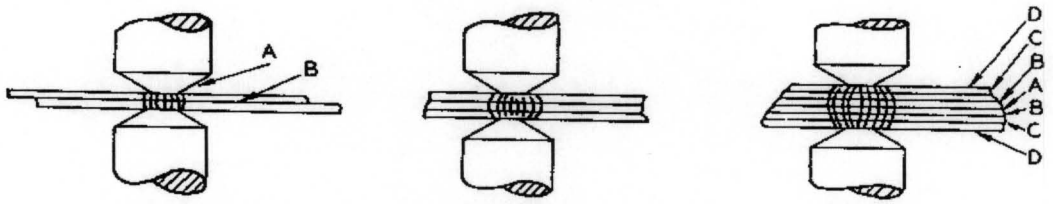


Fig. 5-a Fig. 5-b Fig. 5-c

Fig. 5
"Fanning-Out" da corrente para sucessivos aumentos de espessura [2]

1.2.2. Efeito de Joule e a geração de calor

A soldadura por pontos, é realizada pressionando duas peças de metal juntas, enquanto uma corrente eléctrica passa através delas, para aquecer o contacto localizado das superfícies à temperatura de soldadura. O princípio fundamental da geração de calor na soldadura por resistência, é a lei física de que o calor é gerado num condutor pela passagem de uma corrente eléctrica. A mais importante característica deste processo é a rapidez com que este calor pode ser produzido. O calor é gerado no próprio metal. Para uma completa compreensão da soldadura por resistência, é necessário ter presente que a Lei de Ohm é a teoria eléctrica básica, que diz unicamente que mantendo a tensão constante, a corrente atravessando um circuito é inversamente proporcional à resistência no circuito.

Devemos considerar o circuito secundário da máquina de soldar (incluindo as chapas a soldar) como séries de resistências, em que a soma aritmética de cada uma delas, afecta o fluxo de corrente. É óbvio que a corrente que flui em ampéres, deve ser a mesma em todas as partes do circuito, independentemente da resistência em cada ponto, mas a geração de calor em qualquer ponto, será directamente proporcional à resistência. Então, há necessidade de ter um circuito que seja capaz de produzir calor exactamente onde ele é necessário.

Na soldadura por pontos, o calor é gerado em todos os pontos do circuito secundário. Consideremos de seguida a parte do circuito envonvendo a soldadura e o diâmetro da ponta do eléctrodo. A Fig. 6 mostra um circuito típico.

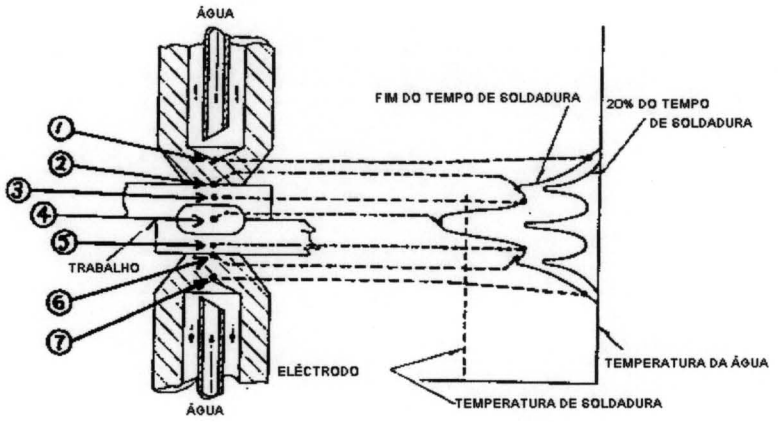


Fig. 6
Gradiente de temperatura da soldadura por pontos [2]

Existem sete resistências conectadas em série da seguinte forma:

1 - eléctrodo superior;

2 - contacto entre o eléctrodo superior e a chapa superior;

3 - chapa superior;

4 - contacto entre as chapas superior e inferior;

5 - chapa inferior;

6 - contacto entre a chapa inferior e o eléctrodo inferior;

7 - eléctrodo inferior.

O calor será gerado em cada uma destas secções, em proporção à resistência de cada uma delas. No entanto, o calor de soldadura, apenas será necessário no ponto **4** e devem fazer-se esforços, para reduzir o calor, o mais possível, em todos os outros pontos. No início de uma soldadura, a temperatura é representada pela linha vertical "temperatura da água". O ponto de maior resistência é o ponto **4**, no entanto, o calor, aí, é rapidamente desenvolvido. Os pontos de maior resistência a seguir ao **4**, são os pontos **2** e **6** onde a temperatura também cresce rapidamente, mas não tão depressa como no ponto **4**. No fim de quase metade do tempo total da soldadura, o gradiente de calor, corresponde à curva da direita. Deve notar-se que o calor gerado em **2** e **6**, é rapidamente dissipado, no contacto com a água de refrigeração dos eléctrodos **1** e **7**. À medida que o tempo de soldadura progride, a taxa de subida da temperatura para o ponto **4**, será muito mais rápida que para o ponto **2** ou **6**. A temperatuta de soldadura é indicada pela linha vertical a tracejado. Numa soldadura perfeitamente controlada, a temperatura de soldadura, apenas seria alcançada, por um pequeno ponto nas interfaces e crescia para um nó, com o aumento do tempo. [2]

O tempo move-se para a esquerda do ponto de partida (linha vertical a preto). Se o tempo continuar como mostrado na figura, a temperatura na zona **4** passará o ponto de fusão e rapidamente os pontos passarão o ponto de ebulição das peças de trabalho, causando câmaras de gás, que resultam na expulsão de partículas ("spitting"). Uma continuada aplicação da corrente, provocará que os cumes sejam menos pronunciados; o nó crescerá completamente até às superfícies dos eléctrodos e as zonas **3** e **5** tornar-se-ão plásticas, resultando numa severa identação, pela penetração dos eléctrodos.

Uma mudança desejada no calor, será seguramente, seguida de uma mudança na corrente ou no tempo. No entanto, não devemos esquecer que a transferência de calor é uma questão de tempo e no desenvolvimento do tamanho próprio do nó, o elemento tempo não pode ser diminuido o suficiente, indiferentemente do aumento da corrente. Os primeiros efeitos de tempo insuficiente, são notados quando o calor é gerado muito rapidamente nas três superfícies de contacto, resultando em corrosão ("pitting") e expulsões de material ("spitting"), especialmente nas superfícies de contacto dos eléctrodos.

No instante em que a corrente pàra de fluir, a geração de calor pára e as peças começam a arrefecer. Com os eléctrodos mantidos no local, devido à sua elevada conductividade e assistidos pela água arrefecida, eles voltam rapidamente à temperatura da água de refrigeração. As superfícies de contacto **2** e **6** conduzem o calor para os eléctrodos, quase imediatamente, nivelando os cumes destes pontos e o centro arrefece gradualmente. A taxa de arrefecimento é determinada pelas mesmas condições que regem a quantidade de calor entrada. Se no entanto, os eléctrodos forem retirados no momento imediato, em que a corrente para, eles não serão capazes de absorver o calor da soldadura. Os cumes na superfície dos eléctrodos aumentarão, os vales entre os cumes desaparecem e o arrefecimento será retardado. Se a pressão for removida enquanto a soldadura permanecer plástica ou em fusão, a soldadura pode falhar e em qualquer dos casos será fraca.

A importância do tempo é evidente. A situação ideal, seria aquela em que, na zona **4**, a temperatura fosse máxima e em todas as outras partes, fosse mínima. Isto leva-nos a fazer as seguintes importantes considerações:

- Os eléctrodos devem ter conductividade eléctrica elevada, para manter o calor gerado dentro deles num mínimo e alta conductividade térmica para dissipar o calor rapidamente das zonas **2** e **6**. No entanto, devem ter também resistência à deformação, causada pelas altas pressões a que estão sujeitos. Os eléctrodos, são geralmente à base de cobre e apresentam boas características de resistência, à deformação e ao desgaste, mesmo a temperaturas relativamente elevadas. A geometria dos eléctrodos tem grande influência na qualidade da soldadura produzida, devendo ser optimizada para cada caso.

- As superfícies de contacto, são as zonas **2** e **6**, onde a resistência deve ser mantida a um minimo. Isto, pode ser feito de duas formas: tendo superfícies limpas, perfeitamente lisas controlando a força dos eléctrodos. Referindo-nos à curva do gradiente da temperatura da Fig. 6, se estas superficies estiverem sujas, com porosidades ou corroídas, a temperatura nestes pontos sobe quase tão depressa, como nas interfaces, resultando em "spitting", eléctrodos queimados,

identação, etc. Quando submetido a pressão fraca, o contacto actual metal-metal é apenas uma pequena percentagem da área total de contacto da superfície. À medida que a pressão aumenta, aumenta também o actual contacto metal-metal, diminuindo assim a resistência. Este aumento na força dos eléctrodos, também diminui a resistência nas interfaces. A solução ideal seria controlar a força exercida nas interfaces e a força exercida fora das interfaces das chapas separadamente, se possível. No entanto, excepto poucas operações, o material do eléctrodo é mais macio do que as peças a soldar, consequentemente, a aplicação de uma dada força, resultará num melhor contacto dos eléctrodos na superfície de contacto, do que nas interfaces.

- Os materiais de trabalho: Assume-se que os dois eléctrodos são idênticos e as chapas são de materiais semelhantes. Se esta relação mudar, o gradiente deixará de ser simétrico. Por exemplo, se a chapa superior for de aço inóxidavel e a inferior for de aço com baixo teor de carbono, a resistência e a geração de calor na zona 2 aumentarão, com o resultado de que o nó, será desenvolvido maioritariamente na chapa superior. O mesmo aconteceria, se as superfícies de contacto dos eléctrodos, tivéssem área desigual, ou se os eléctrodos tivéssem desigual conductividade, ou se a espessura das peças fosse desigual.

Os factores que afectam a quantidade de calor, sendo produzidos para uma dada corrente de soldadura por unidade de tempo são: [2]

1. A resistência eléctrica do material a soldar;

2. A resistência eléctrica do material dos eléctrodos;

3. Resistência de contacto entre os eléctrodos e as peças a soldar, determinada pelas condições da superfície, área de contacto dos eléctrodos e a pressão de soldadura.

1.2.3. Processo de formação de um ponto de soldadura

O aquecimento por efeito de Joule da massa de metal compreendida entre os eléctrodos e que conduz à fusão de um volume de metal, situado na zona de contacto das duas peças, está definido pela relação:

$$Q = 0{,}239 \int R.I^2.dt \quad \text{onde:} \quad [2]$$

Q - quantidade de calorias libertadas;

I - intensidade da corrente de soldadura que atravessa as peças a soldar (ampéres);

t - tempo de passagem da corrente (segundos);

R - soma das diversas resistências óhmicas que a corrente de soldadura encontra, ao passar de um eléctrodo ao outro através das peças a soldar (ohm).

A intensidade da corrente de soldadura, (I), o tempo de passagem da corrente de soldadura, (t) e a resistência óhmica(R), são os factores determinantes do fenómeno térmico, que é a base da soldadura por pontos. É preciso somar a estes factores o esforço de compresão sobre a soldadura, factor igualmente importante para o processo de aquecimento. A resistência, R, que intervém na fórmula anterior, é a resistência total da parte do circuito eléctrico, compreendida entre os eléctrodos. Em cada momento, R é a soma das sete resistências que compõem a parte do circuito da Fig. 6.

Em quente, durante a soldadura, a soma das resistências óhmicas depende apenas: [1]

- da espessura das peças a soldar;
- da resistividade própria do metal a soldar;
- da temperatura alcançada nos diversos pontos;
- do diâmetro do pequeno cilindro de metal aquecido;
- da secção da zona convertida em ponto de fusão.

Na soldadura por pontos, as peças a soldar são sempre colocadas uma sobre a outra e a junta soldada é sempre do tipo sobreposta. O tipo de equipamento a utilizar deverá ser considerado na fase de concepção da junta, uma vez que esta deve permitir sempre o acesso de ambos os lados dos eléctrodos de soldadura.

Os factores mais importantes a ter em conta quando da concepção da junta são os seguintes: [3]

- a distância ao bordo da chapa;
- a superfície das peças a sobrepor;
- as montagens necessárias para garantir o ajuste;
- o espaçamento entre pontos;
- a possibilidade ou não da superfície da peça ficar marcada pela soldadura;
- a resistência mecânica da junta.

O calor produzido na zona de contacto entre os materiais a soldar propaga-se no metal, produzindo a fusão. Ao seu redor, o material a temperatura elevada encontra-se num estado pastoso, ou de deformação plástica. Esta deformação plástica (Fig. 7), é provocada pelo aumento de volume na zona de fusão e também pelo abaixamento da tensão de cedência da zona deformada, como consequência do aumento de temperatura, a que está sujeita. [3]

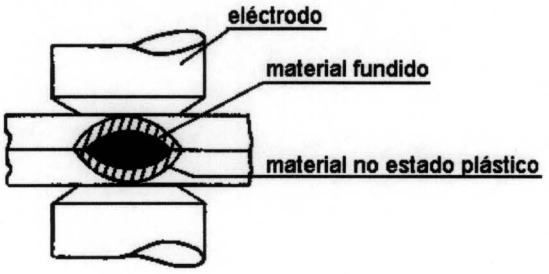


Fig. 7
Formação de um ponto de soldadura [3]

A zona de fusão, apenas solidifica quando se corta a corrente, começando o arrefecimento, com uma transferência do calor para o exterior. Com a solidificação do metal fundido, dá-se uma contracção, provocando um "abatimento" na superfície das chapas (Fig. 8) . Este abatimento só é visível, se as chapas tiverem pelo menos 3 ou 4 mm.

Sempre que a qualidade da soldadura for boa, verifica-se um abatimento na superfície superior dos materiais soldados.

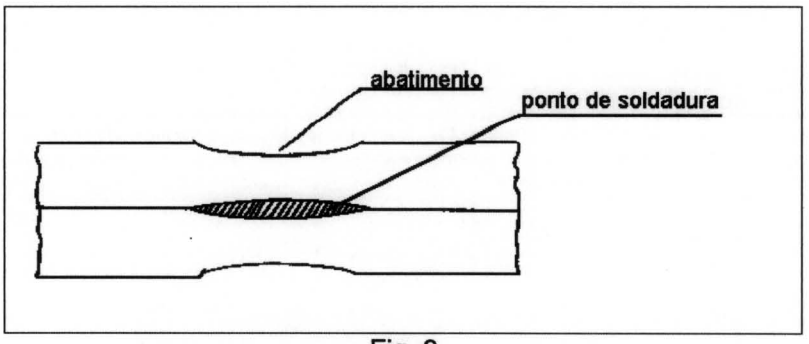


Fig. 8
Abatimento superficial após um ponto de soldadura [3]

Há que ter algum cuidado com a identificação deste abatimento, pois este não deve ser confundido com as cavidades que surgem na superfície, quando um ponto de soldadura se encontra "queimado".

Num ponto queimado, verifica-se sempre que, a fusão originada é demasiada, chegando a atingir a superfície externa do material. O abatimento, nestes casos, ronda os 0,5 mm e é considerado como um defeito de soldadura. [3]

Resumidamente pode dizer-se que este tipo de soldadura, é uma soldadura realizada num "recipiente fechado", não existindo por isso oxidação ou outra reacção com o meio ambiente. A existência de uma força de compressão para encostar as peças a soldar, de forma a criar o tal "recipiente fechado" e para se opor à deformação que resulta da dilatação, é indispensável. Esta força de aperto tem ainda como função fechar o circuito

eléctrico, manter constante a resistência de contacto entre os materiais a soldar e, após o corte da corrente, forjar o material durante o seu arrefecimento. [3]

A distância ao bordo da chapa, é aquela que vai do centro da junta de soldadura, ao bordo da chapa. Esta distância, (Fig. 9) deverá ser suficientemente grande, para garantir que haja suficiente material de base, para resistir à força exercida pelo metal fundido, a qual tende a expulsar o material no estado liquido do "recipiente" em que está contido.

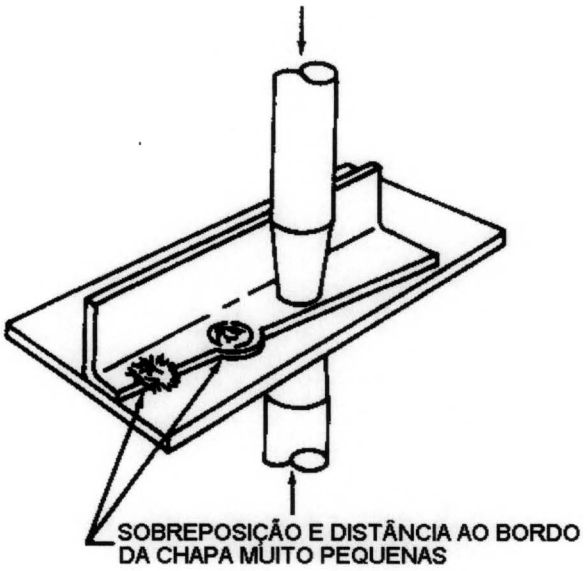


Fig. 9
Efeito de uma sobreposição deficiente [3]

O valor mínimo de sobreposição entre duas chapas deverá ser o dobro da menor distância ao bordo da chapa, por forma a evitar o sobreaquecimento do bordo, bem como a eventual expulsão do metal em fusão. [3]

Os quatro cortes macrográficos da Fig. 10, mostram o nascimento e desenvolvimento de um ponto de soldadura, em duas chapas de aço doce, de 5 mm de espessura. Estes quatro pontos foram executados com a mesma máquina, com eléctrodos semelhantes e com a mesma corrente de soldadura e o mesmo esforço de compressão entre os eléctrodos. O único parâmetro variável, foi o tempo de passagem da corrente, que se aumentou progressivamente. [1]

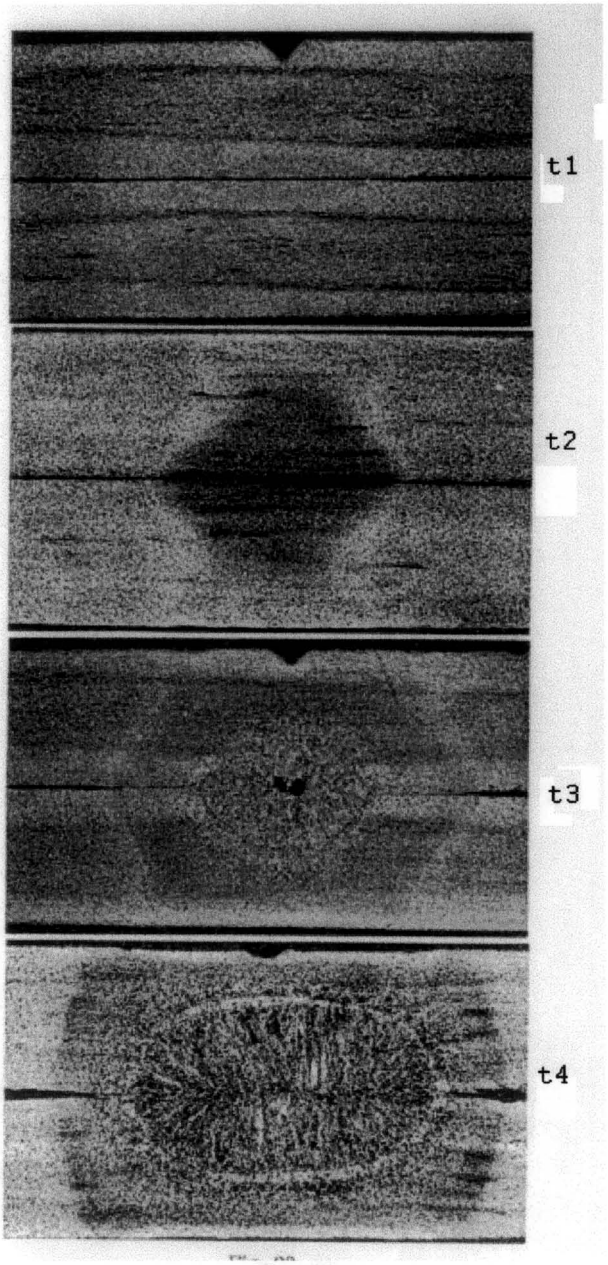


Fig. 10
Formação de um ponto de soldadura em chapas de aço doce
Cortes macrográficos dos pontos realizados com tempos t_1, t_2, t_3 e t_4 [1]

Os tempos de passagem da corrente são os seguintes: $t_1<t_2<t_3<t_4$

Com o tempo t_1, muito curto, observa-se um começo de aquecimento numa zona estrita, confinada na união das chapas. Com o tempo t_2, superior a t_1, a zona de aquecimento estendeu-se simetricamente a uma e outra parte do plano de união das duas chapas. O aquecimento foi mais intenso e o volume aquecido é maior. O tempo t_3, superior a t_2, foi suficiente para levar à fusão um pequeno núcleo de metal de secção elíptica, situado simetricamente a uma e outra parte da união das duas chapas. Com o tempo t_4, superior a t_3, o volume de metal levado à temperatura de fusão aumentou consideravelmente e um ponto de soldadura une as duas chapas. O núcleo de metal, levado à temperatura de fusão, é praticamente simétrico ao plano de separação das chapas.

1.2.3.1. Período de aquecimento de um ponto de soldadura

Como mostram as macrografias da Fig.10, na soldadura por pontos, a passagem da corrente em determinadas condições dá lugar a um aquecimento muito localizado no contacto das chapas, que conduz rapidamente à fusão de um núcleo de metal, pertencente a ambas. Durante o seu aquecimento progressivo, o núcleo de metal dilata-se. A dilatação provocada pelo aumento da temperatura pode evidenciar-se mediante uma montagem dilatométrica, como a representada esquematicamente na Fig. 11.

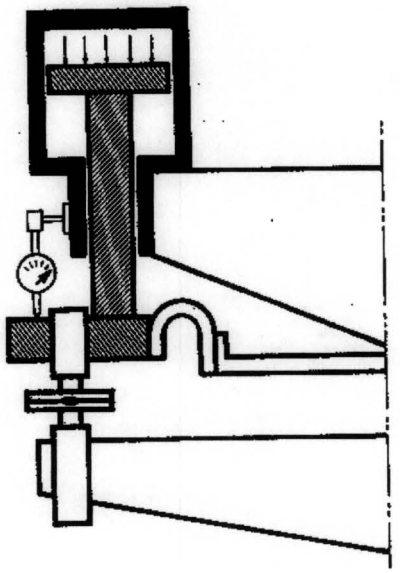


Fig. 11
Montagem para medição das variações de espessura das chapas no local do ponto, durante a operação de soldadura [1]

Esta montagem, permite medir a variação das espessuras das chapas durante a formação do ponto de soldadura. No momento em que se alcança a temperatura de fusão, a pequena massa líquida que constitui o ponto de soldadura, apresenta uma forte tendência a escapar-se entre as chapas. A tendência do metal em fusão, para sair, deve ser neutralizada, mediante a intervenção de um esforço de compressão suficiente, aparecendo assim uma nova missão, muito importante, do esforço de compressão aplicado mediante os eléctrodos. Se este esforço de compressão é demasiado débil, o metal escapa-se entre as chapas, sob a forma de partículas mais ou menos importantes denominadas projecções. Este fenómeno das projecções leva à expulsão de uma parte do metal que forma o ponto de soldadura e pode desta forma originar defeitos internos (vazios e porosidades) que alteram consideravelmente a qualidade do ponto de soldadura. [1]

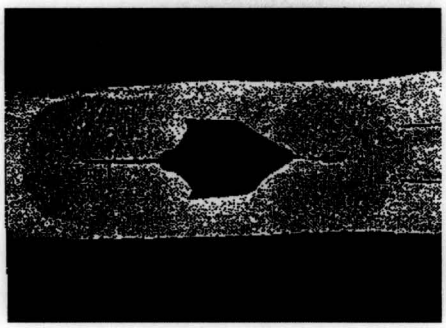


Fig. 12
Vazio interno num ponto de soldadura realizado com esforço
de compressão insuficiente durante o período de aquecimento [1]

A Fig. 12, representa a macrografia de um ponto de soldadura realizado a pressão insuficiente. Pode-se observar a presença de um vazio interno muito importante. As projecções de metal fundido devem ser eliminadas ou pelo menos reduzidas, atribuindo um valor suficiente ao esforço de compressão e evitando o desenvolvimento de um excesso de energia calorífica, ou seja, doseando perfeitamente a relação RI^2t.

No momento do corte da corrente de soldadura, quando termina o fornecimento de energia calorífica ao ponto de soldadura e às massas que o rodeiam, o estado térmico do ponto é o que se indica na Fig. 13:

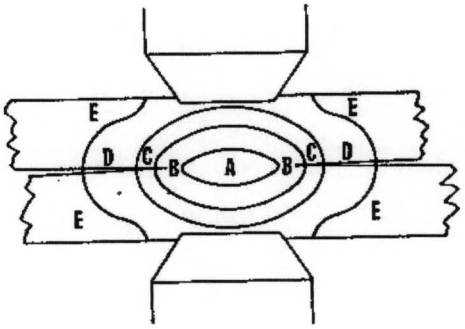


Fig. 13
Estado térmico de um ponto de soldadura em duas chapas de aço doce,
no final do período de aquecimento [1]

Assim, tem-se:

- uma zona central (A) à temperatura de fusão;
- uma zona (B) espécie de fundo de metal, em estado plástico que rodeia a zona central em fusão;
- uma zona (C) que alcança quase a temperatura crítica;
- uma zona (D) a temperatura inferior à crítica;
- uma zona (E) que permanece à temperatura ambiente.

A temperatura da zona (B) é muito superior à temperatura crítica.

A interrupção da corrente de soldadura, determina o final do período de aquecimento e marca o começo da segunda fase da operação: a fase de arrefecimento ou solidificação do ponto de soldadura.

1.2.3.2. Período de arrefecimento de um ponto de soldadura

O arrefecimento pode produzir-se de duas formas:

- O ponto pode arrefecer livremente, cessando o esforço de compressão no mesmo momento em que se corta a corrente de soldadura.
- O ponto pode arrefecer mantendo o esforço de compressão durante um certo tempo depois de ter cessado a passagem da corrente de soldadura.

O núcleo de metal fundido, encontra-se no seio de uma massa metálica refrigeradora relativamente importante, constituída pelas mesmas peças soldadas e pelos eléctrodos. No caso de arrefecimento sob pressão, os eléctrodos, contendo um sistema de refrigeração, constituem uma fonte fria, mantida a uma temperatura quase constante e directamente em contacto com as superfícies exteriores das chapas, em frente ao ponto de soldadura. [1]

A missão desempenhada pela manutenção do esforço de compressão dos eléctrodos, durante o arrefecimento do ponto, é de importância primordial para a supressão ou limitação das lacunas, repuchamentos e gretas que tendem a formar-se durante a solidificação do núcleo.

A ruptura de um ponto arrefecido, com manutenção do esforço de compressão, é sã e homogénea, enquanto que a ruptura de um ponto arrefecido livremente, sem pressão, apresenta sempre um grande número de ocos internos, porosidades e fissuras.

As características mecânicas, de um ponto de soldadura, arrefecido livremente, são sempre inferiores, às de um ponto arrefecido com manutenção da pressão, supondo iguais as outras condições para ambos os casos. De forma geral, o processo térmico segundo o qual se realiza um ponto de soldadura e que tem uma influência considerável sobre a qualidade do mesmo, depende:

- dos metais a soldar (composição, características metalúrgicas, etc.);
- dos factores de regulação: intensidade da corrente de soldadura, tempo de soldadura, esforço de compressão.

1.2.4. Resistências de contacto

Uma superfície metálica, jamais é perfeitamente plana, mas sim rugosa. Se fosse observada com forte aumento, notar-se-ia que está constituída por arestas e ocos, mais ou menos importantes, segundo o seu nível de acabamento. Este relevo está esquematizado exageradamente na Fig. 14.

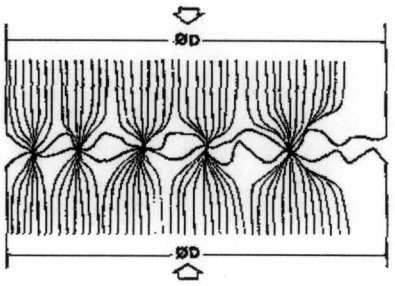


Fig. 14
Aspecto de duas superfícies metálicas em contacto, vistas com grande aumento.
As rugosidades caracterizam o estado superficial

Esta rugosidade superficial, influi nas propriedades eléctricas e mecânicas do contacto de duas superfícies metálicas. Assim, para uma superfície de contacto teórica $S = \pi (D^2/4)$, a superfície de contacto real, é a soma de uma grande quantidade de pequenas superfícies de contacto, inferiores à teórica. As superfícies de contacto elementares, são constituídas pelos pontos de contacto das arestas de uma peça, com as arestas da outra. [1]

Durante a passagem da corrente, os filetes de corrente concentram-se nestes pontos, provocando uma redução artificial da secção de passagem. É por estas razões que a zona de contacto de duas peças, mesmo estando perfeitamente limpas, se caracteriza por uma resistência óhmica muito elevada. [1]

A resistência de contacto de duas peças metálicas, colocadas uma sobre a outra, depende: [1]

- da natureza dos metais de contacto e das suas características (dureza, resistência mecânica, conductividade);
- do estado da superfície dos metais, caracterizado por um acabamento de mecanização ou por um acabamento e uma rugosidade superficiais devidos a laminação, por oclusão de gases, óxidos e impurezas diversas;
- da pressão a que estão submetidas as superfícies em contacto e do modo de aplicação desta pressão (estático ou dinâmico);
- da temperatura dos metais na zona de contacto.

A magnitude da resistência de contacto, varia muito dependendo da carga e condição da superfície. Geralmente, a resistência de contacto diminui com um aumento da carga, mas numa superfície com lubrificante, observa-se um aumento na resistência.

O contacto metálico que ocorre entre dois eléctrodos de metal, quando colocados juntos, ocorre verdadeiramente apenas em pequenas áreas microscópicas. A corrente flui através dessas áreas sendo constrangida, dando lugar a uma resistência restricta $Rc=\rho/d$ onde: [5]

ρ - resistividade eléctrica

d - diâmetro da área de contacto microscópica

Mesmo uma superfície limpa está poluída. Este filme superficial pode ser composto por óxidos e estes podem ser condutores, semi-condutores ou isolantes, dependendo da espessura, o que pode contribuir para a resistência de contacto eléctrico, porque reduz a probabilidade de conexão metálica, local, nas asperezas.

A resistência de contacto, é a soma da baixa resistência do contacto metálica, com a alta resistência de contacto do filme. É uma variável de importância considerável na aplicação prática da soldadura por resistência eléctrica por pontos, pois qualquer alteração significante nesta resistência, pode afectar o processo de saída dos parâmetros e assim a qualidade da soldadura resultante. [5]

Além da própria resistividade do material, a magnitude da resitência de contacto, depende da carga aplicada, forçando as duas superfícies a juntarem-se e das propriedades mecânicas dos materiais em contacto, pois ambas afectam a deformação plástica e as capacidades de carregamento de carga das rugosidades de contacto.

O contacto eléctrico é feito apenas através da superfície entre os eléctrodos, assumindo que não há outros contactos ou junções entre as duas chapas. O contacto metálico, que é necessário para a condução eléctrica, é alcançado apenas pela deformação plástica das rugosidades, que estão no contacto e suportam a carga superficialmente. Esta deformação plástica nas rugosidades, provoca o filme óxido.

É incorrecto assumir, que a resistência de contacto do eléctrodo, pode ser determinada, trazendo o diâmetro das ponta dos eléctrodos, um contra o outro, sem que nenhuma peça intervenha, pois desta forma obtemos uma resistência de contacto cobre - cobre, o que é diferente do contacto superficial cobre - zinco. [5]

1.2.4.1. Influência da natureza dos metais em contacto e do estado das superfícies

Como já se tinha visto, a resistência de contacto depende do número de pontos em contacto. O estado de superfície depende do modo de elaboração das peças. A dispersão, ou seja, a separação entre o maior e o menor dos valores da resistência de contacto, diminui ao aumentar o esforço de compressão. Só a partir de um certo valor mínimo do esforço de compressão, para um determinado metal e para uma espessura determinada, os valores da resistência de contacto são suficientemente regulares. Então para um mesmo esforço de compressão (Fig. 15), as resistências de contacto resultam muito mais elevadas para o aço inoxidável do que para o aço doce, mesmo que as chapas tenham em ambos os casos a mesma espessura e a medição tenha sido realizada nas mesmas condições.

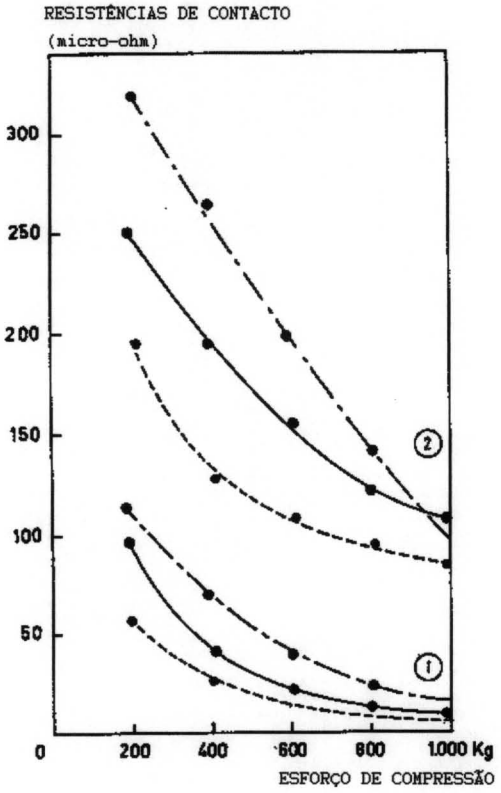


Fig. 15
Resistências de contacto em frio, em função do esforço de compressão [1]

Na Fig. 15, tem-se:

1. Resistências de contacto entre eléctrodo e chapa.

2. Resistências de contacto entre chapas.

— • Chapas de aço doce laminado a frio, duplamente decapado. 1 mm de espessura. Eléctrodos troncocónicos

----- • Chapas de aço doce laminado a frio, duplamente decapado. 1 mm de espessura. Eléctrodos de ponta esférica, raio 75 mm, em liga de cobre.

• Chapas de aço inoxidável 18/8, não estabilizado, laminado a frio, duplamente decapado. 1 mm de espessura. Eléctrodos de ponta esférica, raio 75 mm, em liga de cobre.

Estes valores mais elevados das resistências de contacto, são devidos a uma maior dureza das rugosidades superficiais do aço inoxidável. As resistências de contacto entre os eléctrodos e as chapas são, nas mesmas condições, muito inferiores às resistências de contacto entre as chapas, graças ao material dos eléctrodos (liga de cobre - bom condutor) e graças a uma concentração de pressão perfeitamente estabelecida. O gráfico da Fig. 15 mostra claramente, as grandes diferenças de valor, que existem entre as resistências de contacto chapa-chapa e as resistências de contacto eléctrodo - chapa.

1.2.4.2. Influência da temperatura sobre as resistências de contacto

A influência da temperatura sobre as resistências de contacto dos metais, depende essencialmente da natureza destes, mas geralmente e este é o caso, para o aço doce, num aumento moderado da temperatura, originando uma diminuição muito sensível dos valores das resistências de contacto, como se pode observar na Fig. 16. Esta diminuição da resistência é devida à melhoria dos contactos, provocada pelo esbatimento das rugosidades da superfície sob o efeito da temperatura. [1]

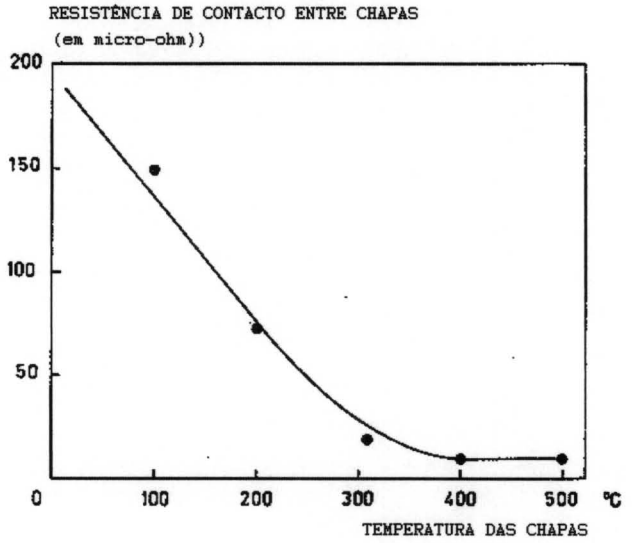


Fig. 16
Variação da resistência de contacto entre chapas, em função da temperatura [1]

1.2.5. Estudo dos parâmetros de soldadura

A soldadura por pontos, requer uma combinação bem determinada da pressão (amplitude e duração), bem como da corrente eléctrica (intensidade e tempo de passagem). A corrente eléctrica, deve passar do eléctrodo à peça, devendo ser suficientemente elevada, para que o encosto entre as peças a soldar seja perfeito bem como, entre estas e os eléctrodos.

Nas máquinas de soldadura, é o secundário do transformador que se encontra ligado aos eléctrodos. A pressão é exercida pelos eléctrodos e é obtida a partir de um dispositivo hidráulico ou pneumático.

O caso mais vulgar de soldadura por pontos, é a soldadura por ponto simples, usando um par de eléctrodos com o mesmo diâmetro. O equipamento utilizado para realizar esta soldadura é designado por "pinça de soldadura", cujo esquema se pode apresentar de forma simplificada na Fig. 17, a seguir representada.

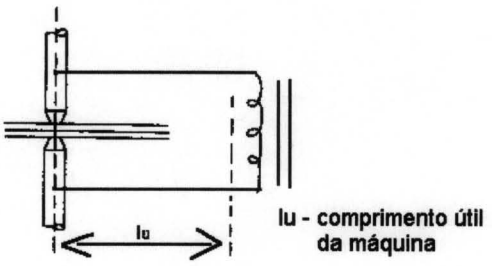


Fig. 17
Soldadura por ponto simples [3]

A utilização destas máquinas de soldadura, produz soldaduras de muito boa qualidade, além disso trata-se de um equipamento bastante económico. Este processo permite a utilização de eléctrodos com diferentes diâmetros, mediante a localização do ponto de soldadura a realizar.

Deve no entanto ter-se em atenção o comprimento "lu" do equipamento, pois se este for muito grande, obtém-se uma potência elevada, mas um baixo rendimento. Ter em atenção também, que este processo provoca impressões em ambas as faces, originadas pela pressão exercida pelos eléctrodos.

A quantidade de calor produzida (Q), depende fundamentalmente de três principais parâmetros do processo: a resistência eléctrica, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente eléctrica.

Por sua vez, a resistência depende de factores como:

- a resistividade dos materiais;
- o estado de superfície dos materiais a soldar;
- a natureza e forma dos eléctrodos;
- a força de aperto.

Quando a força de aperto dos materiais a soldar aumenta, a resistência diminui, então, em termos práticos, substitui-se o parâmetro resistência pelo parâmetro "Força exercida pelo eléctrodo" ou "Força de aperto".

Uma operação de soldadura por pontos, requer a determinação prévia dos valores a dar às seguintes variáveis, para obter um ponto de soldadura com um diâmetro determinado: [1]

- intensidade da corrente eléctrica de soldadura (corrente eléctrica que atravessa as peças a soldar);
- tempo de passagem da corrente de soldadura (ou tempo de soldadura);
- dimensões das pontas dos eléctrodos;

- esforço de compressão entre os eléctrodos;
- tempo de aproximação (ou de assentamento);
- tempo de manutenção da pressão.

Estes valores dependem: [1]

- da natureza dos materiais a soldar (características mecânicas, eléctricas, condutividade térmica, calor específico, calor latente de fusão, composição química, estado metalúrgico, etc.);
- das espessuras das peças a soldar e da sua forma;
- do seu estado superficial;
- da classe de ponto de soldadura desejado;
- do aspecto exterior que se requer depois da soldadura, etc.

Todos estes factores de regulação, estão muito relacionados entre si, de forma que, a modificação do valor de um deles, pode originar a necessidade de modificar um ou vários dos outros. O estudo da influência destes diversos factores de regulação é bastante complexo.

A equação fundamental para o calor utilizado, para realizar uma soldadura por pontos, é:

$$H = I^2RTK \qquad [2]$$

em que:

I = à corrente fluindo através da soldadura, em amperes.

T = ao tempo de passagem da corrente, em segundos.

R = à resistência efectiva à corrente, fluindo da área de contacto de uma eléctrodo para o outro, em ohms.

K = ao factor representativo das perdas por condução, convecção e radiação, sendo dissipadas pelos eléctrodos, peças, ou meio circundante.

No entanto, na prática, podemos considerar K, R e H, como uma variável desconhecida que representamos por C. O que reduz a equação a:

$$T = C/I^2 \qquad [2]$$

Para qualquer tipo de condições dadas, composição do material, pressão, diâmetro da ponta do eléctrodo, condições de contacto, aquecimento médio, etc., que determinam C, podemos empiricamente, determinar a relação entre o tempo e a corrente.

Para determinar estes dados empíricos, é necessária uma investigação completa, que necessitaria apoiar-se em experiências inumeráveis. No entanto para obter dados funcionais, a compilação é necessariamente confinada às cadeias de valores, conhecidos por experiência, por serem razoavelmente práticos. [2]

1.2.5.1. A intensidade da corrente

Pelo seu valor relativo, muito elevado em comparação com o das resistências existentes nos outros pontos, a resistência inicial na união das chapas, permite neste local uma libertação de calor muito importante, mas com a condição de a corrente secundária ser suficiente. A intensidade mínima da corrente secundária, é aquela para a qual, a quantidade de calor produzido na união e na sua zona vizinha, é superior às perdas de calor por condução e radiação, nas chapas, nos eléctrodos e no ambiente, até se chegar à temperatura de fusão. Abaixo deste valor de intensidade, o calor desenvolvido dispersa-se à medida que se produz, alcançando-se um estado de equilíbrio e a temperatura das peças entre os eléctrodos estabiliza-se, a um valor inferior ao ponto de fusão. No entanto, o valor mínimo da intensidade da corrente de soldadura não é suficiente para assegurar a realização do ponto em condições óptimas. De facto, com a intensidade mínima, o tempo de passagem da corrente é longo, o que dá origem a que um volume importante de metal aqueça a alta temperatura, com todos os graves inconvenientes que isto supõe quer do ponto de vista metalúrgico, quer do ponto de vista prático da soldadura. [1]

A intensidade da corrente de soldadura dependerá, do ponto de vista energético: [1]

- do tempo de soldadura (soldadura lenta - soldadura rápida);
- da espessura das peças a soldar;
- da natureza dos materiais a soldar (resistividade, calor específico, calor latente de fusão);
- do diâmetro do ponto de soldadura.

Durante a operação, o ponto de soldadura aparece e desenvolve-se em diâmetro e em altura. O seu diâmetro aumenta rapidamente e depois permanece quase constante qualquer que seja o tempo durante o qual se prolongue o aquecimento, como se observa na Fig. 18.

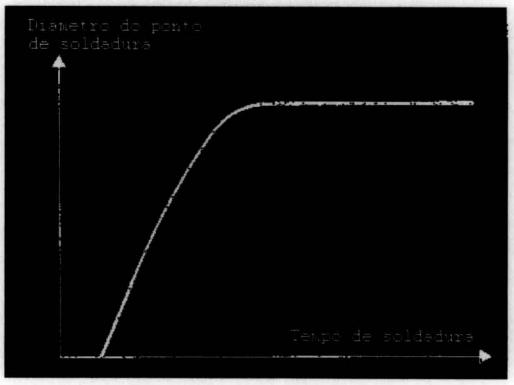


Fig. 18
Variação do diâmetro do ponto em função do tempo de soldadura
para uma determinada intensidade [1]

A forma de se desenvolver o ponto de soldadura, depende da espessura das chapas e o diâmetro final do ponto, é função do diâmetro da ponta do eléctrodo e da espessura das peças a soldar.

O calor necessário, para fundir o volume de metal, que constitui o ponto de soldadura, vem dado pela expressão seguinte: [1]

$$Q = V \cdot s \cdot c_1 \cdot T + V \cdot s \cdot c_2 \qquad [1]$$

onde:

Q = quantidade de calor

V = volume do ponto de soldadura

s = peso específico do material a soldar

c_1 = calor específico

T = diferença entre a temperatura de fusão e a temperatura ambiente

c_2 = calor latente de fusão

$$Q = V \cdot s \, (c_1 \cdot T + c_2) \qquad [1]$$

Esta energia calorífica, provém da transformação da energia eléctrica (RI^2t) em calor. A energia calorífica resultante (KRI^2t) deverá superar, naturalmente as Q calorias, uma vez que é necessário ter em conta as perdas caloríficas por radiação e por condução nos materiais a soldar e nos eléctrodos. [2]

$$KRI^2t = Q/\eta \qquad [1]$$

sendo η = rendimento da operação

A quantidade de calor desenvolvida localmente pela passagem da corrente eléctrica através das peças a soldar é proporcional: [1]

- a R (conjunto de resistências) que dependem da natureza dos materiais a soldar e do esforço de compressão entre eléctrodos;
- ao quadrado da intensidade da corrente de soldadura (I);
- ao tempo, T, de passagem desta corrente.

Pode-se actuar sobre os valores I e t para provocar a fusão de uma determinada quantidade de material. Para cada caso de soldadura, com pontas dos eléctrodos, de dimensões dadas e para um esforço de compressão determinado, pode traçar-se um diagrama de soldabilidade que expresse a relação entre a intensidade da corrente e o tempo de soldadura. A Fig. 19, expressa a relação entre a intensidade da corrente e o tempo de soldadura.

Para uma corrente I_1 inferior a I_{min}, intensidade mínima de soldadura, a soldadura não se realiza qualquer que seja o tempo de passagem de corrente. As chapas aquecem mais ou menos mas o calor desenvolvido na união dispersa-se à medida que se vai produzindo. No estado de equilíbrio, a temperatura alcançada é inferior à de fusão do metal. Para uma intensidade de corrente I_2, superior a I_1, nos tempos t_1, t_2 e t_3, não se alcança a fusão, originando-se uma simples colagem no local de contacto. No tempo t_5, alcança-se a temperatura de fusão na união das peças e começa a soldadura desenvolvendo-se correctamente para um aumento do tempo de t_5 a t_7. Para uma intensidade de corrente I_3 superior a I_2, a temperatura de fusão alcança-se depois do tempo t_2, inferior a t_5. [1]

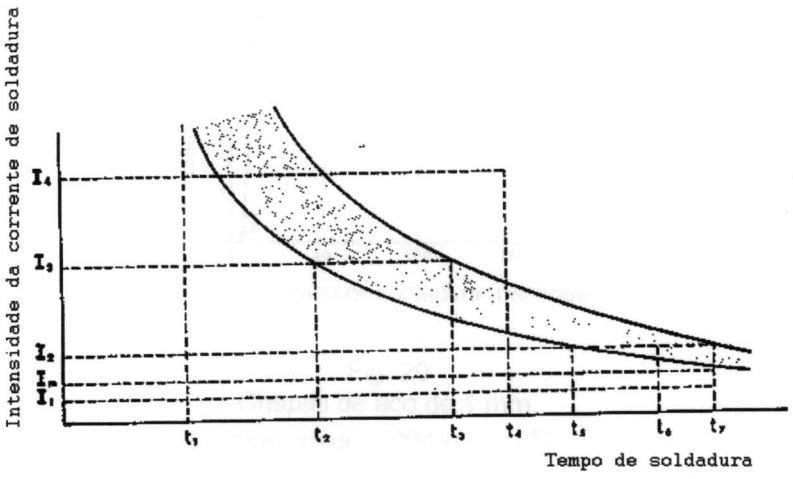


Fig. 19
Diagrama de soldabilidade que expressa a relação intensidade da corrente / tempo de soldadura [1]

O tempo e a intensidade, são dois factores interdependentes, ou seja, para uma dada intensidade, corresponde um tempo determinado, existindo um número infinito de combinações que dão lugar a um mesmo valor de RI^2t: [1]

$$Q = R \cdot I \cdot I \cdot t = RI^2t$$

$$Q = R \cdot (I/2) \cdot (I/2) \cdot (4t) = RI^2t$$

$$Q = R \cdot (I/3) \cdot (I/3) \cdot (9t) = RI^2t$$

$$Q = R \cdot (I/n) \cdot (I/n) \cdot (n^2t) = RI^2t$$

A cada valor do esforço de compressão corresponderá um diagrama particular. Este diagrama (Fig. 20 e Fig. 21) caracteriza-se pela existência de três zonas:

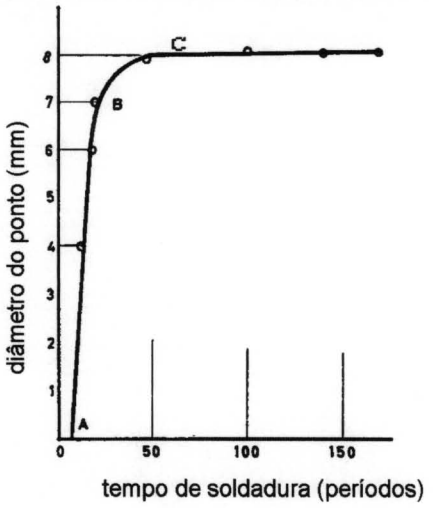


Fig. 20
Chapas de aço de 1 mm.
Intensidade: 7800 A [1]

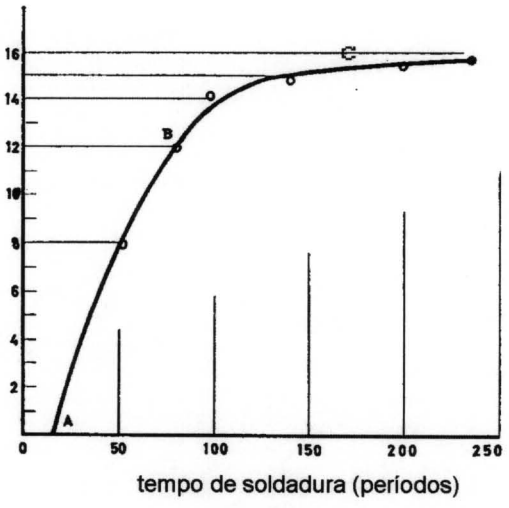


Fig. 21
Chapas de aço de 5 mm
Intensidade: 16500 A [1]

- Zona A: zona de colagens, não se alcançou a fusão, soldadura impossível.
- Zona B: zona de soldadura
- Zona C: zona de projecções e deterioração nas peças soldadas e nos eléctrodos.

A zona B, ou zona de soldadura, depende das características dos metais a soldar. Para certos metais esta zona é estreita e neste caso tanto I como t se devem regular com precisão. Se para um valor de soldadura t_4 o valor da intensidade da corrente é I_4, o ponto fica fora da zona de soldadura, encontrando-se na região C; nestas condições, para um esforço de compressão dado, a quantidade de calor fornecida ao ponto de soldadura resulta excessiva. Aparece neste momento o fenómeno da projecção (expulsão de metal fundido). Se se aumentam ainda mais os valores da intensidade de corrente e do tempo de soldadura, as projecções aumentarão. Finalmente, a fusão tem lugar no contacto dos eléctrodos, que ficam deteriorados e os pontos de soldadura resultam queimados. Veja-se na Fig. 22, a relação entre o diâmetro do ponto e o tempo de soldadura, para diferentes intensidades da corrente:

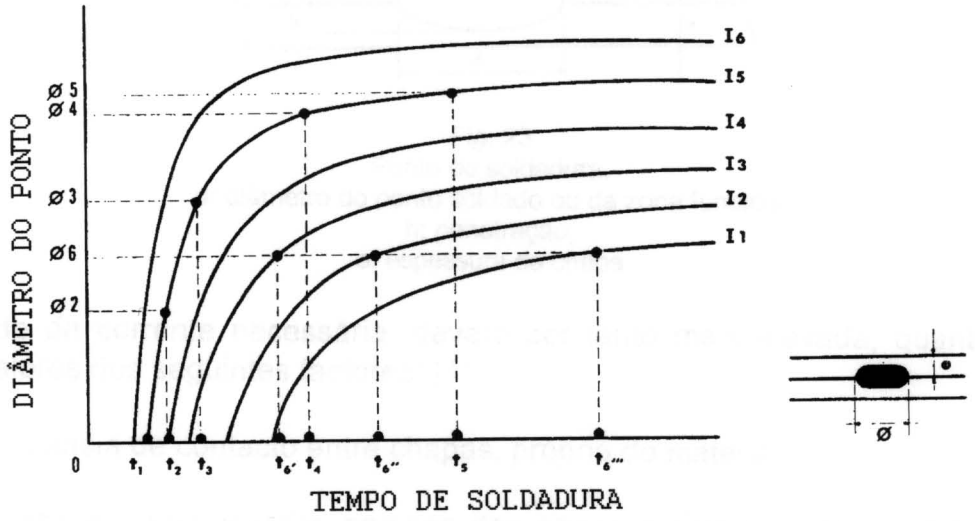


Fig. 22
Diagrama das curvas "diâmetro do ponto em função do tempo de soldadura" para diferentes intensidades da corrente de soldadura.
$I_6>I_5>I_4>I_3>I_2>I_1$; e = constante [1]

Relativamente à capacidade de carga, podem ocorrer as seguintes situações: [6]

- Soldadura com insuficiente capacidade carga: se a corrente de soldadura for muito baixa, ou se os eléctrodos estiverem frios, não se produz o nó do ponto de soldadura, ou produzindo-se, é demasiado pequeno. A expansão térmica do nó é pequena.

- Soldadura com suficiente capacidade de carga: para a formação de uma soldadura com carga suficiente, é necessária mais energia, logo a expansão térmica será maior e o ponto também.

- "Spatters": a expansão do nó termina na expulsão de material fundido, a corrente é demasiado alta, ou a força de compressão do eléctrodo é demasiado baixa.

1.2.5.1.1. Densidades da corrente de soldadura

A densidade da corrente de soldadura no ponto, é o número de ampéres por milímetro quadrado de secção soldada, que atravessa as peças, durante a operação de soldadura: [1]

Δ ampéres / mm^2 = Intensidade da corrente de soldadura (A) / Secção do ponto soldado (mm^2)

Secção do ponto soldado: $S = \pi d^2 / 4$ (mm^2) (Fig. 23)

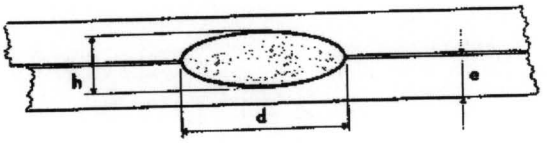


Fig. 23
Ponto de soldadura.
d: diâmetro do ponto soldado ou da zona fundida;
h: penetração;
e: espessura da chapa

A densidade da corrente necessária, deverá ser tanto mais elevada, quanto menores forem os valores dos seguintes factores: [1]

- a resistência de contacto entre chapas, própria do material;

- a resistência eléctrica das porções das peças a soldar compreendidas entre os eléctrodos, que depende da resistividade própria dos materiais e da sua espessura;

- o rendimento η da operação, que intervém na fórmula indicada anteriormente e que depende da espessura das peças e sobretudo da condutibilidade térmica dos materiais a unir . A soldadura deverá ser tanto mais rápida quanto mais elevada for a conductividade térmica;

- o tempo de soldadura.

1.2.5.1.2. Ciclos de intensidade da corrente de soldadura

Soldadura a intensidade constante: Este processo de soldadura é o mais utilizado (Fig. 24). A corrente de soldadura, mantém-se constante, durante toda a duração do

aquecimento, na condição de que a tensão de alimentação, não exprima qualquer variação.

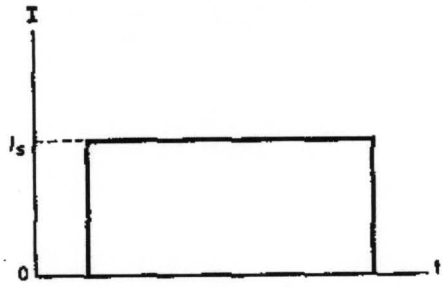


Fig. 24
Soldadura com intensidade constante [1]

Soldadura com recozimento (pós-aquecimento): Depois da fase de soldadura, que se realiza normalmente a intensidade constante, provoca-se a passagem de uma corrente de intensidade inferior à da corrente de soldadura (ver Fig. 25). O objectivo deste procedimento de soldadura, é impedir um arrefecimento demasiado rápido do ponto. É um arrefecimento controlado e aplica-se apenas em casos especiais: aços contendo meio carbono, que se temperam durante a soldadura, aços e ligas especiais e grandes espessuras.

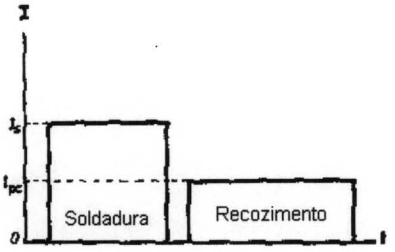


Fig. 25
Soldadura com recozimento [1]

Soldadura com pré-aquecimento: uma corrente de fraca intensidade (muito inferior à intensidade de soldadura), atravessa as peças a conjuntar e leva a zona a soldar, a uma certa temperatura (inferior à de fusão). Segue-se imediatamente a passagem da corrente de soldadura (Fig. 26), que assegura a formação do ponto.

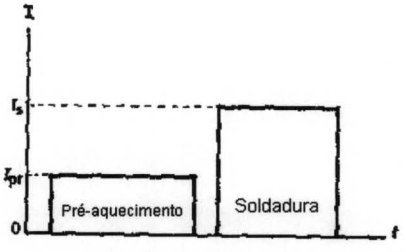


Fig. 26
Soldadura com pré-aquecimento [1]

O pré-aquecimento aumenta o volume de metal aquecido nas proximidades do ponto. Em certos casos o pré-aquecimento utiliza-se para favorecer o assentamento das peças, que apresentam uma certa rigidez.

1.2.5.2. O tempo de soldadura

Para valores de intensidade iguais, ou ligeiramente superiores à intensidade mínima de soldadura, o tempo de passagem de corrente deve ser muito longo. É a soldadura lenta.

Para valores da intensidade muito superiores à intensidade mínima de soldadura, os tempos necessários são cada vez mais curtos. Trata-se da soldadura rápida. A técnica da soldadura rápida generalizou-se devido às grandes vantagens que traz consigo. Os tempos de soldadura que antes eram da ordem de vários segundos, inclusivé para a união de chapas de pequena espessura, são agora de alguns períodos. As perdas caloríficas por condução nas chapas e nos eléctrodos, são tanto mais pequenas, quanto mais curto for o tempo de soldadura. O rendimento da operação será mais elevado, quanto mais intensa seja a corrente de soldadura e mais curto o tempo de aquecimento. Pode admitir-se que os tempos de soldadura curtos são inversamente proporcionais ao quadrado da intensidade da corrente. Os tempos de soldadura curtos facilitam a manutenção correcta dos eléctrodos. Graças à rapidez da soldadura, apenas aquece a alta temperatura a zona do ponto e a operação termina antes que a superfície das peças em contacto com os eléctrodos alcance uma temperatura elevada. Desta forma, as pontas dos eléctrodos, mantidas a uma temperatura bastante baixa, conservam a sua dureza e não se deformam. Os seus diâmetros mantêm o seu valor inicial e a intensidade de corrente de soldadura permanece constante, assegurando uma boa regularidade do trabalho.

A lentidão do aquecimento origina a elevação da temperatura de um importante volume de metal que sobrepassa a zona do ponto de soldadura. Os eléctrodos por estarem em contacto com um metal em estado plástico, deixarão nas peças marcas profundas. As deformações depois da soldadura podem ser excessivas.

As resistências mecânicas das soldaduras executadas com tempos de soldadura muito longos são geralmente inferiores às obtidas com tempos de soldadura mais curtos. O tempo de soldadura influi sobre a velocidade de arrefecimento do ponto, depois da interrupção da corrente eléctrica. As peças de união difícil necessitam de tempos de soldadura longos, pois se se usassem tempos de soldadura muito curtos a operação terminaria antes de se ter podido realizar correctamente a localização da soldadura no local desejado.

1.2.5.3. Força de aperto, esforço de soldadura ou esforço de compressão

O esforço de soldadura ou a força exercida pelos eléctrodos, tem um efeito directo na corrente de soldadura. Foi mostrado que a resistência de contacto era inversamente proporcional à pressão dos eléctrodos. Por esta razão e porque a pressão dos eléctrodos, ou esforço de soldadura é um factor controlável, ela é uma das unidades "TIP" - tempo, corrente, pressão - que constituem os três principais factores na soldadura por resistência.

Quando aplicado à soldadura por resistência, o termo "esforço de soldadura", significa sempre "força de soldadura estática". Esta força de soldadura tem sido medida por cilindros hidráulicos ou pneumáticos. Uma análise da pressão exercida no material durante uma soldadura por pontos, indica que a pressão de soldadura efectiva, é dinâmica e não estática e materialmente afectada pela fricção e inércia das partes móveis da máquina de soldadura. [2]

As pressões dinâmicas de soldadura são governadas por cinco factores: [2]

- Pressão média;
- Inércia, ou seja, o peso total e a distribuição de peso, de mover as partes do sistema de pressão;
- Fricção no sistema de pressão;
- Reacção no sistema de pressão pela passagem da corrente pelos membros durante a soldadura;
- Força sob compressão a várias temperaturas do material a ser soldado.

A força então medida, deve ser considerada como tendo os requisitos para fazer uma boa soldadura, com controlo próprio, de outras variáveis da técnica de soldadura por pontos e do material a soldar, para prever um contacto razoavelmente intimo, na zona de soldadura, sem esforço de soldadura a ser exercido. Se o material a ser soldado está deformado, então, a zona de soldadura não está em contacto íntimo, devendo prover-se uma força adicional, para além da força necessária para a soldadura, a fim de suprimir esta deformação e levar as peças a um contacto íntimo na zona de soldadura.

Esta situação ocorre frequentemente na soldadura por pontos e não conduz a uma boa prática de soldadura, mas por vezes é inevitável. Provavelmente a pior consequência desta situação, é a variação na força requerida, para pressionar as peças uma contra a outra, resultando numa variação da resistência da soldadura e na sua qualidade. Por vezes, esta força adicional requerida para forçar as peças a juntarem-se, requer um aumento no tempo de acostagem. Por outro lado, devido a um possível afastamento das peças, o tempo de forjagem deve ser suficiente para permitir uma solidificação completa da soldadura. [2]

O esforço de soldadura entre eléctrodos e chapas, tem um objectivo bem definido, nas três fases da operação de soldadura: durante o tempo que precede à passagem de corrente (aproximação das peças), durante o tempo de soldadura propriamente dito e durante o tempo de refrigeração do ponto soldado, depois do período de aquecimento.

Na formação do ponto de soldadura, este factor é tão importante como a intensidade da corrente, devido à sua função preponderante e indispensável, sobre a localização da soldadura e sobre as resistências de contacto.

No período inicial do ciclo de soldadura, antes da passagem da corrente, o esforço de soldadura aplicado às peças a soldar, tem por objectivo uni-las uma contra a outra, a fim

de estabelecer um contacto íntimo entre elas, num determinado sítio, localizando a soldadura. As partes da chapa próximas a esta zona de contacto, estão em contacto sob uma pressão muito reduzida, ou quase nula e apresentam uma resistência eléctrica muito mais elevada à passagem da corrente.

O esforço aplicado, deve ser suficientemente importante para vencer as reacções elásticas das peças a soldar e para as deformar, se necessário.

O esforço de compressão deve alcançar um valor mínimo, que assegure:

- uma resistência de contacto entre chapas suficientemente regular e de um valor adequado.

- uma resistência de contacto eléctrodo-chapa de valor muito baixo, com o objectivo de impedir qualquer aquecimento prévio prejudicial neste local.

O estudo das resistências de contacto, mostrou-nos a notável influência que esta tem no valor do esforço aplicado. Durante o tempo de passagem da corrente através das peças, o esforço de soldadura, tem a missão de manter o aperto obtido e assegurar uma pressão suficiente do eléctrodo sobre a chapa, para manter a um valor muito baixo a resistência eléctrodo-chapa. Estas, são as missões importantes, que desempenha o esforço de soldadura entre eléctrodos e peças na formação do ponto de soldadura. O esforço de soldadura exerce uma função indispensável sobre as qualidades metálicas e metalúrgicas do ponto de soldadura. Por isto, a soldadura por pontos foi classificada como um método de soldadura por pressão.

A missão do esforço de soldadura sobre as peças a soldar, é importante durante: [1]

- o assentamento ou aperto das peças antes da soldadura;

- a soldadura propriamente dita, ou tempo de passagem da corrente;

- a manutenção ou tempo durante o qual o ponto de soldadura fica sob pressão, depois da interrupção da corrente de soldadura.

É então necessário escolher os valores do tempo de assentamento (tempo de acostagem) e do tempo de manutenção (tempo de forjagem), assim como os valores do esforço de soldadura, durante o assentamento, durante a soldadura e durante a manutenção.

O esforço de soldadura, durante a descida e aperto do eléctrodo, deve ser suficiente para garantir uma superfície de passagem de corrente bem localizada e para assegurar uma resistência de contacto entre chapas, suficientemente elevada e regular e uma resistência de contacto eléctrodo - chapa o mais pequena possível.

Para facilitar o aquecimento inicial, seria interessante ter um esforço de soldadura pequeno, que assegurasse uma resistência de contacto entre chapas muito elevada, mas nestas condições a resistência de contacto eléctrodo - chapa, teria também um valor relativamente alto e inclusive perigoso, que poderia provocar um aquecimento excessivo

no ponto de contacto de cada eléctrodo. Isto provocaria deformação e desgaste importante nos eléctrodos, projecções nas superfícies e deterioração das próprias chapas. Estes inconvenientes, impõem um limite inferior do esforço de compressão, que é preciso ultrapassar sempre, a fim de que as resistências de contacto eléctrodo-chapa sejam suficientemente pequenas, para evitar estes fenómenos prejudiciais. [1]

Para uma intensidade de corrente e um tempo de soldadura dados, com pontas de eléctrodos determinadas, o diâmetro do ponto de soldadura diminui, ao aumentar o esforço de soldadura, como se pode observar na Fig. 26.

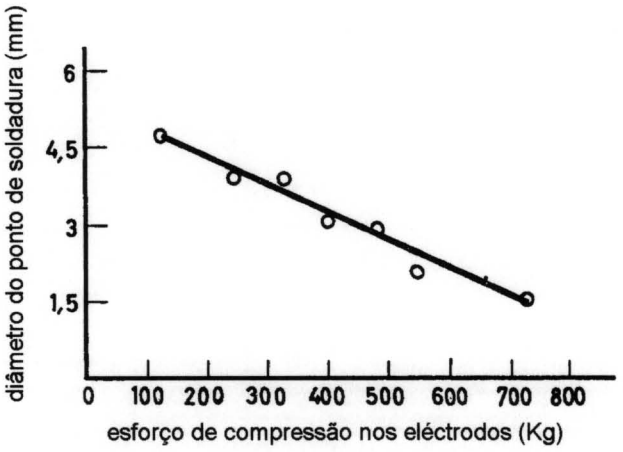


Fig. 27
Curva de diminuição do diâmetro do ponto de soldadura em função do aumento do esforço de soldadura [1]

A Fig. 27 mostra a curva de diminuição do diâmetro do ponto de soldadura, em função do aumento do esforço, na soldadura de duas chapas de aço doce de 1 mm de espessura, com uma intensidade da corrente de soldadura de 9000 A e um tempo de soldadura de 6 períodos. Os eléctrodos têm a ponta esférica de raio 75 mm. O esforço de compressão a utilizar depende: [1]

- das características eléctricas e mecânicas dos materiais;
- dos valores das resistências de contacto (função do esforço de soldadura);
- das espessuras das peças a soldar;
- das condições de assentamento das peças: peças planas, peças embutidas, perfis, peças deformadas, etc;
- dos estados de superfície, que condicionam os valores das resistências de contacto;
- da intensidade da corrente de soldadura.

A pressão (esforço por unidade de superfície de contacto) dos eléctrodos sobre as peças, deverá ser tanto maior quanto mais elevada for a densidade da corrente, para evitar o fenómeno de projecções de metal em fusão.

A curva da Fig. 28 dá-nos as pressões específicas limites, em função das densidades da corrente, para as quais não se produz o fenómeno das projecções. Trata-se da soldadura de chapas de aço doce, de espessura 1 mm, eléctrodos de ponta troncocónica com diâmetro 5 mm e tempo de soldadura 9 períodos.

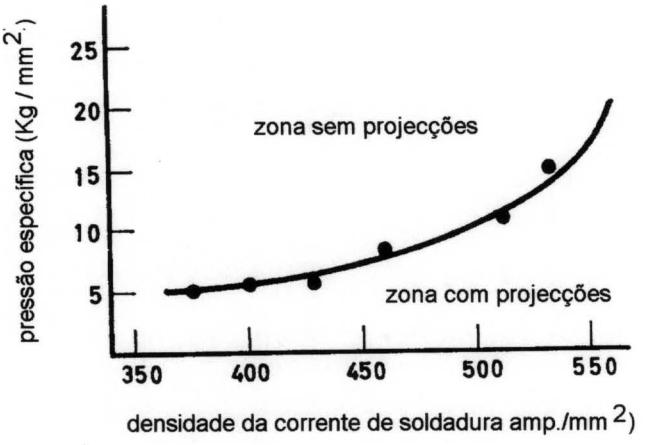


Fig. 28
Pressões específicas em função das densidades de corrente [1]

O esforço de compressão é portanto função do diâmetro das pontas dos eléctrodos.

1.2.5.3.1. Os diferentes ciclos do esforço de compressão

Soldadura com esforço de compressão constante: usa-se na maior parte dos casos. Na Fig. 29, adopta-se um valor do esforço de compressão constante durante todo o decorrer da operação: descida do eléctrodo (assentamento), soldadura (aquecimento) e manutenção. O tempo de manutenção (tempo de forjagem), deverá ser tanto maior quanto maior for a espessura das chapas e quanto piores sejam as condições de assentamento destas. Nos casos normais, o tempo de manutenção varia de 5 períodos para espessuras de 1 mm, a 50 ou 100 períodos para espessuras de 5 mm. [1]

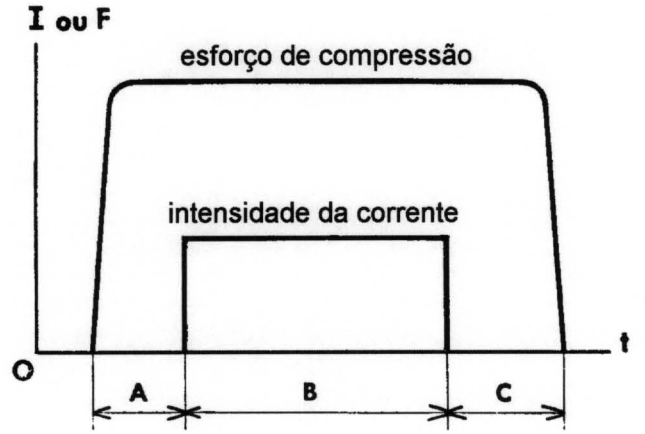


Fig. 29
Soldadura com esforço de compressão constante [1]

Soldadura com variação do esforço de compressão: caracteriza-se por um aumento rápido do esforço de compressão ao fim da soldadura. A variação de tal esforço, produz-se no momento da interrupção da corrente de soldadura, ou alguns períodos antes (Fig. 30). Este esforço de compressão maior, prolonga-se durante o tempo de manutenção e chama-se forjamento. Contribui para melhorar notavelmente a qualidade do ponto de soldadura, aumentando a sua resistência mecânica, melhorando as qualidades metalúrgicas do ponto e tem a vantagem de adaptar o valor do esforço às fases da operação de soldadura. Relativamente baixo durante os primeiros momentos de aquecimento, o esforço de compressão assegura uma resistência de contacto entre chapas suficientemente elevada. Aumentando fortemente quando a resistência de contacto é nula, já não influi no aquecimento, mas o seu elevado valor, é muito favorável para a supressão das projecções, que têm tendência a produzir-se e exerce uma acção benéfica sobre os fenómenos que têm lugar durante a solidificação do ponto.

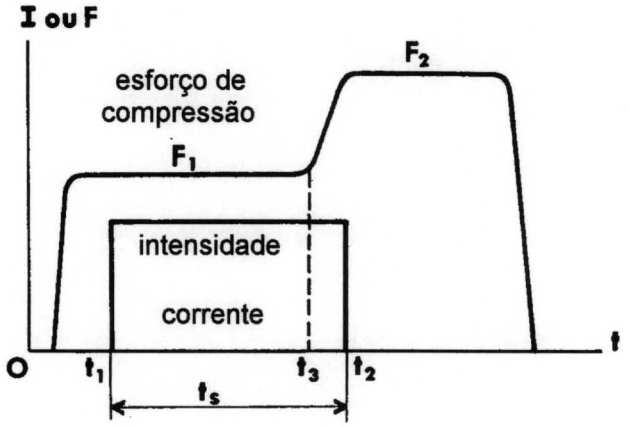


Fig. 30
Soldadura com variação do esforço de compressão [1]

1.2.6. Efeito shunt

O efeito "shunt" é um dos factores importantes que afecta a qualidade da soldadura, deteriorando-a devido ao "shunt" da corrente que flui através das soldaduras vizinhas. Mesmo se as variáveis da máquina estão numa condição desejável, há por vezes variações consideráveis na qualidade da soldadura.

Isto deve-se a variações na corrente de soldadura, causadas por mudanças na condição da superfície das peças a soldar, alterações no diâmetro da ponta dos eléctrodos e alterações na impedância do circuito de soldadura. Na prática, a soldadura é feita uma após a outra, logo, a soldadura adjacente afecta a qualidade da soldadura subsequente, devido ao "shunt " da corrente que flui através das soldaduras já existentes. Esta é a principal fonte de variação da qualidade. [2]

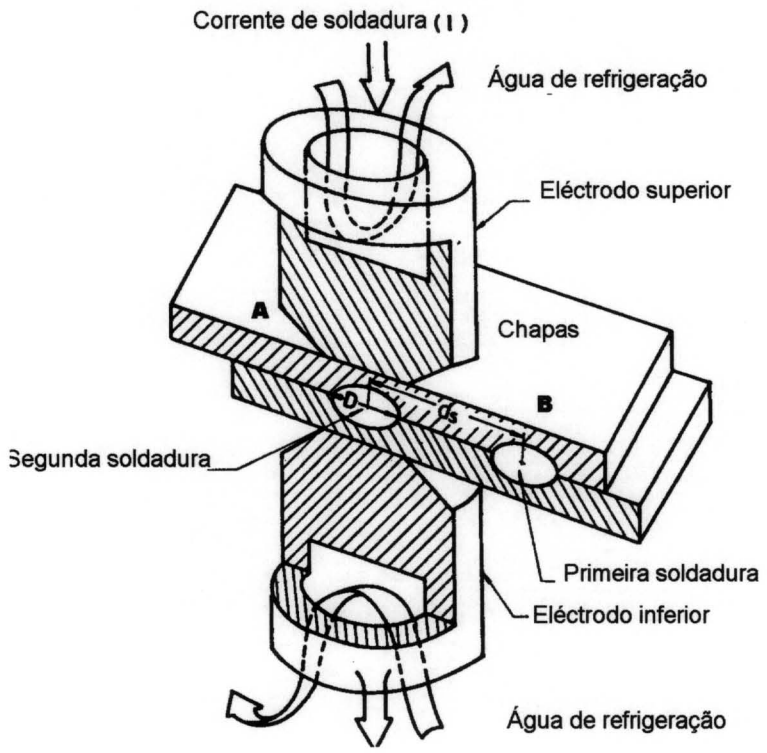


Fig. 31
Diagrama esquemático do "efeito shunt" [7]

No caso de um único ponto de soldadura, um certo leque de condições está envolvido. Mas se um segundo ponto é realizado perto do primeiro, ocorre um efeito de "shunt", que é equivalente a duas resistências em paralelo. A corrente, de acordo com a lei de Ohm, fluirá através de dois caminhos, de forma inversamente proporcional à sua resistência.

Então, na Fig. 30, o metal entre os eléctrodos torna-se um circuito dividido, parte da corrente vai para o caminho A enquanto que o restante vai para o caminho normal B. Se ds for longo, a sua resistência comparada com B será alta e o efeito pode ser desprezado. Se ds é curto, uma apreciável porção da corrente total será "shuntada". Outro factor a considerar, é que como caminho B aumentou na temperatura, a sua resistência aumenta, adicionando-se ao efeito de shunt. Os materiais a ser soldados também têm considerável influência no efeito. O aço inoxidável, tendo alta resistência , é menos influenciado do que o aço normal.

Quando um conjunto de pontos de soldadura, são feitos sucessivamente, ao longo de uma junta, uma parte da corrente secundária, é desviada através das soldaduras adjacentes. Este facto deverá ser considerado sempre que se pretende determinar a distância entre os pontos.

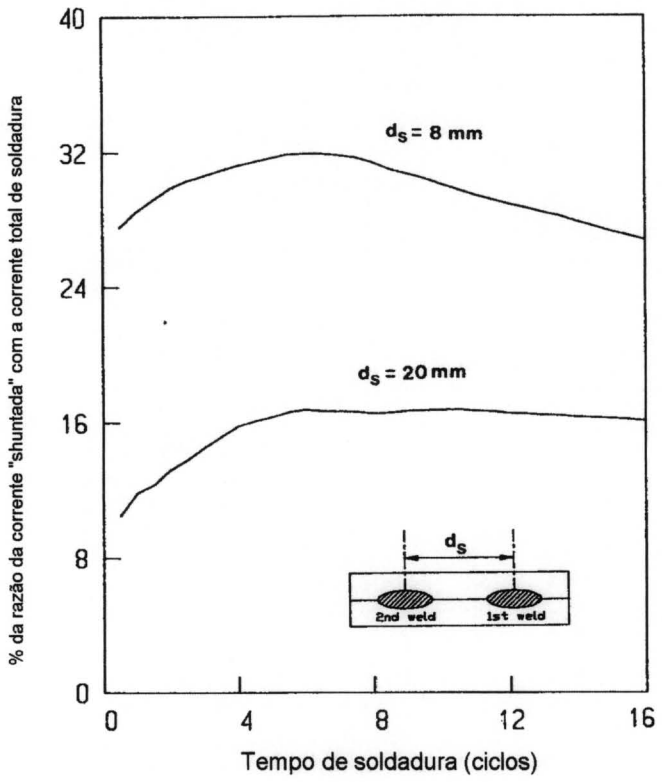


Fig. 32
Variação da razão da corrente shuntada / corrente total de soldadura [7]

O desvio da corrente dependerá em primeiro lugar, da razão entre as resistências eléctricas, dos dois possíveis caminhos por onde a corrente eléctrica pode passar, isto é, o caminho através das juntas de soldadura adjacentes, já realizadas e o caminho onde se vai realizar o novo ponto de soldadura. Se o caminho oferecido através da junta de soldadura adjacente, for maior que a espessura da junta, a sua resistência eléctrica será também superior e o efeito de desvio da corrente será desprezável. Desta forma, o afastamento entre os pontos dependerá essencialmente da condutividade eléctrica dos materiais a soldar, da sua espessura, diâmetro, do ponto de soldadura e estado das superfícies em contacto. Por exemplo, metais com condutividade elevadas ou secções mais espessas, necessitam de maior afastamento entre os pontos de soldadura. [3]

1.2.7. Balanço de calor

Em discussões sobre como realizar soldaduras por pontos, há um factor ao qual muitas vezes não se dá a devida consideração, sobretudo por causa da dificuldade de determinar o seu efeito exacto. Este factor é o balanço correcto de calor. A maior parte das discussões em soldadura por pontos, estão confinadas à soldadura de duas espessuras de material com diâmetro de pontas dos eléctrodos iguais. O balanço de calor nestes casos, é automaticamente correcto. No entanto, provavelmente 50% das aplicações não têm estas condições e um balanço próprio de calor pode significar o sucesso ou a falha de um trabalho.

O balanço de calor, deve ser definido como uma condição, na qual as zonas de fusão de ambas as peças do material a ser soldado, possam suportar aproximadamente o mesmo grau de aquecimento e a mesma aplicação de pressão. O balanço de calor pode ser afectado pela: [2]

- conductividade térmica e eléctrica relativas dos materiais a ser soldados;
- geometria relativa das partes a ser soldadas;
- conductividade térmica e eléctrica dos eléctrodos;
- geometria dos eléctrodos.

Para soldar, por exemplo, uma liga com alto teor em cobre, com grande condutividade térmica e eléctrica, a um material de baixa conductividade térmica e eléctrica, tal como o aço inoxidavel, a soldadura pode não ser de grande qualidade, devido a uma pobre condição de liga dos dois materiais. Mas é possível obter uma soldadura de qualidade aceitável, utilizando algumas técnicas, como se mostra na Fig. 32, a seguir:

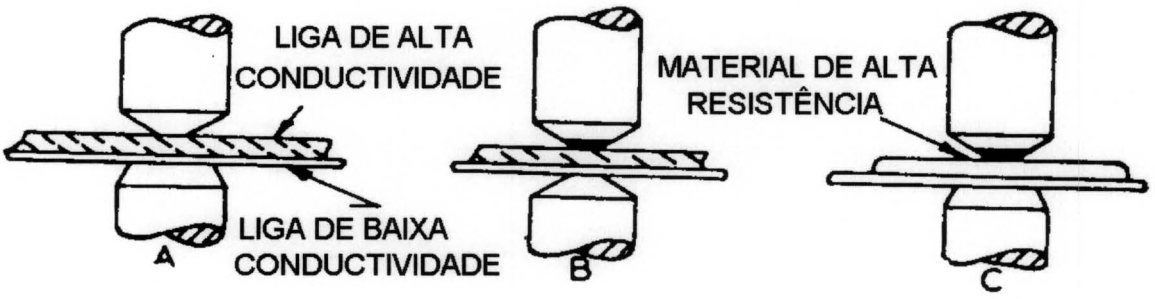


Fig. 33
Diferentes técnicas de obtenção de um balanço de calor adequado [2]

A Fig. 33-A, mostra um balanço correcto de calor, obtido utilizando uma área da ponta do eléctrodo mais pequena, na liga de cobre, do que na liga de aço, para obter aproximadamente graus de fusão iguais, por densidade variável de corrente.

A Fig. 33-B, mostra um balanço correcto de calor, obtido utilizando um eléctrodo com uma ponta de material altamente resistente, tal como tungsténio ou molibdénio, para criar aproximadamente a mesma fusão na liga de cobre, como na liga de aço.

A Fig. 33-C indica uma combinação das duas técnicas mostradas em 32-A e 32-B.

1.2.8. Forma e dimensão dos eléctrodos

Os eléctrodos são peças metálicas condutoras de formas particulares, cuja função é conduzir a corrente eléctrica às peças a soldar e em simultâneo aplicar um esforço.

Um eléctrodo caracteriza-se: pela sua forma, a sua matéria e a sua face activa. [8]

- forma: classificam-se segundo 5 famílias:

  - pratos;
  - direitos centrados (a face activa está centrada);
  - direitos excêntricos;
  - inclinados excêntricos;
  - de forma especial (adaptados a um uso particular: ponto de aspecto, soldadura de tubos ou fios, peças de forma, ...)

- matéria: utiliza-se o cobre ou ligas de cobre, em que as mais comuns são o CuCr1Zr, o CuAg ou ainda o CuCoBe. Existem ainda eléctrodos com deposição superficial de molibdénio, ou tungsténio. O aumento da dureza da face activa do eléctrodo, permite aumentar a sua duração de vida.

- face activa: pode ser em forma de prato ou arredondada e o seu diâmetro varia segundo a espessura da chapa a soldar.

Os eléctrodos têm uma tripla função na soldadura por resistência por pontos:

- canalizar a corrente eléctrica para as peças a soldar;
- transmitir o esforço mecânico necessário à obtenção de um bom contacto entre as peças durante o tempo de acostagem, tempo de soldadura e tempo de forjagem;
- libertar as perdas caloríficas produzidas durante a soldadura.

Deve fazer-se um esforço para que estas funções sejam cumpridas, pelo que devemos:

- eliminar todos os obstáculos à passagem da corrente (sujidade dos eléctrodos);
- assegurar uma pressão correcta (alinhamento e paralelismo das faces activas do eléctrodo);
- ter um bom sistema de refrigeração, regulando os tubos de refrigeração. O débito de água necessário à refrigeração dos eléctrodos deve ser superior ou igual a 3 l/min.

Os resultados da investigação, demonstram que os eléctrodos com uma interface de 90º, promovem uma distribuição de corrente mais uniforme na face do eléctrodo. A geometria do eléctrodo afecta a sua utilização e a sua vida, pela influência na distribuição local da corrente. Um desenho eficiente de um eléctrodo, pode variar as suas propriedades mecânicas e térmicas, desde que se mantenha a corrente uniforme. Na indústria automóvel, contendo aproximadamente entre 3000 e 5000 soldaduras por pontos e sendo

o maior utilizador da soldadura por resistência eléctrica por pontos, é necessária a soldadura de várias chapas de aço, galvanizadas, que foram estabelecidas para o uso na indústria automóvel devido à sua resistência à corrosão. No entanto, este aumento de protecção aumentou a dificuldade de soldar estas chapas galvanizadas. A junção do zinco, com o cobre dos eléctrodos, promove um rápido desgaste, diminuindo a vida dos eléctrodos. [9]

A relação entre a geometria dos eléctrodos, a distribuição da corrente e a vida do eléctrodo, foi formulada de resultados de modelos e de testes experimentais. Uma maior superficie de trabalho dos ângulos do eléctrodo, levam a uma distribuição de corrente mais uniforme na face do eléctrodo. Este efeito reduz o aquecimento localizado na periferia da face. Este aquecimento mais uniforme, pode contribuir para uma utilização mais duradoura.

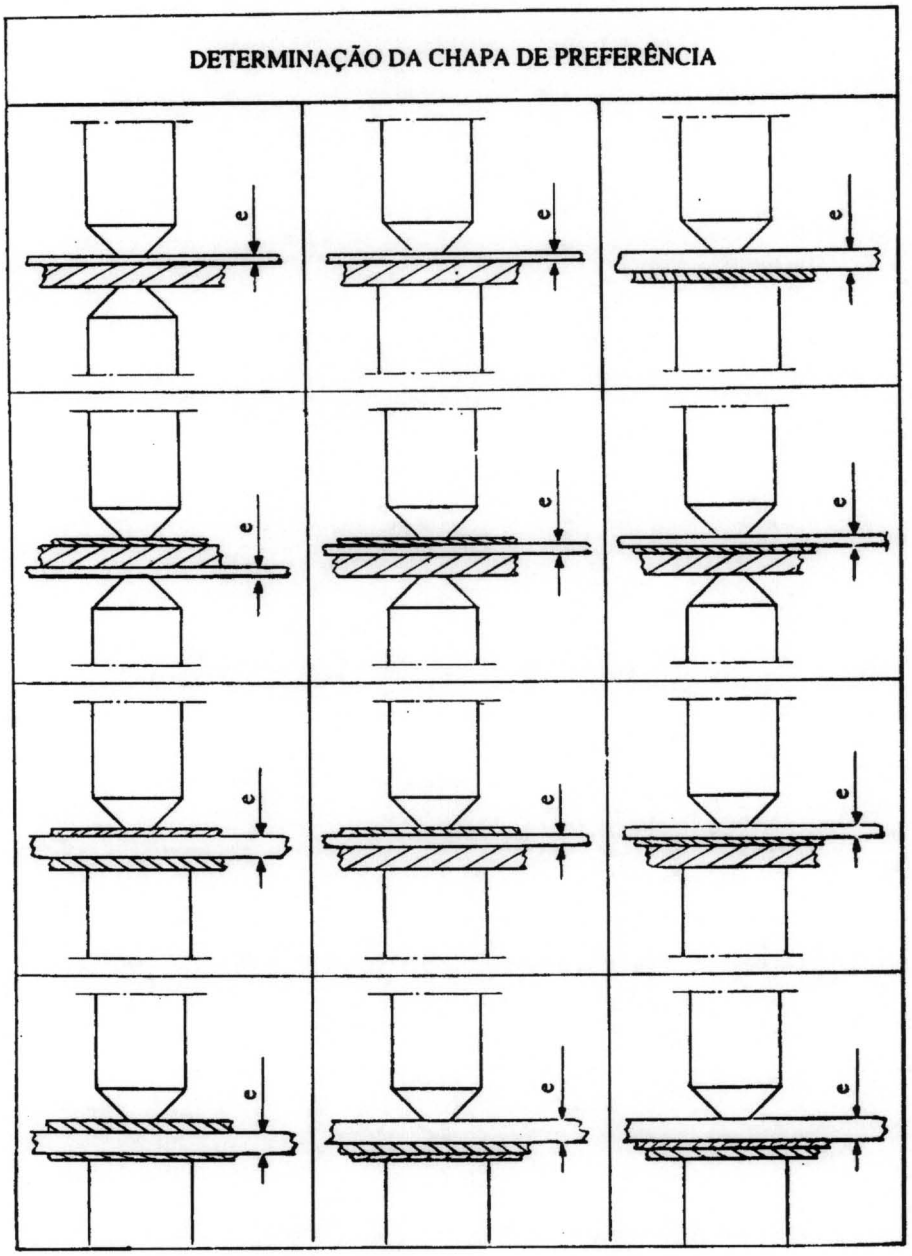
Um dos factores importantes é o diâmetro (**d**) das pontas dos eléctrodos, que pode determinar-se de acordo com a seguinte equação, definida pelo *Instituto Internacional de Soldadura*: [3]

$$d = 5\sqrt{e}$$

onde:

d - diâmetro da ponta do eléctrodo [mm]
e - espessura da chapa de referência [mm]

A chapa de referência a ter em conta, ou seja, a espessura a ter em conta para o cálculo de d, varia consoante os casos de soldadura que se nos apresentam, como se pode verificar na Tab. 2 que se segue:



Tab. 2
Determinaçãop da espessura de referência "e" [3]

A força de aperto necessária, será aquela que garanta um bom encosto entre as chapas a soldar. O diâmetro **D** do ponto de soldadura deverá neste caso ser o seguinte:

$$0{,}8d \leq D \leq 1{,}1d$$

Uma soldadura de boa qualidade só será conseguida se os eléctrodos estiverem em boas condições. Estes requerem uma atenção muito especial, sendo a sua manutenção uma condição essencial à realização correcta da soldadura.

Os eléctrodos são constituídos pelos seguintes componentes:

- A ponta do eléctrodo
- O corpo de eléctrodo
- O dispositivo de arrefecimento

O diâmetro da ponta do eléctrodo (superfície de contacto), controla o tamanho da soldadura. Se o diâmetro é demasiado pequeno, como mostra a Fig. 34, a soldadura resultante é demasiado fraca, no entanto, pode ser uma soldadura segura. Outra objecção às soldaduras pequenas, é que a marca deixada na superfície pode ser severa e uma pequena variação no diâmetro da ponta do eléctrodo, pode resultar em grandes variações na força da soldadura. Por outro lado se o diâmetro da ponta do eléctrodo é demasiado grande, o centro sombreado (Fig. 35) pode tornar-se demasiado quente, resultando numa aparência muito deficiente e a soldadura será fraca, devido aos vácuos e bolhas, como resultado de pressão insuficiente por unidade de superfície. [2]

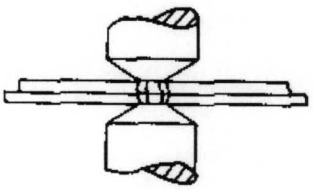


Fig. 34
Soldadura com diâmetro pequeno

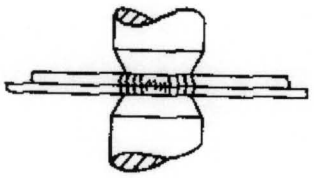


Fig. 35
Soldadura com diâmetro muito grande [2]

A referência ao diâmetro da ponta do eléctrodo, deve ser interpretada como sendo o diâmetro da área de contacto da ponta do eléctrodo, com a chapa na conclusão da soldadura. O diâmetro da secção de fusão entre as duas chapas, será ligeiramente inferior ao diâmetro da área de contacto do eléctrodo. Isto considerando que as superfícies das pontas dos eléctrodos, estariam perfeitamente encostadas e paralelas uma à outra. O que quase nunca acontece, porque mesmo que os eléctrodos sejam perfeitamente maquinados, existe sempre deflexão nos braços da pinça, resultando em superfícies dos eléctrodos não paralelas, o que por sua vez provoca distribuições de calor desiguais e por vezes indentação dos eléctrodos. No entanto, após uso continuado, os eléctrodos sofrem esmagamento, o que proporciona superfícies paralelas durante a soldadura. [2]

A secção e a forma das pontas dos eléctrodos, delimitam a superfície através da qual a corrente de soldadura passa, desde o eléctrodo às peças a soldar. As pontas do eléctrodo são geralmente de forma troco-cónica (Fig. 38)

Existe uma diferença entre os pontos desenvolvidos numa chapa grossa e numa chapa fina. Para as chapas de pequena espessura, o valor constante que adquire o diâmetro do ponto, no troço da curva situado depois do troço B (Fig. 20 e Fig. 21) é sensivelmente igual a 1,3 vezes o diâmetro da ponta do eléctrodo, qualquer que seja a intensidade da corrente e qualquer que seja o valor deste último diâmetro.

Para as chapas de espessura grossa nem sempre sucede isto. Tal só se verifica se a secção da ponta do eléctrodo expressa em milímetros quadrados é igual ou superior a 16 ou 17 vezes a espessura total das chapas a soldar. Este fenómeno explica-se porque nas chapas grossas, os filetes de corrente têm mais tendência a dispersar-se quanto mais pequeno é o diâmetro da ponta do eléctrodo (Fig. 36).

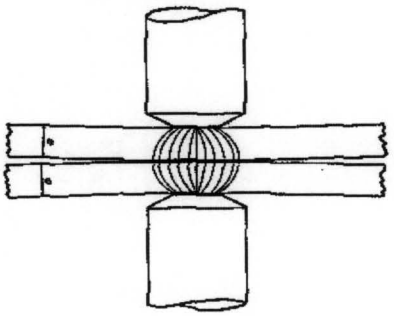


Fig. 36
Soldadura de chapas grossas [1]

A fórmula para determinação do diâmetro da ponta do eléctrodo, recomendada pela "American Welding Sociaty" é: [1]

$\Phi = 2e + 2,5$ (em mm)

A fórmula aconselhada pela " British Standard" é: [1]

$\Phi = \sqrt{e}$ (em polegadas)

Todas estas fórmulas conduzem a resultados sensivelmente iguais.

Também se utilizam eléctrodos de ponta esférica (Fig. 37), que apresentam numerosas vantagens:

- melhor assento - regulação mais fácil;
- menos marcas exteriores deixadas pelo eléctrodo no local do ponto - melhor aspecto da superfície;
- adaptação de um mesmo raio de curvatura a várias espessuras, segundo o valor do esforço de compressão;
- melhor refrigeração das pontas dos eléctrodos.

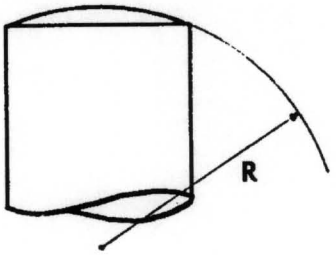


Fig. 37
Eléctrodo de ponta esférica

O eléctrodo, é o órgão da máquina que está directamente em contacto com as peças a soldar. É a ferramenta da máquina de soldar por pontos e portanto, o elemento sujeito a desgaste. O eléctrodo forma parte do circuito secundário de soldadura. Deve localizar e concentrar a corrente de soldadura, de elevada intensidade e transmitir o esforço de compressão aos locais onde se vão produzir os pontos de soldadura. Deve dissipar o mais rapidamente possível, o calor desenvolvido localmente.

Características exigidas num eléctrodo: [1]

- deve ser construído em material de conductividade elevada;
- deve ter uma resistência de contacto com as peças a soldar o mais pequena possível para impedir aquecimentos prejudiciais na superfície;
- deve ser construído em material de dureza e resistência mecânica elevadas inclusive a altas temperaturas.De facto, os eléctrodos têm uma secção de passagem da corrente reduzida, relativamente às outras partes do circuito secundário eléctrico e poderiam sofrer um aquecimento elevado por efeito de Joule. Por outro lado, estão em contacto com as chapas, no local do ponto de soldadura e são objecto de um aquecimento suplementar por condução. Além disso a ponta do eléctrodo, de superfície relativamente pequena, transmite um esforço elevado, a um material que pode ser muito duro. O que dá lugar a um trabalho muito importante da ponta do eléctrodo e uma tendência para que esta se esmague;
- deve ter as dimensões e forma adequada para permitir a soldadura das peças nos locais desejados;
- deve apresentar uma superfície de contacto determinada com a peça a soldar, para assegurar a obtenção de um diâmetro do ponto determinado. É muito importante que esta superfície, que delimita a secção da passagem da corrente de soldadura às peças a conjuntar, se mantenha bastante constante no curso da produção. Com efeito, a densidade da corrente de soldadura deve manter-se entre certos limites, já que não sendo assim, o efeito de Joule é insuficiente e não se produz a fusão do ponto.

Os eléctrodos dependem:

- das características mecânicas e eléctricas dos materiais a soldar: dureza, densidade da corrente necessária para a soldadura, resistência de contacto eléctrodo-material, etc;
- das espessuras a soldar que determinam a superfície da ponta do eléctrodo, a intensidade e o tempo de soldadura;
- da acessibilidade dos locais onde devem realizar-se os pontos de soldadura;
- do aspecto exterior exigido aos pontos;
- das cadências de soldadura (número de pontos por minuto) é preciso evitar um aquecimento exagerado por efeito de Joule.

Um eléctrodo fica definido pelas dimensões indicadas no desenho da Fig. 38. Geralmente é refrigerado por circulação de água.

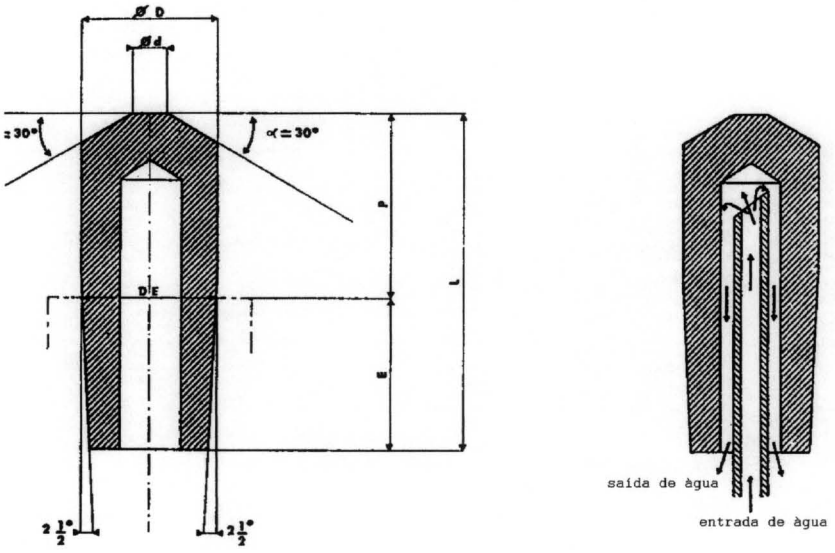


Fig. 38
Eléctrodo de ponta troncocónica - Refrigeração [1]

O diâmetro D do eléctrodo, será tanto maior, quanto maior for a intensidade da corrente secundária e mais elevados forem o tempo e a cadência de soldadura. Utilizam-se principalmente duas formas de eléctrodo: com ponta tronco-cónica e com ponta esférica ou bombeada.

No caso dos eléctrodos tronco-cónicos, o ângulo α (Fig. 38) será no máximo 30°, a não ser que as peças a soldar a isso obriguem, pois quanto maior for o ângulo α, mais rápidos são os desgastes e as deformações no eléctrodo.

1.2.9. Desenho para a soldadura por resistência eléctrica por pontos

Existem algumas condições e regras importantes, a ter em conta quando se faz um projecto para soldadura por resistência: [2]

- **Espaço do eléctrodo**: A primeira consideração, é prover um espaço suficiente para o eléctrodo (Fig. 39). Na Fig. 39-A apresenta-se um caso cujas condições são ideais para a realização da soldadura por pontos. Na Fig. 39-B, uma das chapas foi virada para criar uma flange. Neste caso, o comprimento da flange deve ser suficiente, para permitir o acesso do eléctrodo. Se o eléctrodo tocar na chapa virada, ocorrerá um "shunt" parcial da corrente, enfraquecendo a soldadura e ao mesmo tempo, marcando a chapa e o eléctrodo. Sempre que o acesso do eléctrodo for limitado, pode utilizar-se um eléctrodo idêntico ao representado na Fig. 39-C. Por vezes uma das chapas apresenta-se virada, formando mesmo um ângulo, como na Fig. 39-D. Se este ângulo não exceder os 30° (valor máximo standard permitido), medidos a partir da vertical, o melhor é utilizar um eléctrodo que é colocado no porta-eléctrodo, com um determinado ângulo.

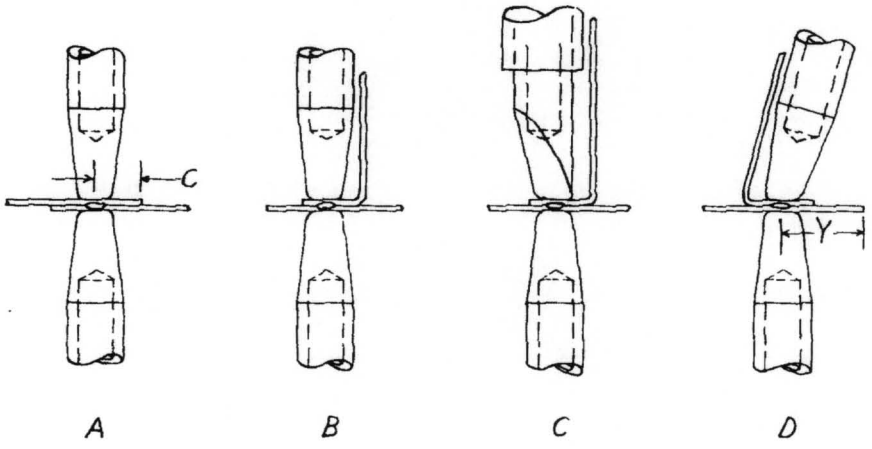


Fig. 39
Algumas soldaduras por pontos [2]

- **Distância do bordo**: Esta é a distância entre o centro do eléctrodo ou da soldadura, até ao bordo da chapa. Na Fig. 39-A, esta distância está representada por C. Se as soldaduras forem realizadas muito perto da borda, não há material suficiente para suportar o ponto de soldadura, o que origina cavidades, expulsão de metal e soldaduras fracas e defeituosas.

- **Garganta útil**: Na Fig. 40, a distância **TD** (do inglês "Throat Depth") representa a "garganta útil" da máquina (pinça de soldadura) na qual as peças têm de caber para ser soldadas. Como é óbvio, a distância **Y** representada na Fig. 39-D, deve ser inferior à garganta útil da pinça que efectuar essa soldadura. Devido às perdas que ocorrem neste tipo de máquinas, é importante manter a

garganta útil com um comprimento mínimo, apenas o suficiente para ser superior a **Y** (Fig. 39 -D).

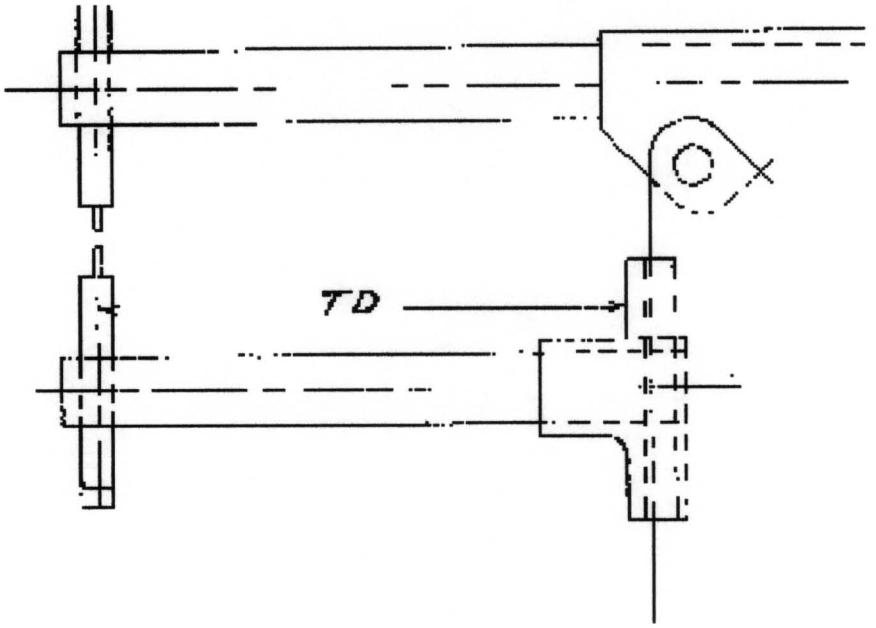


Fig. 40
Garganta útil de uma pinça de soldadura [2]

- **Contacto de sobreposição**: O comprimento mínimo da sobreposição é também o comprimento mínimo do bordo da chapa.

- **Esforço de soldadura**: Geralmente nos bordos das chapas soldadas, há perda da dureza do metal.

- **Escolha do equipamento**: Com o desenho do produto, deve aparecer também uma boa concepção do tipo de equipamento a utilizar, para realizar as soldaduras. Primeiro, há que escolher entre um equipamento portátil ou manual. Se as peças a soldar são pesadas e volumosas, será mais fácil levar a pinça de soldadura ao material, do que o contrário. É o que sucede por exemplo, na Indústria Automóvel. As pinças de soldadura aí utilizadas estão adaptadas para trabalhar em peças de geometria complicada e podem realizar pontos de soldadura em locais de difícil acesso. Estas pinças, encontram-se ligadas ao transformador por cabos eléctricos pesados, têm ainda conectados a si linhas de água e ar, que tornariam o seu manuseamento bastante difícil e pesado para o ser humano, se o seu peso propriamente dito não fosse tão reduzido, permitindo-lhe uma boa performance.

- **Condições da Superfície**: A qualidade do produto final, determinará o tipo de material utilizado. Este material deve estar limpo, liberto de óleos, tinta, colas e mastiques de estanquecidade e de estrutura, aplicadas entre as chapas antes de as soldar e de outras sujidades.

- **Encosto entre chapas**: Quando as chapas são soldadas, estas devem estar bem encostadas, de forma perfeita. Qualquer força requerida para forçar as chapas a encostar, vai interferir na força de soldadura aplicada, resultando em soldaduras fracas, inferiores ou inconsistentes. Torna-se por isso necessário dar uma atenção especial às tolerâncias de fabrico das chapas a soldar. É que, infelizmente, pensa-se que a operação de soldadura pode compensar os erros geométricos das chapas a soldar, o que nem sempre acontece.

1.2.10. Materiais soldáveis por pontos

A Indústria Automóvel, é uma das indústrias que mais utiliza a soldadura eléctrica por resistência por pontos. Um subconjunto de um automóvel, pode ser realizado com dois, três, quatro ou cinco, diferentes tipos de aço, soldados entre si. No entanto, o material que mais se solda por resistência é o aço, não apresentando problemas particulares de soldabilidade, desde que o seu teor de carbono não seja superior a 0,18%. Acima deste teor em carbono, verifica-se um efeito de têmpera, que aumenta com o aumento do teor em carbono. Sempre que este efeito de têmpera acontece, torna-se necessário realizar um pós aquecimento do ponto de soldadura. Alguns dos materiais mais correntemente soldados são os seguintes: [3]

- **Aço Inoxidável**

Fácil de soldar, com baixa potência dado a sua elevada resistividade. Na soldadura por resistência deste material 18-8 não estabilizado, é necessário utilizar tempos de soldadura muito curtos, de forma a evitar a precipitação dos carbonetos nas juntas de grão, com a consequente perda da inoxibilidade do aço.

- **Alumínio-Ligas Leves**

Com este material podem obter-se soldaduras de muito boa qualidade, desde que se utilizem equipamentos de soldadura adequados. Estes metais possuem muito boa condutividade térmica e eléctrica, recobrindo-se de uma camada de óxido refractário que os isola completamente, o que implica que se faça uma decapagem imediatamente antes da soldadura, para se obterem soldaduras de boa qualidade.

Dada a boa condutividade térmica destes materiais, a marca deixada pelos eléctrodos não revela vestígios de aquecimento.

- **Níquel**

O níquel e as suas ligas soldam-se bastante bem mas a sua soldabilidade diminui à medida que o seu teor em enxofre aumenta, dado que quando tal acontece, pode formar-se um eutético debaixo do ponto de fusão o qual pode provocar o aparecimento de fissuras no ponto de soldadura.

Como o óxido de níquel é solúvel a quente no metal e a frio tal não acontece, perto do núcleo de soldadura pode aparecer um abaixamento das propriedades

mecânicas. Para evitar tal oxidação, torna-se necessário utilizar tempos de soldadura muito curtos.

- **Chapa Galvanizada**

O zinco do material a soldar pode-se depositar na superfície dos eléctrodos, combinando-se com o cobre para formar latão, fazendo aumentar a resistência eléctrica entre o eléctrodo e a peça a soldar. Provoca-se assim um aquecimento exagerado do eléctrodo, pelo que se torna importante que este tenha um arrefecimento muito bom.

Desde o início da soldadura com eléctrodos novos o aquecimento local provocado pela sua contaminação, faz com que a ponta do eléctrodo seja esmagada, originando uma diminuição do diâmetro da zona fundida. Por isso é necessário aumentar progressivamente a corrente de soldadura.

Ambos se soldam bastante bem por resistência, mas com tempos de soldadura muito curtos e intensidades de corrente muito elevadas. A intensidade de corrente para soldar o cobre deverá ser superior aquela utilizada para soldar o latão, e as pontas dos eléctrodos deverão ser recobertas de tungsténio ou molibdénio.

1.2.11. Economia do processo

A soldadura por resistência eléctrica por pontos, torna-se um processo bastante económico, uma vez que tem um tempo de operação bastante rápido. As soldaduras individuais são feitas em segundos ou pequenas fracções de segundo, então as taxas de produção são actualmente determinadas pelo tempo requerido para colocar as peças na máquina e o remover após completar a soldadura.

As economias deste processo, são também notáveis na conservação do material de soldadura, uma vez que os meios que utiliza são bastante duráveis. Por outro lado, o facto de não utilizar qualquer tipo de material estranho às chapas a soldar, também contribui para que se torne um processo menos dispendioso que outros processos de soldadura. Além disto, não necessita grande dispêndio para corrigir a superfície após esta ser soldada, uma vez que sob condições normais, os pontos terminados não necessitam grandes operações de acabamento. Uma das grandes vantagens deste tipo de soldadura, em relação a outras formas, é a eliminação de fios, fluxos ou outros materiais de adição.

Geralmente, o propósito de utilizar a soldadura por resistência, é obter uma elevada qualidade do produto com meios económicos de produção. O custo das operações necessárias para preparar as peças a soldar, como a limpeza da superfície, por exemplo, são sensivelmente iguais aos de outros processos de junção. O tipo de acabamento desejado pode influenciar a escolha do método a utilizar. Um projectista bem informado acerca do processo de soldadura por resistência, usará os seus conhecimentos para responder às mais diversas situações que possam surgir. Não pode esquecer as condições do local, bem como os requerimentos específicos do produto.

1.2.12. Qualidade de um ponto de soldadura

A qualidade de uma soldadura por resistência depende essencialmente, da qualidade de aspecto e da qualidade física do ponto de soldadura. Actualmente, sob certas condições, já é possível produzir soldadura por pontos, sem vestígio de marcas. O produto final não apresenta sinais de soldadura. No entanto, para conseguir tal feito, torna-se por vezes necessário polir as zonas soldadas, não só na soldadura, mas também na superfície onde a soldadura foi realizada.

Par se conseguir uma boa soldadura, as variáveis de soldadura devem ser mantidas, bem como os parâmetros de soldadura, sendo estes de fundamental importância na qualidade do ponto.

Isto significa supervisão estrita, melhores máquinas, ferramentas e controlos. Não é necessário realizar soldaduras invisíveis senão nas partes de acabamento altamente visível ou utilizáveis. No entanto, não é necessário realizar soldaduras invisíveis, a não ser que se trate de zonas de acabamento elevado. Se os pontos de soldadura se encontrarem espaçados uniformemente, eles terão a aparência de rebites e não parecerão bossas na superfície.

O controlo das soldaduras pode fazer-se através de um exame visual, mas este não é suficiente para garantir a qualidade do ponto. Torna-se necessário recorrer a outros métodos, sendo os ensaios destrutivos aqueles que mais correctamente podem avaliar qual o estado ou resistência de uma dada junta. Estes ensaios podem ser de tracção, torção ou de simples arrancamento.

Estes ensaios têm no entanto a desvantagem de ser destrutivos, o que apenas permite que o controlo seja feito estatisticamente, num reduzido número de soldaduras. O controlo não destrutivo após a soldadura apresenta várias dificuldades, não sendo praticamente utilizado, embora a radiografia e os ultra-sons tenham já sido utilizados, estes são processos de controlo manifestamente não adequados para este tipo de soldadura.

Conclui-se que até hoje, não foi ainda descoberto um processo de controlo não destrutivo da soldadura por resistência, suficientemente fiável e universal, capaz de suscitar uma vasta utilização.

Um factor importante, é o desenho das várias partes do produto, que vai assegurar não só a facilidade de fazer boas soldaduras, mas vem também tornar possível obter a maior rapidez e a melhor qualidade, das máquinas de soldadura utilizadas. Por outro lado, um mau desenho pode tornar uma soldadura impossível de realizar sob um mínimo de satisfação.

A Norma NFA 89 240 determina a classificação dos defeitos com comentários explicativos (ver Anexo 1).

Alguns defeitos de soldadura são:

- Ponto "craché" ou "spatter" : presença de uma projecção de metal líquido durante a soldadura entre o metal e o eléctrodo. Acontece desde que a intensidade seja demasiado elevada ou se o contacto eléctrodo-peça não é correcto.

- Fissura: na zona de contacto eléctrodo-material que se produz durante o arrefecimento do ponto de soldadura. Aparecem geralmente no limite superior do domínio de soldabilidade; a intensidade é demasiado elevada. Estas fissuras não são aceitáveis e constituem o critério principal para a determinação do limite superior do domínio de soldabilidade.

- Identação: marca deixada pelos eléctrodos na superfície dos materiais. Esta penetração dos eléctrodos no metal depende da dureza do material a quente e a frio.

Apesar da sua grande aplicação comercial, o tamanho adequado do nó, continua a ser o primeiro indicador de qualificação do processo de soldadura. O tamanho do nó convencionalmente estimados, utilizando um número de testes destrutivos e recentemente utilizando técnicas mais sofisticadas, como análises ultra-sónicas e de resistividade dinâmica. Embora se acredite que frequentemente o tamanho do nó esteja directamente relacionado com os diferentes parâmetros do processo. [4]

Vários sensores diferentes têm sido utilizados para avaliar a qualidade de soldaduras por resistência eléctrica por pontos. No entanto, nenhum deles teve aplicação universal. Os mais usuais são a tensão de soldadura, a corrente de soldadura, a resistência dinâmica e o deslocamento dos eléctrodos, mas a surgiram vários problemas na obtenção dos sinais de resposta que sofriam influência eléctrica elevada proveniente do próprio processo. [10]

Mesmo sendo um dos processos mais limpos e mais eficientes de soldar chapas de aço, tem a grande desvantagem de os ensaios não destrutivos feitos à junta não serem seguros. Quanto aos ensaios destrutivos apenas são feitos com frequências alargadas e podem perder grande parte das soldaduras defeituosas.

Uma das técnicas simples mais recentes de inspeccionar a soldadura é medir a tensão entre as pontas dos eléctrodos. Se a corrente de soldadura for aproximadamente constante, a tensão será proporcional ao calor gerado entre as pontas dos eléctrodos. Mas infelizmente, a corrente não é constante devido à alteração da resistência da área soldada.

Além disso, sabe-se de estudos realizados, que quando se solda aço galvanizado, grande parte das variações da resistência durante a soldadura, ocorrem na interface eléctrodo-chapa e não na superfície de união. Então pelo menos no aço galvanizado, as variações da tensão de soldadura para soldadura, devem ser interpretadas mais devido ao desgaste do eléctrodo, do que à geração de calor na superfície de união, onde se formará o nó, o que poderá levar a cometer erros de interpretação. [10]

Podem obter-se resultados mais satisfatórios medindo o deslocamento dos eléctrodos durante uma soldadura. A quantidade da expansão térmica, fusão e expulsão podem ser

correlacionados com o declive e magnitude da curva de deslocamento. O controlo da qualidade através deste método foi utilizado durante algum tempo, no entanto os utilizadores consideram-no aplicável apenas às prensas de soldadura e não às pinças móveis. [10]

As elevadas correntes necessárias à realização das soldaduras provocam ruídos eléctricos radioactivos e indutivos, que podem afectar facilmente os sinais eléctricos a ser medidos. Felizmente, se forem compreendidos os princípios da geração dos ruídos, a sua interferência pode ser minimizada.

Com os instrumentos adequados e a redução dos ruídos, pode obter-se informação relevante para o controlo da qualidade. A resistência eléctrica dinâmica e as curvas do deslocamento necessário dão-nos informação significativa quanto à formação do nó e ao seu crescimento. Pode obter-se mais informação sobre a soldadura por resistência por pontos, utilizando sensores múltiplos do que apenas um sensor. Estas técnicas serão necessárias futuramente, se se quiser ter um processo de controlo da qualidade mais real e eficaz. [10]

Não existem grandes sistemas aceitáveis de controlo ou visualização para o processo de soldadura por pontos na linha de produção. Apesar de podermos medir e controlar a pressão aplicada ao cilindro, o fluxo de água de refrigeração e a corrente de soldadura, as soldaduras defeituosas continuam a ocorrer.

Na indústria automóvel, têm sido feitos vários esforços para assegurar a qualidade das soldaduras, através da inspecção manual, mas é desejável um método que permita o controlo em linha, durante a produção.

Outra forma de determinar a qualidade das soldaduras por pontos é destruir o ponto de soldadura por tensão ou torque e medir o diâmetro do ponto do nó resultante.

A estrutura metalúrgica do ponto só pode ser observada após um ataque químico da superfície após polimento, podendo ver a forma, a penetração do ponto e a sua qualidade interna (presença ou não de fissuras e porosidades).

1.2.13. Controlo da soldadura por pontos

O ciclo simples da soldadura por pontos consiste em:

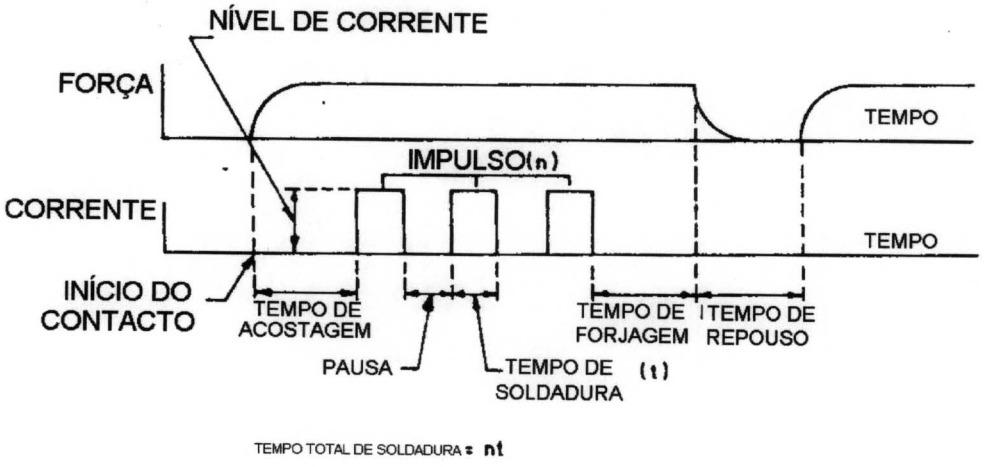


Fig. 41
Ciclo da soldadura por pontos [4]

- Acostagem: É o tempo entre o instante em que se pressiona o botão de inicio de soldadura e a aplicação da corrente de soldadura. Ele fornece o tempo para a válvula operar e o cilindro de pneumático (ou hidráulico) trazer o eléctrodo ao contacto com as peças e desenvolver força suficiente para a soldadura.

- Soldadura: Determina o tempo de soldadura ou comprimento do tempo durante o qual a corrente flui.

- Forjagem: Após a corrente cortada, os eléctrodos devem continuar nas peças sob pressão suficiente até que o metal soldado solidifique.

- Repouso: Num tempo automático de repetição, este é o tempo de intervalo desde o fim do tempo de forjagem até ao princípio do tempo de acostagem.

Todos estes elementos de tempo são expressos em ciclos, significando o número de ciclos num sistema de 60-ciclos, onde um ciclo é 1/60 segundos. Em muitos temporizadores modernos cada uma destas funções é ajustável independentemente, então a soma das quatro saídas dividida por 60 dá-nos o tempo em segundos por um ciclo por operação. [11]

Há muitas variações e refinamentos na sequência anterior. O tempo acostagem é inicialmente o mesmo em todos os casos. O tempo de soldadura no entanto, tem várias variações.

O tempo de acostagem óptimo e particularmente o tempo de forjagem podem ser determinados e controlados durante longos períodos de tempo. É aceitável que a

corrente de soldadura não deve ser iniciada antes de 90% da força de compressão necessária ser fornecida. Dos casos práticos sabe-se que a soldadura começa frequentemente demasiado cedo ou demasiado tarde. [12]

Uma estimativa mostra que uma redução rigorosa do tempo de forjagem até ao seu mínimo, resulta em ganhos de tempo de cerca de 5 minutos na produção da carroçaria de um veículo, trazendo benefícios económicos significativos. [12]

Por outro lado, tem-se observado que a soldadura começa sem que exista suficiente força de compressão, o que provoca um aumento de expulsões de material (spatters). Apesar de serem consideradas soldaduras de força mecânica suficiente, exibem diâmetros do ponto menores do que as soldaduras produzidas directamente abaixo do chamado "spatter limit". As expulsões de material devem ser minimizadas. Neste caso um alargamento do tempo de acostagem é necessário. Quanto ao tempo de forjagem, ele é necessário para o nó solidificar, prevenindo a formação de bolhas e micro-fissuras. [12]

1.3. Conclusão do capítulo 1

Nesta primeira parte, foi aboradado de forma geral, o processo de soldadura por resistência eléctrica e particularmente a soldadura por pontos.

Explicou-se a sua forma de execução, vantagens e inconvenientes, as condições necessárias à sua realização e sobretudo, os vários parâmetros que intervêm no processo, desde os parâmetros de soldadura propriamente ditos, à importância dos meios que permitem a sua execução.

Finalmente, foi focado o aspecto da qualidade de um ponto de soldadura, formas de inspecção e níveis de aceitação.

CAPÍTULO 2

IDENTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

2.1. AÇOS

Os aços comuns, além do carbono que é o principal elemento de liga, apresentam manganés, sílicio, fosforo e enxofre como elementos sempre presentes, em função das matérias-primas que foram utilizadas na fabricação do ferro gusa e do aço.

O carbono é o responsável directo pela dureza do material, no estado recozido e normalizado e pela sua temperabilidade. Sem o carbono, o ferro não pode ser endurecido pela têmpera, pois não haverá formação da martensita. É o carbono que determina a estrutura e as propriedades mecânicas do aço nos estados recozido e normalizado, ao mesmo tempo que a sua presença, em maior ou menor quantidade, torna o aço mais ou menos temperável ou endurecível.

O aço em contacto com outros metais, oxida rapidamente, formando uma camada de impurezas na superfície. Estes óxidos não condutores de electricidade, interferindo desta forma nas operações de soldadura por resistência eléctrica. [2]

Quando os stocks de peças têm uma quantidade significativa de óleo, os hidrocarbonetos evaporam, deixando depósitos de carbono não apenas nas interfaces, mas também nas superfícies dos eléctrodos. Em condições extremas, isto pode provocar um aumento de carbono na soldadura, podendo enfraquecê-la. O depósito de carbono nos eléctrodos, aumenta a resistência de contacto e consequentemente a temperatura nos eléctrodos, encurtando a sua vida. [2]

As propriedades dos aços dependem, basicamente, de dois factores:

- Composição química.
- Estrutura.

2.1.1. Composição química

O sílicio é o elemento essencialmente desoxidante, pois neutraliza a acção de formação de CO ou CO_2, por ocasião da fusão e solidificação dos aços.

O manganés actua como desoxidante do mesmo modo que o sílicio e como dessulfurante, ao combinar-se com o enxofre, formando um sulfeto de manganés, eliminando o problema da fragilidade a quente que pode ocorrer na presença do FeS.

O fósforo e o enxofre, são geralmente considerados nocivos, de modo que as especificações, a não ser em casos especiais, procuram fixar os teores desses elementos em valores baixos.

Levando a determinação da composição química dos aços a uma maior precisão, outros elementos podem ser encontrados, como o alumínio, zinco e os gases oxigénio, nitrogénio e hidrogénio, presentes devido aos processos de fabricação. Normalmente, esses elementos, pouco afectam as propriedades do aço.

2.1.2. Estrutura dos aços

Quanto à estrutura, ela, por sua vez, é influenciada pelos seguintes factores:

- Composição química.
- Tratamento térmico.
- Tratamento mecânico.

A composição química determina, em função do teor de carbono, se o aço é hipoeutectóide, eutectóide ou hipereutectóide.

O tratamento térmico influi sob dois aspectos:

- temperatura e tempo de aquecimento.
- velocidade de arrefecimento.

O tratamento mecânico relaciona-se com as deformações do material, se a quente ou frio.

Sabe-se que a deformação a quente dos metais tende a eliminar algumas imperfeições, defeitos ou heterogeneidades, como bolhas, vazios, estrutura dendrítica etc., o que, em última análise, produz uma estrutura granular mais homogénea, com reflexos positivos nas propriedades mecânicas.

O material utilizado nos ensaios de soldadura, é obtido por laminagem, que pode ser a quente ou a frio.

A laminagem a quente efectua-se quando o metal está quente, visto que se consegue maiores reduções de espessura em cada um dos passos de laminagem. Antes da laminagem a quente, os lingotes para chapa são pré-aquecidos a temperaturas elevadas e depois laminados a quente num trem de laminagem.

A laminagem a frio é efectuada à temperatura ambiente numa série de trens de laminagem.

2.1.3. Efeito dos elementos de liga nos aços

De um modo geral, ao introduzir-se elementos de liga nos aços visam-se os seguintes objectivos:

- alterar as propriedades mecânicas;
- aumentar a maquinibilidade;
- aumentar a temperabilidade;
- conferir dureza a quente a quente;
- aumentar a capacidade de corte;
- conferir resistência ao desgaste;
- conferir resistência à corrosão;
- conferir resistência à oxidação;
- modificar as características eléctricas e magnéticas.

Os elementos de liga são introduzidos em teores muito variados, a não ser nos casos em que se desjam características especiais, como a dureza a quente, a inoxibilidade, refratariedade, etc. A tendância moderna é adicionar vários elementos de liga simultaneamente, em teores baixos e médios.

2.1.4. Aços para chapas

As chapas são materiais que exigem:

- elevada deformabilidade ou ductilidade, ainda com prejuízo da resistência mecânica;
- soldabilidade adequada;
- superfície sem defeitos;
- baixo custo.

A expressão "chapa" compreende uma série de produtos, todos importantes na indústria:

- Folha - produto plano com espessura inferior a 0,30mm e qualquer largura.
- Tira - produto plano com espessura compreendida entre 0.30 e 5.0 mm.
- Chapa fina - produto plano com espessura compreendida entre 0.30 e 6.0 mm e largura idual ou superior a 300 mm.

- Barra chata - produto plano com espessura superior a 530 mm e largura inferior a 300 mm.

- Chapa grossa - produto plano com espessura superior a 5.0 mm e largura igual ou supeior a 300 mm.

Deve-se distinguir, ainda, dois tipos de produtos planos de aço, de acordo com o revestimento protector superficial:

- chapas galvanizadas, quando recobertas de zinco.

- folhas de flandres, quando recobertas de estanho.

As chapas galvanizadas são classificadas em:

- chapas galvanizadas numa face.

- chapas galvanizadas nas duas faces: neste caso, salvo especificação en contrário, as duas faces têm um revestimento de espessura sensívelmente igual. O revestimento é designado pela letra G, seguido de um grupo de números, indicando a espessura mínima do revestimento sobre cada uma das faces. Ex: G10/10, significa revestimento galvanizado sobre as duas faces com uma espessura mínima de 10 microns.

As chapas revestidas por zinco, são muito utilizadas na construção automóvel, quer seja por galvanização quer por electrozincagem. No entanto colocam grandes problemas à soldadura por resistência. Necessitam uma modificação dos parâmetros de soldadura, relativamente ao aço nu, caracterizando-se por uma degradação mais rápida dos eléctrodos com um enorme risco de obter pontos defeituosos e um aumento dos custos de produção.

As características físicas do zinco, a sua resistividade ($6\mu\Omega/cm^2$) e sobretudo a sua temperatura de fusão (±420ºC) muito baixa comparativamente com a do aço, vão modificar consideravelmente a formação de um ponto de soldadura. Com efeito, a fusão do revestimento de zinco, aumenta a secção de passagem da corrente, sobretudo nos casos onde as chapas são revestidas em ambas as faces. [6]

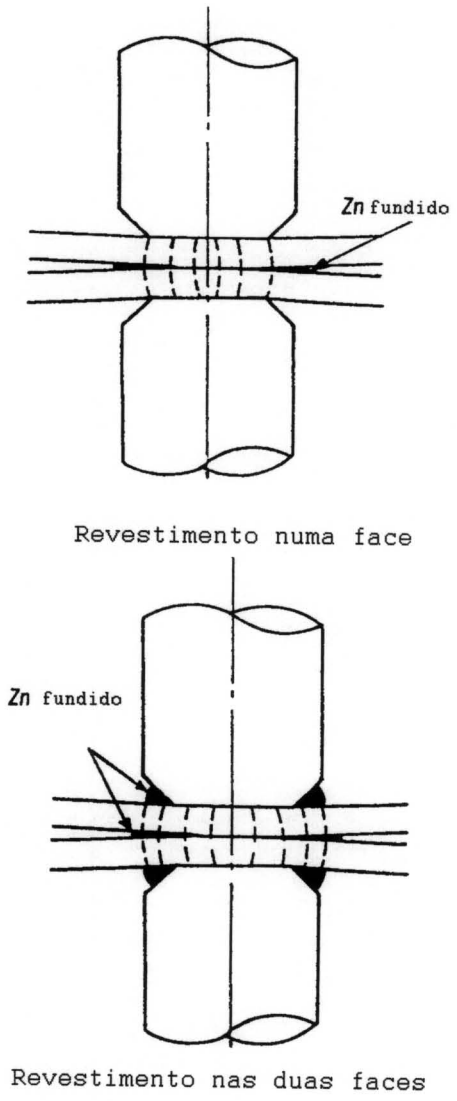


Fig. 42
Secção de passagem da corrente pelo revestimento [6]

Os fenómenos induzidos pelo zinco (Fig. 42), necessitam uma adaptação dos parâmetros de soldadura utilizados em chapas nuas, aumento ligeiro do esforço para limitar o aquecimento à interface eléctrodo-chapa, aumento do tempo de soldadura e sobretudo da intensidade.

Esta modificação da intensidade de soldadura, é acompanhada por uma aproximação dos valores limites das intensidades. Estes valores são definidos quer pelo "campo de soldabilidade", quer pelo "domínio de soldabilidade".

O "campo de soldabilidade" corresponde ao leque de intensidades limitado por um valor mínimo convencional associado a um diâmetro mínimo de ponto e por um valor máximo caracterizado pela aparição da projecção. O "domínio de soldabilidade" toma os mesmos critérios mas integra um parâmetro suplementar variável (esforço ou tempo de soldadura) além da intensidade.

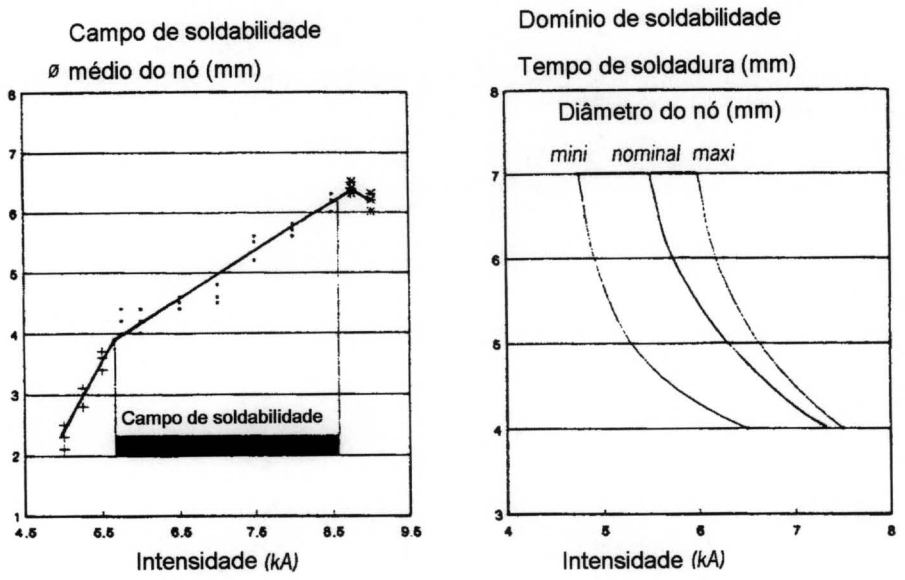


Fig. 43
Campo e domínio de soldabilidade

A temperatura de fusão do zinco (418ºC) não é suficiente para evitar totalmente a sua fusão sobre a face em contacto com o eléctrodo.

Com efeito, a temperatura da face activa ultrapassa bastantes vezes os 500ºC embora este valor seja relativo dependendo de inúmeros factores como o esforço a eficácia de refrigeração, etc.

Relativamente à influência do zinco na formação do ponto observam-se dois fenómenos distintos:

- Numa 1ª fase, sobretudo nos eléctrodos novos, o zinco adere sob a forma de uma película (zinco ou óxido de zinco) modificando desta forma, as resistências de contacto chapa-eléctrodo, tendo como consequência a alteração dos parâmetros de soldadura e os riscos de colagem do eléctrodo.

- Seguidamente, o zinco difundido pouco a pouco na liga de cobre dos eléctrodos (formando-se latão) modifica as características eléctricas, (pelo aumento de resistividade) e mecânicas (aumento da dureza) da sua extremidade. Estas modificações das características aumentam a velocidade de degradação do eléctrodo.

Na fabricação de chapas, deve-se evitar os defeitos superficiais conhecidos por "linhas de Luder" ou "linhas de distensão" e "casca de laranja".

O primeiro defeito, caracterizado pelo aparecimento de tiras alongadas, ocorre quando o aço é laminado pouco acima da carga correspondente ao limite de escoamento, condição essa que deve, portanto, ser evitada, porque se o fenômeno não afecta as propriedades mecânicas do material, este apresenta-se com um mau aspecto superficial, o qual não pode ser disfarçado nem pela aplicação de pintura.

A "casca de laranja" corresponde a uma superfície grosseira e rugosa que aparece após a estampagem; o defeito é causado por granulação grosseira do material que vai ser estampado. Assim sendo, para chapas que vão ser submetidas a estampagem profunda, recomenda-se tamanho de grão intermediário, devendo-se por outro lado, evitar granulação muito fina que pode prejudicar a qualidade de estampagem do aço.

2.2. Características do material utilizado

O material utilizado nos provetes de ensaio, apresenta várias características entre as quais:

- Boa aptidão à estampagem.
- Boa soldabilidade.
- Boa aderência com mastics de estanquecidade e estruturais.
- Boa aderência com tintas.

As tiras de aço utilizadas para a realização dos provetes de ensaio, têm a seguinte composição química:

Designação	% C (max)	% Mn (max)	% Si (max)	% P (max)	% S (max)	% Al	% Fe
Aço Laminado	0,10	0,50	0,10	0,045	0,050	0,020	99,19

Foram utilizadas chapas sem qualquer revestimento e também chapas galvanizadas de ambos os lados, cujo revestimento se carateriza por ser homogéneo e não apresentar descontinuidades tendo a seguinte composição química:

Designação	% Fe (max)	% Pb (max)	% Sb (max)	% Al (max)	% Zn
Revestimento	0,70	0,025	0,025	0,50	98,75

2.3. Equipamento

2.3.1 - Pinças de Soldadura Eléctrica

As máquinas de soldar por pontos podem classificar-se em dois grandes grupos:

- máquinas fixas: nas quais são as peças a soldar, que vão ao encontro da máquina.
- máquinas móveis: em que as peças se encontram fixas em maquetes.

As máquinas de soldar podem também caracterizar-se e distinguir-se:

- pelo sistema de aplicar pressão aos eléctrodos;
- pelo tipo de alimentação eléctrica: monofásica ou trifásica;
- pela disposição do circuito eléctrico de soldadura;
- pela corrente de soldadura: alternada, baixa frequência, contínua ou rectificada;
- pela cadência de soldadura: ponto por ponto, repetição automática, pequena ou grande cadência.

As partes principais de uma máquina de soldar por pontos são:

- um armário de comando;
- o transformador destinado a fornecer a corrente de soldadura;
- o circuito secundário exterior destinado a conduzir a corrente de soldadura desde o transformador aos braços, aos porta-eléctrodos e eléctrodos em contacto com as peças a soldar;
- os braços, os porta-eléctrodos e eléctrodos;
- um sistema para dar movimento e pressão aos eléctrodos, destinado a fornecer o esforço de compressão localizado sobre as peças a soldar;
- um sistema de refrigeração dos órgãos sujeitos a aquecimento, durante a passagem da corrente;
- um equipamento eléctrico e possivelmente electrónico, que deve cumprir as seguintes funções:
    - conectar e cortar a corrente de soldadura;

* contar o tempo de soldadura, os tempos de acostagem, de forjagem, de intervalo etc;

* regular as correntes de soldadura, de pré-aquecimento e de arrefecimento;

* assegurar a automatização parcial ou total da operação de soldadura.

Relativamente ao transformador , este pode estar na própria pinça ou à distância. Os transformadores suspensos, normalmente têm uma tensão secundária máxima, relativamente a uma máquina fixa de soldar por pontos, para compensar as perdas nos cabos de conexão da pinça.

O corte da corrente deve realizar-se por um contactor. Este pode ser de tipo mecânico e comando electromagnético com sopro reforçado ou de tipo electrónico [1].

A electroválvula é um dos acessórios que se encontra sempre num conjunto transformador-pinça de soldadura. Esta válvula accionada electricamente, assegura a chegada do ar ao pistão da pinça, no caso de uma pinça pneumática ou ao elevador de pressão, no caso de uma pinça hidráulica.

O contactor de pressão, controla a pressão do ar comprimido no cilindro e impede que a soldadura comece antes da pressão para a qual foi regulada. Assegura desta forma, um esforço de forjamento sempre constante nos eléctrodos.

A rede de distribuição de água de refrigeração permite regular independentemente o caudal de água de cada circuito. Normalmente existe um circuito de refrigeração para:

- um dos cabos secundários (o braço superior e o eléctrodo superior da pinça);

- o segundo cabo (o braço inferior e o eléctrodo inferior da pinça);

- o transformador.

No caso das pinças hidráulicas, utiliza-se um elevador de pressão. Estas pinças justificam-se quando os esforços de soldadura transmitidos aos eléctrodos são elevados, pois nestes casos, a utilização de um cilindro pneumático, resultaria numa pinça muito volumosa e pouco manejável.

É então preferível accionar as pinças por um cilindro hidráulico, já que as pressões hidráulicas podem ser 10 vezes superiores às pneumáticas.

Para compensar o peso da pinça, que pode pesar mais de uma centena de quilos, utilizam-se equilibradores. Podem ser simples ou duplos, conforme o transformador esteja conectado a uma ou a duas pinças de soldadura.

Os cabos secundários de conexão da pinça de soldadura ao transformador, são arrefecidos pela circulação de água. Uma pinça de soldadura propriamente dita, compreende:

a) os eléctrodos, que fixos às extremidades dos braços transmitem o esforço de soldadura às peças a soldar. São de cobre ligado e são refrigerados pela circulação de água;

b) os braços superior e inferior. Estes braços também são arrefecidos. Têm uma secção determinada pelo esforço de soldadura aplicado aos eléctrodos;

c) um cilindro que pode ser pneumático ou hidráulico;

d) um botão de comando inserido num punho de manobra. O ciclo de soldadura inicia-se accionando este botão, que pode tomar a forma de gatilho;

e) um dispositivo que permite a suspensão da pinça ao equilibrador.

Uma das características mais importantes das pinças de soldadura é o esforço que permitem exercer. Um esforço elevado assegura uma soldadura de boa qualidade e evita projecções de material fundido durante a soldadura.

Deve ter-se em conta que:

- uma regulação dos parâmetros de soldadura estabelecida para uma posição de braços determinada, pode não ser válida se se modifica tal posição;
- interessa sempre utilizar máquinas com braços curtos e com a menor separação possível entre eles;
- o facto de soldar peças maciças que se introduzem entre os braços da máquina podem afectar a sua regulação.

Relativamente à geometria dos braços, as pinças mais comuns são em "C" (Fig. 44) ou em "Tesoura" (Fig. 45), podendo também ser articuladas através de uma combinação mista das duas versões.

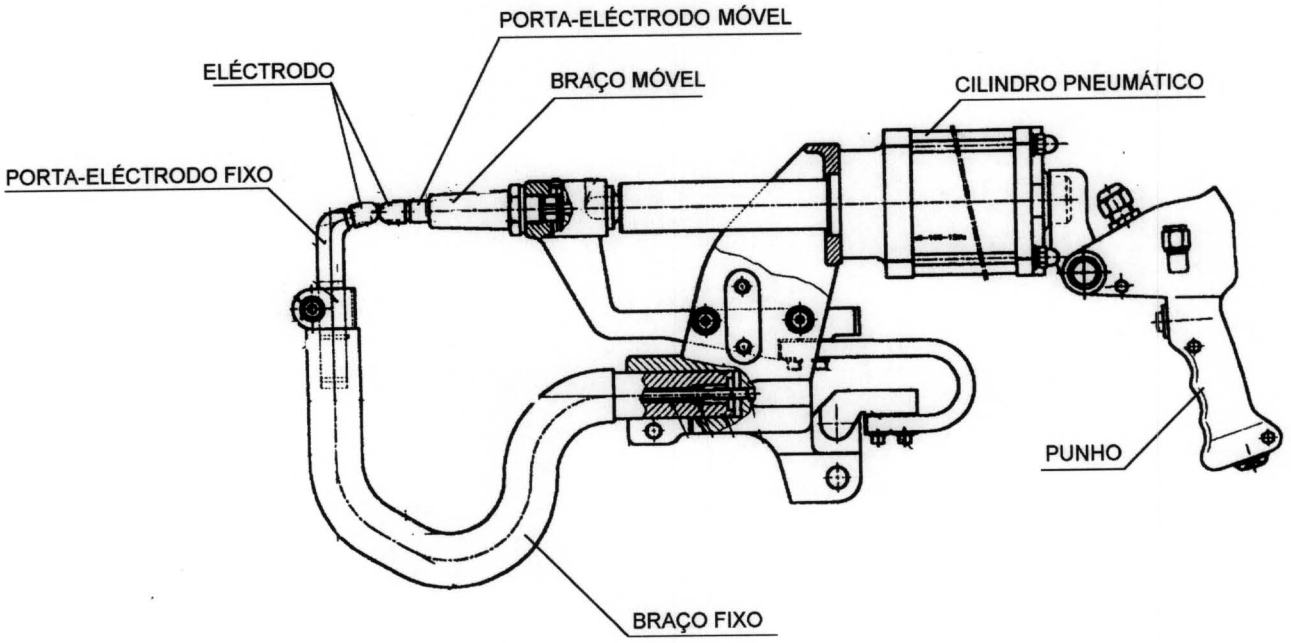


Fig. 44
Pinça de soldadura em C

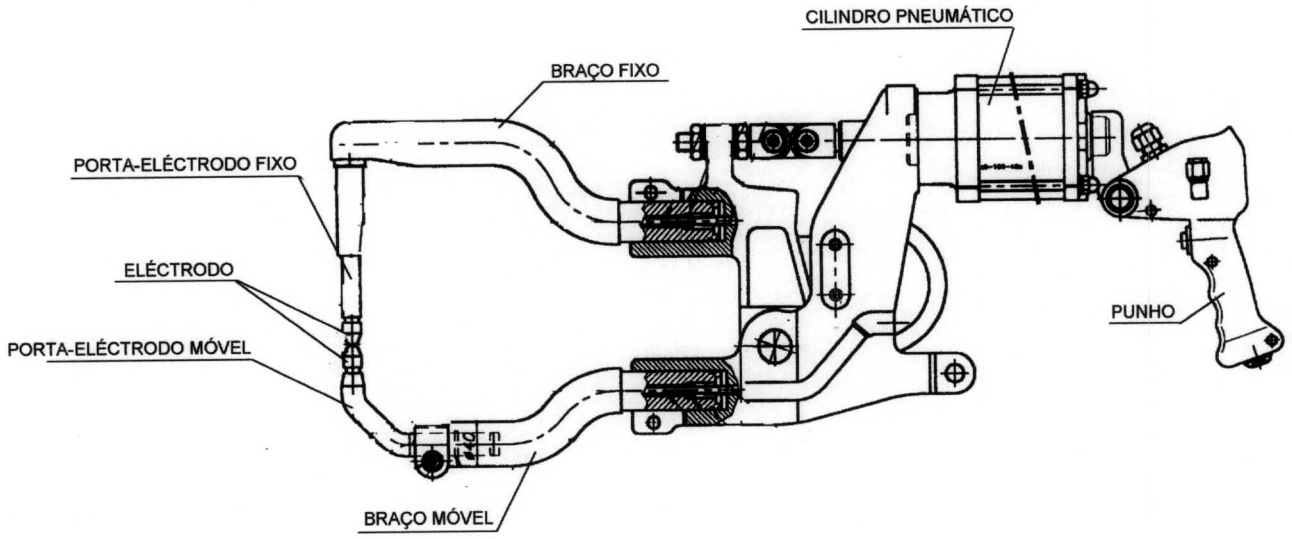


Fig. 45
Pinça de soldadura em tesoura

2.3.2. Características da pinça de soldadura utilizada

- Pinça

Pinça móvel, com transformador incorporado.

Marca: ARO

Geometria: X

Tipo: XM 53 12A 20 3P 2

Potência: 53 KVA – 50%

Eléctrodos standard P 911 310 206

Porta-eléctrodos standard: P 911 040 070 e P 911 040 069

Esforço de soldadura máximo: 320 daN a 5,5 bar

Corrente máxima de soldadura: 18 000 A

Corrente máxima de curto-circuito: 22 600 A

Pequena abertura: 20 mm

Grande abertura: 93 mm

Massa total da pinça: 82 Kg

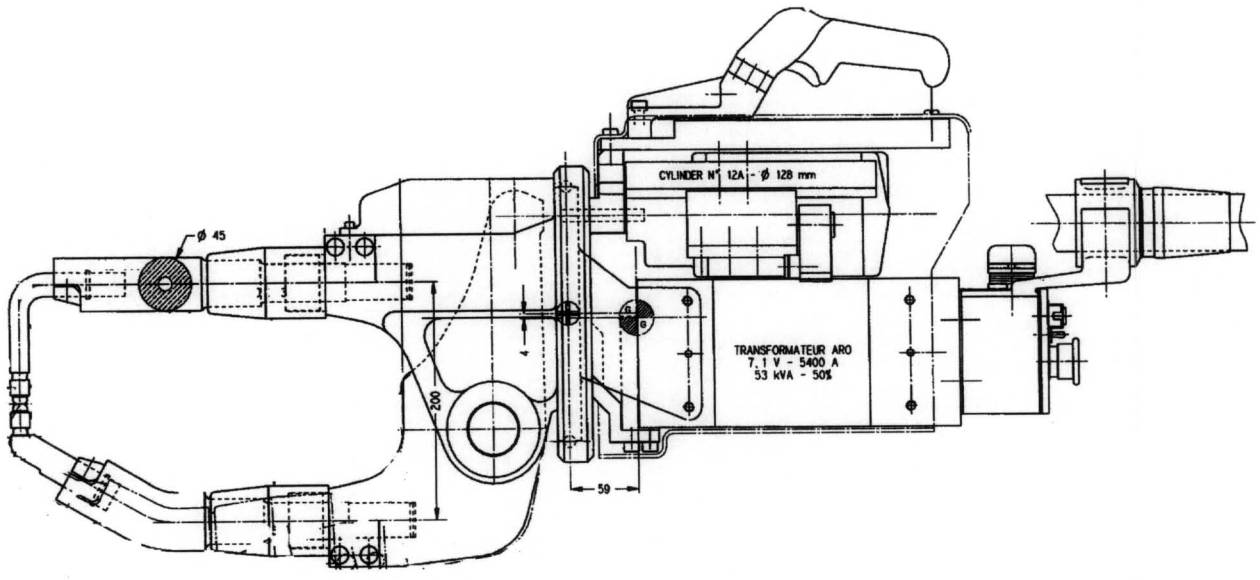


Fig. 46
Pinça de soldadura utilizada na realização dos ensaios

2.4 – Conclusão do Capítulo 2

Neste capítulo, abordaram-se sumariamente os aços em geral, bem como a influência do revestimento à base de zinco no processo de soldadura.

Fez-se também um breve resumo dos principais componentes do sistema transformador-pinça de soldadura, tendo sido apresentadas as características da pinça de soldadura utilizada na realização dos provetes de ensaio.

CAPÍTULO 3

DEFINIÇÃO DO PLANO DE EXPERIÊNCIAS

3.1 – Procedimento experimental

Foram realizados pontos de soldadura por resistência eléctrica, um em cada provete, como mostra a figura, num total de 32 provetes.

Os provetes são constituidos por uma juntaentre duas chapas de aço com espessuras de 0,67 mm e 1,17 mm sobrepostas 25 mm, nos quais se realiza um único ponto de soldadura.

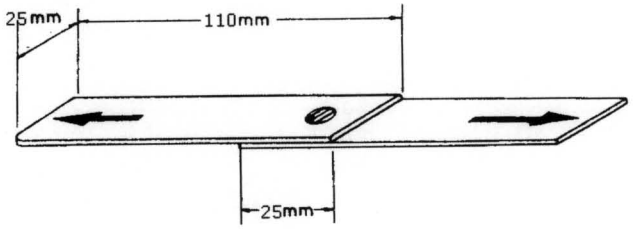


Fig. 47
Esquema de montagem dos provetes utilizados

No caso de uma ruptura no plano da soldadura, o seu diâmetro, é o diâmetro médio da zona fundida. No caso de ruptura por descolamento, é o diâmetro médio do ponto descolado.

Após o planeamento das experiências, que é abordado a seguir no ponto 3.2 e da realização dos pontos de soldadura, foram realizados ensaios de tracção por corte à totalidade dos provetes.

O ensaio de tracção tem por objectivo determinar a força máxima de ruptura que podem suportar os provetes. Foram ainda medidos os diâmetros dos pontos de soldadura resultantes.

3.2. Planeamento das experiências

No planeamento das experiências recorreu-se ao Método de Taguchi, que permitiu estudar seis factores (variáveis) do processo de soldadura com dois níveis para cada um desses factores, entendendo-se por níveis os valores tomados pelos factores. O Método de Taguchi permite reduzir o número de ensaios a realizar, recorrendo a uma biblioteca de matrizes ortogonais pré-estabelecidas, sem grande perda de informação, além de quantificar as interações entre factores. [13].
A técnica de Taguchi, tem grandes vantagens quando se pretende estudar o comportamento de um processo de fabrico, máquina ou material, em que entram em jogo vários factores, como neste caso, permitindo reduzir o número de ensaios a executar e

calcular as interações entre factores. Além disso, como as experiências são efectuadas de um modo planeado, os dados obtidos são mais fáceis de tratar e interpretar. Consegue-se deste modo fazer uma análise sistemática dos efeitos dos factores em estudo de um modo mais eficaz e económico.

A selecção dos factores a estudar foi feita com base no conhecimento comum sobre os parâmetros que mais influenciam a formação de um ponto de soldadura e também por forma a ir de encontro aos objectivos do trabalho, no que diz respeito à influência das chapas galvanizadas e aos factores esforço de compressão e intensidade de soldadura.

Os valores escolhidos para os factores, diferem bastante dos valores tabelados por Normas de soldadura (Anexo 2) para as mesmas características das chapas. São ainda diferentes dos valores teóricos determinados pelo programa informático "SERGIS", como se pode ver no Anexo 3. Este programa é propriedade da Grupo PSA e significa "Sistema de Estudo e de Realização de Gamas Informatizadas de Soldadura". O SERGIS permite-nos constituir gamas de soldadura, calcular os seus parâmetros , os circuitos secundários das máquinas de soldadura, bem como definir quadros de consumo de fluidos e seguir a evolução dos parâmetros após a instalação do meio no local.

Quanto à selecção do número de níveis para os factores, foram utilizados dois níveis, para minimizar a dimensão inicial do plano de experiências, apresentando desta forma, um menor número de graus de liberdade. Este plano de experiências inicial, com muitos factores todos a dois níveis, permitirá eliminar muitos dos factores em estudo e os mais importantes poderão ser investigados com níveis superiores a dois, sem causar um aumento excessivo da dimensão do plano de experiências. A selecção da matriz ortogonal de Taguchi é função do número total de graus de liberdade necessários para comportar os factores e o número de níveis. [13]

Na tabela 3, estão indicados os factores a estudar e a atribuição dos respectivos níveis.

	FACTORES					
	diâm. ponta electrodo	esforço de compressão	intensidade da corrente	tempo de soldadura	revestimento da chapa	espessura da chapa
nivel	d [mm]	F [daN]	I [A]	t [~]	R	e [mm]
1	6	160	8000	10	sem	0,67
2	8	230	11000	16	G10/10	1,17

Tab. 3
Atribuição dos níveis aos factores

Neste trabalho estudaram-se os efeitos principais dos factores, bem como as interações entre si. O plano de experiências foi constituido por 32 ensaios em que a 1ª coluna foi atribuída ao diâmetro da ponta do eléctrodo, a 2ª coluna, ao esforço de soldadura, a 4ª coluna, à intensidade da corrente, a 8ª coluna, ao tempo de soldadura e a 15ª e 16ª colunas, ao revestimento e espessura da chapa, respectivamente.
As respostas a estudar, são a força de ruptura do ponto de soldadura e o diâmetro do ponto de soldadura resultante.

A matriz seleccionada foi a L_{32} (2^{31}) tem 32 linhas que correspondem ao número de ensaios (31 graus de liberdade), com todas as colunas a dois níveis, como mostra a tabela 4:

L_{32} (2^{31})

Nº	1	2 3	4 5	6 7	8 9	10 11	12 13	14 15	16 17	18 19	20 21	22 23	24 25	26 27	28 29	30 31
1	1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1
2	1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2
3	1	1 1	1 1	1 1	2 2	2 2	2 2	2 2	1 1	1 1	1 1	1 1	2 2	2 2	2 2	2 2
4	1	1 1	1 1	1 1	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	1 1	1 1	1 1	1 1
5	1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2
6	1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1
7	1	1 1	2 2	2 2	2 2	2 2	1 1	1 1	1 1	1 1	2 2	2 2	2 2	2 2	1 1	1 1
8	1	1 1	2 2	2 2	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1	1 1	1 1	2 2	2 2
9	1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2
10	1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1
11	1	2 2	1 1	2 2	2 2	1 1	2 2	1 1	1 1	2 2	1 1	2 2	2 2	1 1	2 2	1 1
12	1	2 2	1 1	2 2	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1	2 2	1 1	1 1	2 2	1 1	2 2
13	1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1
14	1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2
15	1	2 2	2 2	1 1	2 2	1 1	1 1	2 2	1 1	2 2	2 2	1 1	2 2	1 1	1 1	2 2
16	1	2 2	2 2	1 1	2 2	1 1	1 1	2 2	2 2	1 1	1 1	2 2	1 1	2 2	2 2	1 1
17	2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2
18	2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	2 1	2 1	2 1	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1
19	2	1 2	1 2	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1	1 2	1 2	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1
20	2	1 2	1 2	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1	1 2	1 2	1 2	1 2
21	2	1 2	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1
22	2	1 2	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	1 2	1 2
23	2	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1	1 2	1 2	1 2	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1	1 2	1 2
24	2	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	1 2	1 2	1 2	1 2	2 1	2 1
25	2	2 1	1 2	2 1	1 2	2 1	1 2	2 1	1 2	2 1	1 2	2 1	2 1	2 1	1 2	2 1
26	2	2 1	1 2	2 1	1 2	2 1	1 2	2 1	2 1	1 2	2 1	1 2	1 2	1 2	2 1	1 2
27	2	2 1	1 2	2 1	2 1	1 2	2 1	1 2	1 2	2 1	1 2	2 1	1 2	1 2	2 1	1 2
28	2	2 1	1 2	2 1	2 1	1 2	2 1	1 2	2 1	1 2	2 1	1 2	2 1	2 1	1 2	2 1
29	2	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	1 2	2 1	2 1	2 1	1 2
30	2	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	1 2	2 1	1 2	1 2	2 1	1 2	1 2	1 2	2 1
31	2	2 1	2 1	1 2	2 1	1 2	1 2	2 1	1 2	2 1	2 1	1 2	1 2	1 2	1 2	2 1
32	2	2 1	2 1	1 2	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	1 2	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1	1 2

Tabela 4
Matriz ortogonal L_{32} (2^{31})

Programou-se a pinça de soldadura com os parâmetros de soldadura definidos, sendo alterados para cada provete, mediante as condições requeridas para os ensaios. O diâmetro da ponta do eléctrodo, foi conseguido, substituindo os porta-eléctrodos inferior e superior, por outros que permitissem receber os eléctrodos de diâmetro 6 ou 8 mm, conforme o caso.

Foram feitos 32 provetes X 3 repetições, que corresponde a um total de 96 pontos de soldadura, para permitir a análise de variância dos resultados. Os provetes foram fixos num calibre, com um sistema de fixação por alicates, para permitir um posicionamento correcto das chapas a soldar.

3.3. Conclusão

Neste ponto, foi feita a definição das experiências realizadas. Apresentou-se a forma dos provetes utilizados e os dois tipos de testes aos quais foram submetidos (ensaios de ruptura).

O plano de experiências seguido foi definido pelo Método de Taguchi, através de uma matriz ortogonal L_{32} (2^{31}).

CAPÍTULO 4

CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Ensaios de tracção por corte

Dos ensaios à tracção realizados, obtiveram-se as seguintes respostas para a força de ruptura do ponto de soldadura (F) e para o diâmetro do ponto resultante (D).

	FACTORES						RESPOSTAS					
							1ª Medição		2ª Medição		3ª Medição	
Nº PSE	d [mm]	F [daN]	I [A]	t [~]	R	e [mm]	D [mm]	T [kgf]	D [mm]	T [kgf]	D [mm]	T [kgf]
1	6	160	8000	10	sem	0,67	5,3	368	5,4	347	5,5	323
2	6	160	8000	10	sem	1,17	5,7	670	6,0	670	5,7	670
3	6	160	8000	16	G10/10	0,67	5,0	273	5,1	346	5,0	211
4	6	160	8000	16	G10/10	1,17	5,6	605	5,5	580	5,8	595
5	6	160	11000	10	G10/10	0,67	6,0	358	6,2	363	5,9	366
6	6	160	11000	10	G10/10	1,17	6,4	580	6,7	540	6,7	640
7	6	160	11000	16	sem	0,67	6,0	445	6,0	448	6,3	435
8	6	160	11000	16	sem	1,17	6,8	830	6,6	835	7,0	800
9	6	230	8000	10	G10/10	0,67	6,7	384	6,6	388	6,5	333
10	6	230	8000	10	G10/10	1,17	5,1	720	5,7	780	5,4	740
11	6	230	8000	16	sem	0,67	4,4	328	4,9	381	4,2	363
12	6	230	8000	16	sem	1,17	5,0	420	4,5	420	4,6	430
13	6	230	11000	10	sem	0,67	6,4	384	6,5	380	6,3	378
14	6	230	11000	10	sem	1,17	6,6	830	6,7	815	6,5	830
15	6	230	11000	16	G10/10	0,67	6,7	411	6,3	372	6,3	379
16	6	230	11000	16	G10/10	1,17	7,0	685	7,0	645	7,0	685
17	8	160	8000	10	G10/10	0,67	7,4	263	6,9	280	7,1	277
18	8	160	8000	10	G10/10	1,17	7,4	430	7,4	420	7,4	395
19	8	160	8000	16	sem	0,67	6,3	425	6,4	406	6,1	396
20	8	160	8000	16	sem	1,17	7,0	760	6,4	810	6,4	790
21	8	160	11000	10	sem	0,67	7,2	395	7,0	411	7,0	424
22	8	160	11000	10	sem	1,17	6,6	830	6,8	740	6,2	815
23	8	160	11000	16	G10/10	0,67	6,0	373	6,2	393	6,2	373
24	8	160	11000	16	G10/10	1,17	7,7	685	7,9	695	7,4	665
25	8	230	8000	10	sem	0,67	5,8	373	5,8	379	5,8	388
26	8	230	8000	10	sem	1,17	6,0	735	6,0	730	5,7	735
27	8	230	8000	16	G10/10	0,67	5,7	217	6,1	357	6,1	261
28	8	230	8000	16	G10/10	1,17	7,1	575	7,1	560	7,0	575
29	8	230	11000	10	G10/10	0,67	6,9	415	7,0	381	7,2	373
30	8	230	11000	10	G10/10	1,17	7,0	620	6,9	620	7,0	620
31	8	230	11000	16	sem	0,67	6,6	402	7,0	400	6,7	430
32	8	230	11000	16	sem	1,17	7,1	835	7,2	850	7,1	850

Tab. 5
Respostas obtidas

A nomenclatura utilizada foi a seguinte:

d: diâmetro da ponta do eléctrodo;

F: esforço de soldadura;

I: intensidade da corrente de soldadura;

t: tempo de soldadura;

R: tipo de revestimento;

T: força de ruptura;

D: diâmetro do ponto de soldadura.

Na realização de alguns pontos de soldadura verificaram-se projecções de soldadura (expulsões de material), sobretudo nas chapas com revestimento.

Durante a realização dos ensaios de tracção por corte, alguns provetes, romperam pelo ponto.

O tratamento estatístico dos resultados, foi feito para a análise da variância e efeitos principais dos factores.

Nas figuras que se seguem, pode observar-se o aspecto dos provetes, após o ensaio de ruptura.



Fig. 48
Provete Nº 5

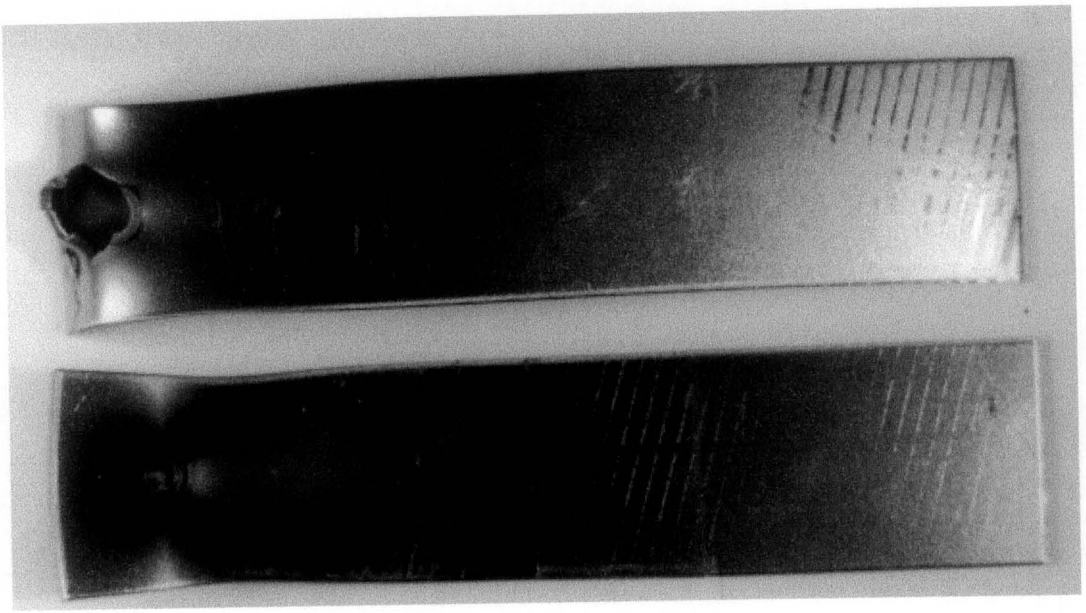


Fig. 49
Provete Nº 12

Quando sujeito a um esforço por cizalhamento, o corpo do ponto, comprime a zona da chapa situada na periferia do ponto, na direcção do esforço. Esta mesma compressão, tende a romper a chapa, por tracção, na secção transversal ao esforço e que passa pelo centro do ponto, como se pode observar na Fig. 49.

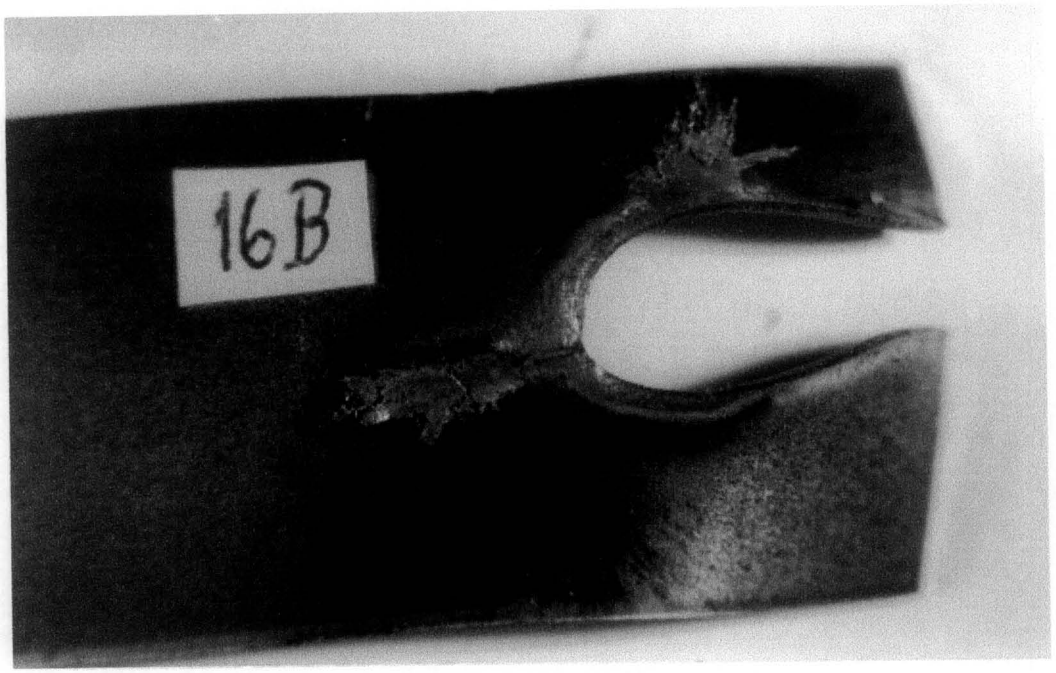


Fig. 50
Provete Nº 16 – parte 1

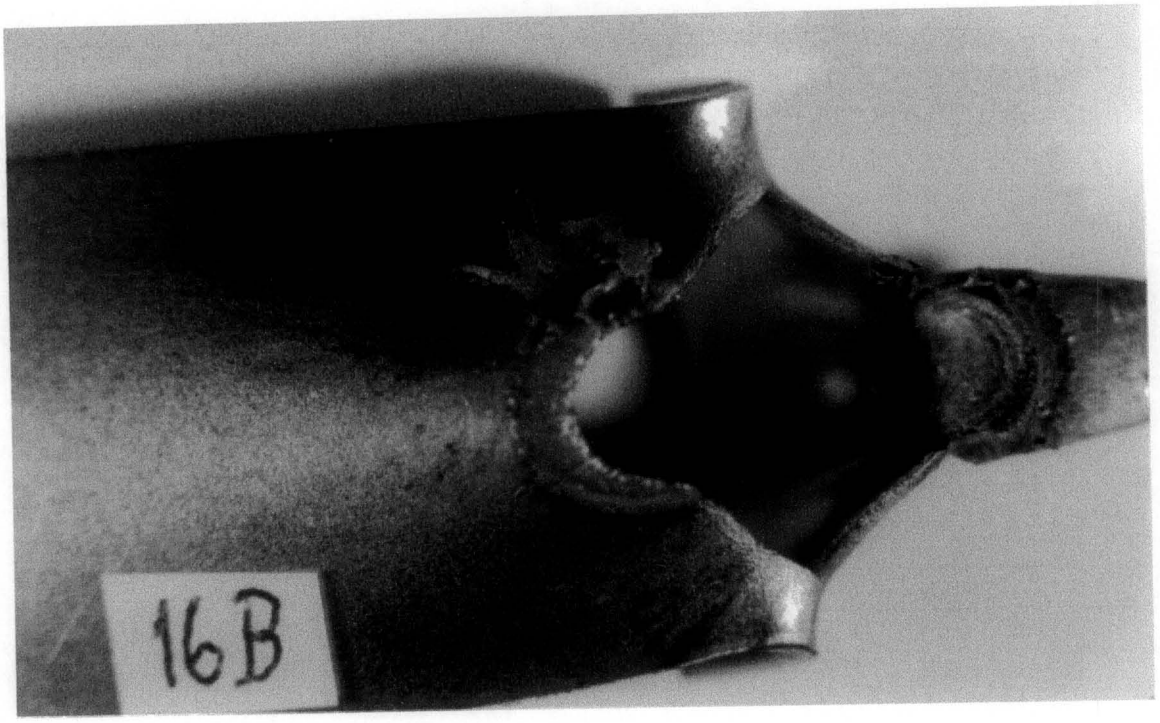


Fig. 51
Provete Nº 16 – parte 2

De salientar, a existência de fortes projecções de soldadura, no provete Nº 16 (Fig. 50 e Fig. 51), provocadas talvez, pelo revestimento de zinco em ambas as faces. O provete Nº 12 (Fig. 49), não apresenta este fenómeno.

Note-se também, que a projecção no provete Nº 16, surge na face interior das duas chapas a soldar, o que nos leva a crer, que no momento da soldadura, as peças não estariam bem assentes uma na outra.

4.2. Análise estatística dos resultados

Começou por fazer-se uma análise de variância para o parâmetro "força de ruptura", com o objectivo de analisar a influência de cada parâmetro de soldadura na variação total da resposta. Na tabela 6, apresentam-se os resultados da análise da variância para a força de ruptura. Esta análise foi feita para um nível de significância (α) de 5%, isto é, para um nível de confiança de 95%. As últimas colunas da tabela, apresentam a percentagem de contribuição (P) de cada factor, na variância total, indicando-nos o grau de influência da resposta.

Fontes de variação	Variações SQ	gl	DQM	Rácio-F	Valor de prova	Lambda	Power	P (%)
d	1298,01042	1	1298,01042	0,41919	0,5193	0,41919	0,09540	0.0
F	1776,76042	1	1776,76042	0.57380	0,4212	0.57380	0,11200	0.0
I	179141,76042	1	179141,76042	57,85346	<0,0001	57,85346	1,00000	5.4
t	102,09375	1	102,09375	0,03297	0,8564	0,03297	0,05366	0.0
R	193231,76042	1	193231,76042	62,40380	<0,0001	62,40380	1,00000	5.9
e	2281358,34375	1	2281358,34375	736,75996	<0,0001	736,75996	1,00000	70.2
d X F	23,01042	1	23,01042	0,00743	0,9315	0,00743	0,05083	0.0
d X I	10,01042	1	10,01042	0,00323	0,9548	0,00323	0,05036	0.0
d X t	40385,01042	1	40385,01042	13,04226	0,0006	13,04226	0,96226	1.1
d X R	73981,54042	1	73981,54042	23,89218	<0,0001	23,89218	0,99956	2.2
d X e	918,84375	1	918,84375	0,29674	0,5876	0,29674	0,08227	0.0
F X I	128,34375	1	128,34375	0,04145	0,8392	0,04145	0,05460	0.0
F X t	100039,59375	1	100039,59375	32,30758	<0,0001	32,30758	0,99999	3.0
F X R	58361,34375	1	58361,34375	18,84768	<0,0001	18,84768	0,99601	1.7
F X e	98,01042	1	98,01042	0,03165	0,8593	0,03165	0,05352	0.0
I X t	24288,84375	1	24288,84375	7,84403	0,0065	7,84403	0,080143	0.7
I X R	6716,76042	1	6716,76042	2,16916	0,1450	2,16916	0,29030	0.1
I X e	17685,51042	1	17685,51042	5,71150	0,0194	5,71150	0,65365	0.4
t X R	1357,51042	1	1357,51042	0,43841	0,5100	0,43841	0,09746	0.0
t X e	82,51042	1	82,51042	0,02665	0,8708	0,02665	0,05296	0.0
R X e	33115,51042	1	33115,51042	10,69459	0,0016	10,69459	0,91620	0.9
Residual	229139,10417	74	3096,47438					8.4
Total	3243240.216							100

Tab. 6
Análise da variância para a força de ruptura

Nas tabelas 6 e 7, a nomenclatura é a seguinte: SQ – somas dos desvios quadráticos, gl – graus de liberdade (número de termos independentes), DQM – desvios quadráticos médios, P – percentagem de contribuição.

A percentagem de contribuição, P, indica o poder relativo de um factor e/ou interacção na variação total observada na experiência. A percentagem de contribuição é calculada da seguinte forma: [13]

$P = (SQ''_A / SQ_T) \times 100$ em que: $SQ''_A = SQ_A - (DQM_{erro})\, gl_A$

onde:

SQ_A – somas dos desvios quadráticos do factor A

DQM_{erro} – desvios quadráticos médios

gl_A – graus de liberdade do factor A

Fontes de Variação	Variações SQ	gl	DQM	Rácio-F	Valor de prova	Lambda	Power	P (%)
d	14,41500	1	14,41500	162,40193	<0,0001	162,40193	1,00000	25,0
F	0,35042	1	0,35042	3,94786	0,0506	3,94786	0,48711	0,4
I	13,65042	1	13,65042	153,78800	<0,0001	153,78800	1,00000	23,6
t	0,77042	1	0,77042	8,67965	0,0043	8,67965	0,84376	1,2
R	3,08167	1	3,08167	34,71860	<0,0001	34,71860	1,00000	5,2
e	2,47042	1	2,47042	27,83215	<0,0001	27,83215	0,99993	4,2
d X F	0,54000	1	0,54000	6,08374	0,0160	6,08374	0,68378	0,8
d X I	3,08167	1	3,08167	34,71860	<0,0001	34,71860	1,00000	5,2
d X t	0,54000	1	0,54000	6,08374	0,0160	6,08374	0,68378	0,8
d X R	0,07042	1	0,07042	0,79333	0,3760	0,79333	0,13576	0,0
d X e	0,10667	1	0,10667	1,20173	0,2765	1,20173	0,18075	0,0
F X I	2,10042	1	2,10042	23,66366	<0,0001	23,66366	0,99951	3,5
F X t	0,03375	1	0,03375	0,38023	0,5394	0,38023	0,09122	0,0
F X R	1,21500	1	1,21500	13,68840	0,0004	13,68840	0,97006	2,0
F X e	0,63375	1	0,63375	7,13994	0,0093	7,13994	0,75921	0,9
I X t	1,87042	1	1,87042	21,07244	<0,0001	21,07244	0,99845	3,1
I X R	2,16000	1	2,16000	24,33494	<0,0001	24,33494	0,99964	3,6
I X e	0,22042	1	0,22042	2,48325	0,1193	2,48325	0,32609	0,2
t X R	0,24000	1	0,24000	2,70388	0,1043	2,70388	0,35111	0,3
t X e	3,01042	1	3,01042	33,91588	<0,0001	33,91588	1,00000	5,1
R X e	0,24000	1	0,24000	2,70388	0,1043	2,70388	0,35111	0,3
Residual	6,56833	74	0,08876					14,6
Total	57,36962							100,0

Tab. 7
Análise da variância para o diâmetro do ponto de soldadura

4.2.1. Força de ruptura

Da análise da tabela 6 anterior, é possível constatar que na força de ruptura, o factor de maior influência é sem dúvida a espessura da chapa a soldar (P = 70%), seguindo-se, com uma contribuição menor, o tipo de revestimento utilizado (P = 6%) e a intensidade da corrente de soldadura (P = 5%).

A contribuição dos restantes factores é nula para os valores escolhidos, o que significa que possivelmente, os valores escolhidos são muito próximos um do outro.

Existem interacções entre os factores que são significativas, nomeadamente a interacção FXt, com uma percentagem de contribuição de 3%, apesar destes factores, isoladamente, não serem significativos para um nível de confiança de 95%, talvez por tomarem valores num leque pouco alargado, que não nos permite observar a sua influência.

Se tivéssemos escolhido para o esforço de soldadura valores de 160 daN e 300 daN, por exemplo, para cada nível, respectivamente, teríamos certamente obtido uma resposta diferente para a força de ruptura, que nos permitiria avaliar a forma como esta reage a variações do esforço de compressão.

Outras interacções existentes, mas de pouca influência entre si são: Dxr, FXR, dXt, Rxe, Ixt, Ixe e IXR. As restantes não apresentam qualquer influência.

O erro residual de 8,4%, poderá dizer respeito a diversos factores, como erros na medição da força de ruptura, não visualizando o ponteiro da marcação no momento exacto em que se deu a ruptura, à existência de pontos de soldadura colados, em que o valor da força de ruptura se refere ao momento em que o ponto de soldadura rompeu, ou a outros factores aleatórios não controláveis.

As figuras que se seguem, dizem respeito aos gráficos dos efeitos principais dos factores, na força de ruptura de um ponto de soldadura. O efeito principal de um factor representa um aumento (ou diminuição se for negativo), quando passa de um nível para outro, na resposta média global.

Relativamente ao diâmetro da ponta do eléctrodo, (d) e ao esforço de soldadura (F), a sua influência é pouco acentuada, o que vem de encontro ao valor de P, na tabela 6 para estes factores. (Ver Fig. 52 e Fig. 53)

A escolha de valores, para o esforço de compressão muito próximos um do outro (160 e 230 daN), não permite observar a real influência deste factor, pois como se sabe, tanto teórica como experimentalmente, este é um dos factores que mais afecta a formação de um ponto de soldadura. A importância deste factor foi explicada no primeiro capítulo deste tabalho.

Relativamente ao tempo de soldadura (Fig. 54), o primeiro nível de 10 ciclos, encontra-se de acordo com os valores teóricos indicados para a realização de uma soldadura para as condições apresentadas (Anexo 2), sendo mesmo o valor médio indicado. Quanto ao segundo nível escolhido, de 16 ciclos, ele é um pouco exagerado para a situação. Foi também focado no primeiro capítulo deste trabalho, a má política que é a utilização de tempos de soldadura demasiado longos, que além de tornarem o processo mais lento e portanto menos económico, podem também conduzir a soldaduras "queimadas", com uma consequente perda de resistência mecânica. Tal possibilidade poderia ser confirmada ou não, pela utilização de um terceiro nível intermédio aos utilizados. Certamente para um tempo de soldadura $10<t<16$, a força de ruptura aumentaria ligeiramente.

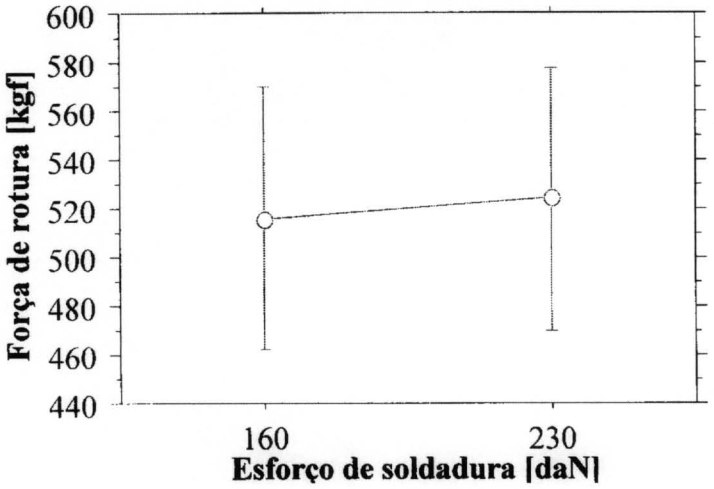


Fig. 52
Efeito Esforço de soldadura

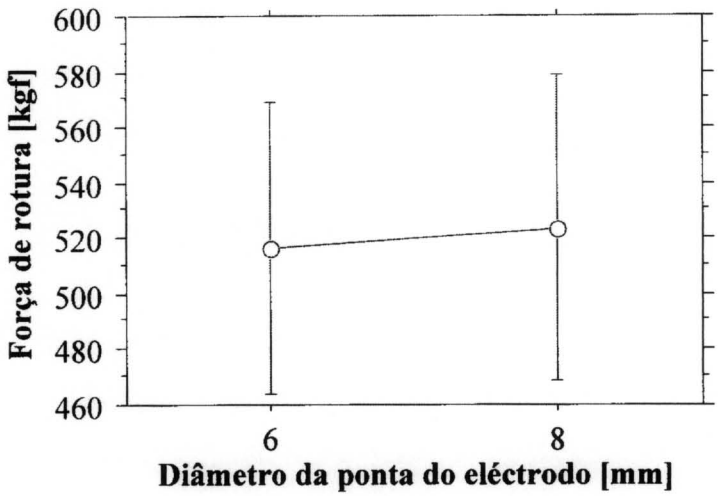


Fig. 53
Efeito Diâmetro da ponta do eléctrodo

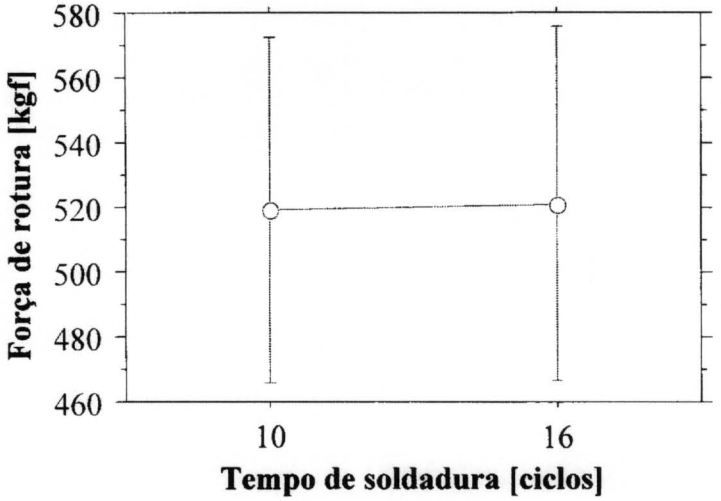


Fig. 54
Efeito Tempo de soldadura

Dos factores estudados, sem dúvida aquele que mais influencia a força de ruptura é a espessura da chapa (e) (Fig. 56). Tal facto, está completamente de acordo com o que se abordou nos capítulos anteriores, em que sempre se focou a importância fulcral das condições do material a soldar, bem como o estado da sua superfície. Só assim se justifica que o revestimento (R) das chapas a soldar, seja o segundo factor mais influente no estudo da resposta estudada. (Fig.55)

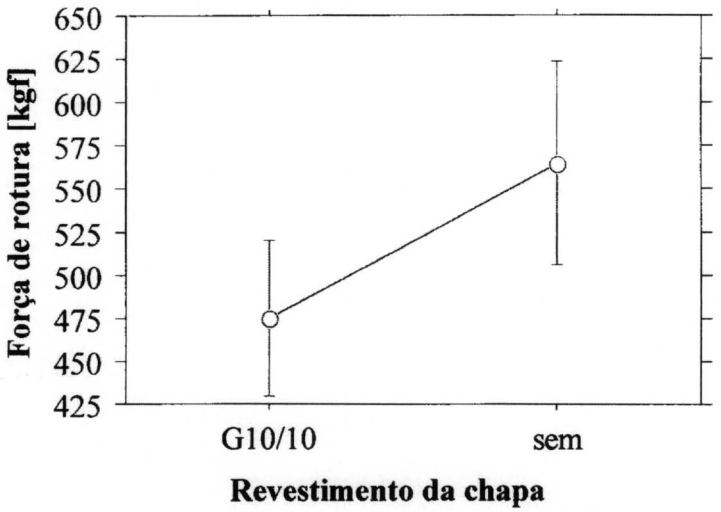


Fig. 55
Efeito Revestimento da chapa

De facto, é fundamental uma perfeita definição de parâmetros de soldadura para as características do material a ser soldado. Por isso, tanto os valores tabelados em normas de soldadura (Anexo 2), como os valores de programas informáticos como o SERGIS (Anexo 3), são determinados e escolhidos, tendo em conta a espessura de referência das peças a soldar (ver escolha da espessura de referência na tabela 2, da pág.49), bem como o tipo de revestimento que as compõem (no caso do SERGIS).

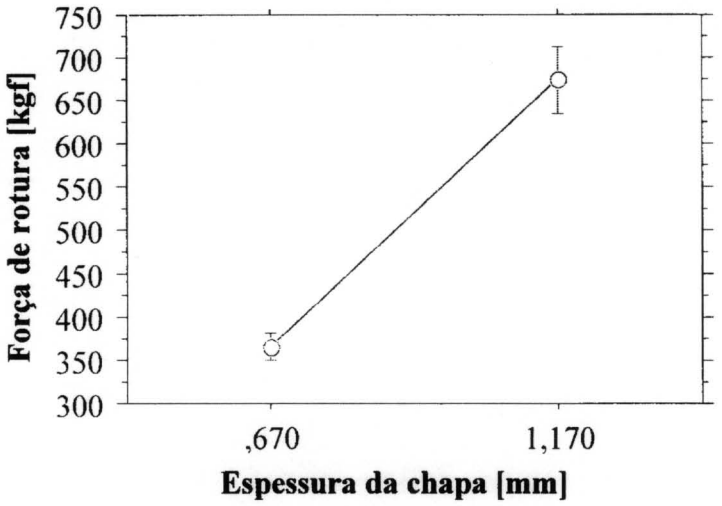


Fig. 56
Efeito Espessura da chapa

Como factor de alguma contribuição (Fig. 57), surge-nos ainda a intensidade da corrente de soldadura, que como não podia deixar de ser, é o parâmetro mais influente na realização de um ponto de soldadura.

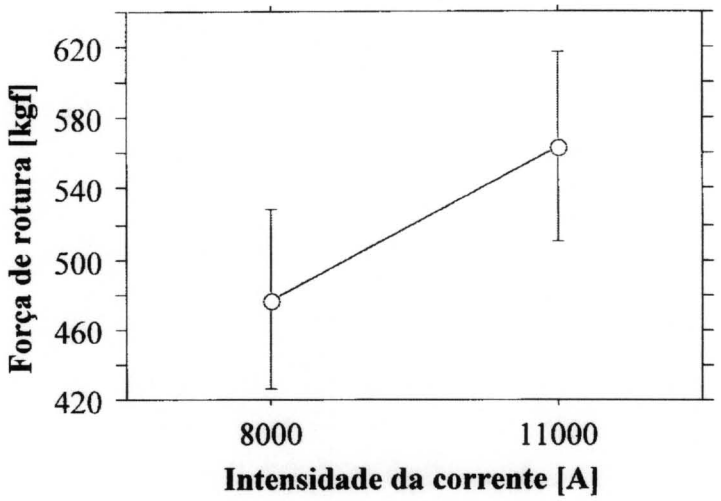


Fig. 57
Efeito Intensidade da corrente

Relativamente às interacções existentes entre os factores estudados, verifica-se que, a mais significativa com P=3%, é a da conjugação dos factores esforço de compressão x tempo de soldadura (Fig. 58). Ou seja, se passarmos de um esforço de compressão de 160 daN para 230 daN, o efeito sobre a força de ruptura é diferente, se trabalharmos com um tempo de soldadura de 10 ciclos ou se este for de 16 ciclos. Os efeitos para uma ou outra situação são opostos. Assim, para um aumento do esforço de soldadura, com um tempo de soldadura de 10 ciclos, a força de ruptura aumenta, o que significa que a resistência mecânica do ponto de soldadura também. Para esse mesmo aumento do esforço de soldadura, mas utilizando agora, um tempo de soldadura de 16 ciclos, verifica-se exactamente o contrário, ou seja, a força de ruptura diminui.

Tal acontecimento, vem apenas confirmar o que já se tinha dito sobre estes dois factores, pois se tempos demasiado longos, tornam as soldaduras queimadas, enfraquecendo-as; para um tempo de soldadura adequado, um aumento do esforço de soldadura apenas beneficiará a formação do ponto de soldadura, facilitando as operações de levar as chapas a uma acostagem perfeita e no final da soldadura, garantindo-lhe um arrefecimento adequado do nó.

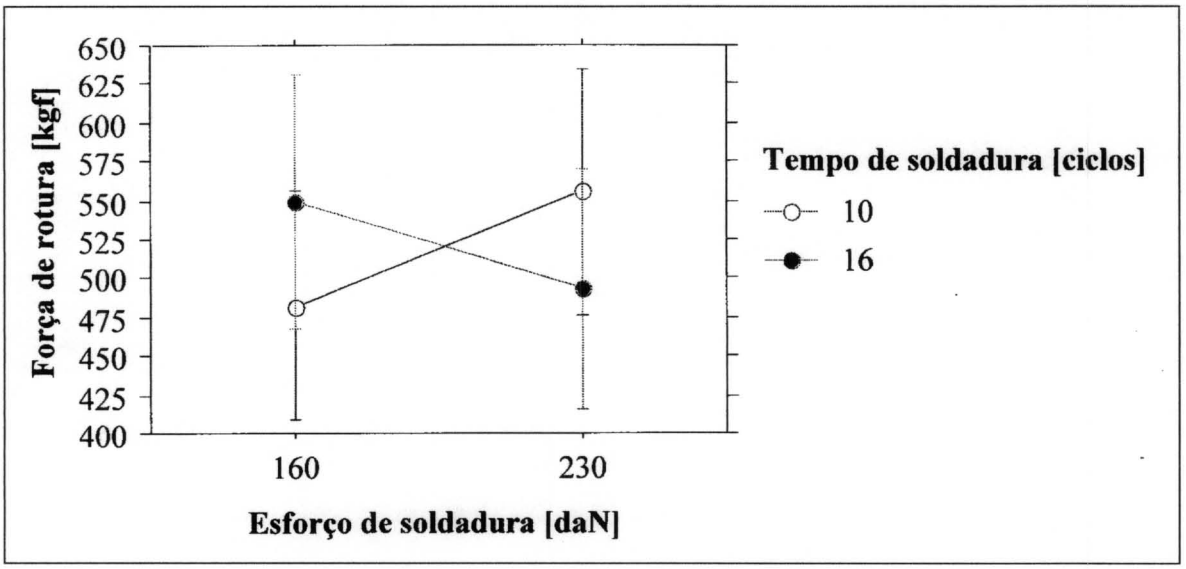


Fig. 58
Efeito esforço de soldadura / tempo de soldadura

Com uma contribuição de P=2,2%, verifica-se existir também uma interacção entre os factores diâmetro da ponta do eléctrodo x tempo de soldadura. A interpretação gráfica, neste caso, pode ser feita sob o ponto de vista que, tempos de soldadura curtos, necessitam eléctrodos com menor diâmetro na face activa, do que as soldaduras com tempos de soldadura mais longos (Fig. 59).

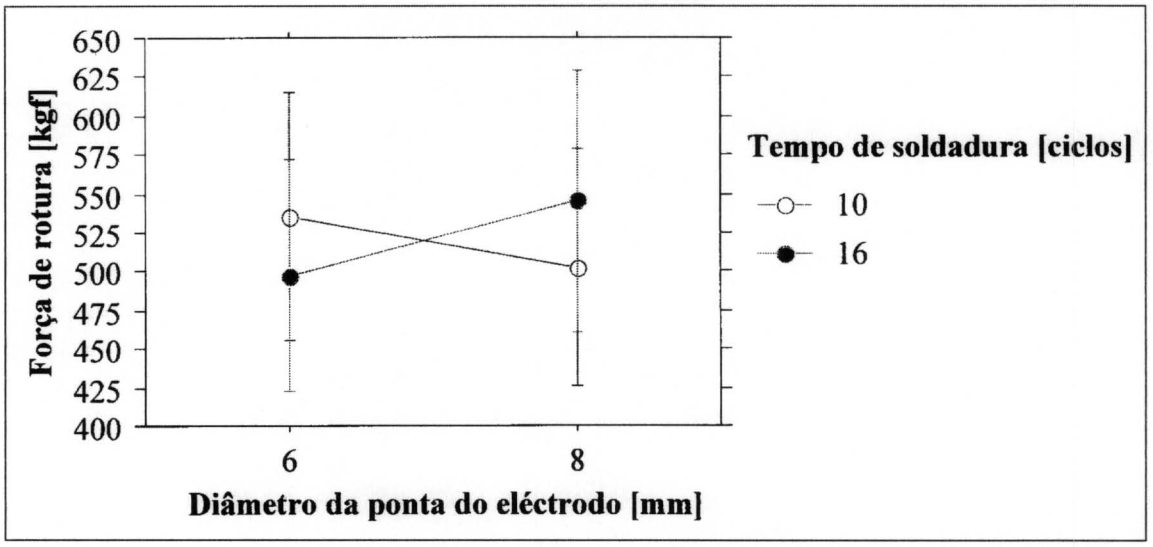


Fig. 59
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / tempo de soldadura

Uma outra interacção com alguma influência, é o esforço de soldadura x revestimento da chapa. Como se pode observar pelo gráfico (Fig. 60), um aumento dos valores do esforço de compressão, pode fazer aumentar, ou baixar a força de ruptura, caso se trate de chapas galvanizadas ou sem qualquer revestimento. Relativamente à utilização das chapas galvanizadas, parece lógico que a resistência mecânica do ponto de soldadura melhore. No entanto, não há motivo para que a força de ruptura diminua no caso da chapa nua, uma vez tratar-se de uma mudança de um valor bastante baixo do esforço de soldadura, para um valor até mais adequado para as características da chapa a soldar, pelo que tal efeito se pode dever a causas aleatórias.

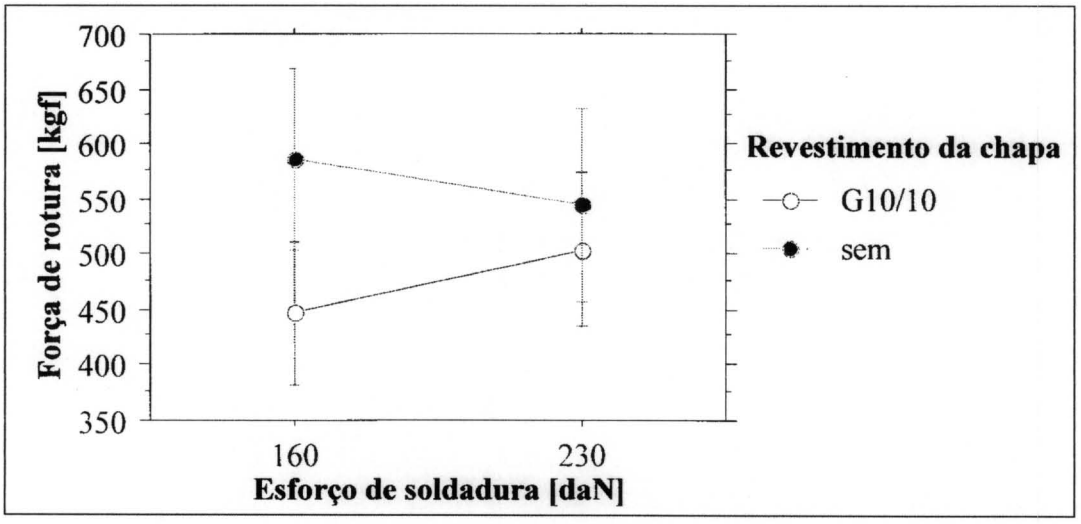


Fig. 60
Efeito esforço de soldadura / revestimento da chapa

Já na interacção diâmetro da ponta do eléctrodo x revestimento da chapa (Fig. 61), verifica-se um acréscimo da força de ruptura, quando passamos de eléctrodos com face activa de diâmetro 6 mm para 8 mm, em chapas nuas, o mesmo não acontecendo para as chapas galvanizadas. Com uma maior zona de contacto eléctrodo-chapa, na utilização de

eléctrodos de maior diâmetro, acaba por verificar-se uma maior expulsão de metal, pois a zona de revestimento (zinco), é maior, tendo uma maior resistência à passagem de corrente. Por isso, utilizam-se intensidades de corrente mais elevadas para as chapas galvanizadas, do que para as chapas não revestidas.

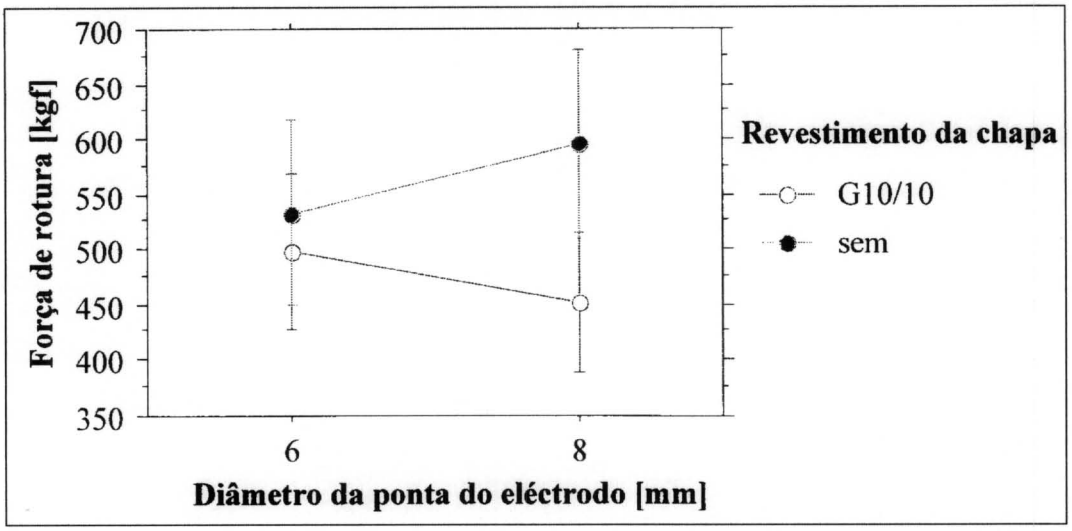


Fig. 61
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / revestimento da chapa

Pela Fig. 62, pode também observar-se a influência dos factores revestimento da chapa x espessura da chapa, com uma contribuição, P=0,9%, pouco significativa. O aumento da força de ruptura, é mais acentuado quando passamos de chapas galvanizadas, a chapas nuas, para maiores espessuras de chapa. De facto, para chapas de espessura elevada, a questão do revestimento tem uma maior influência na soldadura, pois a introdução de um revestimento de zinco, como é a galvanização, numa chapa grossa, já por si só mais difícil de soldar, com determinados parâmetros de soldadura, tem um efeito mais penalizante do que se a chapa fosse de espessura reduzida.

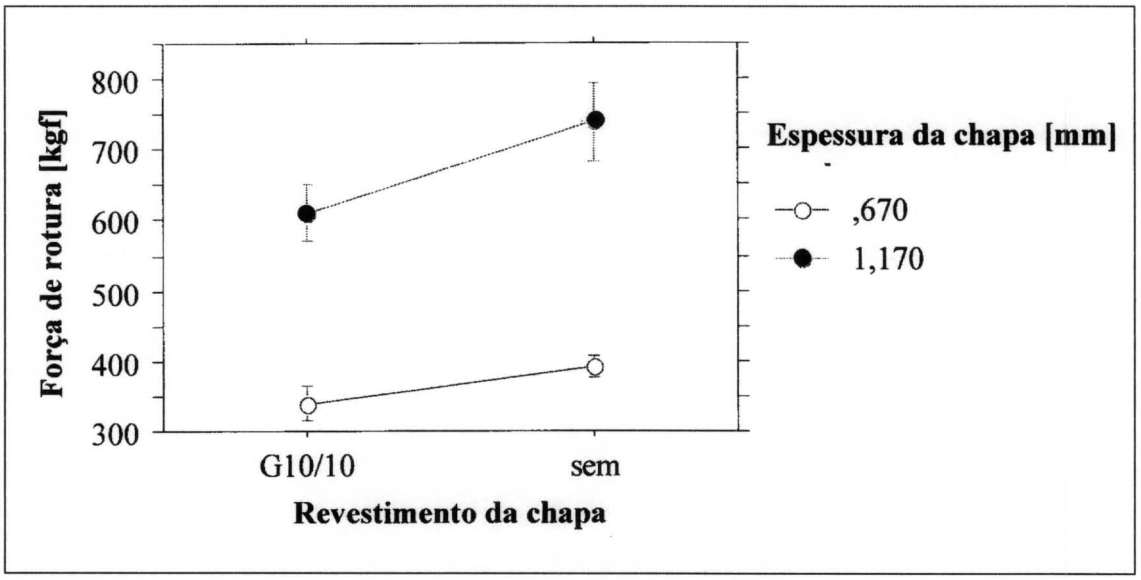


Fig. 62
Efeito Revestimento da chapa / espessura da chapa

Surgem depois algumas interacções de pouca importância das correlações seguintes:

- intensidade da corrente x tempo de soldadura;
- intensidade da corrente x revestimento da chapa;
- intensidade da corrente x espessura da chapa.

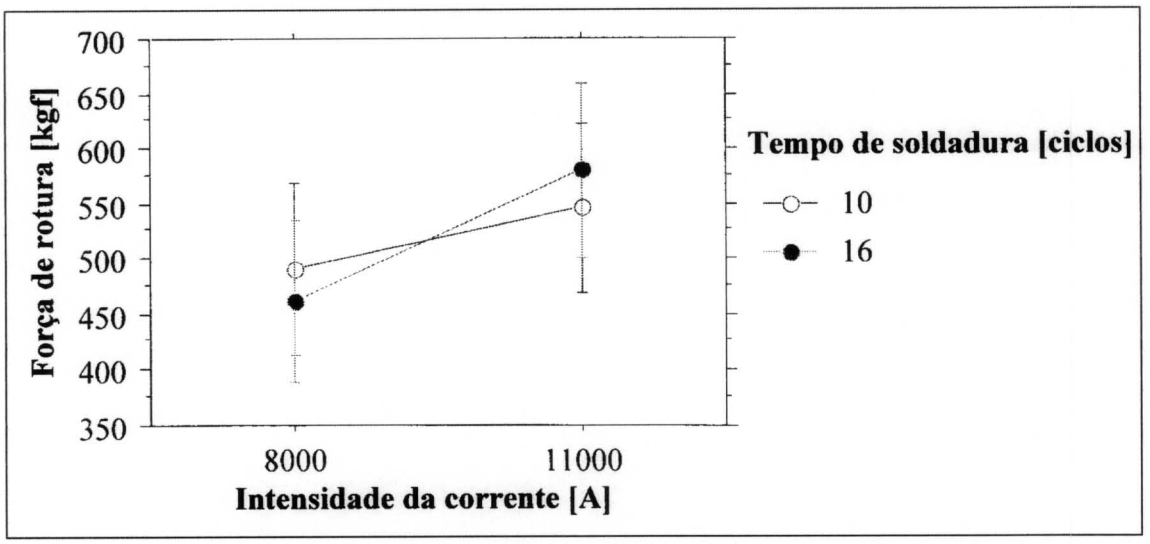


Fig. 63
Efeito intensidade da corrente / tempo de soldadura

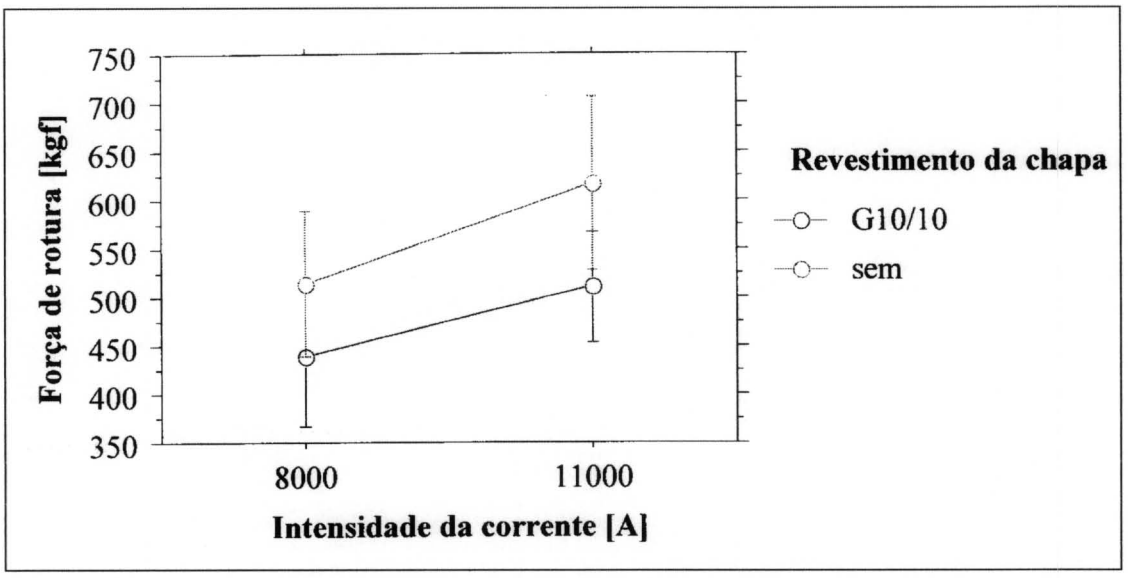


Fig. 64
Efeito Intensidade da corrente / Revestimento da chapa

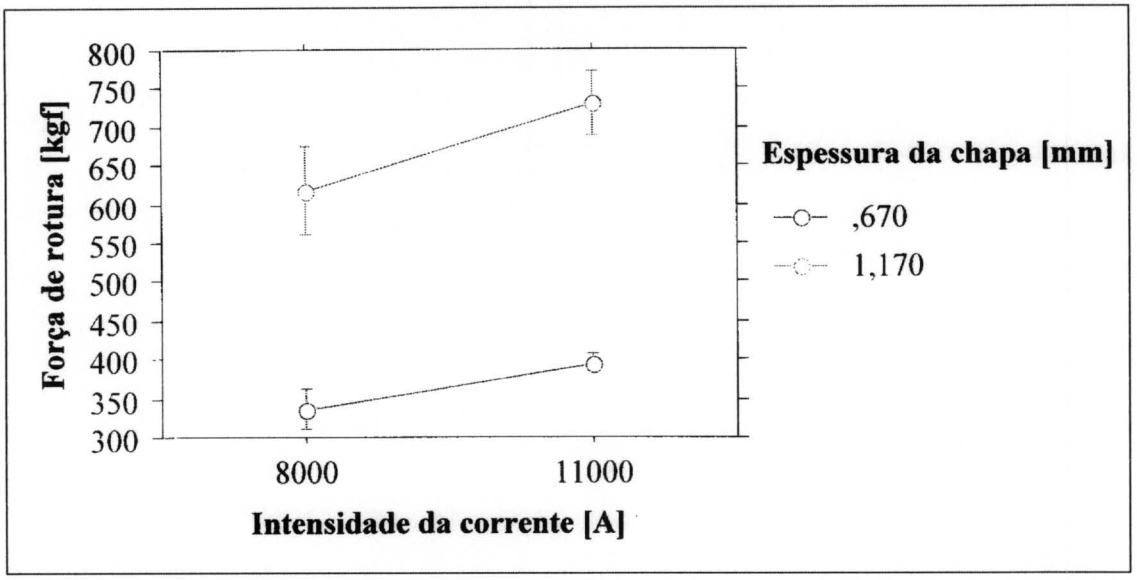


Fig. 65
Efeito Intensidade da corrente / espessura da chapa

Nestes 3 casos (Fig. 63, Fig. 64 e Fig. 65), pode constatar-se que para um aumento da intensidade da corrente de 8000 A para 10000 A, a força de ruptura aumenta mais significativamente nos casos em que:

- o tempo de soldadura é mais elevado;
- as chapas não têm revestimento;
- a espessura das chapas é maior.

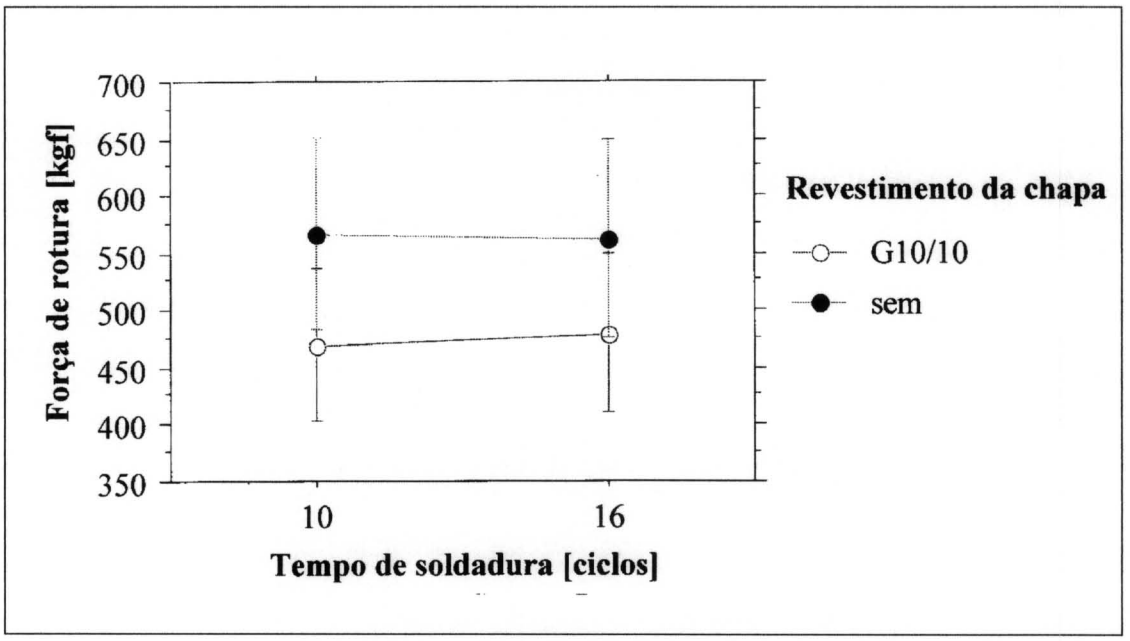


Fig. 66
Efeito Tempo de soldadura / revestimento da chapa

As restantes interacções, não apresentam qualquer valor de contribuição (P= 0%), pelo que se conclui, que não existe uma interdependência entre os restantes factores, como se pode observar nos gráficos das figuras 66, 67, 68, 69, 70, 71 e 72.

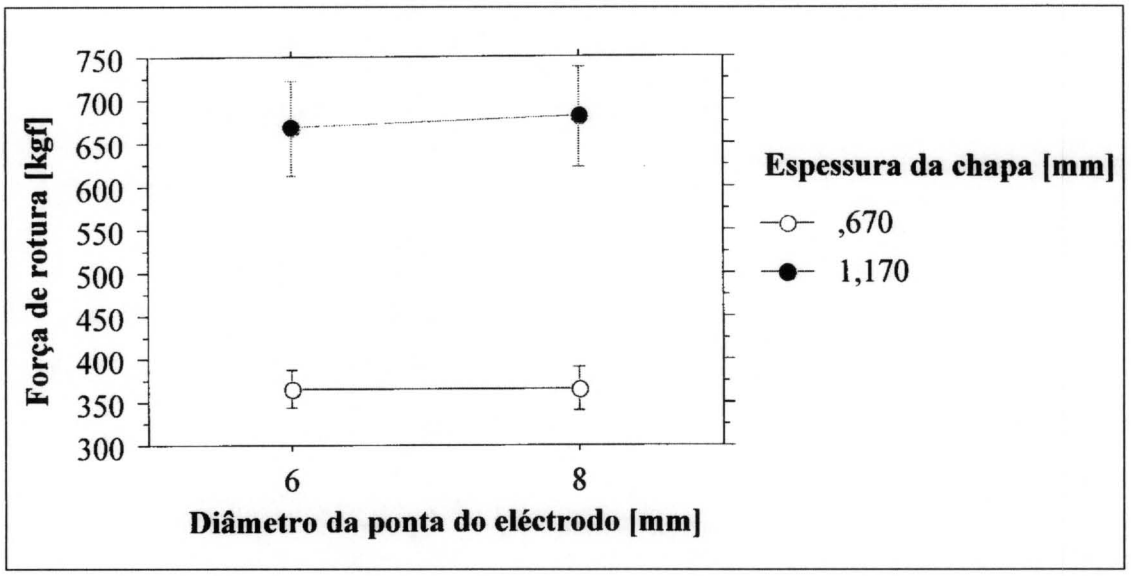


Fig. 67
Efeito Diâmetro da ponta do eléctrodo / espessura da chapa

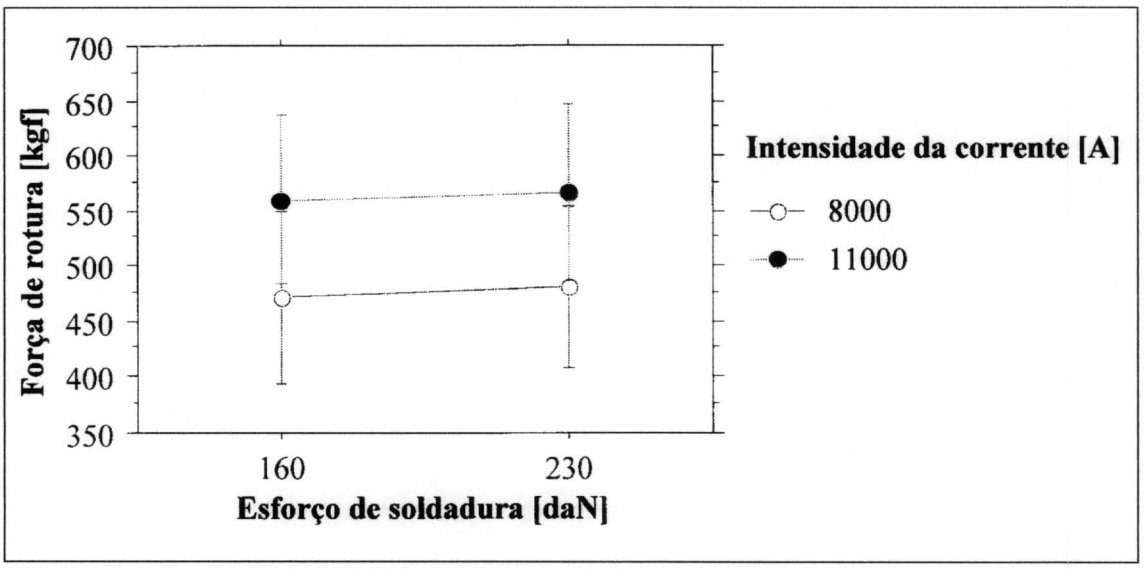


Fig. 68
Efeito Esforço de soldadura / intensidade da corrente

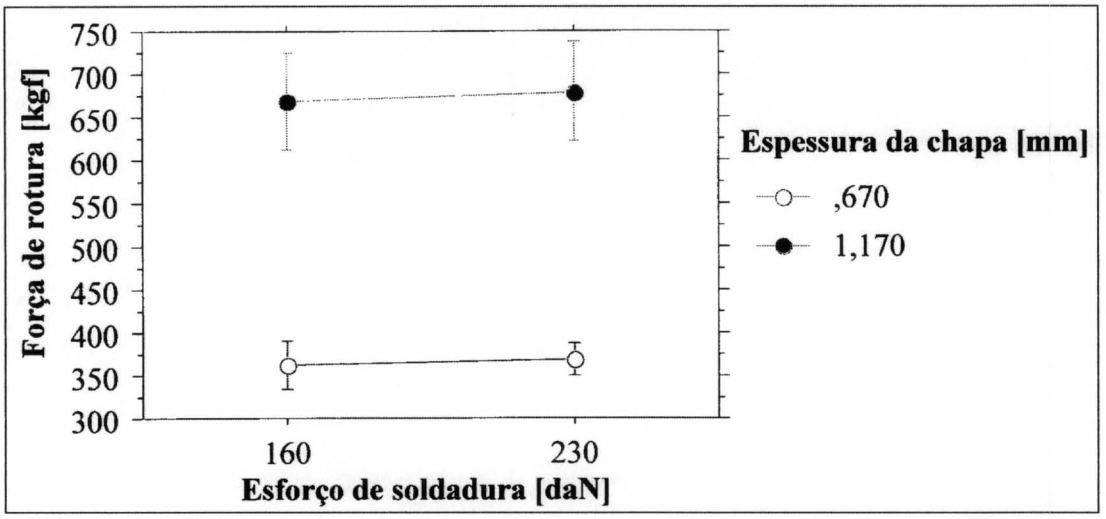


Fig. 69
Efeito esforço de soldadura / espessura da chapa

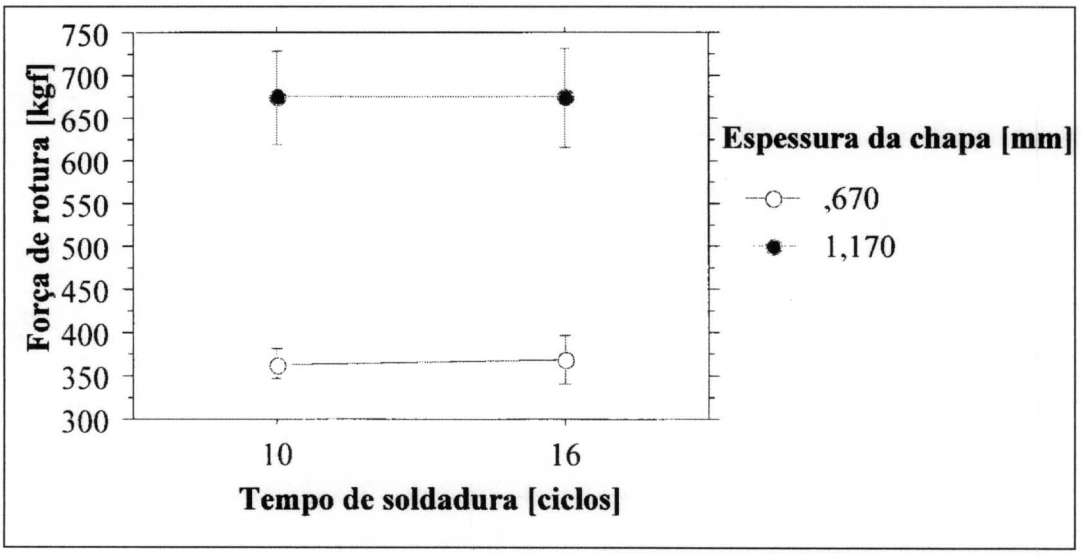


Fig. 70
Efeito tempo de soldadura / espessura da chapa

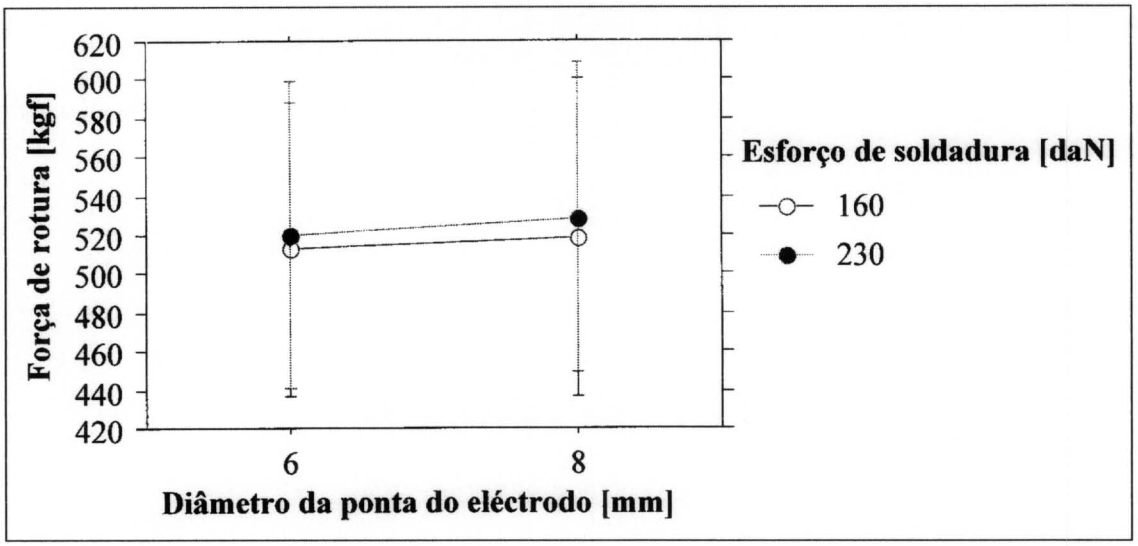


Fig. 71
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / esforço de soldadura

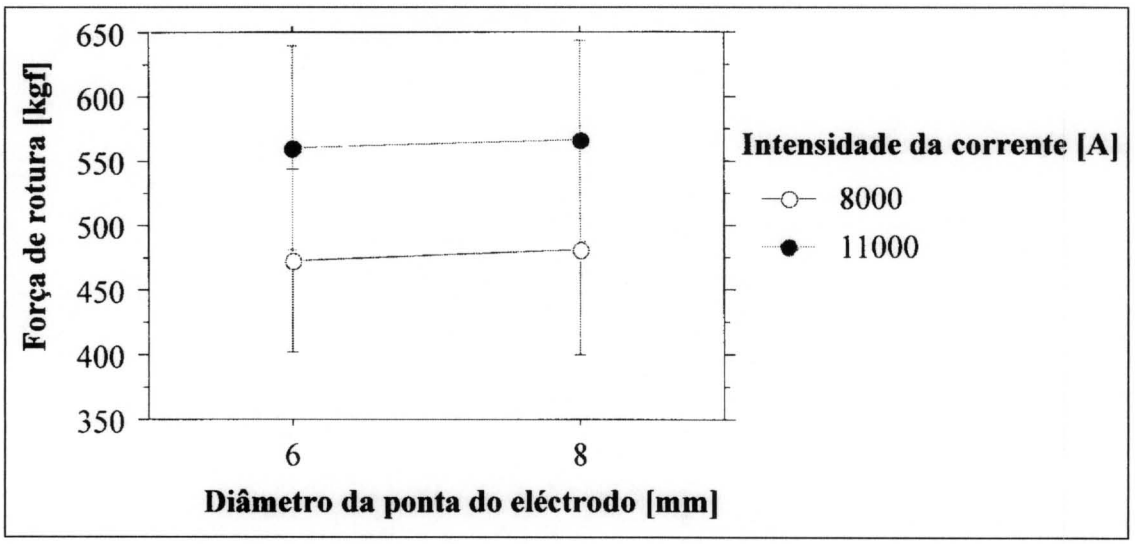


Fig. 72
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / intensidade da corrente

4.2.2. Diâmetro do ponto de soldadura

A forma mais correcta de poder avaliar a influência dos diversos factores, na formação do ponto de soldadura, neste tipo de ensaios, é sem dúvida pela medição do diâmetro do ponto de soldadura resultante.

Na tabela 7, já apresentada, pode verificar-se a contribuição dos diversos factores estudados.

Temos como factores de forte correlação com o diâmetro do ponto resultante, o diâmetro da ponta do eléctrodo utilizado (d), com uma contribuição de 25% e a intensidade da corrente (I), com uma contribuição de 26,3%.

Seguem-se os factores revestimento da chapa (R) e a espessura da chapa (e), com contribuições de 5,2 % e 4,2% respectivamente. Com menor influência na formação do ponto de soldadura aparece o tempo de soldadura (t), com P=1,2% e o esforço de compressão dos eléctrodos com uma contribuição de 0,4%.

Foi possível encontrar interacções praticamente entre todos os factores, com excepção do diâmetro da ponta do eléctrodo, com o revestimento e com a espessura da chapa e do esforço de compressão com o tempo de soldadura.

Foi possível ainda, identificar algumas interacções importantes, entre o diâmetro da ponta do eléctrodo e a intensidade da corrente; entre o tempo de soldadura e a espessura das chapas; entre a intensidade da corrente e o revestimento das chapas; entre o esforço de compressão e a intensidade da corrente, bem como entre a intensidade da corrente e o tempo de soldadura. As restantes são pouco significativas.

Pela análise dos gráficos que se seguem, é-nos possível avaliar, a influência dos factores estudados na formação de um ponto de soldadura e identificar as interacções existentes entre si.

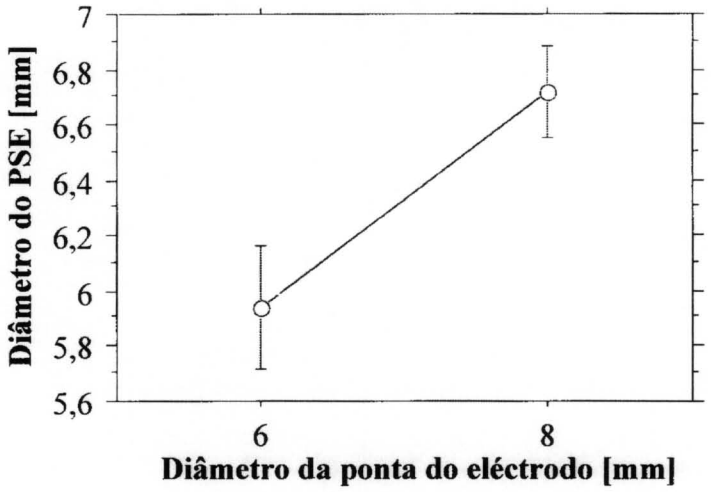


Fig. 73
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo

Na figura 73, é possível analisar o efeito do diâmetro da ponta do eléctrodo. É claro que para um mesmo nível de condições, o diâmetro do ponto de soldadura realizado, é menor ou maior, consoante se utilizem eléctrodos de face activa menor ou maior.

Daí a necessidade de uma atenção muito especial para com os eléctrodos, sendo essencial a sua manutenção. É que o diâmetro da ponta do eléctrodo, controla o tamanho da soldadura, como tivemos oportunidade de ver nas figuras 34 e 35 da página 50.

Como factor de forte correlação com a resposra estudada (P=23,6%), surge a intensidade da corrente de soldadura, pois com a sua subida, a quantidade de metal fundido aumentará, dando origem a diâmetros de pontos de soldadura maiores (Fig. 74).

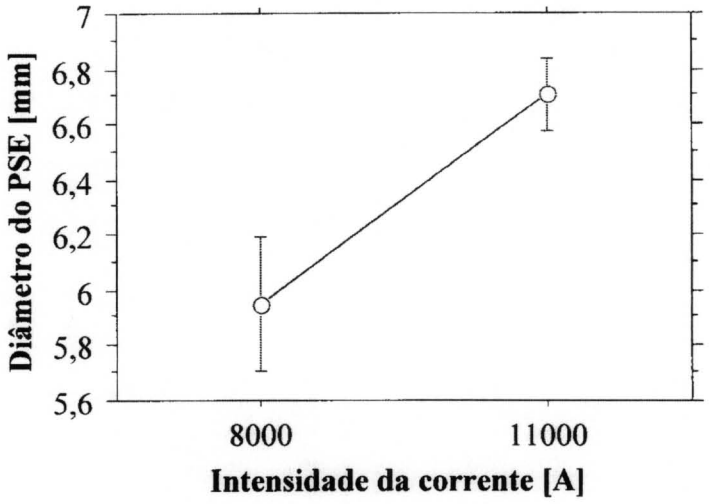


Fig. 74
Efeito intensidade da corrente

No que diz respeito, à influência das características do material a soldar, nomeadamente, a sua espessura e revestimento, podemos constatar que têm correlações semelhantes com a resposta estudada. Assim, observa-se que os pontos de soldadura, apresentam diâmetros maiores, para chapas revestidas a zinco de ambas as faces, do que para chapas nuas, sendo maiores também, os diâmetros dos pontos de soldadura realizados em chapas mais grossas, do que utilizando chapas finas. Este acontecimento pode explicar-se, tendo em conta que, com o aumento da oposição à passagem da corrente, a densidade da corrente no centro da formação do ponto diminui (fenómeno "fanning-out", já abordado na pág. 13), dispersando-se em seu redor, originando pontos de soldadura de menor qualidade, para uma mesma intensidade da corrente de soldadura, mas de maior diâmetro. Estes efeitos podem ser vistos nas figuras 75 e 76.

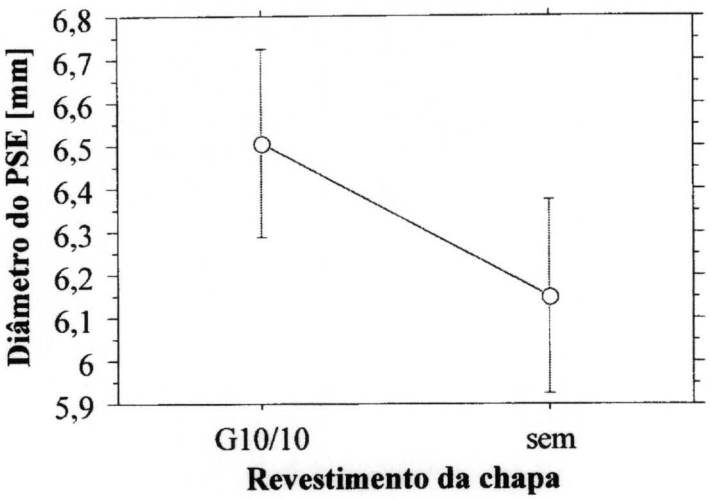


Fig. 75
Efeito revestimento da chapa

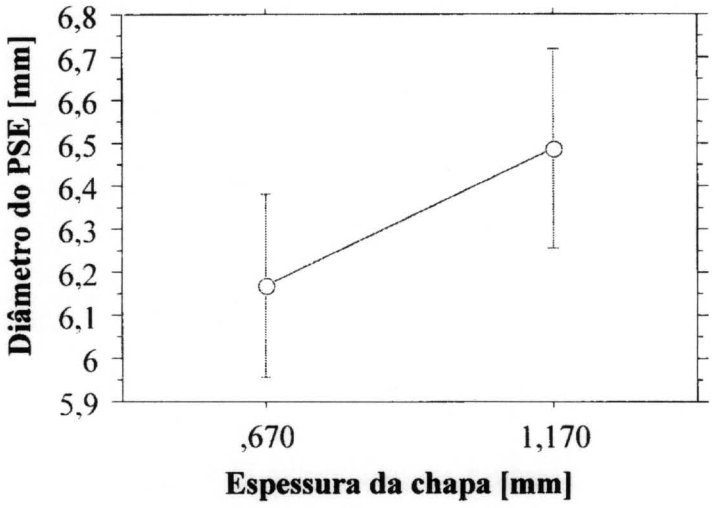


Fig. 76
Efeito espessura da chapa

Um factor de fraca correlação com a resposta estudada, é o tempo de soldadura, como se pode observar no gráfico da figura 77. É natural que para tempos de soldadura muito longos, como é o caso da utilização de 16 ciclos, as soldaduras apresentem diâmetros menores, pois a lentidão do aquecimento, origina uma elevação de temperatura do metal a soldar, que sobrepassa a zona do ponto de soldadura. Nesta situação, os eléctrodos deixarão marcas profundas na superfície das chapas (identação) e o núcleo de metal fundido diminui, com a saída do próprio metal, para a superfície das peças e dos eléctrodos, que se degradarão mais rapidamente.

O esforço de soldadura, com uma correlação pouco significativa (P = 0,4%), intervém de forma negativa, ou seja, o seu aumento, faz diminuir o diâmetro do ponto de soldadura. (Fig. 78)

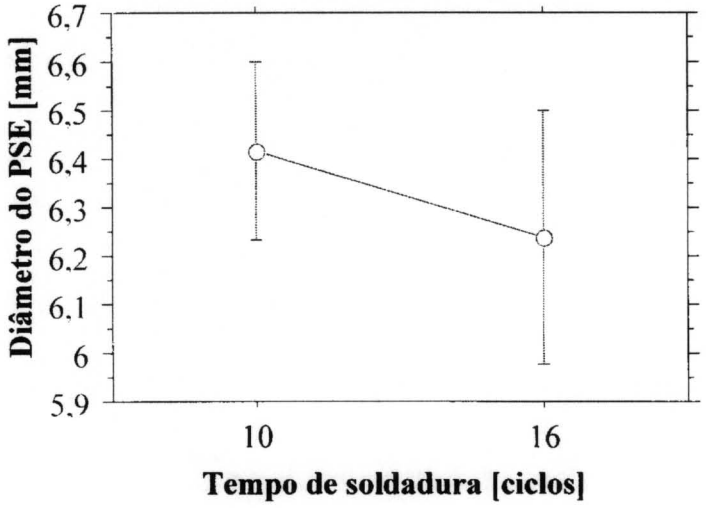


Fig. 77
Efeito tempo de soldadura

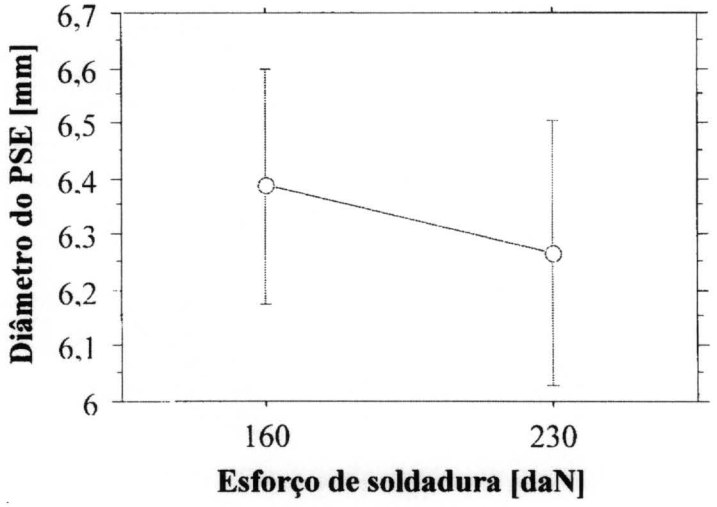


Fig. 78
Efeito esforço de soldadura

Analisemos agora os gráficos relativos às diferentes interacções existentes entre os diversos factores estudados.

Assim, na fig. 79, podemos ver que o aumento do diâmetro do eléctrodo é mais significativo para o aumento do ponto de soldadura, quando trabalhamos com valores menores da intensidade da corrente. Para valores mais altos da intensidade da corrente, o efeito não é tão acentuado.

Outra interacção (Fig. 80), com alguma importância (P=5,1%), é a interacção tempo de soldadura / espessura da chapa, que apesar de apresentar respostas iguais para o 1º nível do tempo de soldadura (10 ciclos), quando passamos ao 2º nível (16 ciclos), tem efeito contrário na resposta estudada, sendo positivo, no caso de chapas de 1,17 mm de espessura e negativo, no caso de chapas de 0,67 mm. Tal facto explica-se, porque nas chapas mais finas, com um tempo de soldadura demasiado longo, a identação dos

BIBLIOTECA F.E. PORTO

eléctrodos na superfície é maior, reduzindo deste modo o diâmetro do ponto de soldadura. O tempo de soldadura é função da espessura do material a soldar.

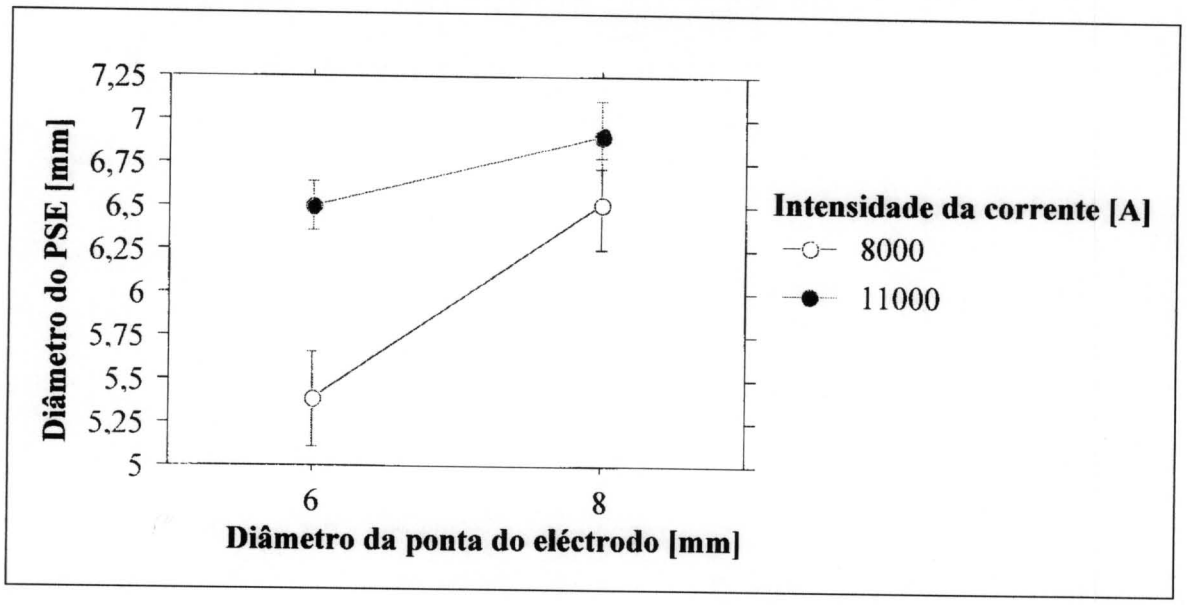


Fig. 79
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / intensidade da corrente

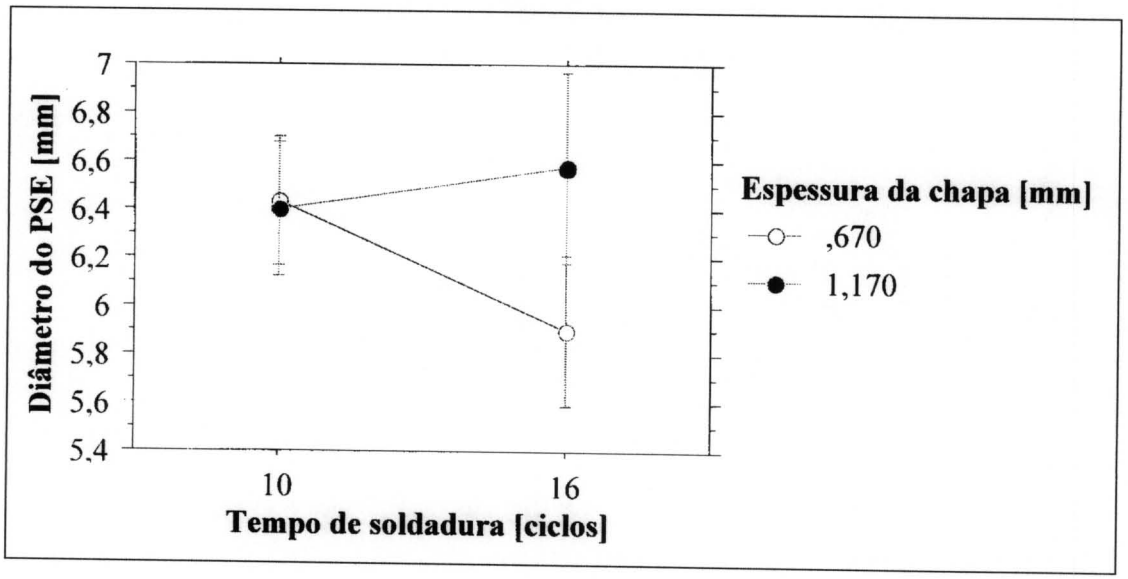


Fig. 80
Efeito tempo de soldadura / espessura da chapa

Com a elevação da intensidade da corrente de soldadura, como se pode observar na fig. 81, o diâmetro do ponto de soldadura aumenta, no entanto, esta subida, é mais acentuada quando estamos na presença de chapas nuas, comparativamente, com a utilização de chapas galvanizadas de ambos os lados. A intensidade da corrente, é função do tipo de revestimento e das características em geral das peças a soldar.

Esta variável, está também relacionada com o esforço de soldadura (fig. 82), cujo aumento, tem efeitos diferentes no diâmetro do ponto de soldadura resultante, quer se

trate de intensidades da corrente de maior ou menor valor. Relaciona-se ainda com o tempo de soldadura, sendo o efeito do seu aumento, mais significativo na resposta a estudar, perante tempos de soldadura mais lentos, como podemos ver pelo gráfico da fig. 83.

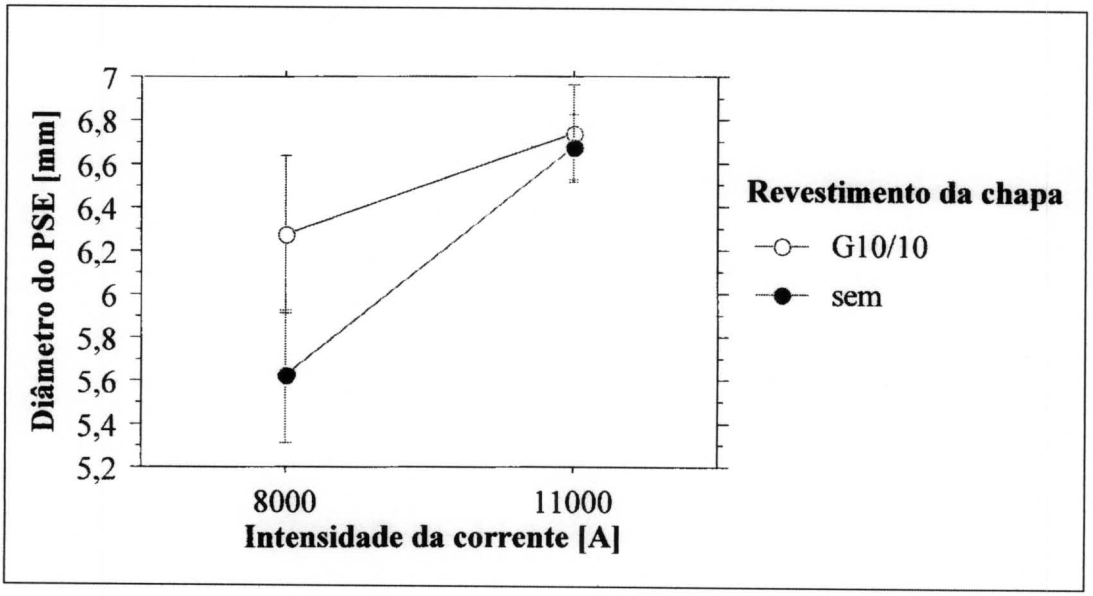


Fig. 81
Efeito intensidade da corrente / revestimento da chapa

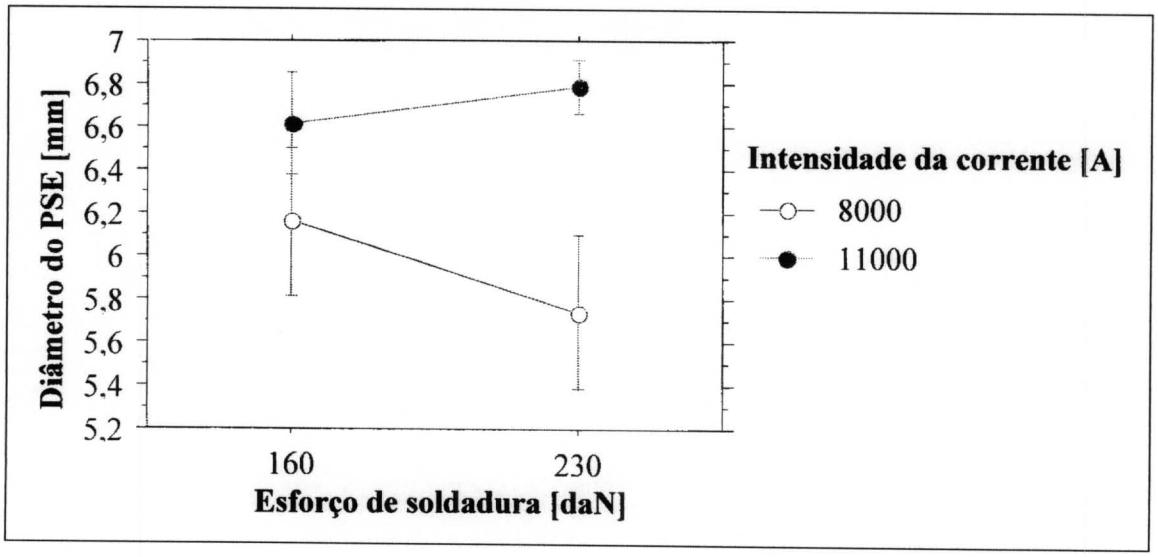


Fig. 82
Efeito esforço de soldadura / intensidade da corrente

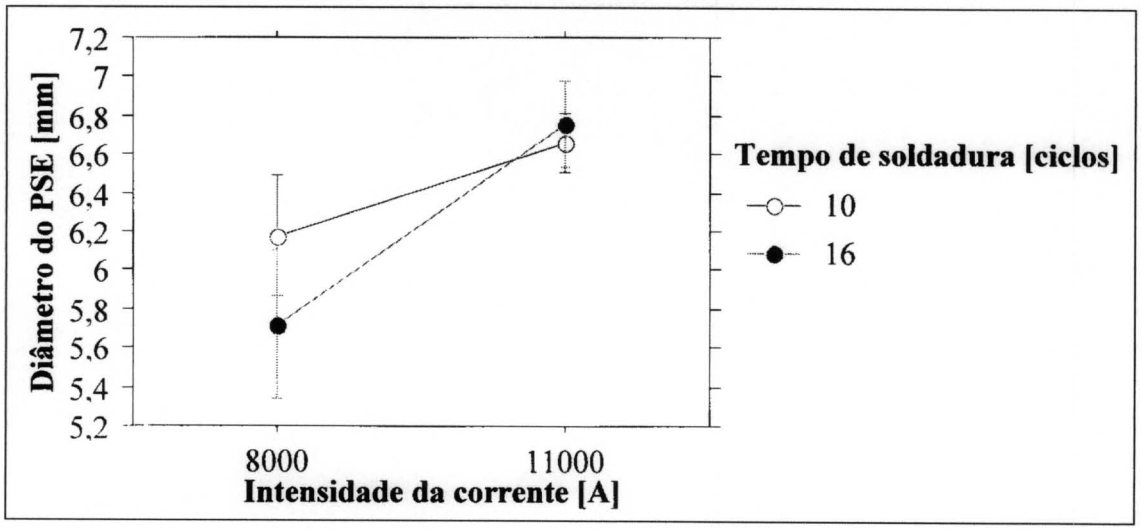


Fig. 83
Efeito intensidade da corrente / tempo de soldadura

Na fig. 84 e 85, podem observar-se as interacções do esforço de soldadura com as características das peças a soldar, nomeadamente, a espessura da chapa e o seu revestimento. Assim pode constatar-se, que este efeito é mais visível para baixas pressões, no que diz respeito à espessura de chapa e para pressões superiores, no que diz respeito ao seu revestimento.

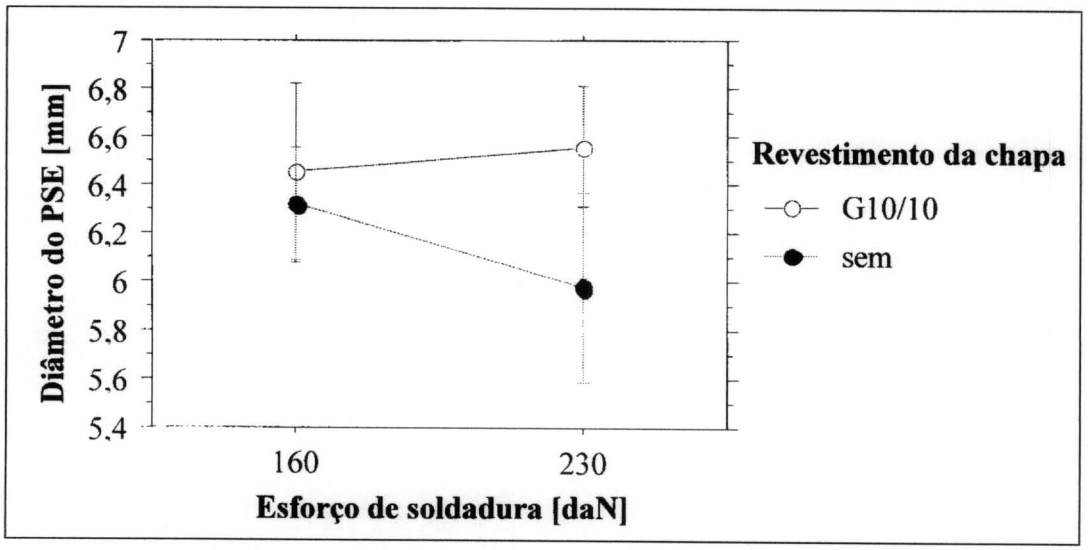


Fig. 84
Efeito esforço de soldadura / revestimento da chapa

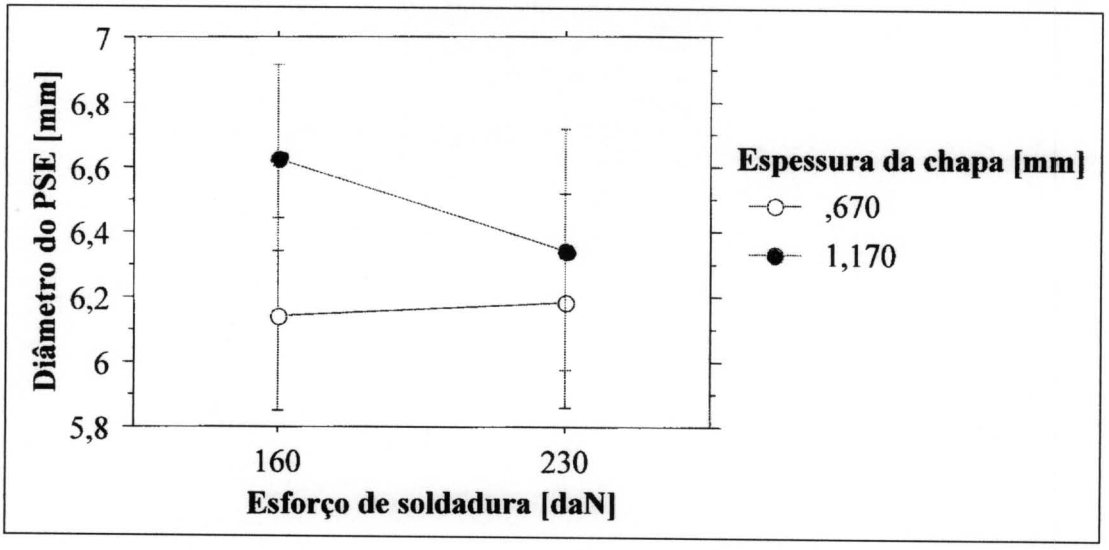


Fig. 85
Efeito esforço de soldadura / espessura da chapa

Quando utilizamos eléctrodos de face activa maior (8 mm), como se pode observar na fig. 87, existe uma ligação deste factor com o esforço de soldadura empregue, dando origem a diâmetros do ponto de soldadura maiores ou menores, consoante se trate de menores ou maiores valores para o esforço de soldadura. Quando utilizamos eléctrodos de face activa menor, existe uma relação deste factor com o tempo de soldadura utilizado, dando origem a pontos de soldadura com diâmetro menor, para tempos de soldadura mais longos (fig. 86).

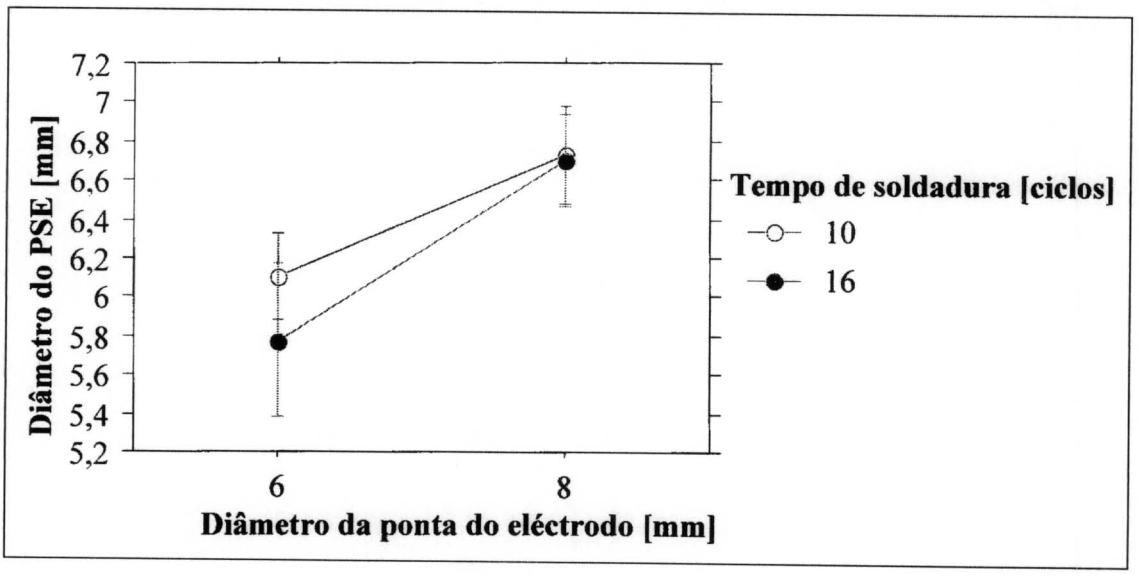


Fig. 86
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / tempo de soldadura

Apesar da interacção revestimento da chapa / espessura da chapa, surgir com uma contribuição P=0,3% (fig. 88), não vejo que exista qualquer ligação entre estes factores, uma vez que sendo ambos, estados do material a soldar, em nada se podem influenciar um ao outro. O valor apresentado, deve ser encarado, como uma falha do próprio programa de análise de dados, ou proveniente de causas aleatórias desconhecidas.

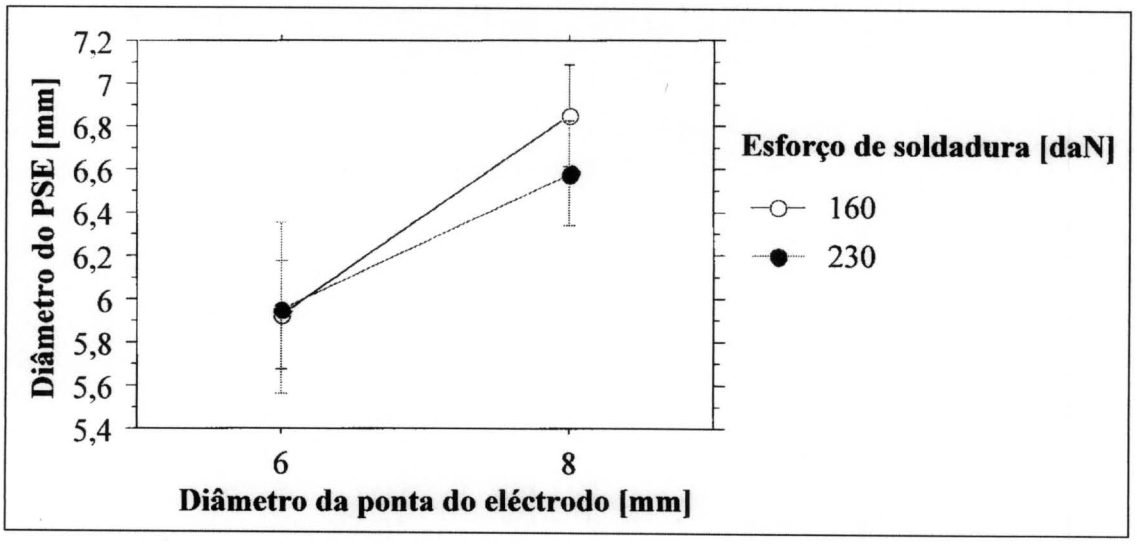


Fig. 87
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / esforço de soldadura

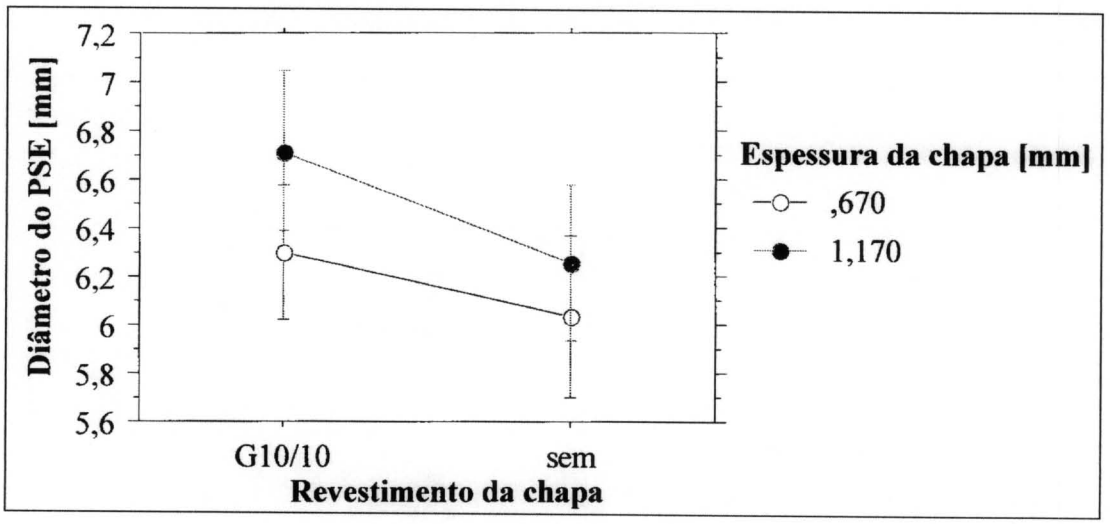


Fig. 88
Efeito revestimento da chapa / espessura da chapa

No gráfico da fig. 89, surge o esforço de soldadura com uma interdependência em relação ao tipo de revestimento da chapa, sendo o seu efeito negativo, mais significativo em chapas galvanizadas.

Aparece também a intensidade da corrente (fig. 90) dependendo da espessura das chapas a soldar. Para esta interacção, esperava-se um maior nível de contribuição P, pois a espessura é um factor determinante na escolha da intensidade de soldadura.

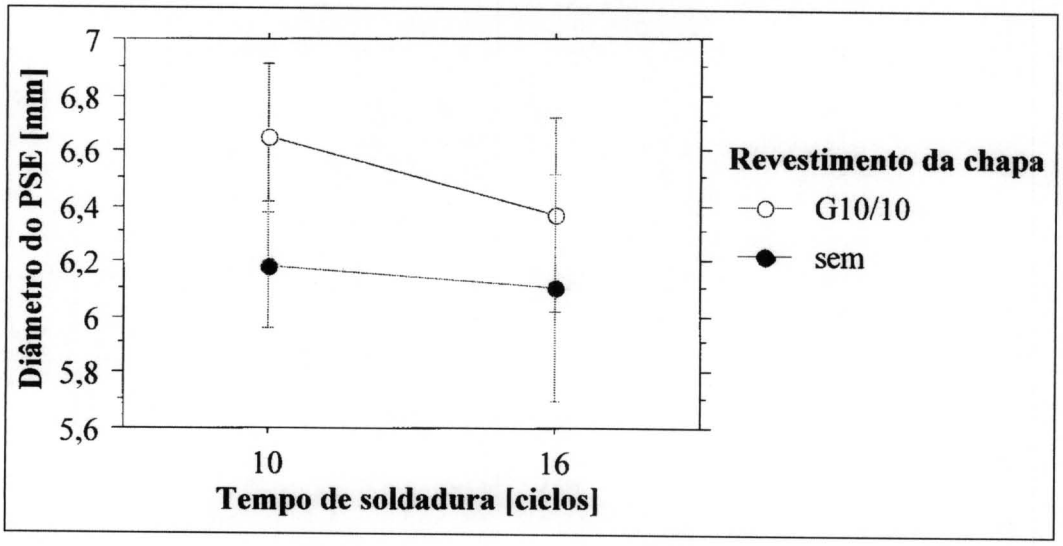


Fig. 89
Efeito tempo de soldadura / revestimento da chapa

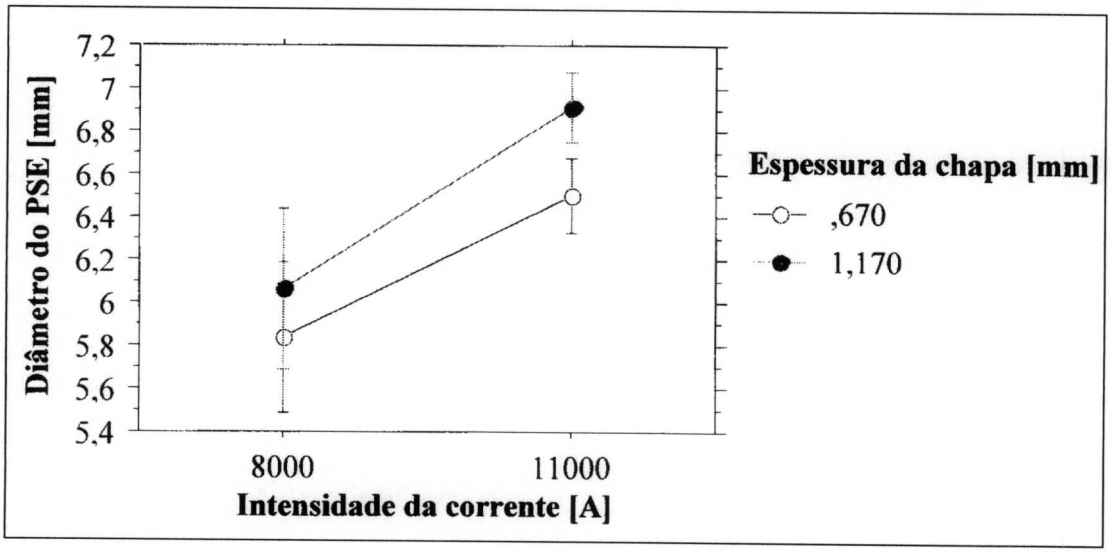


Fig. 90
Efeito intensidade da corrente / espessura da chapa

Nas figuras 91, 92 e 93, não se observam interacções entre os factores, podendo concluir-se da experiência realizada, que o diâmetro da ponta do eléctrodo, não é função da espessura da chapa, nem do seu revestimento e que o esforço de soldadura e o tempo de soldadura não são interdependentes.

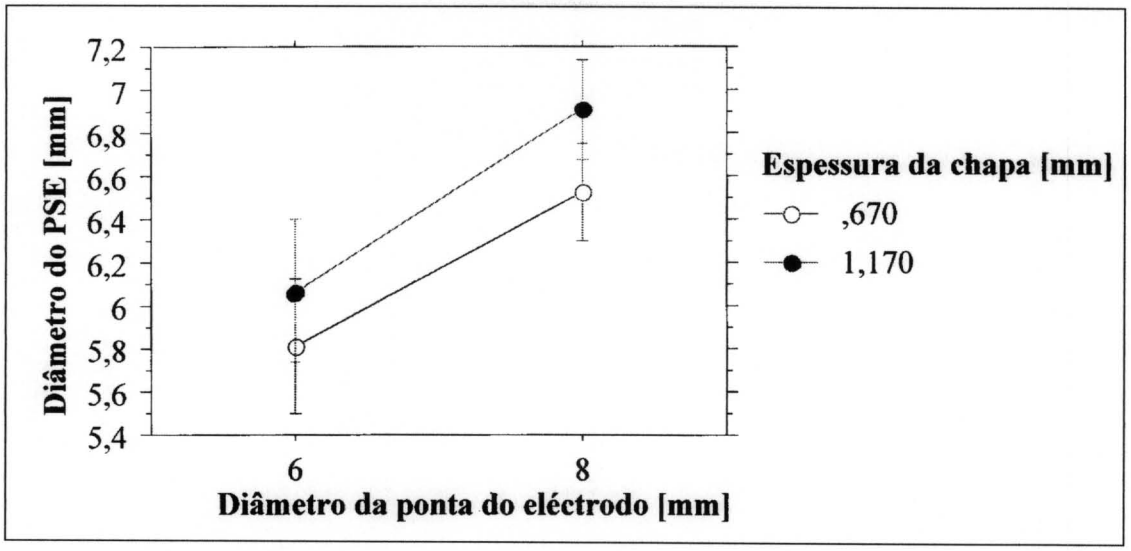


Fig. 91
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / espessura da chapa

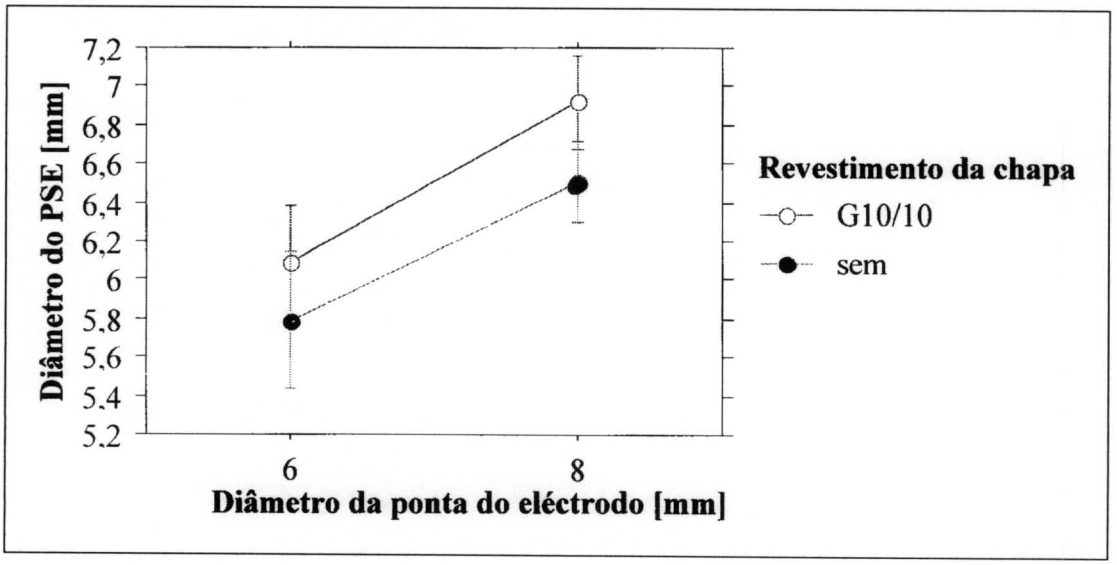


Fig. 92
Efeito diâmetro da ponta do eléctrodo / revestimento da chapa

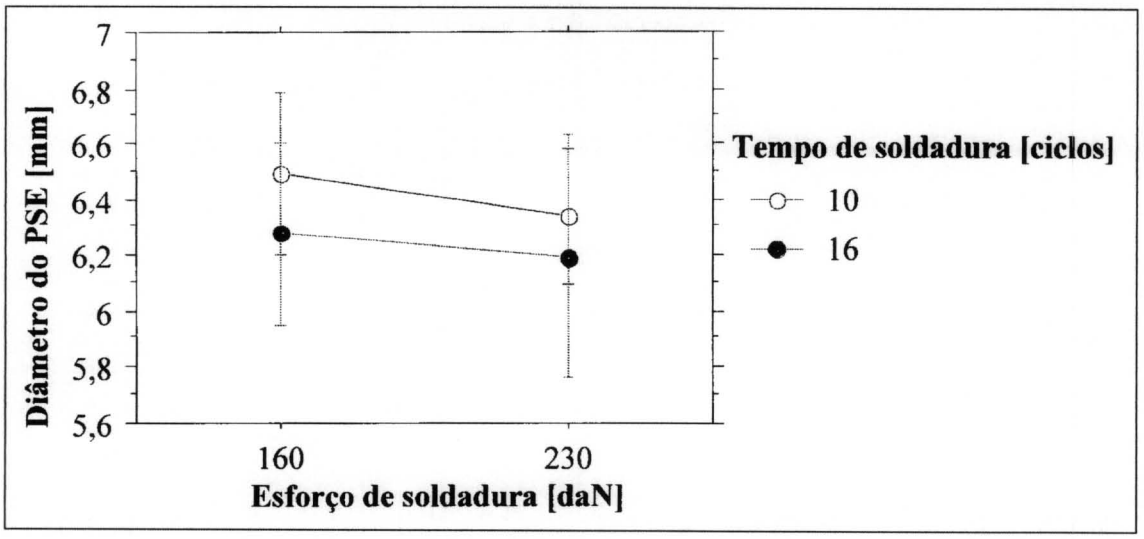


Fig. 93
Efeito esforço de soldadura / tempo de soldadura

4.3. Conclusão do capítulo 4

Pela análise dos resultados dos ensaios realizados, pode concluir-se que o factor mais influente na resistência mecânica de um ponto de soldadura, mantendo constantes todas as outras variáveis do processo, não abrangidas por este estudo, são as características das peças a soldar, nomeadamente, a espessura das peças e o seu revestimento. De facto, é através do conhecimento destes dois factores que se podem estabelecer os parâmetros de soldadura propriamente ditos.

Como parâmetro de soldadura mais importante, entre os factores escolhidos, surge a intensidade da corrente de soldadura, como era de esperar.

Contrariamente às expectativas, o tempo de soldadura, o esforço de compressão dos eléctrodos e o diâmetro da ponta do eléctrodo, não apresentaram qualquer contribuição para a variação da força de ruptura, o que significa que não foram bem escolhidos, ou que o seu tipo de contribuição se reflecte sobre outras características, diferentes da estudada, como a qualidade de aspecto do ponto de soldadura, ou o seu diâmetro, por exemplo.

Como interacções entre factores, deve considerar-se o efeito provocado pela variação simultânea do esforço de compressão e do tempo de soldadura, pelas razões já referidas.

As restantes interacções apresentam níveis de contribuição muito reduzidas, ou nulas, o que significa que são independentes.

Outra resposta estudada foi o diâmetro do ponto de soldadura resultante. Pela análise dos resultados obtidos, é possível identificar as contribuições de cada factor, bem como as suas interligações. Assim, tem-se como factores determinantes, o diâmetro da ponta

do eléctrodo e a intensidade da corrente, seguindo-se com contribuições menores, as características das peças, revestimento e espessura, o tempo de soldadura e o esforço de soldadura.

Foi possível também, estabelecer interacções entre todos os factores, à excepção das relações dxR, dxe e FXt. Isto significa, que há uma forte dependência entre os diversos factores estudados, que deve ser contemplada sempre que se pretenda levar a cabo, qualquer alteração nestes factores. Estando intimamente ligados, não podemos esquecer que, o efeito da mudança de um destes factores, não pode ser analisada isoladamente, mas terá sim um efeito acrescido, proveniente da acção dos factores com os quais interactua.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES / LIMITAÇÕES / PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Este trabalho, permitiu o conhecimento e a compreensão do processo de soldadura por resistência eléctrica por pontos. Foram apresentadas as suas principais variáveis, bem como factores que intervêm na formação de um ponto de soldadura.

De uma forma bastante geral, foi feita uma apresentação dos aços, material utilizado para a realização das soldaduras; bem como o tipo de equipamento utilizado.

Os principais objectivos do presente trabalho, penso terem sido alcançados, uma vez que através dos ensaios experimentais realizados e após a análise dos resultados obtidos, foi possível identificar as variáveis do processo que apresentam uma maior correlação com as respostas estudadas, assim como estabelecer as interacções existentes entre esses factores.

Entre outros aspectos, foi possível analisar o efeito da utilização de determinados parâmetros de soldadura, quando pretendemos soldar chapas de aço revestidas à base de zinco, cujo revestimento é realizado por electrozincagem, ou por galvanização, comparativamente com a utilização de chapas de aço, sem qualquer tipo de revestimento. Este aspecto, é presentemente de interesse fundamental na indústria automóvel, onde nos últimos tempos, com o intuito de oferecer uma garantia anti-corrosão mais alargada nos veículos, se tem recorrido em grande escala, à utilização de chapas galvanizadas ou electrozincadas de ambos os lados. Obviamente, esta situação trouxe algumas dificuldades à realização dos pontos de soldadura, tanto do ponto de vista da qualidade do ponto, como do ponto de vista económico.

Outro aspecto de grande interesse que foi possível constatar, foi a importância da escolha da "espessura de referência", que experimentalmente foi o factor de maior contribuição para a força de ruptura, pois é através deste factor, conjuntamente com o revestimento das peças a soldar, que devem ser definidos os parâmetros de soldadura do processo. Não devemos esquecer, no entanto, as diversas interacções existentes entre estes parâmetros.

Com este trabalho, verificámos que é possível efectuar soldaduras de qualidade e de boa resistência à ruptura, com parâmetros de soldadura diferentes dos parâmetros de soldadura teóricos, definidos em normas de soldadura ou através de programas informáticos. Tal facto, permite-nos alargar o campo e o domínio de soldabilidade, o que em determinadas situações, é muito útil, como nos casos em que por qualquer deficiência técnica, a pinça de soldadura que faz determinada operação, não nos permita obter os parâmetros teóricos definidos. Nestes casos, podemos trabalhar com parâmetros de soldadura "degradados". Estes, não sendo os definidos teoricamente, para as características das peças a soldar, encontram-se ainda dentro do domínio e campo de soldabilidade e por isso dão origem a soldaduras conformes.

Contudo, apesar das condições ideais, com parâmetros de soldadura teóricos, como o tipo de equipamento de soldadura a utilizar, como a sequência de soldaduras a realizar, entre outros factores, deverm ser previamente definidas e determinadas, só através da prática, é possível estabelecer com exactidão, os factores que optimizam o processo de soldadura.

No que diz respeito aos critérios de avaliação da qualidade, de um ponto de soldadura, eles são bastante limitados, pois os ensaios não destrutivos, que habitualmente se realizam, não nos permitem ter uma visão real da qualidade do processo, uma vez que apenas verificam a existência de pontos de soldadura colados e de uma forma muito geral, pois apenas alguns pontos de soldadura são verificados.

Os ensaios destrutivos, dão-nos uma visão mais fiável da qualidade do ponto internamente, mas como se compreende, apenas se efectuam com uma periodicidade alargada, por serem muito dispendiosos. Além disso, detectam o problema tardiamente. Ou seja, não existe ainda nenhum meio de controlo capaz de nos dar informação imediata e precisa sobre a qualidade do ponto de soldadura, no decorrer do processo de soldadura, que nos permita tomar conhecimento imediato do problema existente, para poder actuar prontamente.

É por isso fundamental, o conhecimento dos diversos factores que intervêm no processo e uma correcta definição dos parâmetros de soldadura, bem como um equipamento de soldadura adequado à operação, para o qual deve existir um plano de manutenção preventiva bem executado.

Concluindo, resta salientar que os objectivos deste trabalho foram alcançados, uma vez que através da análise realizada, foi possível identificar os factores mais significativos e as suas interacções. Desta forma, pelo conhecimento dos órgãos dos equipamentos de soldadura, que estão directamente relaccionados com estes factores, será possível definir para os mesmos, um plano de manutenção preventiva exaustivo, tendo em vista a optimização do processo de soldadura por resistência eléctrica por pontos.

5.2 - Limitações

Os resultados obtidos neste trabalho, foram obtidos com base num campo muito restrito de variáveis. De facto existem muitas outras variáveis que afectam a formação de um ponto de soldadura e que não foram tidas em conta neste estudo. Concretamente, o tempo de acostagem e o tempo de forjagem, de grande importância no ciclo de soldadura.

Relativamente aos ensaios realizados, penso que seria interessante, se os prevetes tivessem sido realizados em cruz, permitindo através de um equipamento adequado, efectuar ensaios por arrancamento, obtendo um maior número de informações sobre o ponto de soldadura.

Não devemos esquecer, no entanto, que os resultados obtidos, dizem respeito a provetes experimentais, realizados com condições diferentes das existentes ao longo do processo de soldadura em contínuo, onde existem vários pontos de soldadura na mesma zona, podendo verificar-se o efeito de "shunt" e onde uma pinça de soldadura pode fazer mais

de 50 pontos de soldadura consecutivos, o que provoca o seu aquecimento, mesmo com um bom sistema de refrigeração. Existe o desgaste dos eléctrodos, a sujidade nas chapas a soldar, o posicionamento das pinças, a sobreposição dos conjuntos de peças, nem sempre perfeito, enfim toda uma série de factores que não foram tidos em conta na realização dos ensaios, mas que afectam o processo e consequentemente a definição dos parâmetros de soldadura.

Os equipamentos de soldadura, já contemplam alguns dispositivos capazes de fazer face a problemas como estes. É o caso do desgaste dos eléctrodos, que é contemplado através de um dispositivo existente no conjunto transformador - pinça de soldadura, permitindo estabelecer " patamares" de aumento da intensidade da corrente, em função do desgaste sofrido pelo eléctrodo, permitindo ainda definir uma "lei de rodagem" destes eléctrodos. Assim, consoante o desgaste sucessivo do eléctrodo, haverá aumentos sucessivos da intensidade da corrente. Além disso, no momento exacto em que há necessidade de fresar ou "rodar" o eléctrodo, é próprio equipamento que indicia essa situação.

No entanto, este é um processo com muitos factores envolvidos, onde nem sempre é fácil, na prática, averiguar, qual ou quais os factores que deram origem a determinado defeito. Se a tudo isto, quisermos somar o facto deste ser um processo manual, torna-se ainda mais difícil reproduzir na prática as condições experimentais.

Por falta de tempo, não foi feita a análise metalográfica dos pontos de soldadura, o que certamente nos permitiria obter um maior número de informação sobre a sua qualidade interna. Pelo mesmo motivo, não foram definidas as equações de correlação entre os diversos factores analisados.

5.3. Propostas para trabalhos futuros

Numa perspectiva de dar continuidade ao trabalho realizado, seria interessante, determinar as equações que relacionam os diversos factores entre si, através de um programa estatístico semelhante ao utilizado. Desta forma, poderíamos ter presentes fórmulas de equivalência, entre eles.

Outro trabalho importante a realizar, seria identificar, quais os componentes críticos dos equipamentos de soldadura e estabelecer um plano de manutenção preventiva para os mesmos. Não será difícil analisar que, sendo o diâmetro da ponta do eléctrodo, o factor de maior correlação com o diâmetro do ponto de soldadura, será fundamental estabelecer um plano de manutenção preventiva para os eléctrodos de soldadura, definindo para estes componentes críticos, uma lei de rodagem.

BIBLIOTECA F.E. PORTO

BIBLIOGRAFIA

[1] – Lheureaux, G. E. e Bellotte, E. J. "Le Soudage par Resistance" – Dunod, Paris, 1965.

[2] - Vecchio, E. J. Del , "Resistance Welding Manual" Third Edition. Volume I, Resistance Welder Manufacturers Association, Philadelphia 1956.

[3] – Santos, J. F. O. e Quintino, L. "Processos de Soldadura" ISQ Edições Técnicas 2ª Edição.

[4] - Han, Z., Orozco, J., Indacochea, J.E. e Chen, C. H., "Resistence Spot Welding: A Heat Transfer Study", Welding Journal Vol.68 Nº9, 1989.

[5] – Thornton, P. H., Krause, A. R. e Davies, R.G., "Contact Resistances in Spot Welding", Welding Journal, Vol.75 Nº12, 1996.

[6] – Roguin, P. H., " Le Problème des Toles d'Acier Zingué en Soudage par Resistance par Points - Soudage et Techniques Connexes, Juillet - Août 1995.

[7] – Chang, H. S. e Cho, H. S. " A Study on the Shunt Effect in Resistance Spot Welding" Welding Journal Vol. 69 Nº8, 1990.

[8] – Kucza, J. C., Hank, E. e Chollat, H. "Soudure par Résistance par Points des Alliages d'Aluminium pour l'Automobile" Revue Soudage et Techniques Connexes, Juillet – Août , 1996.

[9] – Bowers, R. J., Sorensen, C. D. e Eagar, T. W. "Electrode Geometry In Resistence Spot Welding" - Supplement To The Welding Journal, February 1990, W. Journal Vol. 69 Nº 2 1990.

[10] – Gedeon, S. A., Sorensen, C. D., Ulrich, K. T. e Eagar, T. W., "Measurement of Dinamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds", Welding Journal Vol.66 Nº12, 1987.

[11] – Ghosh, P.K., Gupta, P. C., Ramavtar e JHA, B. K., "Weldability of Intercritical Annealead Dual-Phase Steel With the Resistance Spot Welding Process", Welding Journal Vol.70 Nº1, 1991.

[12] – Heb, J., Kern, T., Kriegl, W. e Schweizer, M., "Visualization of the Resistence Spot Welding Process in the Production Line " - Welding Journal Vol. 77 Nº 12, 1998.

[13] – Figueiredo, Miguel Augusto Vigário e Fernandes, António Augusto, "O Método de Taguchi no Planeamento e Análise de Operações de Soldadura" - Ingenium - Revista da Ordem dos Engenheiros II série nº11, Agosto/Setembro 1996.

ANEXOS

ANEXO I

PSA
PEUGEOT
CITROËN

SOUDAGE ELECTRIQUE PAR RESISTANCE TECHNIQUES DE SOUDAGE SPECIFICATIONS GENERALES

NORMALISATION
DES BIENS D'EQUIPEMENT

E34.03.180.G

Décembre 1998 P : 1/25

ICS : 25.160.10

Avant-propos

À la date de publication du présent document, il n'existe pas de norme internationale, européenne ou française traitant du même objet.

Objet et domaine d'application

Le présent document réunit les informations nécessaires à l'étude et à la réalisation des moyens de soudage utilisés par le groupe PSA Peugeot Citroën.

Descripteurs

Procédé, soudage par résistance.

Modifications

Par rapport à l'édition précédente :

Actualisation du document.

Ajout des paragraphes 1.3.1, 1.3.5, et 1.5.2.4

Modification des paragraphes 1.3.2, 1.3.3, 1.3.4, 1.4, 1.5.2 et 1.7.4.

ETABLI PAR	REMPLACE	HOMOLOGATION
Filière 34A	Même indice de 11/95	DTAT/MPG/RTC/CNE M. NOGARET

Reproduction interdite

Sommaire

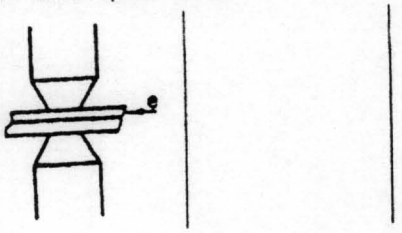
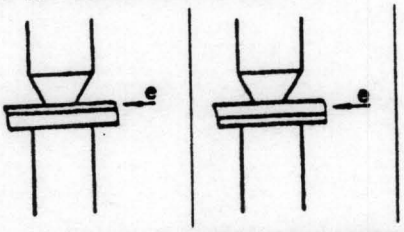
		Page
1	**Techniques de soudage**	**5**
1.1	Épaisseur de référence	5
1.2	Modes de soudage	8
1.3	Soudage hors normes	8
1.4	Classes de paramètres	15
1.5	Paramètres de soudage	15
1.6	Méthodes de soudage	31
1.7	SERGIS	35
2	**Définition du processus**	**46**
2.1	PSE attribut B	47
2.2	PSE attribut A	49
2.3	Moyens de retouche	51
2.4	Loi d'incrémentation des courants de soudage	52
3	**Détermination des moyens de soudage – Phase préparatoire**	**60**
4	**Liste des documents de référence**	**65**

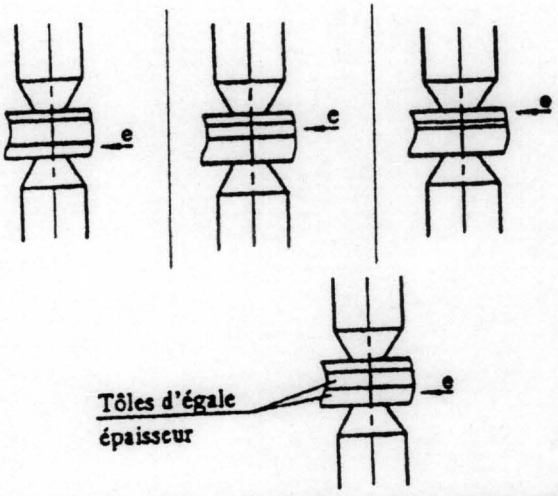
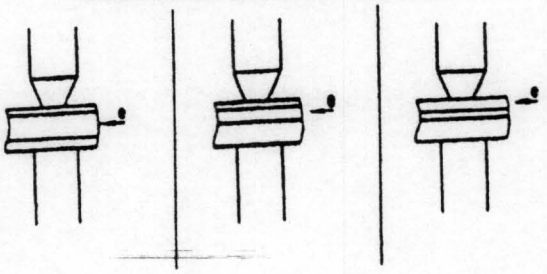
1 Techniques de soudage

1.1 Épaisseur de référence

Les paramètres de soudage (intensité, effort, temps) et le choix de la méthode de soudage à utiliser pour un assemblage déterminé sont fonction d'une épaisseur de référence "e" définie dans le tableau 1.

Tableau 1

<table>
<tr><th></th><th>Entre électrodes</th><th>Sur contre électrode</th></tr>
<tr><td rowspan="2">2 tôles</td><td>Valable pour simple point et double point push-pull</td><td>Valable pour simple point, double point série et double point push-pull</td></tr>
<tr><td>e = tôle la plus mince

</td><td>e = tôle côté électrode active


Δ épaisseur entre tôle côté contre électrode et épaisseur référence ≤ 0,2 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3 tôles</td><td>e = tôle moyenne

</td><td>Valable pour simple point et double point push-pull sur tôle nue uniquement
e = la plus épaisse des deux tôles qui n'est pas en contact avec la contre électrode


Δ épaisseur entre tôle côté contre électrode et épaisseur référence ≤ 0,2 mm
Le soudage pulsation sur contre électrode est interdit</td></tr>
</table>

NOTE : Pour d'autres configurations d'assemblage, nécessité de réaliser des essais préalables de soudabilité auprès du service PSA Peugeot Citroën habilité.

Soudage des tôles revêtues sur contre électrode ou en double point série interdit.

Définition d'une contre électrode : mise plate, électrode plate, rayonnée de 40° et 80° ayant une face active supérieure de 2 mm aux faces actives classiques de Ø 6 et Ø 8.

1.2 Modes de soudage

— Simple point direct.

— Simple point indirect.

— Double point push-pull.

— Double point série sur vis et écrou (suivant avis du soudeur. Éviter de souder les bossages annulaires sur tôles fines, réduire l'impédance).

— Soudage normal pour e ≤ 1,2.

— Soudage pulsation pour e > 1,2.

1.3 Soudage hors normes

À la conception du véhicule, tout soudage hors norme nécessite une dérogation écrite comprenant :

— la définition des paramètres de soudage par le service PSA Peugeot Citroën habilité ;

— la validation des résultats par les services études véhicule ;

— la fourniture du compte rendu d'essai au dossier machine.

Un point est considéré hors norme suivant les cas ci-après (voir 1.3.2, 1.3.3 et 1.3.4).

1.3.1 Gammes mixtes

IMPÉRATIF : Au stade étude les gammes mixtes sont strictement proscrites.

Pour des raisons de qualité et d'aspect, il est déconseillé, dans une même gamme de soudage, d'utiliser une même partie travaillante pour effectuer des points de soudure soudage normal et des points de soudure soudage pulsations.

Seul le responsable soudage du service Méthode Ferrage pourra valider cette utilisation en appliquant les restrictions suivantes :

— Soudage pulsation avec embouts de Ø 6 actif
(le cas contraire soudage normal et embout Ø 8 actif est à proscrire).

— 30 % de points pulsation maximum.

— Pas plus de 4 points consécutifs.

— Épaisseur de référence : 2 mm maximum.

— Débit de la pince : 4 l/min minimum.

— Facteur de marche : 12 % maximum.

NOTE : Cette solution altérera :

— la durée de vie des électrodes d'environ 20 % ;

— la qualité et l'aspect des points de soudure électrique (PSE).

Dans le cas de gammes mixtes, les paramètres à utiliser sont les paramètres de soudage pulsation aménagés pour l'électrode de diamètre 6 actif (voir ci-après).

Effort de soudage inchangé	
I = I standard	I = I standard – 800 A
T = temps de soudage – 1 train	T = temps de soudage standard
Les aménagements des paramètres nous amènent à revoir la définition de certaines pinces robot à transformateur incorporé existantes.	

1.3.2 Soudage par point

— Soudage pulsation avec face active de l'électrode de Ø 6.

— Soudage normal avec face active de l'électrode de Ø 8.

— Assemblage 4 épaisseurs.

— Mauvaise disposition des tôles dans l'assemblage.

— Non respect des normes PSA Peugeot Citroën B131220 et B131226.

— Soudage faible effort.

— Soudage de nouveaux matériaux (revêtements, tôles).

— Soudo-collage.

1.3.3 Soudage des vis et écrous

— Vis et écrous non conformes aux normes PSA Peugeot Citroën en vigueur (C171108, C214210, C924220, etc.).

— Soudage différent du soudage simple point.

— Assemblage écrou/tôle non conforme (définition épaisseur de tôle min./max. en fonction des diamètres des écrous).

— Soudage de vis ou écrou avec un robot ou un poste à pince.

1.3.4 Soudage des bossages

— Assemblage hors norme (épaisseur de tôle, bossage hors norme).

— Diamètre de point non conforme à la norme PSA Peugeot Citroën B131230.

— Soudage de bossages avec un robot ou un poste à pince.

1.3.5 Soudage de l'aluminium

Informations générales à préciser selon les applications au fur et à mesure des projets

Matières

Nuance 5182, 5754, 6016.

Épaisseur de 1 à 1,5 mm.

Électrodes

Utiliser impérativement celles définies au standard GE34-007G (électrode cylindrique Ø actif de 6 mm).

Technique de soudage

Soudage simple point (SP) en 50 Hz ou moyenne fréquence (MF). Pour cette dernière technique de soudage, lorsque l'aspect du point est spécifié au plan (présentation soignée), il est impératif que l'électrode de polarité ⊖ (Négative) soit côté visible du point.

Paramètres de soudage (ordre de grandeur)

Temps de soudure (TS) : ≈ 4 périodes (~).

Effort : ≈ 200 daN.

Intensité de 23 à 25 kA pour la nuance 5000.

Intensité de 28 à 30 kA pour la nuance 6000.

Rodage (application connue à ce jour)

Série 5000 en MF : la fréquence de rodage est d'environ 650 points, celle-ci est imposée par l'aspect du point et non sa tenue.

Série 6000 en 50 Hz : cette nuance crée des collages d'électrode sur tôle qui impose une incrémentation du courant de soudage entre deux rodages. La fréquence de rodage imposée par un critère de tenue est de l'ordre de 500 points.

1.3.6 Soudage de tôles à hautes caractéristiques mécaniques (> 400 Mpa)

Les nuances soudables imposent un paramétrage spécifique à ces assemblages, ce qui nécessite des regroupements et affectations de points sur des programmes spécifiques.

En règle générale les paramètres évoluent suivant la tendance :

— TS = standard + ≈ 30 % ;

— Effort = standard actuel + ≈ 25 % ;

— Intensité = standard - ≈ 10 %.

Les règles d'assemblages et paramètres seront définis au fur et à mesure des homologations et validations. Les indications précisées ci-dessus servent d'orientation à l'élaboration des projets.

1.4 Classes de paramètres

Il existe deux classes de paramètres définies dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2

Classe N dite : "normale"	Utilisation préférentielle
Classe L dite : "temps long"	Nécessite l'accord du responsable soudage

Les études ne seront faites qu'en classe de paramètre N.

1.5 Paramètres de soudage

Les paramètres de soudage (intensité, effort, temps) pour les assemblages de deux ou trois épaisseurs sont donnés pour chacune des épaisseurs de référence dans 1.5.1 et 1.5.2.

Ces valeurs ne sont pas données comme valeurs absolues, mais comme recommandations devant servir de base à l'étude des outillages (détermination des circuits secondaires des transformateurs et estimation de la charge des armoires de soudage ou à la détermination des transformateurs de poste à pince).

Les paramètres de soudage double point push-pull sont identiques aux paramètres simple point (suivant 1.5.1 et 1.5.2).

1.5.1 Paramètres de soudage normal

1.5.1.1 Classe N (face active Ø 6 mm)

Épaisseur de référence mm	Temps de soudure (~)				Temps de maintien ~	Effort daN	Intensité (kA) avec tôles						
	Ass. 2 épais		Ass. 3 épais				Nombre de faces revêtues anticorrosion 10 µm						
	<4 rev et 2ème tôle ≤ 1,5 mm	=4 rev ou 2ème tôle > 1,5 mm	<4 rev et 3ème tôle ≤ 1,95 mm	≥4 rev ou 3ème tôle > 1,95 mm			0	1	2	3	4	5	6
0,6	6	8	8	10	6	190	8,5	9,0	9,7	10,5	11,0	11,5	12,0
0,7	8	10	10	12	8	210	8,5	9,0	9,7	10,5	11,0	11,5	12,0
0,8	8	10	10	12	8	230	8,6	9,3	10,0	10,7	11,2	11,8	12,3
0,9	8	10	10	12	8	250	8,7	9,7	10,4	11,0	11,6	12,2	12,6
1,0	10	12	12	14	10	270	8,8	9,8	10,5	11,0	11,6	12,2	12,7
1,2	10	12	12	14	10	300	9,0	10,3	11,0	11,5	12,0	12,6	13,2

Pour soudage sur contre électrode (C.E.) ajouter 1 000 A suivant note DMEI/CEI/EVC N° 4277 de 12/89.

1.5.1.2 Classe L (face active Ø 6 mm)

Épaisseur de référence mm	E max. mm	Temps de soudage ~	Effort daN	Intensité (kA) avec tôles						
				Nombre de faces revêtues anticorrosion 10 µm						
				0	1	2	3	4	5	6
0,7	2	14	165	7,75	8,25	8,85	9,5	10,0	10,25	10,5
0,8	2	15	180	8,25	8,75	9,25	9,75	10,15	10,45	10,7
1,0	2	16	205	8,65	9,25	9,65	10,0	10,35	10,65	10,9
1,2	2	16	240	8,65	9,4	9,9	10,25	10,6	10,9	11,2

1.5.2 Paramètres de soudage pulsation (face active Ø 8 mm)

Épaisseur de référence mm	Temps de maintien ~	Effort daN	Temps de soudure ~		Épaisseur de la deuxième tôle mm	Intensité (kA) avec tôles										
						Épaisseur de la troisième tôle mm										
			Ass. 3 épais	Ass. 2 épais		0	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,5	1,8/2	2,5	3
1,5	12	400	4(5+1)	4(4+1)	1,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,6			
					1,8/2	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,8	12,8	13,0			
				4(5+1)	2,5	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,9	12,9	13,3			
					3	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,2	13,2	13,5			
1,8 à 2	15	450	5(5+1)	5(4+1)	1,8/2	12,2	12,2	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,4	12,6		
				5(5+1)	2,5	12,6	12,6	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	13,0	13,0		
					3	13,2	13,2	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,5	13,5		
2,5	15	500	5(6+1)	5(5+1)	2,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,6	
					3	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,7	13,8	14,0	
3	20	550	6(6+1)	6(5+1)	3	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,9	14,0	14,2

NOTE : 4(5+1) = 4 trains continus de 5 périodes chaudes suivi d'une période de temps froid. La troisième épaisseur peut se trouver indifféremment à l'intérieur ou à l'extérieur de l'assemblage excepté dans la zone grisée où la troisième épaisseur est obligatoirement à l'intérieur (tôle de plus faible épaisseur).

1.5.3 Niveau de regroupement des paramètres

Niveaux de regroup.	Conditions	Robot	M.S.A.* M. à S.*	P. à P.*	Attribut A/B
0	Mêmes codes tôles				A/B
1	Mêmes épaisseurs + mêmes revêtements				A/B
2	Mêmes épaisseurs de référence + même nb de revêtements	●	●		A/B
3	Mêmes épaisseurs de référence + delta de 1 sur le revêt	●	Interdit	●	B
4	Même nb de revêtement + delta de 1 sur l'ép. de référence	●	Interdit	●	B
5	Delta de 1 sur l'ép. de référence et sur le revêtement	Interdit	Interdit	●	B

	Applications autorisées aux intégrateurs.
●	Avec accord du responsable soudeur.

* **M.S.A.** : Machine à souder automatique - **M. à S.** : Machine à Souder - **P. à P.** : Poste à Pince

1.5.4 Paramètres de soudage des vis et des écrous

1.5.4.1 Vis de définition conforme à la norme PSA Peugeot Citroën C171108 et C171110

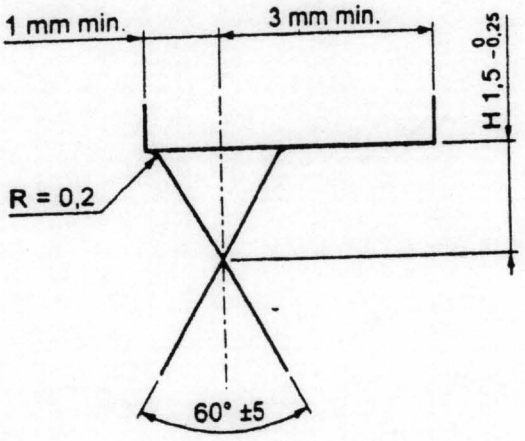
		Vis à 3 bossages				Vis à bossage annulaire			
Vis Ø	Ep. tôle mm	Effort daN	TS ~	INT. Tôle kA	T maintien ~	Effort daN	TS ~	INT Tôle kA	T maintien ~
4	0,7 à 1,2	350	6	10	8	400	4	15	8
	1,5 à 3	350	6	10	8	400	6	15	8
5	0,7 à 1,2	350	6	10	8	400	6	17	8
	1,5 à 3	350	6	10	8	400	8	19	8
6	0,7 à 1,2	350	6	10	8	400	6	20	8
	1,5 à 3	350	6	10	8	400	8	22,5	8
8	0,7 à 1,2	400	8	12,5	10	500	8	27,5	10
	1,5 à 3	400	8	12,5	10	500	8	30,5	10
10	0,7 à 1,2	450	8	13,5	10	600	8	29,5	10
	1,5 à 3	450	8	13,5	10	600	10	34	10
12	0,7 à 1,2	500	8	15	10	700	10	31	10
	1,5 à 3	500	8	15	10	700	10	36	10

Les essais ont été réalisés sur des tôles LAF nues et galvanisées 10 µ ainsi que sur des tôles HLE (34) galvanisées 10 µ.

1.5.4.2 Vis spécifique à bossage triangulaire

Forme du bossage

Bossage triangulaire annulaire continu ou interrompu (3 à 120°).



Paramètres

Les paramètres peuvent être estimés, au stade études, sur la base de données par mm de bossage.

À savoir :

- EFFORT : 20 daN par mm de longueur de bossage ;
- INTENSITÉ : 750 A par mm de longueur de bossage. L'intensité de soudage est obtenue avec une réserve de puissance de 17,5 % (déphasage initiale à 85 % max.) ;
- TEMPS : 8 à 10 ~ en fonction des géométries relatives des deux pièces, ne devant pas compenser un manque de puissance.

1.5.4.3 Écrou de définition conforme à la norme PSA Peugeot Citroën C214210

Écrou Ø	Effort daN	Intensité A	Temps de soudage ~	Temps de maintien ~
M5	300	15 000	6	8
M6	400	15 000	6	8
M8	500	18 000	6	8
M10	600	25 000	8	10
7/16" 20 UNF	600	25 000	8	10

1.5.4.4 Écrou de masse

Écrou Ø	Effort daN	Intensité A	Temps de soudage ~	Temps de maintien ~	Numéro
5,5	400	15 000	8	10	96.176.717.80 79.030.420.62

1.5.5 Paramètres de soudage de bossage (suivant norme PSA Peugeot Citroën B131230) – Intensité avec tôles

Numéro de bossage	Effort daN	Intensité tôle revêtue A	Intensité tôle nue A	Temps de soudage ~
3	180	12 000	9 000	5
4	250	15 000	10 000	6
5	400	16 500	12 000	7
6	500	19 000	15 000	8
7	600	20 000	16 000	10

Pour 2 bossages : x 1,5 effort et intensité

Pour 3 bossages : x 2 effort et intensité

1.6 Méthodes de soudage

1.6.1 Simple point (1 point de soudure par secondaire)

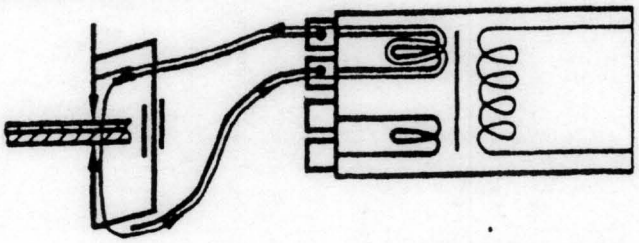


Figure 1 : Avec pince cé (simple point direct)

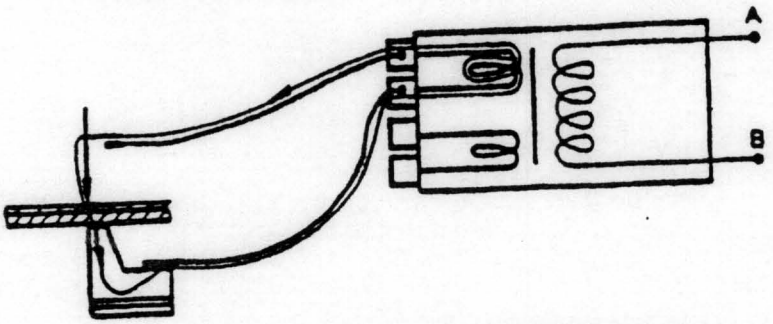


Figure 2 : Simple point direct sur contre électrode

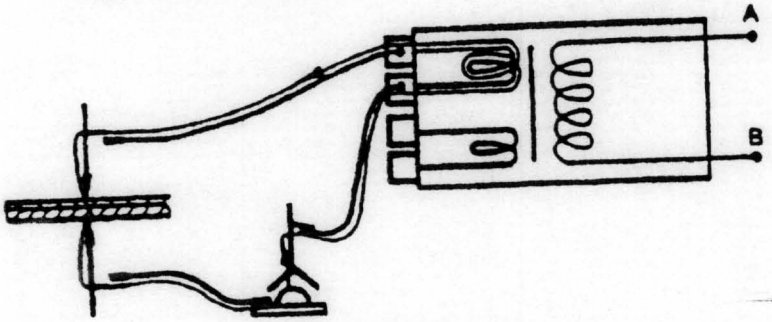


Figure 3 : Simple point indirect

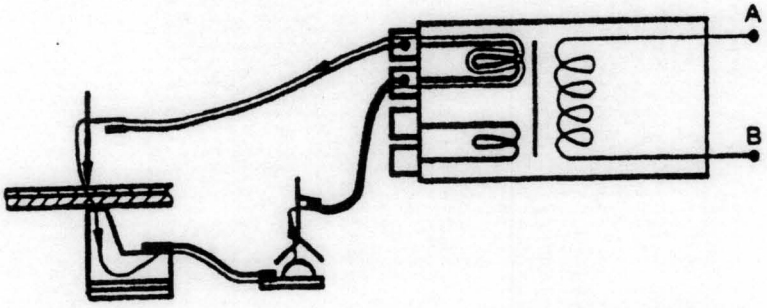
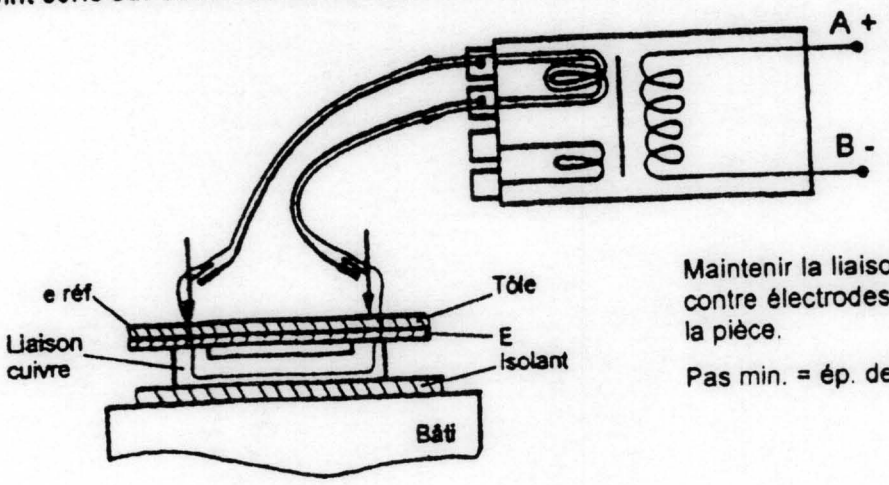


Figure 4 : Simple point indirect sur contre électrode

1.6.2 Double point série sur contre électrode (2 points de soudure par secondaire)



Maintenir la liaison entre les deux contre électrodes au plus près de la pièce.

Pas min. = ép. de référence x 100

Figure 5

1.6.3 Double point push-pull (2 points de soudure avec 2 secondaires)

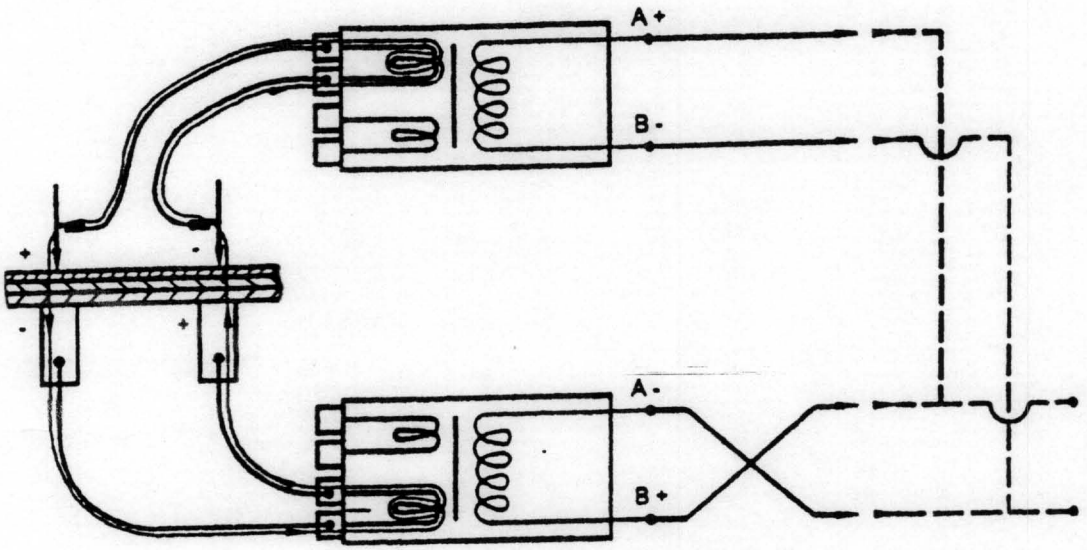


Figure 6 : Sur contre électrode

1.6.4 Soudage par bossage en simple point (indirect)

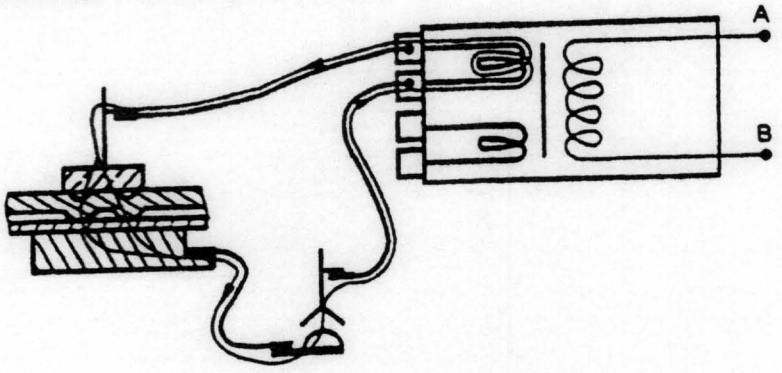


Figure 7

1.7 SERGIS

1.7.1 Informations sur SERGIS

Le logiciel SERGIS (système d'étude et de réalisation des gammes informatisées de soudage) sert :

- à la conception des gammes de soudage des moyens d'assemblage (suivant GE34-009G) ;
- au calcul des moyens ;
- au calcul des énergies de raccordement ;
- à l'exploitation en vie courante.

Les informations servant à SERGIS viennent du fichier PSE (caractéristiques des pièces et des points).

SERGIS permet de calculer des paramètres et de créer un dossier standard du moyen.

1.7.2 Installation et maintenance

La demande d'installation s'effectue auprès de PSA Peugeot Citroën service Méthode Ferrage. De même, pour tout problème d'erreur de logiciel, remonter les problèmes au même service.

1.7.3 Dossier SERGIS

Voir exemple M.S.A. en 1.7.5.

1.7.4 Passation de gamme

Voir document PSA Peugeot Citroën REF.FER.24 "Méthodologie qualité soudure par résistance article enchaînement des étapes techniques".

1.7.5 Gamme de soudage M.S.A.

Fonction principale : A2 Armature caisse hors ligne
Fonction élémentaire : FAH conformation mach Armature Mor

Temps de cycle (c) : 57.0
Temps de cycle (s) : 34.2
Cadence (Véh/h) : 105

N° de gamme :
Service : Méthode Ferrage
Date de création : 11/12/97
Date de modif. : Indice :

GAMME DE SOUDAGE M.S.A.
(SPM)

Niveau regroupement : 0
Dérogation de Mr
Classe des paramètres: A

N° A.S	N° de Pann	N° de Trans 1—2	N° d'él	N° de CE	CYCLE	POINTS N°Pts	N.M	TYP	PRG	Propriétés Y	As	Re	PR	AB	ASSEMBLAGE 1	2	3	4	C.E	EPAISSEURS A SOUDER REVETEMENTS 1			2			3			4		
1	1	T2	P2		1	50044			1	4	0	6		B	0058	0032			G	0.87	G	G	0.97	G						
1	1	T1	P1		1	50045			1	4	0	0		B	0058	0032			G	0.87	G	G	0.97	G						
1	1	T2	P5		2	50042			1	4	0	0		B	0058	0032			G	0.87	G	G	0.97	G						
1	1	T1	P6		2	50043			1	4	0	0		B	0058	0032				1.17		G	0.87	G	G	0.97	G			
1	2	T4	P3		3	50028			1	4	0	0		B	0097	0058	0032			1.17		G	0.87	G	G	0.97	G			
1	2	T4	P4		3	50029			1	4	0	0		B	0097	0058	0032													

Nombre de points : 6

DESCRIPTION DES PIECES

Code	Désignation	Epaisseur	Revêtements	Nature	N° de plan/ind.
0032	DOUBLURE PANNEAU AR	0.97	G2		9624693480/0
0058	PANNEAU AR	0.87	G2		9624694980/C
0097	RENFORT FIXATION GACHE VOLET	1.17			9624729180/0

Nombre de pièces : 3

Validé le :
par :
Signature :

Moyen:0629413 N° Usine:29413 Edition du : 12/12/97
Site : MULHOUSE FERR. Emetteur : Méthode Ferrage
Famille:1PT1 Variante:T10 Stade:ETUDE Page : 1

Fonction principale : A2 Armature caisse hors ligne Fonction élémentaire : FAH conformation mach Armature Bor		Temps de cycle (c) : 57.0 Temps de cycle (s) : 34.2 Cadence (V4h/h) : 105
N° de gamme : Service : Méthode Ferrage Date de création : 11/12/97 Date de modif. : Indice :	GAMME DE SOUDAGE M.S.A. (SPM)	Niveau regroupement : 0 Dérogation de Nr Classe des paramètres: A

PANNEAU : 1

Numéro de Prog.	Epaisseur de Référence	Nbre de Revêt.	Intensité		Temps				Nbre Impuls.	Cadence	Effort	Pression	Course	Arc pilote	
			Ampères	%	Accost	Soudag	Froid	Maintl						Int.	Tps
1	0.90	4	11600	77		10		8	1		250	8.33			

PANNEAU : 2

Numéro de Prog.	Epaisseur de Référence	Nbre de Revêt.	Intensité		Temps				Nbre Impuls.	Cadence	Effort	Pression	Course	Arc pilote	
			Ampères	%	Accost	Soudag	Froid	Maintl						Int.	Tps
1	1.00	4	11600	77		14		10	1		270	7.20			

PANNEAU : 1

	Paliers d'incrémentation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Fin de vie électrode
1	Points cumulés Nombre de points Intensité	50 50 11600	150 100 + 2%	300 150 + 2%	475 175 + 2%	650 175 + 2%	825 175 + 2%	1050 225 + 2%	1300 250 + 2%	1550 250 + 2%	1800 250 + 2%	1800

PANNEAU : 2

	Paliers d'incrémentation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Fin de vie électrode
1	Points cumulés Nombre de points Intensité	50 50 11600	150 100 + 2%	300 150 + 2%	475 175 + 2%	650 175 + 2%	825 175 + 2%	1050 225 + 2%	1300 250 + 2%	1550 250 + 2%	1800 250 + 2%	1800

PANNEAU : 1

Répartition des points par prg. et variante	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
1PT1 T10		4																																

PANNEAU : 2

Répartition des points par prg. et variante	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
1PT1 T10		2																																

Fonction principale : A2 Armature caisse hors ligne Fonction élémentaire : FAN conFormation mach Armature Mer		Temps de cycle (c) : 57.0 Temps de cycle (s) : 34.2 Cadence (Véh/h) : 105
N° de gamme : Service : Méthode Ferrage Date de création : 11/12/97 Date de modif. : Indice :	GAMME DE SOUDAGE M.S.A. (BPH)	Niveau regroupement : 0 Dérogation de Mr Classe des paramètres: A

Répartition des éléments de soudage par transformateurs, panneaux et armoires de soudage

Armoires	Panneaux	Transfo.	Eléments de soudage
1	1	T1	P1( ) P6( )
1	1	T2	P2( ) P5( )
1	2	T4	P3( ) P4( )

Charge des panneaux par cycles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Panneau:1	802	810														
Panneau:2			1344													

Programmes liés par le même compteur									
Panneau : 1									
Panneau : 2									

NUMERO DU POINT	50028	50029	50042
NUMERO 2è POINT SI DP			
TEMPS DE SOUDAGE	14 Périodes	14 Périodes	10 Périodes
CIRCUIT CALCULE SI DPPP			
CYCLE POINT / GAMME	3 / 3	3 / 3	2 / 2
CADENCE / CYCLES ACTIFS	105 Pièces/Heures / 1	105 Pièces/Heures / 1	105 Pièces/Heures / 1
ALIM. TRANSFO. / ATEL.	380 VOLT / 400 VOLT	380 VOLT / 380 VOLT	380 VOLT / 400 VOLT
TYPE D'OUTIL	OUTIL NORMAL	OUTIL NORMAL	OUTIL NORMAL
LONGUEUR PLOT FIXE			
PINCE A SOUDER	M250	M250	M250
LONGUEUR TETE CULBUTEUR			
SECTION TETE CULBUTEUR			
LONGUEUR TOTALE P-E			
LONGUEUR TOTALE C-E			
PROFONDEUR UTILE			
ENTRAXE MOYEN DES BRAS			
SECTION MOYENNE BRAS			
NOMBRE DE CONTACTS	12	12	10
INTENSITE DE SOUDAGE	11600 Ampères	11600 Ampères	11600 Ampères
INTENSITE COURT-CIRCUIT	12649 Ampères	12649 Ampères	12873 Ampères
EPAISSEURS A SOUDER	1.17 mm 0.87 mm 0.97 mm mm	1.17 mm 0.87 mm 0.97 mm mm	0.87 mm 0.97 mm mm mm
EPAISSEUR TOTALE	3.01 mm	3.01 mm	1.84 mm
MODE DE SOUDAGE	Simple Point Direct		
CABLE BASSE IMPEDANCE	1600 mm / 200 mm²	1600 mm / 200 mm²	
TRESSE 1	500 mm / 315 mm²	500 mm / 315 mm²	500 mm / 400 mm²
TRESSE 2	315 mm / 315 mm²	315 mm / 315 mm²	355 mm / 400 mm²
COSSES	200 mm / 525 mm²	200 mm / 525 mm²	400 mm / 525 mm²
ENTRAXE MOYEN CIRCUIT	150 mm	150 mm	200 mm
LONGUEUR DU CIRCUIT	2615 mm	2615 mm	1253 mm
DESCRIPTION CIRCUIT SECONDAIRE			
TENSION SECONDAIRE	8.69 VOLT en série	8.69 VOLT en série	5.42 VOLT en série
DEPHASAGE	77 %	77 %	77 %
CHARGE DE L'ARMOIRE	655 Ampères	689 Ampères	408 Ampères
Choix du Transfo. TYPE	10 - 71	10 - 71	7.1 - 45
Choix du Transfo. PLOT	3	3	1
Choix du Transfo. NUMERO	T4 / secondaire 0	T4 / secondaire 0	T2 / secondaire 0

NUMERO DU POINT		50043	50044	50045
NUMERO 2è POINT SI DP				
TEMPS DE SOUDAGE		10 Périodes	10 Périodes	10 Périodes
CIRCUIT CALCULE SI DPPP				
CYCLE POINT / GAMME		2 / 2	1 / 2	1 / 2
CADENCE / CYCLES ACTIFS		105 Pièces/Heures / 1	105 Pièces/Heures / 1	105 Pièces/Heures / 1
ALIM. TRANSFO. / ATEL.		380 VOLT / 400 VOLT	380 VOLT / 400 VOLT	380 VOLT / 400 VOLT
TYPE D'OUTIL		OUTIL NORMAL	OUTIL NORMAL	OUTIL NORMAL
LONGUEUR PLOT FIXE				
PINCE A SOUDER		M247	M215	M215
LONGUEUR TETE CULBUTEUR				
SECTION TETE CULBUTEUR				
LONGUEUR TOTALE P-E				
LONGUEUR TOTALE C-E				
PROFONDEUR UTILE				
ENTRAXE MOYEN DES BRAS				
SECTION MOYENNE BRAS				
NOMBRE DE CONTACTS		10	10	10
INTENSITE DE SOUDAGE		11600 Ampères	11600 Ampères	11600 Ampères
INTENSITE COURT-CIRCUIT		12851 Ampères	12906 Ampères	12906 Ampères
EPAISSEURS A SOUDER		0.87 mm 0.97 mm mm mm	0.87 mm 0.97 mm mm mm	0.87 mm 0.97 mm mm mm
EPAISSEUR TOTALE		1.84 mm	1.84 mm	1.84 mm
MODE DE SOUDAGE				
CABLE BASSE IMPEDANCE				
TRESSE 1		560 mm / 315 mm²	560 mm / 400 mm²	560 mm / 315 mm²
TRESSE 2		560 mm / 400 mm²	355 mm / 400 mm²	400 mm / 315 mm²
COSSES		350 mm / 525 mm²	450 mm / 525 mm²	350 mm / 525 mm²
ENTRAXE MOYEN CIRCUIT		200 mm	150 mm	150 mm
LONGUEUR DU CIRCUIT		1470 mm	1365 mm	1310 mm
DESCRIPTION CIRCUIT SECONDAIRE				
TENSION SECONDAIRE		5.33 VOLT en série	5.32 VOLT en série	5.32 VOLT en série
DEPHASAGE		77 %	77 %	77 %
CHARGE DE L'ARMOIRE		402 Ampères	401 Ampères	401 Ampères
Choix du Transfo.	TYPE	7.1 - 45	7.1 - 45	7.1 - 45
	PLOT	1	1	1
	NUMERO	T1 / secondaire 0	T2 / secondaire 0	T1 / secondaire 0

Validé le : par : Signature :	Moyen:0629413 N° Usine:29413	Edition du : 12/12/97
	Site : MULHOUSE FERR.	Emetteur : Méthode Ferrage
	Famille:1PT1 Variante:T10 Stade:ETUDE	Page : 5

Fonction principale : A2 Armature caisse hors ligne Fonction élémentaire : FAH conformation mech Armature Mor								Temps de cycle (c) : 57.0 Temps de cycle (s) : 34.2 Cadence (V6H/h) : 105			
N° de gamme : Service : Méthode Ferrage Date de création : 11/12/97 Date de modif. : Indice :			GAMME DE SOUDAGE M.S.A. (SPM)					Niveau regroupement : 0 Dérogation de Mr Classe des paramètres: A			
Armoire		1	1	1	1	1	1				
Séquence		1	1	1	1	2	2				
Panneau		1	1	1	1	2	2				
Transfo.	N°	T2	T1	T2	T1	T4	T4				
	Type Plot S/P/.	45 1 S	45 1 S	45 1 S	45 1 S	71 3 S	71 3 S				
N° de point		50044	50045	50042	50043	50028	50029				
Type de point											
Attribut du point		B	B	B	B	B	B				
N° de programme		1	1	1	1	1	1				
N° de cycle		1	1	2	2	3	3				
N° d'éléments		P2 /	P1 /	P5 /	P6 /	P3 /	P4 /				
Elément Soudage	Sup.	C6				C6					
	Inf.										
Mode de soudage						SPO					
Effort gamme		250	250	250	250	270	270				
RP / VV Supérieur											
Pression gamme		8.33	8.33	8.33	8.33	7.20	7.20				
RP / VV Inférieur											
Pression gamme											
Effort 10 Bar	Théorique										
	Réel										
Rendement											
Effort réel											
Pression	Sup.										
	Inf.										
I Tôle gamme		11600	11600	11600	11600	11600	11600				
I CC gamme		12906	12906	12873	12851	12649	12649				
I PIECE réelle											
I CC réelle											
% ou ° conduction											
I PIECE max 100%											
I CC max 100%											
Réserve en %											
Temps d'accostage											
Validé le : par : Signature :					Moyen:6629413 N° Usine:29413			Edition du : 12/12/97			
					Site : MULHOUSE FERR.			Emetteur : Méthode Ferrage			
					Famille:1PT1 Variante:T10			Stade:ETUDE			Page : 6

2 Définition du processus

La qualité soudure dépend du matériel, de l'environnement et de leur gestion (conformité produit, préventif, gestion

qualité, qualité des réseaux fluides et énergie, matériel correctement choisi, utilisé et paramétré, qualification opérateur, etc.).

L'application d'un **plan de surveillance processus** établi à partir des basics métiers, permettra d'assurer l'obtention et le maintien des performances qualité spécifiées (norme PSA Peugeot Citroën B131226).

En fonction des attributs de points définis par les services Etudes Véhicule (A ou B), les services Méthodes élaborent les gammes et investissent pour limiter l'incidence de l'environnement et réduire le taux de défaillance.

Conditions préliminaires :

- La définition des assemblages est conforme à la norme PSA Peugeot Citroën B131220. Leurs caractéristiques doivent être transmises aux services Méthodes avant les RO (Réalisations Outillages).
- Le fichier PSE doit être renseigné pour les RO puis régulièrement mis à jour par les services concepteurs.
- Les informations qui décrivent les points de soudure, en particulier l'attribut des points, sont contenues dans le fichier PSE. Ces informations seront extraites du fichier PSE par les services Méthodes.

2.1 PSE attribut B

2.1.1 Gammes

Elles sont conformes aux normes PSA Peugeot Citroën E34 : Soudage électrique par résistance.

Pour la mise au point de prés-série 1 (PRS1), les gammes SERGIS devront êtres constituées et renseignées.

2.1.2 Moyens

Ils sont conformes aux normes PSA Peugeot Citroën E34 : Soudage électrique par résistance.

Type	Fonctions
Pince à souder robot ou mécanisée (+ de 5 points/pièce/commande programmable de soudage)	Régulation de l'intensité secondaire Rodage automatique
Poste à pince	Régulation de l'intensité secondaire + guide points
M.S.A. (Machine de Soudage Automatique)	Compensation de tension et contrôle d'intensité primaire
(M. à S.) (Machine à Souder)	Compensation de tension et contrôle d'intensité au primaire (ou régulation d'intensité secondaire)
Matériel récupéré*	Suivant récupération

* Un matériel est dit "récupéré" si, **au moins,** un maillon de la chaîne de soudage est récupéré (séquence, pince, armoire, etc.). Le degré de remise à niveau, décidé par la structure projet, sera fonction :

- de l'état du matériel,
- des fonctions incluses,
- du niveau des investissements du lancement produit et du niveau des coûts d'exploitation.

2.1.3 Réglages initiaux et conditions de mise en œuvre

La méthodologie intitulée "Recueil des procédures d'essais ferrage" n° PSA.VEH.182 liste de façon exhaustive les réglages et les conditions de mise en œuvre des moyens installés.

2.1.4 Utilisation en vie courante

Pour maîtriser et corriger les dérives, un plan de surveillance processus sera mis en place et adapté suivant le type de moyen et son niveau de défaillance (norme PSA Peugeot Citroën B131226).

2.2 PSE attribut A

2.2.1 Gammes

Elles sont conformes aux normes PSA Peugeot Citroën E34 : Soudage électrique par résistance.

Pour la mise au point de PRS1, les gammes SERGIS devront être constituées et renseignées.

Les restrictions à prendre en compte sont :

— Utiliser les modes de soudage simple point ou double point push-pull.

— Utiliser les paramètres de soudage classe N.

— Limiter les regroupements de paramètres de soudage (voir 1.5.3).

Aux niveau 0 ou 1 sur robot et M.S.A., M. à S.

Aux niveaux 0, 1 ou 2 sur poste à pince.

2.2.2 Moyens

Ils sont conformes aux normes PSA Peugeot Citroën E34 : Soudage électrique par résistance.

Type	Fonctions
Pince à souder robot ou mécanisée	Régulation de l'intensité secondaire Rodage automatique
Poste à pince	Régulation de l'intensité secondaire + guide points
M.S.A. (Machine de Soudage Automatique)	Compensation de tension et contrôle d'intensité primaire Maximum 2 points par cycle et par panneau thyristor Limiter la durée de vie à 2 000 points.
M. à S. (Machine à Souder)	Compensation de tension et contrôle d'intensité au primaire (ou régulation d'intensité secondaire)
Matériel récupéré*	Suivant récupération

* Un matériel est dit "récupéré" si, au moins, un maillon de la chaîne de soudage est récupéré (séquence, pince, armoire, etc.). Le degré de remise à niveau, décidé par la structure projet, sera fonction :

— de l'état du matériel,

— des fonctions incluses,

— du niveau des investissements du lancement produit et du niveau des coûts d'exploitation.

2.2.3 Réglages initiaux et conditions de mise en œuvre

La méthodologie intitulée "Recueil des procédures d'essais ferrage" n° PSA.VEH.182, liste de façon exhaustive les réglages et les conditions de mise en œuvre des moyens installés.

2.2.4 Utilisation en vie courante

Pour maîtriser et corriger les dérives, un plan de surveillance processus sera mis en place et adapté suivant le type de moyen et son niveau de défaillance (norme PSA Peugeot Citroën B131226).

2.3 Moyens de retouche

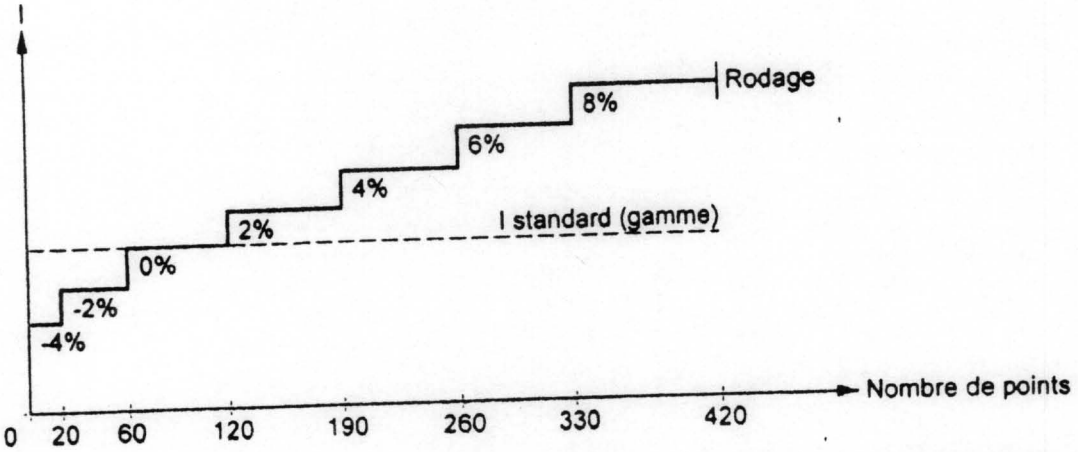
Les moyens de retouche sont différents des moyens de série et ne respecteront pas les 2.1 et 2.2, mais ils sont capacitaires car ils permettront l'utilisation des paramètres standards. Le temps de retouche sera différent du temps de cycle.

2.4 Loi d'incrémentation des courants de soudage

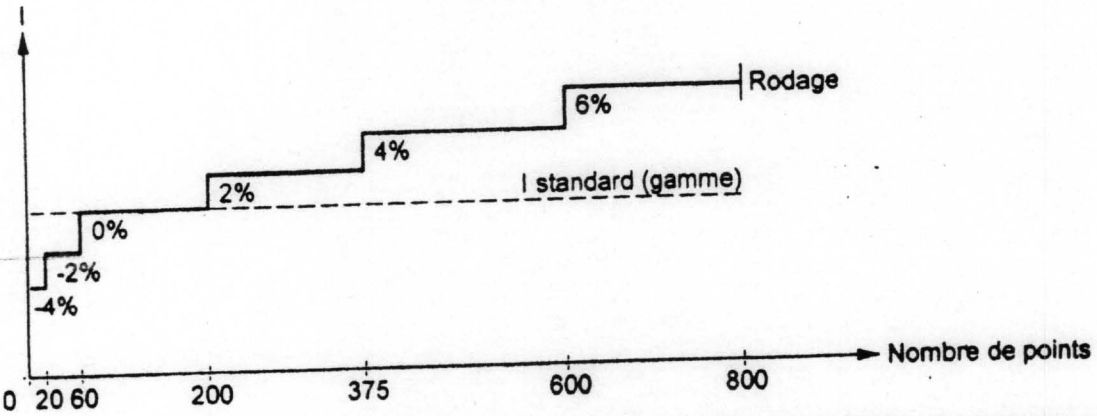
2.4.1 Pour robot

Étant donné la diversité du pourcentage de revêtement dans les gammes de soudage sur robot, il a été validé un type de loi permettant de prendre en compte les flux croisés et la polyvalence véhicule sur les lignes PSA Peugeot Citroën.

Courbe 1 : Gamme comportant des assemblages revêtus > 49 % de faces revêtues



Courbe 2 : Gamme comportant des assemblages revêtus < 49 % de faces revêtues



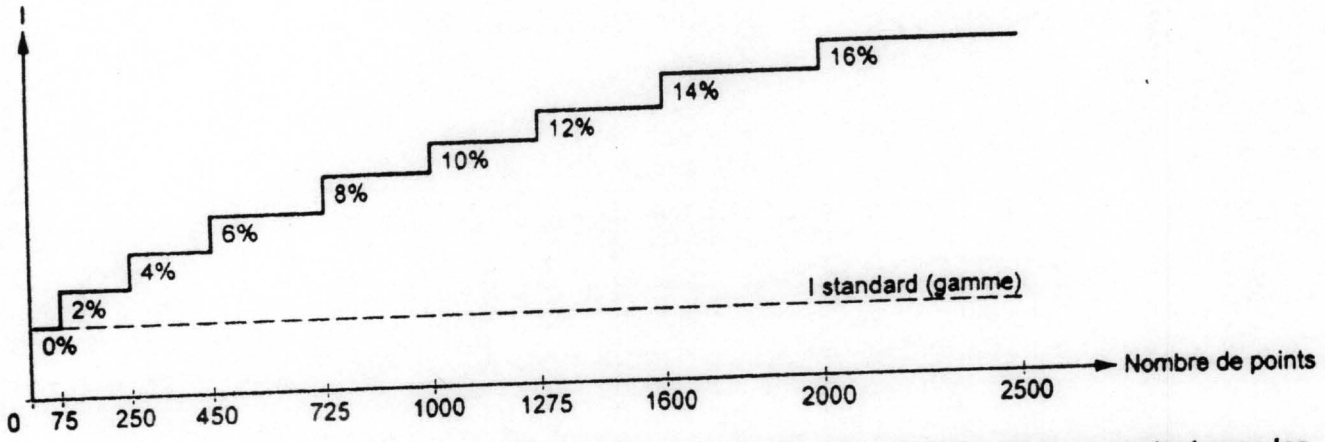
Dans tous les cas, les gammes éditées par SERGIS auront une courbe d'incrémentation complète jusqu'à 20 % de réserve.

NOTE : Dans le cas d'une gamme de soudage pulsation, diviser par 2 les pourcentages d'incrémentation (1 % au lieu de 2 %).

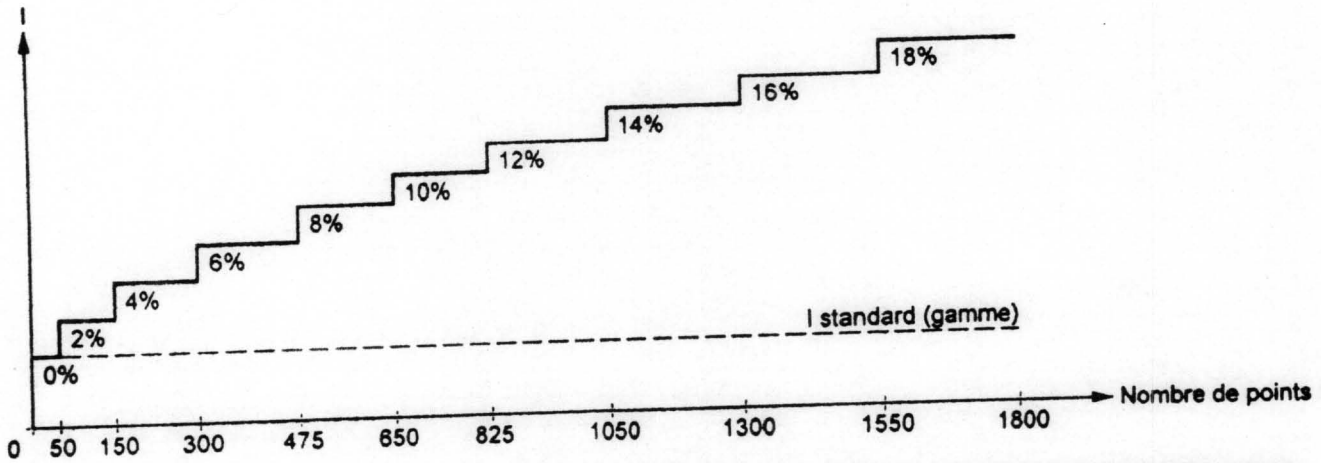
2.4.2 Pour M.S.A.

Trois courbes sont définies correspondant aux assemblages électrozingués, galvanisés et sans revêtement.

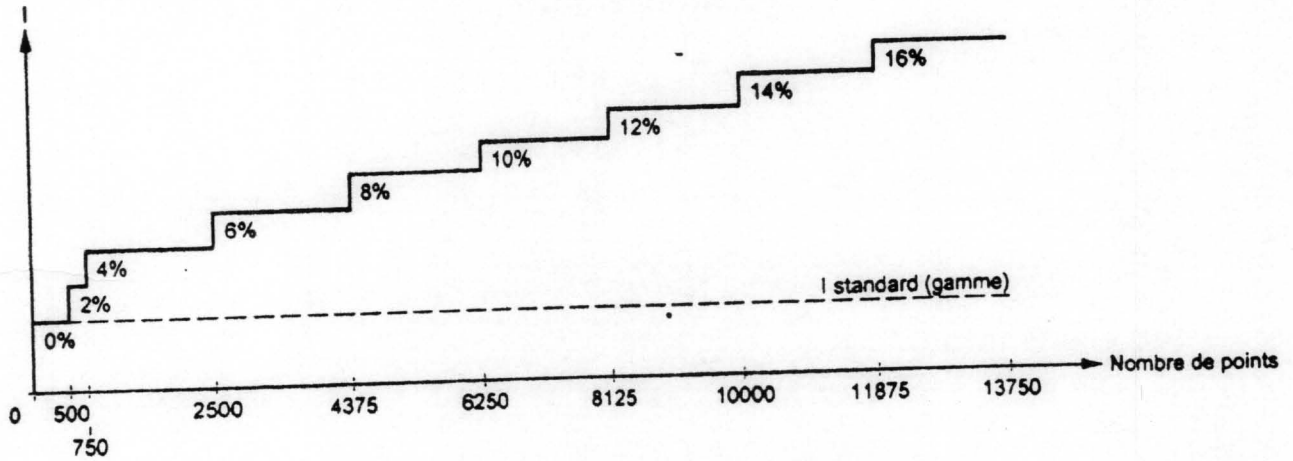
Courbe 3 : Incrémentation pour des points ayant 1 ou 2 faces revêtues électrozinguées en contact avec les électrodes



Courbe 4 : Incrémentation pour des points ayant 1 ou 2 faces revêtues galvanisées en contact avec les électrodes



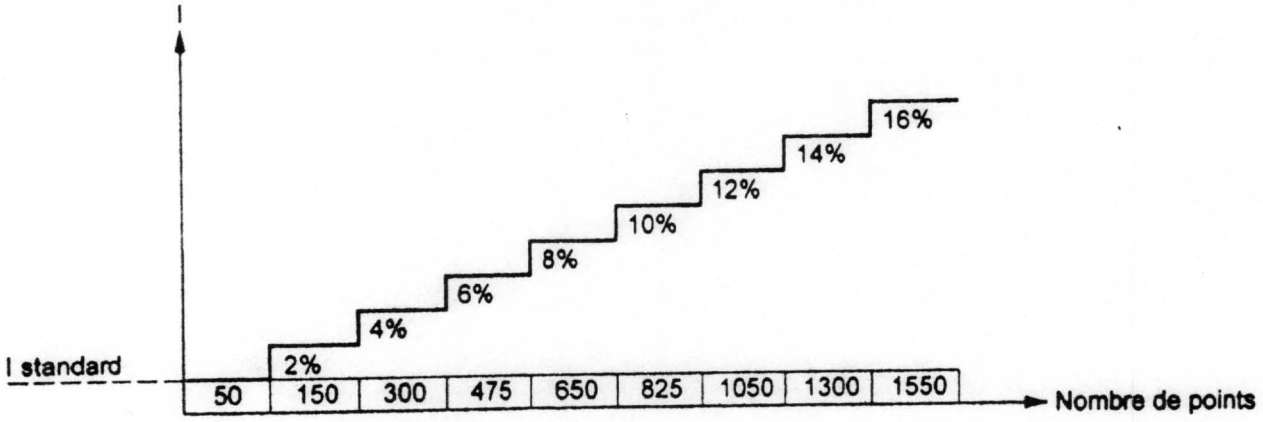
Courbe 5 : Incrémentation pour des points ayant aucune face revêtue en contact avec les électrodes



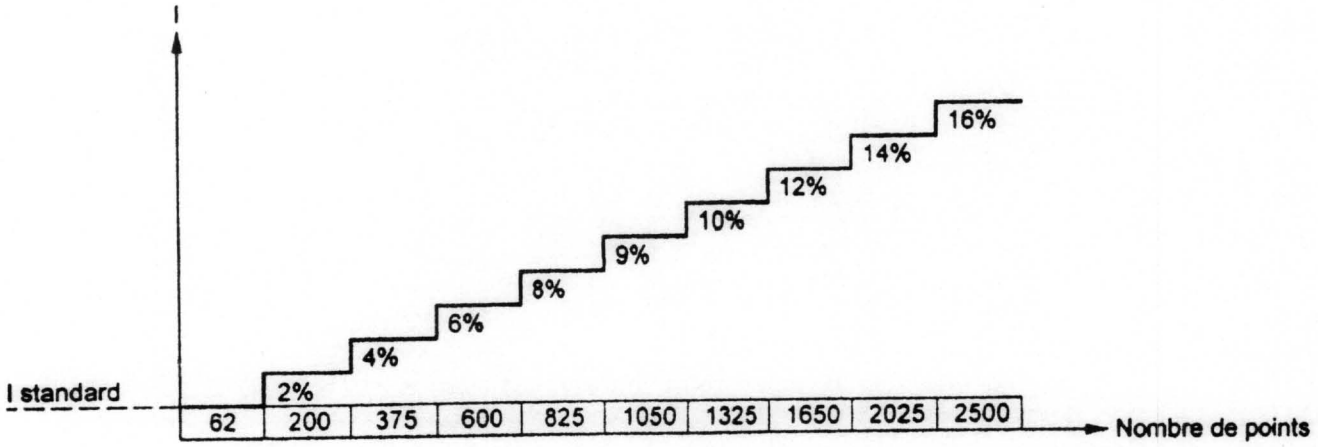
2.4.3 Pour P. à P.

Trois courbes sont définies correspondant aux assemblages galvanisés et sans revêtement.

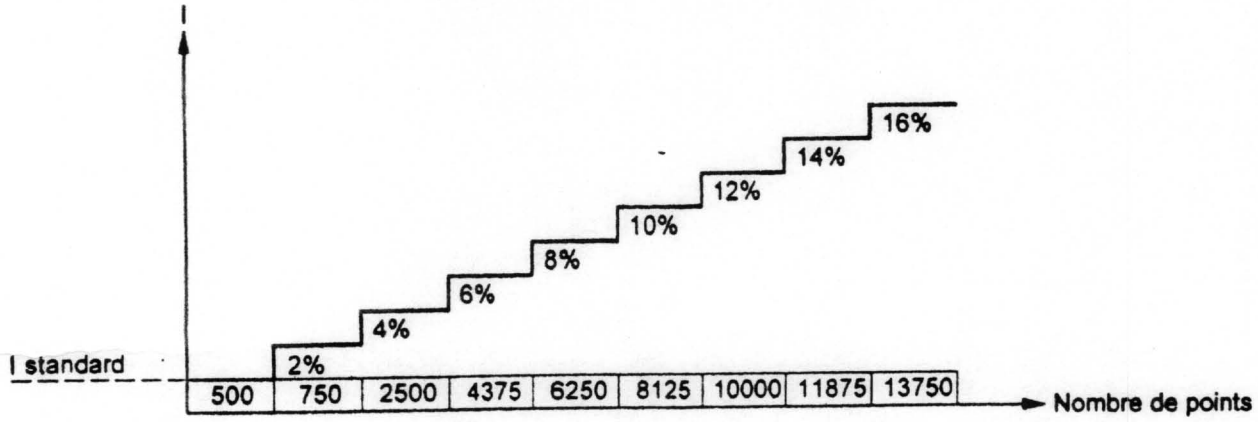
Courbe 6 : Incrémentation pour des gammes revêtues > 49 % de face revêtue



Courbe 7 : Incrémentation pour des gammes revêtues ≤ 49 % de face revêtue



Courbe 8 : Incrémentation compensation pour des gammes nues



3 Détermination des moyens de soudage – Phase préparatoire

1/ VALIDATION DES ASSEMBLAGES (plans de pièces/B131220 – B131226)

→ NON → voir ÉTUDES

CONTRÔLER :

- accessibilité aux points avec parties travaillantes standards,
- bords de tôle,
- répartition des points.

RENSEIGNER : (PSE)

- les pièces à assembler,
- numérotation, qualité des points,
- épaisseur et nature des tôles,
- nature, position des revêtements,
- repérage des points impératifs (pointage, masqué, etc.).

2/ INFRASTRUCTURES

CONNAÎTRE :

- surfaces au sol,
- niveaux des structures et installations (passerelles, fosses, etc.),
- Caractéristiques réseaux, électriques, air et eaux.

3/ ÉBAUCHE D'UNE GAMME D'ASSEMBLAGE

Objectif : déboucher sur un moyen d'assemblage adapté et disponible constitué d'éléments standards

DÉTERMINER :

1) choix des pièces à assembler,
2) nombre et numéro des points,
3) mode de soudage (normal ou pulsation),
4) paramètres de soudage, effort,
5) zones d'appui, de références,
6) sections au droit des points avec parties travaillantes normalisées (guide PSA Peugeot Citroën GE34-007G),
7) ébauche et orientation des bras (LU, HU et obstacles),
8) grande ouverture "GO",
9) types de pinces envisagées (cé, ciseaux, etc.),
10) temps de cycle (chargement, déchargement, déplacements, soudure, prise d'outil, etc.).

ANALYSER :

- basculer les infos du PSE sur logiciel SERGIS,
- regrouper les points de paramètres identiques ou compatibles (Δ Is < 500 A),
- regrouper les parties travaillantes et ébauches de bras identiques afin d'en déduire un minimum de pinces ou types de pinces,

Ces regroupements déterminent le choix du moyen de soudage (multipoints, robotisé, manuel, etc.) ;

- comparer le temps de cycle du moyen de soudage retenu au temps de cycle imparti.

4 Liste des documents de référence

NOTE : Pour les documents non datés, la dernière version en vigueur s'applique.

Documents cités :

Documents PSA Peugeot Citroën

Normes

B131220 :	Soudage par points par résistance des tôles d'acier – Définition des assemblages.
B131226 :	Soudage par points par résistance des tôles d'acier – Qualité des assemblages.
B131230 :	Soudage par bossages par résistance – Définition des assemblages.
C171108 :	Vis à souder à bouts cylindriques – Filetage métrique ISO.
C214210 :	Écrous hexagonaux à souder par résistance.
C924220 :	Écrous carrés à souder par résistance.
REF.FER.24 :	Méthodologie qualité soudure.
PSA.VEH.182 :	Recueil des procédures d'essais ferrage.

Guide

GE34-007G :	Guide technique des parties travaillantes.
GE34-009G :	Conception des machines de soudage multipoints spécifiques (M.S.A.).

Note

DMEI/CEI/EVC :	N° 4277 de 12/89.

ANEXO II

ISSN 0335-3931

norme française

NF A 89-240
Décembre 1987

Soudage et techniques connexes.

Assemblages à recouvrement soudés par résistance par points, par bossages et à la molette

Classification des défauts avec commentaires explicatifs.

E : Welding and allied processes.
Resistance spot, projection and seam welded lap joints.
Classification of defects with explanatory comments.

D : Schweissen und verwandte Verfahren. Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennaht - Überlappschweissverbindungen.
Einteilung der Fehler und Erklärungen.

Norme française homologuée par décision du Directeur Général de l'AFNOR le 5 novembre 1987 pour prendre effet le 5 décembre 1987.

correspondance

A la date de publication de la présente norme il n'existe pas de norme internationale traitant du même sujet.

analyse

Les défauts susceptibles d'être rencontrés dans les soudures effectuées par résistance, par points, par bossages ou à la molette sont classées et comportent des commentaires explicatifs.

descripteurs

Soudage par résistance, par points, par bossages et à la molette. Défauts des soudures.

modifications

corrections

Éditée et diffusée par le Comité de Normalisation de la Soudure (CNS), 32, bd de la Chapelle, 75880 Paris Cédex 18 - Tél. : (1) 42.03.94.05
Diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe - Cedex 7, 92080 Paris la Défense - Tél. : (1) 42.91.55 55

: CNS 1987

BALLU 13 Paris

Soudage et technique connexes

Soudage par résistance, par points, par bossages et à la molette

Classification des défauts avec commentaires explicatifs.

NF A 89-240

Décembre 1987

SOMMAIRE

Page

1. **Objet et domaine d'application** 3

2. **Définitions** 3
   - — Soudage par résistance 3
   - — Soudage par résistance par points 3
   - — Soudage par bossages 3
   - — Bossage 3
   - — Soudage à la molette 3
   - — Types de soudures 3
     - • Soudures par points isolés ou discontinues 3
     - • Soudures continues 4
   - — Noyau du point de soudure — Terme 4
   - — Diamètre du noyau 4
   - — Pénétration 4
   - — Zone affectée thermiquement 4
   - — Recouvrement des points 4
   - — Séparation des tôles 5
   - — Indentation 5
   - — Fissure 5
   - — Microfissure 5
   - — Soufflure 5
   - — Retassure 5
   - — Collage 5
   - — Point craché 5
   - — Brûlure 5
   - — Inclusion 6

3. **Classification des défauts** 7
   - — Groupe n° 1 : Fissures 8
   - — Groupe n° 2 : Cavités 9
   - — Groupe n° 3 : Inclusions solides 10
   - — Groupe n° 4 : Défauts de forme du noyau 10
   - — Groupe n° 5 : Défauts divers 12

Annexe : exemple de défauts de soudures par résistance par points 14

1. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

La présente norme classe et décrit les défauts susceptibles d'être rencontrés dans les assemblages soudés par résistance, par points, par bossages et à la molette.

La norme ne peut pas servir pour l'acceptation des soudures.

Seuls les défauts donnant lieu à des discontinuités de matière ou à des modifications de forme sont pris en considération dans la présente norme.

2. DÉFINITION (Figures 1 et 2)

– **Soudage par résistance** SR (Résistance welding RW)
Procédé dans lequel la soudure est exécutée avec pression en utilisant pour le chauffage, l'effet thermique d'un courant électrique traversant l'assemblage (effet Joule).

– **Soudage par résistance par points** SRP (Resistance spot welding RSW)
Procédé de soudage par résistance dans lequel un point de soudure est obtenu par fusion au droit des électrodes.

Commentaire : La surface du point de soudure est approximativement la même que celle des pointes d'électrodes. Un effort continu, éventuellement variable est appliqué sur le point par les électrodes pendant l'opération de soudage.

– **Soudage par bossages** SRB (Projection welding RPW)
Procédé de soudage par résistance dans lequel l'effort et le passage du courant sont localisés grâce à l'utilisation d'un ou plusieurs bossages exécutés dans l'une ou dans les deux pièces à souder.

Commentaire : Lors du soudage, il se produit un effondrement des bossages, le courant et l'effort sont généralement transmis par des plateaux, des montages, des gabarits ou des mâchoires.

– **Bossage** (Projection)
Déformation locale d'un élément à assembler pour localiser le passage du courant lors du soudage.

– **Soudage à la molette** SRM (Resistance seam welding RSEW)
Procédé de soudage par résistance dans lequel une soudure continue ou discontinue est obtenue par fusion lors du passage entre des molettes faisant office d'électrodes.

Types de soudures

• Soudures par points isolés ou discontinues
Soudures composées de points de soudure dont les zones fondues ne se chevauchent pas et réalisées en soudage par résistance par points (Spot welding) ou par soudage à la molette (Roller spot welding EN - Roll spot welding US).

• Soudures continues
Soudures composées de points de soudure dont les zones fondues se chevauchent, réalisées en soudage par résistance par points (Stitch welding) ou par soudage à la molette (Seam welding).

– **Noyau du point de soudure — (Weld nugget)**
Région de l'assemblage qui a été portée à fusion.

Commentaire 1 : La forme du noyau apparaît sur une coupe diamétrale d'un point de soudure et sur une coupe transversale passant par le centre du noyau pour une soudure continue ; ce noyau est dit de « forme régulière » si son contour a approximativement une forme elliptique ou rectangulaire dont la plus grande dimension est parallèle au plan de joint.

Commentaire 2 : Pour certains alliages, il est difficile de distinguer à l'examen métallographique la zone fondue de la zone thermiquement affectée.

Commentaire 3 : La cristallisation basaltique du point de soudure rappelle celle observée sur la section droite d'un lingot, aussi le terme de lingot est couramment utilisé dans les industries aérospatiales Par contre, le terme « noyau » est d'appellation plus courante dans toutes les autres industries et a donc été retenu dans dans la présente norme.

– **Diamètre du noyau** (Nugget diameter)
Le diamètre du noyau correspond à la largeur de la zone fondue dans le plan de joint.

Commentaire : Cette dimension peut être mesurée soit sur une coupe métallographique diamétrale, soit estimée sur un point rompu par déboutonnage ou par torsion.

– **Pénétration** (Penetration)
C'est la plus grande distance entre le plan du joint des tôles et le contour du noyau exprimé en pourcentage de l'épaisseur de chacune des tôles.

– **Zone affectée thermiquement** (Heat affected zone)
Partie du matériau des pièces élémentaires affectée par le flux thermique lors de l'opération d'assemblage, hors métal fondu.

— **Recouvrement des points** (Overlaps)
C'est, pour les soudures continues, le recouvrement plus ou moins important des noyaux. Au raccordement entre les noyaux, la hauteur de la zone fondue peut être inférieure à la pénétration.

Commentaire : La soudure est dite « régulière » si la pénétration et le recouvrement des points restent constants le long du joint.

— **Séparation de tôles** (Sheet separation)
C'est l'écartement entre les tôles, mesuré à une distance d'un diamètre du noyau par rapport au centre du noyau.

Commentaire : Cette valeur peut être obtenue, par exemple par lecture à l'examen macroscopique, par soustraction des épaisseurs réelles des tôles de la cote extérieure mesurée au palmer.

— **Indentation** (Indentation)
Empreinte laissée par les électrodes à la surface des tôles au droit des points de soudure.

Commentaire : L'examen macroscopique permet une appréciation de la profondeur de l'indentation.

— **Fissure** (Crack)
Discontinuité de matière due à une rupture locale.

Commentaire : Ce défaut peut se produire sous l'effet de contraintes, soit à chaud, soit en cours de refroidissement.

— **Microfissure** (Micro-crack)
Fissure de dimension microscopique.

— **Soufflure** (Gas cavity)
Cavité dans le noyau formée par du gaz.

— **Retassure** (Shrinkage cavity)
Cavité dans le noyau correspondant à un manque de métal dû au retrait au moment de la solidification.

— **Collage** (Lak of fusion)
Absence de fusion entre les éléments constituant l'assemblage.

— **Point craché** (Splashed spot)
Point présentant une éjection de métal liquide pendant le soudage, éjection qui adhère sur le métal de base ou le noyau.

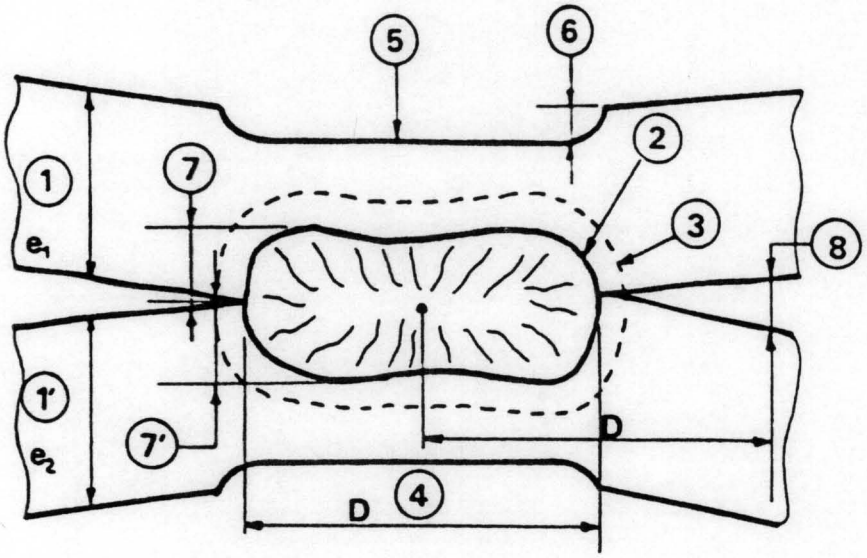
Commentaire : Cette éjection de métal peut avoir lieu entre les tôles ou du côté des électrodes.

— **Brûlure** (Burning)
Altération irréversible de la structure et de ses propriétés, provoqués par un début de fusion intéressant les joints de grains (NF A 02-010).(*)

— **Inclusion** (Inclusion)
Corps exogène emprisonné dans le noyau.
Commentaire : Ce corps exogène peut être constitué par exemple par des oxydes métalliques.

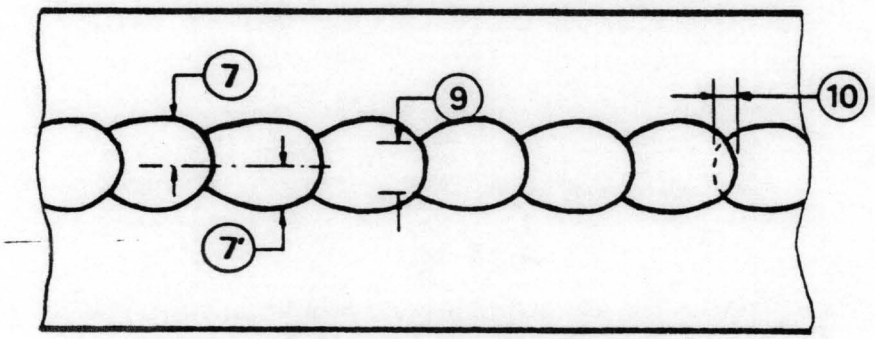
---

* *NF A 02-010 : Vocabulaire du traitement thermique des produits ferreux.*



1 et 1' - Épaisseur des tôles e_1 et e_2
2 - Noyau du point de soudure
3 - Zones affectées thermiquement ZAT
4 - Diamètre du noyau du point de soudure
5 - Indentation
6 - Profondeur de l'indentation
7 - Hauteur de la pénétration
8 - Séparation des tôles

Figure 1 : Soudure par point isolé — Soudure continue (coupe selon l'axe transversal)



7 et 7' - Pénétration
9 - Hauteur de la zone fondue au raccordement de 2 noyaux
10 - Recouvrement des points

Figure 2 : Soudure continue (coupe selon l'axe longitudinal)

3. CLASSIFICATION DES DÉFAUTS

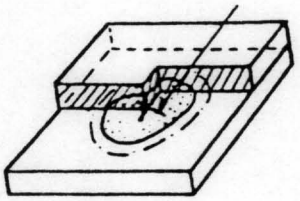
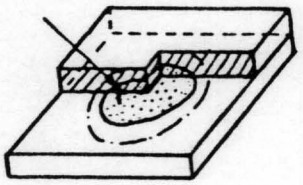
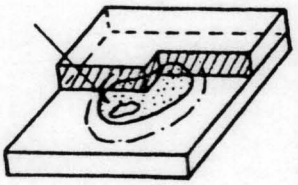
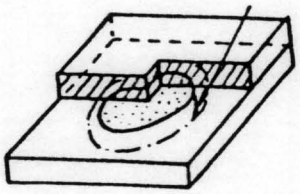
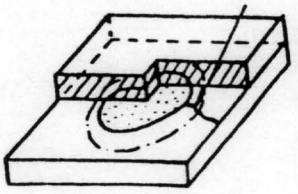
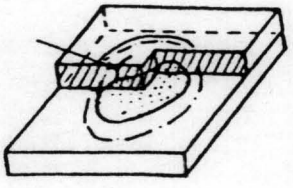
Les défauts sont divisés en cinq groupes :

1 – Fissures
2 – Cavités
3 – Inclusions solides
4 – Défauts de forme du noyau
5 – Défauts divers

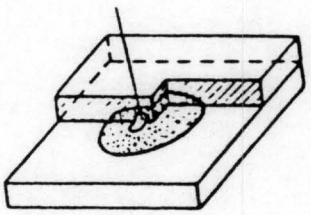
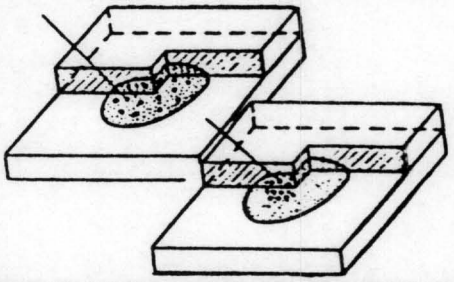
Le tableau relatif à chaque groupe de défaut comporte 4 colonnes réparties comme suit de gauche à doite :

1 – Référence numérique
2 – Désignation
3 – Commentaires
4 – Illustration

Groupe n° 1 — Fissures

N°	DESIGNATION	COMMENTAIRES	ILLUSTRATION
1.1	Fissures au centre du noyau de la soudure.	Ce type de fissures peut être rayonnant. Il est en général situé dans un plan perpendiculaire au plan des tôles.	
1.2	Fissure au bord du noyau de la soudure.	Ce type de fissure part du bord du noyau fondu et s'étend plus ou moins vers le centre. Il est en général situé dans un plan perpendiculaire au plan des tôles.	
1.3	Fissure dans le plan de jonction des tôles.	La direction générale de ce type de fissure correspond à l'interface entre les tôles.	
1.4	Fissure dans la zone affectée thermiquement.		
1.5	Fissure dans le métal de base.		
1.6	Fissure débouchant en surface.	Ce type de fissure apparaissant en surface peut, avoir pris naissance dans le métal fondu et s'être propagé dans le métal de base après avoir traversé la ZAT. Ce type de fissure peut également partir de la ZAT.	

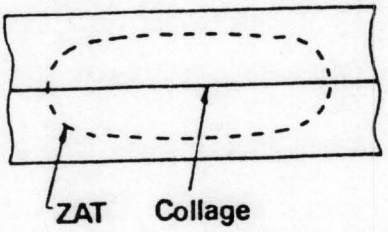
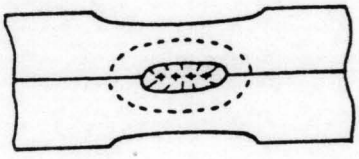
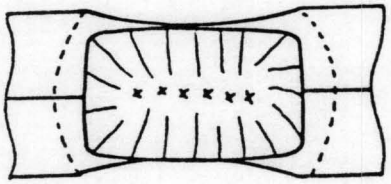
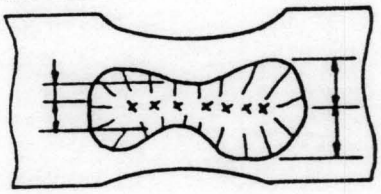
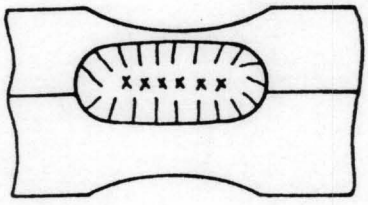
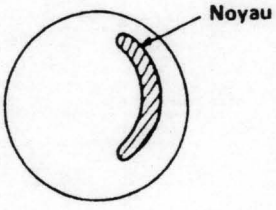
Groupe n° 2 – Cavités

N°	DESIGNATION	COMMENTAIRES	ILLUSTRATION
2.1	Soufflure sphéroïdale.	Soufflure de forme sensiblement sphérique.	
2.2	Porosités.	Soufflures de petites dimensions.	
2.3	Retassure.	Cavité dans le métal fondu.	

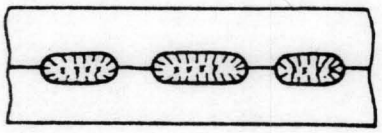
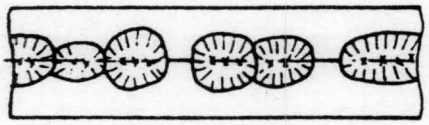
Groupe n° 3 – Inclusions solides

N°	DESIGNATION	COMMENTAIRES	ILLUSTRATION
3.1	Inclusions d'oxydes.	Présence d'oxydes métalliques dans le noyau.	
3.2	Inclusions de métal du placage.		

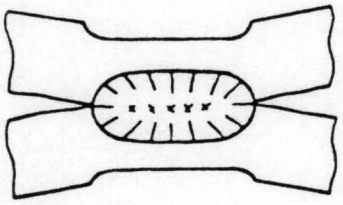
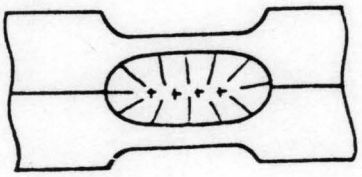
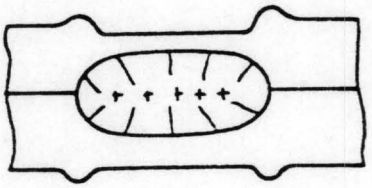
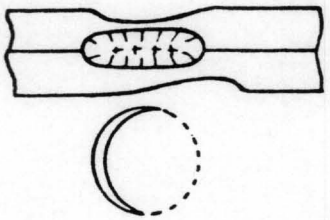
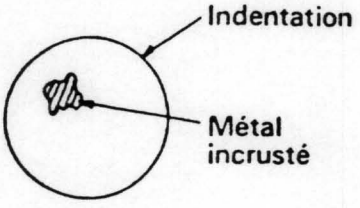
Groupe n° 4 – Défaut de forme du noyau

N°	DESIGNATION	COMMENTAIRES	ILLUSTRATION
4.1	Point collé.	Absence de noyau par suite d'un mauvais choix des paramètres de soudage.	
4.2	Dimensions insuffisantes du noyau.	Par rapport aux dimensions des éléments à assembler, le noyau est très petit avec une pénétration faible dans chaque tôle.	
4.3	Noyau fondu très important (excessif).	Le noyau peut éventuellement déboucher en surface de l'un des deux éléments.	
4.4	Noyau irrégulier.	Pénétration irrégulière dans chacune des tôles.	
4.5	Noyau excentré.		
4.6	Point en forme de lunule.		

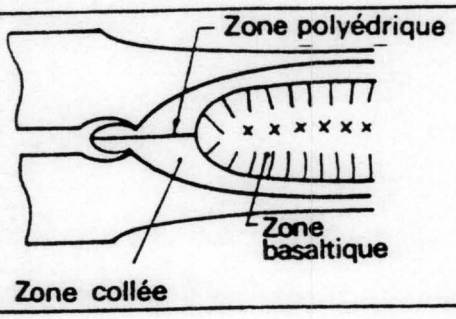
Groupe n° 4 – Défaut de forme du noyau (suite)

N°	DESIGNATION	COMMENTAIRES	ILLUSTRATION
4.7	Noyau oblong.	Point de forme non circulaire.	
4.8	Défauts de continuité dans les soudures.	Il n'y a pas intersection des noyaux.	
4.9	Recouvrement irrégulier des noyaux en soudage à la molette.		

Groupe n° 5 – Défaut divers

N°	DESIGNATION	COMMENTAIRES	ILLUSTRATION
5.1	Séparation excessive entre les tôles (cloquage).	De chaque côté du point de soudure, les tôles tendent à s'écarter.	
5.2	Indentation importante due aux électrodes.	Les empreintes laissées par les électrodes sont profondes.	
5.3	Protubérances à la surface.	Bourrelet important à la surface des tôles entourant l'indentation créée par les pointes d'électrodes. Ce phénomène peut s'accompagner d'une indentation excessive.	
5.4	Indentation irrégulière.	Ce défaut peut être dû, par exemple, à un mauvais alignement des électrodes.	
5.5	Diffusion du cuivre des électrodes.		
5.6	Incrustation de métal de l'électrode adhérant à la surface.		

Groupe n° 5 – Défaut divers (suite)

N°	DESIGNATION	COMMENTAIRES	ILLUSTRATION
5.7	« Fluage » entre les tôles.	Extrusion laminaire de métal se glissant dans l'interface des tôles concentriquement au noyau fondu, à la périphérie de la zone polyédrique. Ce phénomène qui est différent du crachement, apparaît, par exemple, dans le soudage du titane non allié.	

BIBLIOTECA F.E. PORTO