

RUBENS DIEGO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA EM
CHAPAS DE AÇO PHS “PRESS HARDENED
STEEL”**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Maio/2015

RUBENS DIEGO DE OLIVEIRA

(Engenheiro Mecânico, Fundação Educacional Inaciana - FEI, 2010,
São Bernardo do Campo SP).

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA EM
CHAPAS DE AÇO PHS “PRESS HARDENED
STEEL”**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Me. Márcio Batista

São Paulo

Maio/2015

"Persistência e determinação, por si só serão decisivas"

Autor desconhecido.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Gabriela Oliveira por todo o apoio durante as horas de estudo, aos meus irmãos, aos meus amigos pelo tempo que deixamos de estar juntos, inclusive meu amigo/irmão Kalifa, e em especial dedico este trabalho aos meus pais, Antônio Carlos e Maria do Rosário, a eles todos os créditos.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar por permitir que eu cumprisse mais esse capítulo da minha vida acadêmica.

Ao professor Me. Márcio Batista pelas orientações valiosas e indispensáveis na realização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, Frederico Almeida, Flavio Costa e Celso Goicoechea por toda a colaboração durante os ensaios.

A General Motors do Brasil, em especial a engenharia experimental por disponibilizar mão de obra, equipamentos, materiais para corpos de prova e espaço físico.

A escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo, e em especial ao André Arakaki por toda a consultoria técnica provida com boa vontade e de bom grado.

Aos todos os meus colegas de classe, que tornaram as noites de sexta e manhãs de sábado mais divertidas, em especial ao Rui Vagner e o Enos Oliveira.

E a todos, que direta ou indiretamente ajudaram na realização do presente trabalho, pois é impossível concretizar um sonho sozinho.

CURRICULUM VITAE

FORMAÇÃO

- Cursando Pós-graduação Especialização em Engenharia da Soldagem. USP – Butantã Programa de Educação Continuada Escola Politécnica da USP (PECE). Início em Janeiro 2013 e término em Dezembro de 2014.
- Graduado em Engenharia Mecânica. FEI-SBC/Fundação Educacional Inaciana. Início em 2004 e conclusão em 2010.
- Formado como Técnico em Mecânica de Precisão. SENAI-SP/Escola Senai Suíço-Brasileira. Início em 2002 e conclusão em 2003.
- Ensino médio formado na Escola Estadual Maria Auxiliadora. Em 2001

EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL

- **General Motors do Brasil. São Caetano do Sul – SP - 2010 - Até o momento** Cargo: Engenheiro Pleno de Processo.
Principais atividades: Responsável pelo planejamento de linha manuais ou automáticas de soldagem veicular, definindo o processo, quantidades de operadores, operações padronizadas, desenho de LayOut, cálculo de “Standart Time”, gerenciando investimento e contratação de fornecedores/integradores de linha soldagem. Liderar instalação da linha previamente planejada, atendendo o investimento inicial e o prazo do lançamento do veículo. Trabalhei no planejamento e instalação do Projeto ONIX e atualmente atuo em projeto confidencial.
- **EDAG do Brasil. São Bernardo do Campo – SP – 2008/2010** Cargo: Técnico de Processo)
Principais atividades: Planejamento de linha manuais ou automáticas de soldagem veicular, definindo o processo, quantidades de operadores, operações padronizados, desenho de layout , calculando “Standart time”. Participei do planejamento de projeto para VW (Amarok e Jetta), Faurência, Volvo, VW Caminhões, PSA.

- **Blum do Brasil. Embu das Artes – SP – 2005/2008** Cargo: Estagiário de Engenharia – Departamento de Processos Industriais.
Principais atividades: Determinação de tempo ciclo, cronoanálise, operação padronizada.
- **IPT/Laboratório de Embalagens. São Paulo – SP – 2004/2005** Cargo: Técnico de Laboratório.
Principais atividades: Ensaio técnicos em embalagens diversas.

QUALIFICAÇÕES E ATIVIDADES PROFISSIONAIS

- Informática: programação em VBA ACCESS - Impacta. Março, 2006
- Inglês – Wise Up/Particular: nível Avançado, conversação Avançada.
- Curso de PFMEA – Qualificação interna GM, 2013.
- Curso de Process Designer – Siemens -. 2009.
- Curso de Process Simulate – treinamento interno GM, 2013.

EXPERIÊNCIAS NO EXTERIOR

- EUA/Michigan - Treinamento na sede da GM– Laser Brazing – Setembro, 2014.
- Argentina/Córdoba - Acompanhamento em fornecedor – Outubro, 2014.

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

- Hobby, Automodelismo a combustão e motociclismo de turismo.

RESUMO

Na indústria automotiva, está sendo introduzido o uso chapas de aço endurecidas no processo de estampagem a quente, a qual se denomina "PHS" sigla em inglês para "Press Hardened Steel", a finalidade de utilização desta chapa é aumentar a resistência a tensão de ruptura em peças de segurança, o que pode chegar até 1800 MPa. A área de manufatura enfrenta grande desafio na soldagem por resistência a ponto em chapas "PHS", como uma das particularidades a parametrização ideal para se obter a maior qualidade na solda e robustez da região. Neste trabalho foi avaliado o desempenho dos parâmetros de soldagem tempo e corrente em função de quatro forças de soldagens distintas, 180, 280, 345 e 400 kgf, durante a soldagem de duas chapas "PHS", ambas com 1,18mm de espessura. As chapas foram soldadas em uma máquina tipo manual. Foram feitos quatro diagramas de soldabilidade para encontrar os parâmetros de soldagem para cada força testada, de forma atender o critério do diâmetro mínimo do ponto de solda, conforme a norma. Os resultados mostraram que a partir de 345Kgf aplicadas entre os eletrodos, os diagramas de janela operacional começaram a se estabilizar no eixo do tempo e corrente de soldagem, e ainda pode-se notar que com tempos maiores e correntes menores, houve a tendência de se reduzir a expulsão de material fundido.

ABSTRACT

In the automotive industry , is being introduced the use of hardened steel plates in the hot stamping process , which is called " PHS " stands for "Press Hardened Steel ," the purpose of using this plate is to increase the tensile strength of break in safety equipment , which can reach up to 1800 MPa . The manufacturing area faces big challenge in resistance welding the point in plates "PHS" as one of the features the ideal parameter to get the highest quality in welding and robustness of the region. This study evaluated the performance of welding parameters time and current as a function of four forces of different welding, 180, 280, 345 and 400Kgf during welding two plates "PHS", both with 1,18mm thick. The plates were welded on a machine manual type. Four weldability diagrams were made to find the welding parameters for each strength tested strength, so meet the minimum diameter of the criterion of the weld point, as the norm. The results showed that 345Kgf applied from the welding, the window operating diagrams started a tendency to stabilize at a known plane geometry, and can also be noted that with higher and lower current time , there was a tendency to reduce the expulsion of molten material .

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Ilustração das resistências elétricas envolvidas no processo de soldagem a ponto. Baseado na ref. [3].	5
Figura 3. 2 Esquema do corte transversal da região soldada. Baseado na ref. [10].	6
Figura 3. 3 Ilustração de ensaio destrutivo [42].	7
Figura 3. 4 Verificação das medidas “A” e “B” para definição do diâmetro do ponto. Baseado na ref. [42].	8
Figura 3. 5 Exemplo de inspeção por ultrassom em um ponto de solda [17].	9
Figura 3. 6 Corte transversal para a determinação do tamanho da indentação no ponto de solda. Baseado na ref. [11].	11
Figura 3. 7 Estampagem de aço pelo processo PHS. Baseado na ref. [13]. ...	12
Figura 3. 8 Diagrama TTT, [6].	13
Figura 3. 9 Diagrama de resistência a ruptura do aço comercial em comparação do aço PHS [30].	14
Figura 3. 10 Aplicação comum de peças confeccionadas em PHS na estrutura veicular [32].	15
Figura 3. 11 Distribuição de carga típica em teste de colisão lateral [32].	16
Figura 3. 12 Diagrama operacional típico para o processo de soldagem a ponto por resistência [11].	17
Figura 3. 13 Configuração básica dos equipamentos de soldagem a ponto. Baseado na ref. [36].	18
Figura 3. 14 Exemplo de processo de soldagem manual [40].	19
Figura 3. 15 Exemplo de processo de soldagem automática [40].	20
Figura 3. 16 Equipamento de soldagem do tipo “X”. Baseado na ref. [36].	21
Figura 3. 17 Equipamento de soldagem do tipo “C”. Baseado na ref. [36].	21
Figura 3. 18 Perfis diversos de eletrodos, que resultam diversos diâmetros na região de soldagem. Baseado na ref. [41].	22
Figura 4. 1 Pinça de Soldagem Düring® MFDC tipo C	24
Figura 4. 2 Eletrodo utilizado no experimento. - Mat.: CuCrZr	25
Figura 4. 3 Forma básica conforme norma EN ISO 14273.	26

Figura 4. 4 Forma básica conforme norma EN ISO 14273.	27
Figura 4. 5 Micro estrutura do metal de base (PHS) aumento 500x.	28
Figura 4. 6 Corpos de prova obtidos de peças veiculares já manufaturadas pelo processo "PHS"	29
Figura 4. 7 Martelo e talhadeira utilizados em testes.....	30
Figura 4. 8 Diagrama de janela operacional para 400kgf.....	31
Figura 4. 9 Parâmetro ideal de soldagem para ter um maior grau de liberdade possível.....	33
Figura 4. 10 Weld Tester MYACHI - Modelo MM-360 A (medidor de força e corrente de soldagem).....	34
Figura 4. 11 Máquina Universal de Ensaio, eletromecânica e microprocessada EMIC modelo DL60000.	35
Figura 5. 1 Gráfico de janela operacional para 180 kgf	37
Figura 5. 2 Gráfico de janela operacional para 280 kgf	38
Figura 5. 3 Gráfico de janela operacional para 345 kgf	40
Figura 5. 4 Gráfico de janela operacional para 400 kgf	42
Figura 5. 5 Diagrama com a representação esquemática do ponto assimétrico	42
Figura 5. 6 Gráficos de janela operacional sobrepostos	43
Figura 5. 7 Diagrama com a representação esquemática da região de solda na qual a força de soldagem atua	45
Figura 5. 8 Ensaio de tração para ponto soldado com 180Kgf de carga com o tempo de 100ms	49
Figura 5. 9 Ensaio de tração para ponto soldado com 180Kgf de carga com o tempo de 200ms	50
Figura 5. 10 Ensaio de tração para ponto soldado com 180Kgf de carga com o tempo de 300ms	51
Figura 5. 11 Ensaio de tração para ponto soldado com 280Kgf de carga com o tempo de 300ms	52
Figura 5. 12 Ensaio de tração para ponto soldado com 345Kgf de carga com o tempo de 300ms	53

Figura 5. 13 Ensaio de tração para ponto soldado com 400Kgf de carga com o tempo de 300ms	54
Figura 5. 14 Gráfico de força de ruptura a tração versus tempo de soldagem.	56
Figura 5. 15 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 200x.	57
Figura 5. 16 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 50x.	58
Figura 5. 17 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 200x.	59
Figura 5. 18 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 50x.	60
Figura 5. 19 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 100x.	61
Figura 5. 20 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 50x.	62
Figura 5. 21 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 200x.	63
Figura 5. 22 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 100x.	64
Figura 5. 23 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 50x.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1 Cotas conforme norma EN ISO 14273.	26
Tabela 4. 2 Propriedades Mecânicas do aço PHS	27
Tabela 4. 3 Propriedades Químicas do aço PHS.....	28
Tabela 4. 4 Tabela de aquisição de dados de soldagem nos ensaios	32
Tabela 5. 1 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para 180 kgf.....	36
Tabela 5. 2 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para 280 kgf.....	38
Tabela 5. 3 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para 345 kgf.....	39
Tabela 5. 4 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para 400 kgf.....	41
Tabela 5. 5 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para a força de 180 à 400 kgf	44
Tabela 5. 6 Dados correlacionando a força necessária para rompimento do corpo de prova e tempos de soldagem.	55

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

PHS:	Press Hardened Steel
AWS:	American Welding Society
LE:	Limite de Escoamento
LR:	Limite de Resistência à Tração
ZAC:	Zona Afetada pelo Calor
MPa:	Mega Pascal (N.mm ²)
N/mm:	Newton por milímetro
kA:	Quilo Ampères
ms:	Milissegundos
°C:	Graus Celsius
PP:	Ponto Pequeno
PB:	Ponto Bom – Dentro dos critérios de aceitação da norma
PR:	Ponto Ruim – Ponto com expulsão de material fundido.
I:	Corrente em Ampères
t:	Tempo em milissegundos
σ_{esc} :	Tensão de escoamento (kgf/mm ²)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
SUMÁRIO	xiv
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	4
3.1 Soldagem por resistência.	4
3.1.1 Processo de soldagem a ponto por resistência.....	4
3.1.2 Falhas comuns durante o processo de soldagem	6
3.1.2.1 Ponto mínimo aceitável conforme norma.....	7
3.1.2.2 Expulsão de material fundido.....	10
3.2 Aço PHS “Press Hardened Steel”.	11
3.2.1 Principais aspectos do aço “PHS”.....	12
3.2.2 Aplicação do “PHS” na indústria automotiva.....	14
3.3 Diagrama operacional de soldagem a ponto.....	16
3.4 Equipamento e eletrodo.	18
3.4.1 Características do equipamento de soldagem a ponto	18
3.4.2 Tipos de equipamento de soldagem a ponto	19
3.4.3 Tipos de eletrodos.....	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS.	24
4.1 Equipamentos e corpos-de-prova utilizados nos experimentos.	24
4.2 Critérios de aceitação do ponto de solda.	29

4.2.1 Determinação da Janela operacional:	29
4.2.2 Determinação do ponto ótimo de trabalho para a janela operacional: .	33
4.2.3 Equipamentos de calibração e monitoramento utilizados durante os experimentos.....	34
4.2.4 Equipamento tração	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.	36
5.1 Janela Operacional 180 kgf.	36
5.2. Janela Operacional 280 kgf.	37
5.3 Janela Operacional 345 kgf.	39
5.4 Janela Operacional 400 kgf.	41
5.5 Sobreposições das Janelas Operacionais.	43
5.6 Determinação da força exigida na soldagem do PHS.....	45
5.7 Validação da equação da força exigida na soldagem do PHS.....	47
5.8 Ensaio de Tração.....	49
5.9 Macrografias e Micrografia dos pontos de solda obtidos nos ensaios	57
6. CONCLUSÕES.	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	68

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

A soldagem de duas peças por resistência elétrica é concebida com a fusão de ambas proveniente da passagem de corrente elétrica, e da aplicação de pressão. Durante o processo, as peças aquecem-se e ocorre a fusão localizada no ponto de interface de contato das superfícies com maior resistência elétrica. A geração de calor é devida à resistência do conjunto à passagem de corrente. Neste processo de soldagem, essa resistência é composta de resistência de contato peça/eletrodo e peça/peça.

A soldagem a ponto por resistência é o processo mais utilizado na indústria automotiva, hoje um carro pode ter facilmente mais de 4000 pontos de solda, os materiais que devem ser soldados cada vez mais sofrem modificações afim de tornar os veículos mais leves, seguros e baratos.

Neste processo de evolução dos materiais, foi desenvolvido um aço que é endurecido a quente durante a etapa de estampagem de peças veiculares, ele é conhecido com aço "PHS" em virtude da sigla em inglês que denomina o processo de concepção do mesmo, "Press Hardened Steel".

A função deste aço nos automóveis é criar uma estrutura rígida e resistente a impactos ao redor dos ocupantes e assim aumentar a segurança durante um impacto, isto é possível porque as peças após o processo de estampagem a quente podem alcançar até 1100MPa de limite de resistência a ruptura.

Uma outra vantagem que este aço denota, é possibilidade de redução na massa dos veículos, tendo em vista que se pode alcançar a mesma, ou maiores durezas com espessura menores nas peças.

Contudo este aço desafia a soldagem por resistência a ponto usual, pois os parâmetros de soldagem como tempo, corrente e força devem garantir resistência mecânica no ponto igual ou próxima a encontrada na chapa

O presente trabalho será voltado para o estudo dos parâmetros na soldagem a ponto por resistência, na junção de duas chapas "PHS", ambas com 1,18mm de espessura, utilizando uma máquina manual, com parâmetros de soldagem variáveis, sendo forças de 180, 280, 345 e 400 Kgf, tempos de 100,

200 e 300 ms e correntes de 4 kA até 11 kA, definindo assim quatro diagramas de soldabilidade.

As variáveis estudadas têm a finalidade de encontrar os melhores valores para tempo, corrente e força e assim permitir uma parametrização inicial muito próxima do ideal para um par de chapas "PHS".

2. OBJETIVO.

O objetivo deste trabalho é estudar as influências dos parâmetros no processo de soldagem a ponto por resistência em chapa de aço "PHS", utilizada na indústria automotiva a fim de determinar os parâmetros ótimos dentro da janela operacional, visando a qualificação aos requisitos mínimos da norma. E estes parâmetros poderão então ser adotados durante as fases de ajuste e parametrização dos equipamentos de soldagem na indústria automotiva, visando a redução de custos e otimização de processos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

3.1 Soldagem por resistência.

Entre os diversos tipos de processo de soldagem por resistência pode-se citar: a ponto; de topo-a-topo; por resistência pura e por centelhamento; por ressalto; e por costura [1].

Todavia este trabalho tratará em sua essência, exclusivamente sobre o processo a ponto por resistência.

3.1.1 Processo de soldagem a ponto por resistência

O processo de soldagem a ponto por resistência, assim como os outros processos de soldagem por resistência consiste em unir duas ou mais peças de forma autógena, ou seja, sem a adição de outro metal as peças que serão soldadas. Para viabilizar este processo deve-se fundir ambos os materiais [2].

A fusão dos dois materiais de base é possível quando se aplica uma dada pressão entre as chapas e em simultâneo uma corrente elétrica, esta corrente elétrica promove a geração de calor na interface de contato das chapas a serem soldadas [2].

Desta forma, na interface dos materiais de base a serem soldados respeita-se então a lei de Joule, equação 1, que é uma correlação entre a corrente elétrica, a resistência do condutor e o calor resultante [1].

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

Aonde: Q = calor (Cal)

J = 4,185 J

I = corrente de soldagem (A)

R_T = conjunto de resistência elétrica (Ω)

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

O calor gerado pela corrente elétrica é maior no local em que se encontra a maior resistência elétrica. Portanto, a resistência deverá ser maior no ponto a ser soldado, isto por que o objetivo é fundir as peças entre si [3].

Na figura 3.1 está representado de forma ilustrativa as resistências envolvidas no processo, que devem ser somadas para se determinar a resistência elétrica total, equação (2) [3].

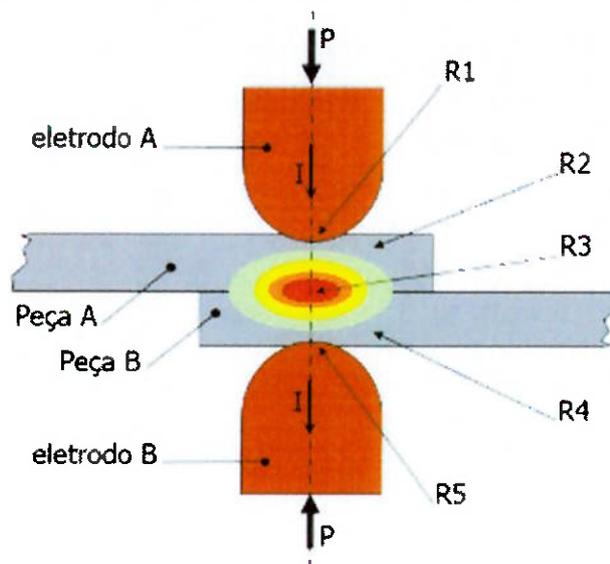


Figura 3. 1 - Ilustração das resistências elétricas envolvidas no processo de soldagem a ponto. Baseado na ref. [3].

$$R_{\text{total}} = R1+R2+R3+R4+R5 \quad (2)$$

Esta soldagem se caracteriza pela utilização de dois eletrodos de cobre (eletrodo A e eletrodo B), que aplicam uma dada pressão (P) e uma corrente elétrica (I) nas peças (A e B), esta pressão tem a finalidade fundamental reduzir a resistência elétrica entre os eletrodos e as peças (R1 e R5), já a corrente tem a finalidade de gerar o efeito Joule no ponto de maior resistência (R3) [1].

As resistências R2 e R4 são as que trazem menor influência no contexto geral [3].

Durante o aquecimento das chapas no ponto de resistência R3 o metal sofre uma expansão térmica, sendo assim, é importante que os eletrodos mantenham a pressão aplicada para garantir que força de reação contraria

gerada pela expansão da chapa fundida não afaste as chapas e não perca eficiência térmica no local esperado da solda [7].

Como é mostrado na figura 3.2, pelo lado interno do eletrodo deve haver um fluxo de água que tem a função de refrigerar o eletrodo e também o ponto de solda, é muito importante que o eletrodo seja refrigerado a cada ciclo de soldagem pois em processos que o eletrodo é sujeito a grandes sequencias de pontos a sua integridade física será deliberadamente afetada, e assim caso não seja refrigerado irá perder a sua eficiência como condutor de corrente [10].

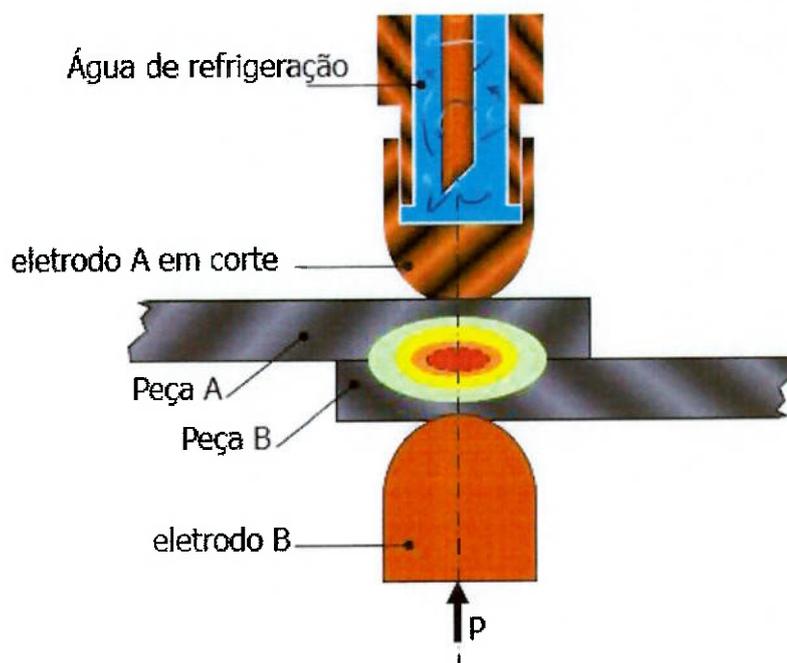


Figura 3. 2 Esquema do corte transversal da região soldada. Baseado na ref. [10].

3.1.2 Falhas comuns durante o processo de soldagem

A falha mais comum que pode ser encontrada nas peças soldadas pelo processo citado anteriormente é o ponto de solda com dimensional aquém do especificado, isto é evidenciado quando se detecta que o diâmetro do ponto está pequeno e/ou durante o processo de aquecimento houve a expulsão de material fundido [13].

3.1.2.1 Ponto mínimo aceitável conforme norma.

De modo geral cada empresa adota uma norma interna para determinar o diâmetro mínimo aceitável na área da secção fundida do ponto de solda, esta dimensão respeita critérios de resistência a tração, cisalhamento e fadiga, esforços que comumente sujeitam a solda [11].

Para validar este diâmetro da secção fundida há algumas maneiras, dentre elas o teste destrutivo da união soldada (figura 3.3), e a verificação do diâmetro fundido com paquímetro (figura 3.4) [11].

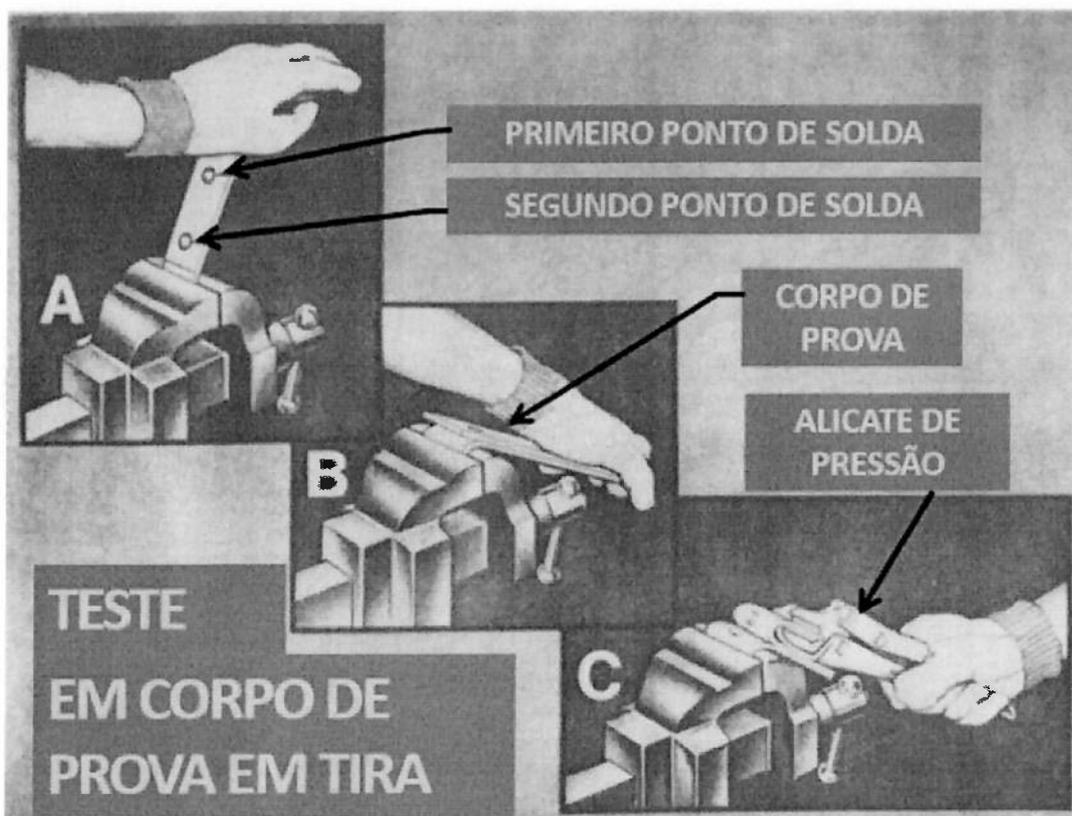


Figura 3. 3 Ilustração de ensaio destrutivo [42].

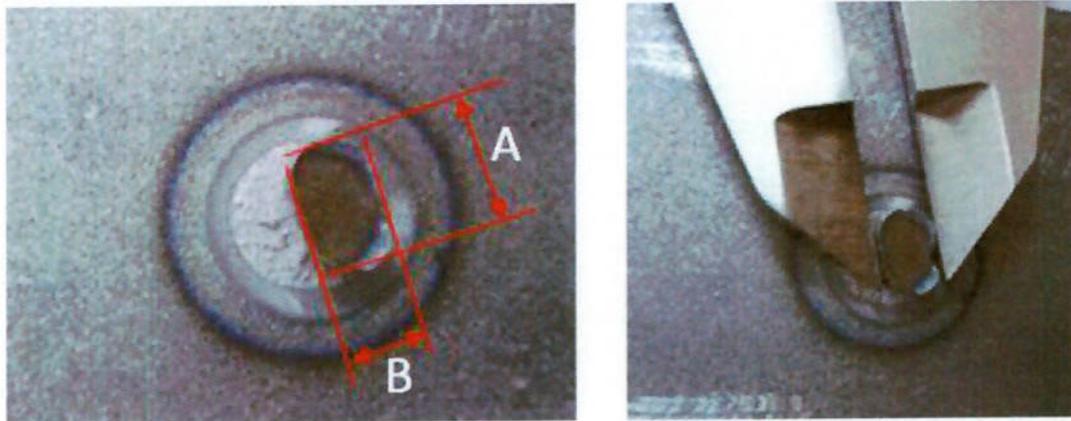


Figura 3. 4 Verificação das medidas “A” e “B” para definição do diâmetro do ponto. Baseado na ref. [42].

Pelo método de medição com paquímetro, o diâmetro será o resultado da média aritmética das medidas maiores e menores encontradas ao se medir como o paquímetro o ponto de solda já rompido [22].

Contudo esta inspeção é imprecisa e pode recorrer em erro caso não seja efetuado com a perícia exigida [11].

Uma forma muito comum e precisa para determinar o diâmetro real resultante é a medição por ultrassom do diâmetro referido, que tem como uma das vantagens ser um método não destrutivo [17].

Na inspeção por ultrassom na soldagem a ponto, assim como em qualquer outro processo de inspeção por ultrassom (figura 3.5) é induzida uma onda sonora na peça soldada e de acordo com o padrão de reflexão do som pode-se fazer uma análise comparativa com um padrão já determinado e assim com esta avaliação determinar o diâmetro do ponto de solda, para a aplicação de soldagem a ponto por resistência [17].

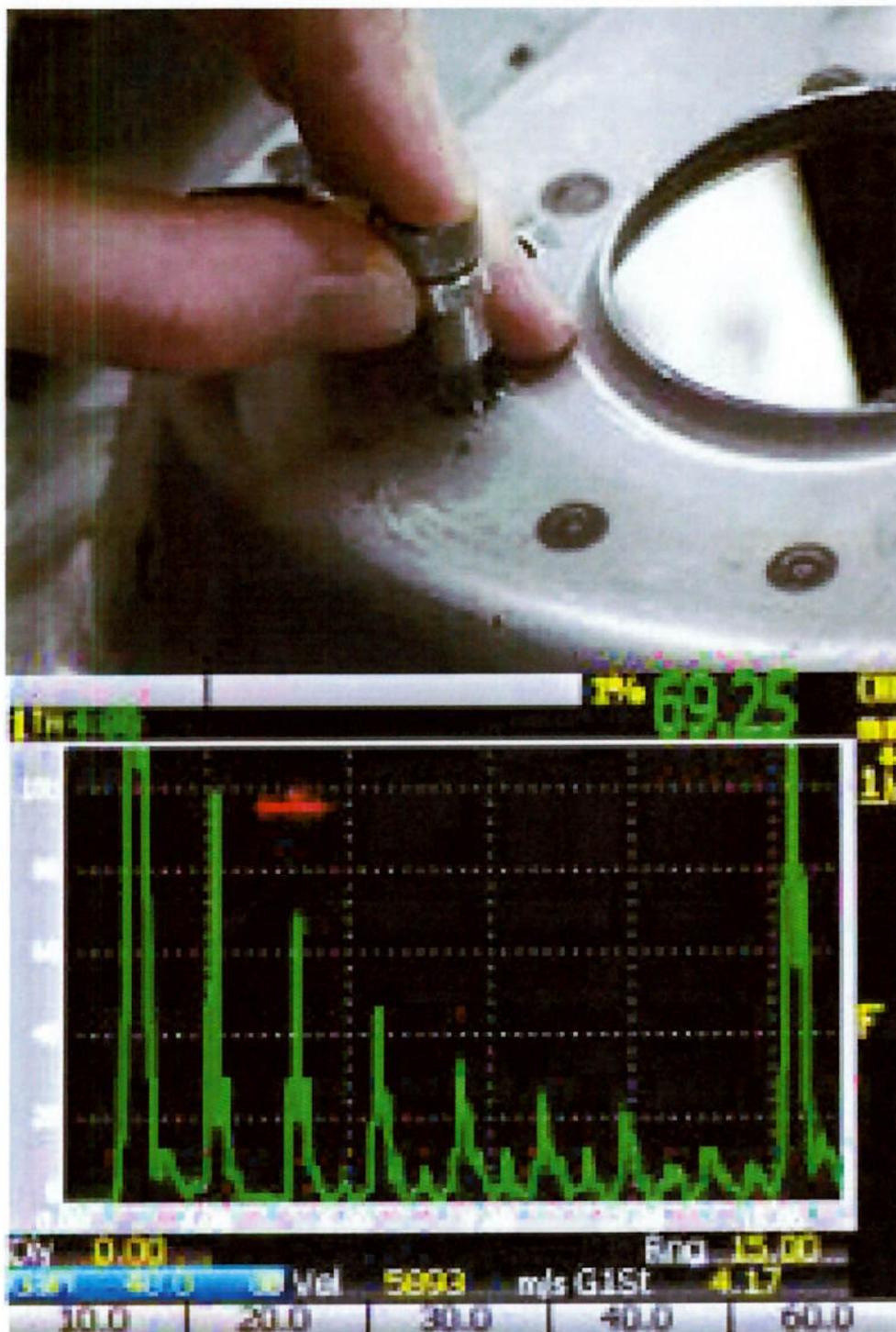


Figura 3. 5 Exemplo de inspeção por ultrassom em um ponto de solda [17].

O diâmetro fundido da secção do ponto de solda que é considerado aceitável na indústria automotiva é por volta de 3,5 a 5 vezes a raiz quadrada da espessura da chapa a ser soldada, neste trabalho, o método que será adotado para a determinação do diâmetro mínimo aceitável provem de norma específica da indústria, a qual é a equação 3:

$$D = 4 \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Aonde: D = Diâmetro da secção fundida (mm)

t = Espessura da chapa (mm)

3.1.2.2 Expulsão de material fundido.

A expulsão do material fundido na região de solda pode ser resultado de excesso de pressão dos eletrodos nas chapas durante a soldagem, excesso de corrente de soldagem ou excesso de tempo durante a aplicação da pressão [23].

Esta expulsão pode acontecer pela interface das chapas a serem soldadas ou até mesmo pela interface eletrodo chapa, o que de modo geral é entendido como o caso mais grave de expulsão, isto porque além da maior perda de massa fundida, há ainda a penetração do eletrodo na chapa durante a fase de resfriamento do ponto, o que pode prover um defeito chamado de indentação [23].

Pode-se definir a indentação como a profundidade de penetração da face dos eletrodos na chapa [11].

Conforme figura 3.6 pode-se verificar que a indentação são as espessuras somadas das chapas soldadas (e_1) menos a espessura do corte transversal do ponto de solda (e_2), dividido por dois, demonstrado na equação 4 [11].

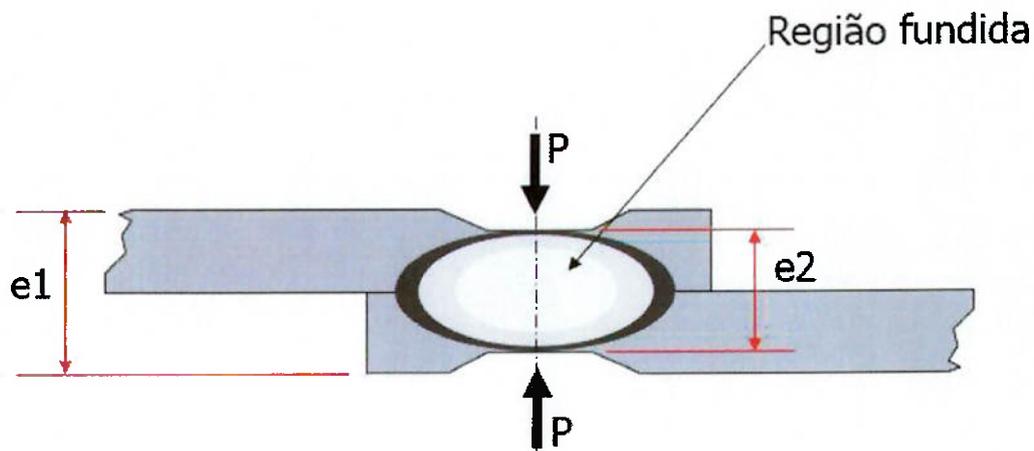


Figura 3. 6 Corte transversal para a determinação do tamanho da indentação no ponto de solda. Baseado na ref. [11].

$$I_d = \frac{e_1 - e_2}{2} \quad (4)$$

Aonde: I_d = Profundidade da Indentação (mm)
 e_1 = Espessura transversal do somatório de chapas unidas (mm)
 e_2 = Espessura transversal da região fundida, incluindo a ZAC (mm)

3.2 Aço PHS “Press Hardened Steel”.

A indústria automotiva com sua busca incessante por materiais novos e novas liga de aço para atender a necessidade de redução de custo, melhoria de desempenho dos veículos e principalmente o aumento dos níveis de segurança, desenvolveu o aço que é conhecido internacionalmente como PHS ou “Hot Stamp” [26].

Ele recebe este nome em virtude do processo de conformação mecânica no qual é submetido, para a obtenção de peças destinadas a indústria automotiva [26].

Este processo consiste em primeiro efetuar o corte de uma pré-forma da chapa a ser conformada, posteriormente esta pré-forma é submetido a um processo de aquecimento que tem como intuito elevar a temperatura até aproximadamente 900°C, deve-se então transferi lá rapidamente para a prensa que irá promover o formato definitivo da peça [28].

Para finalizar, o equipamento sujeita a chapa estampada deste aço a uma rápida refrigeração, podemos verificar na figura 3.7 o processo ilustrado.

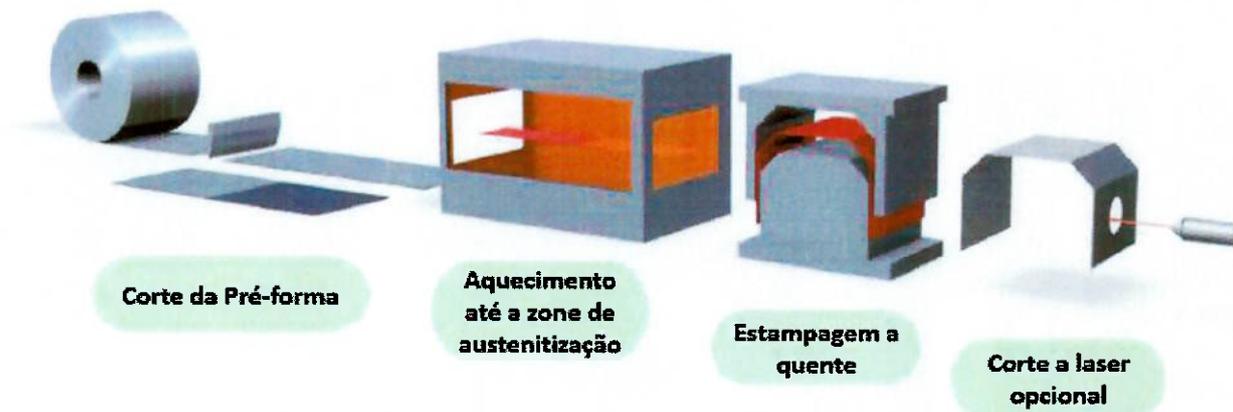


Figura 3. 7 Estampagem de aço pelo processo PHS. Baseado na ref. [13].

3.2.1 Principais aspectos do aço “PHS”

A utilização crescente do aço conformado pelo processo PHS se justifica pela sua capacidade de promover a redução de massa e a melhoria da segurança nos veículos, este aço permite tal ganho em virtude do seu processo de conformação visar uma estrutura martensítica após a estampagem.

Durante o processo de aquecimento da pré-forma a temperatura é controlada de modo que permeie os 900°C, o que transforma a estrutura cristalina em austenítica [28].

Na fase de estampagem a estrutura austenítica é uma aliada a necessidade de alongamento do material, podendo ser acrescido 50% a mais a

sua capacidade de alongamento, o que permite uma estampagem mais fácil em relação a estampagem a frio [28].

No término da estampagem a ferramenta de conformação promove um resfriamento rápido da peça estampada, visando uma temperatura no final do processo por volta dos 50°C, o que permite a formação de uma microestrutura martensítica de forma homogênea na peça estampada [30].

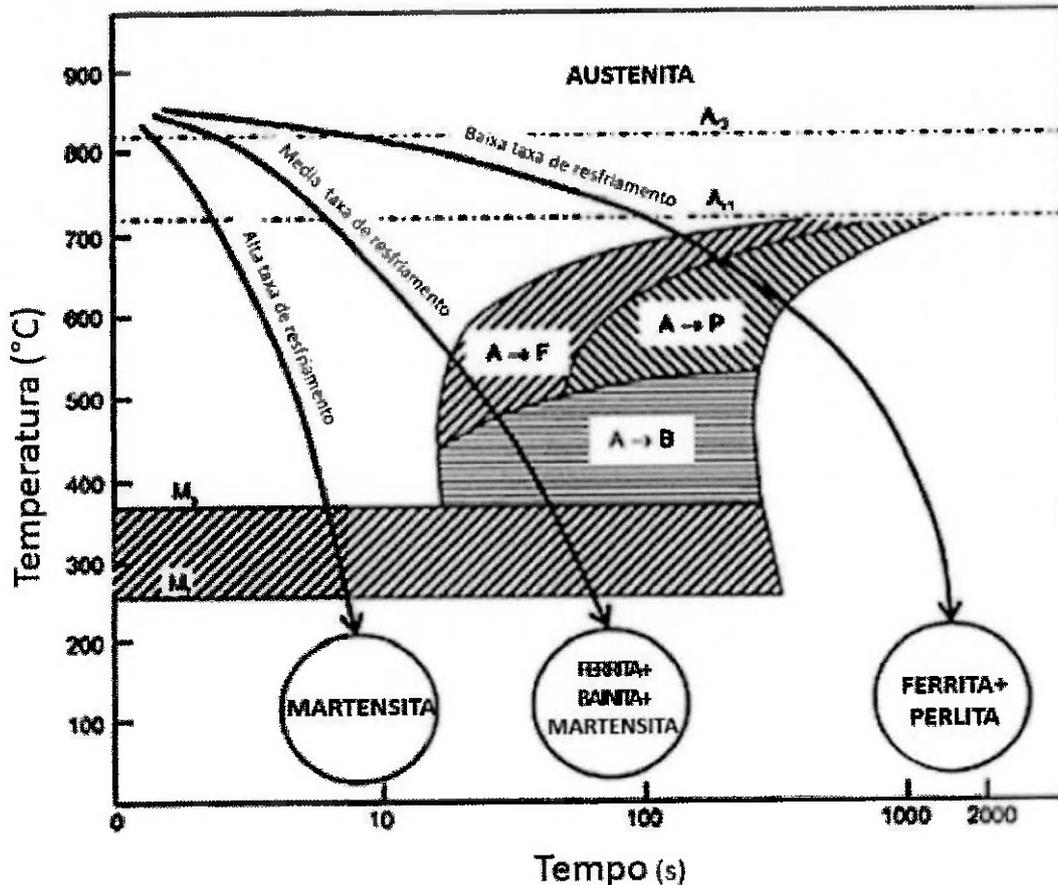


Figura 3. 8 Diagrama TTT, [6].

Estudando o diagrama tempo, transformação e temperatura (diagrama TTT, figura 3.8) é possível verificar que o resfriamento rápido garante que o resultado da estrutura cristalina seja martensítico, o que é o objetivo do processo de produção das peças PHS [6].

A estrutura martensítica permite que o produto final tenha uma tensão de ruptura aumentada em até 1800 MPa o que chega a ser 3 vezes maior do que no material original (por volta de 600 MPa) [24].

Como pode ser observado na figura 3.9.

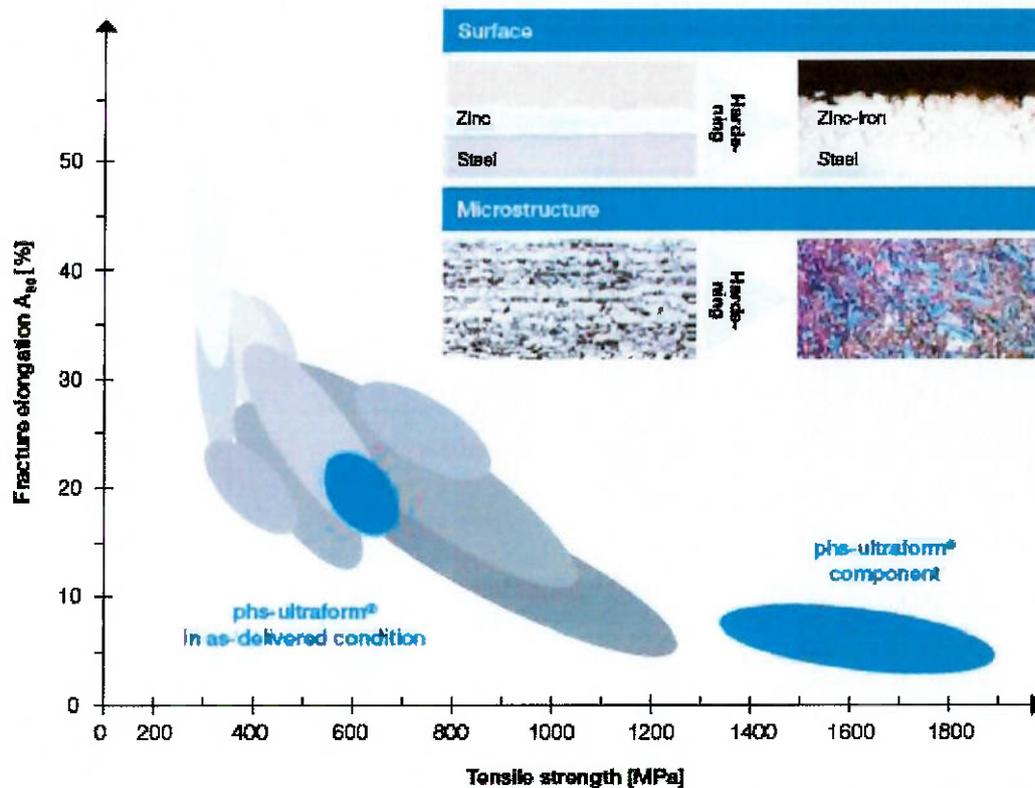


Figura 3. 9 Diagrama de resistência a ruptura do aço comercial em comparação do aço PHS [30].

3.2.2 Aplicação do “PHS” na indústria automotiva

O aço obtido pelo processo PHS permite que a indústria automotiva permeie dois de seus principais objetivos, o aumento de segurança aos passageiros do veículo e a redução de massa do mesmo [27].

O aumento de segurança é possível com a utilização deste aço em áreas específicas, isto porque o aumento de resistência mecânica que o processo PHS promove ao aço, é muito interessante quando se busca uma maior rigidez em determinada peça do veículo [26].

Na figura 3.10 pode ser visto as aplicações mais comuns.

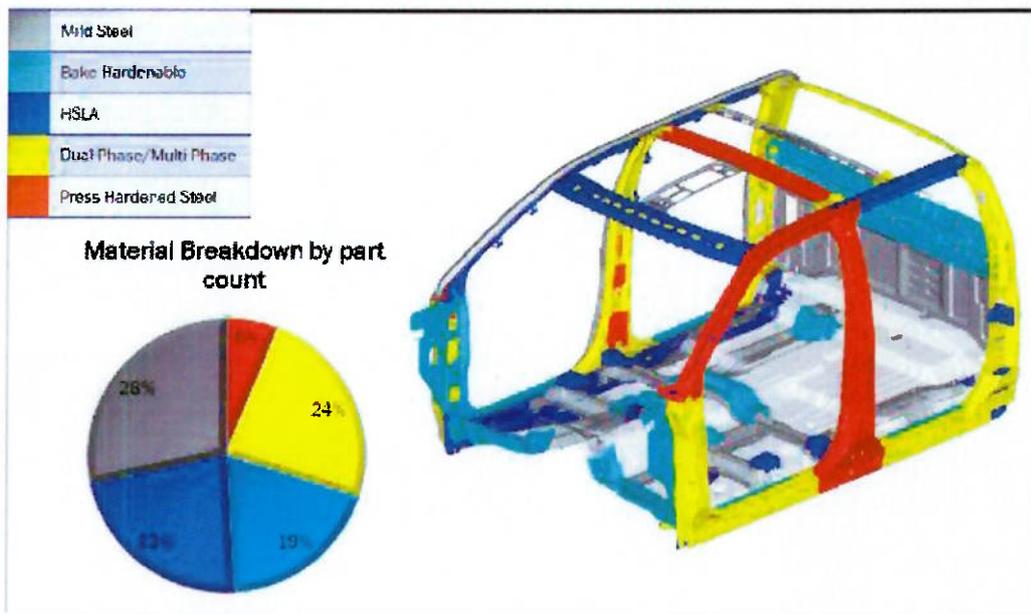


Figura 3. 10 Aplicação comum de peças confeccionadas em PHS na estrutura veicular [32].

A aplicação na região lateral da cabine do veículo visa o aumento da resistência a impactos laterais, isto porque é uma região do veículo que os ocupantes estariam mais expostos em caso de colisão lateral [32].

Na figura 3.11 fica evidenciado como se comporta o vetor carregamento em uma situação de colisão lateral [32].

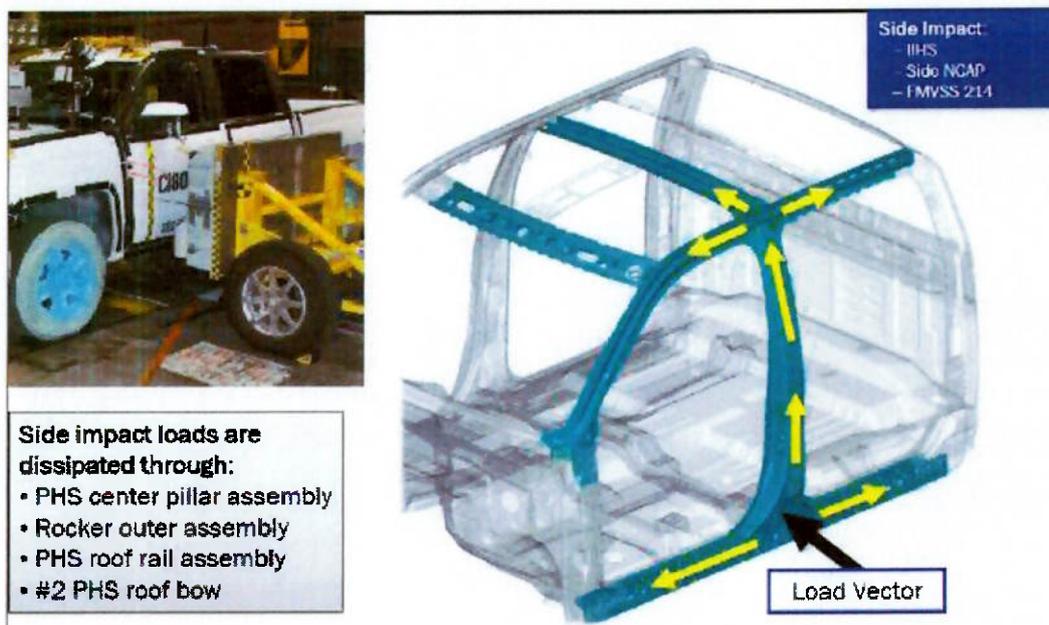


Figura 3. 11 Distribuição de carga típica em teste de colisão lateral [32].

Desta forma um material com maior rigidez, e que possa garantir a menor deformação plástica adjacente aos ocupantes é algo desejável no veículo, contudo para este fim estas peças não podem trazer um aumento de massa ao veículo [33].

O aço PHS atende esta expectativa, já que durante o seu processo de conformação o alongamento linear é maior devido a sua estrutura cristalina ser austenítica o que também permite uma estampagem com espessuras menores [31].

Portanto, as peças tendo menor espessura e maior resistência mecânica atendem a necessidade de redução de massa do veículo, o que é de extrema relevância quando a exigência é reduzir o peso final do veículo [26].

3.3 Diagrama operacional de soldagem a ponto

O diagrama operacional de soldagem a ponto funciona como um mapa orientativo para a escolha dos parâmetros de soldagem a serem utilizados em uma determina combinação de chapas [35].

Este diagrama é muito útil pois baliza as escolhas dos parâmetros iniciais da soldagem dentro de um campo de pontos de solda aceitáveis, sua configuração comum trata de um plano cartesiano que tem o tempo em função da corrente [11].

São entendidos como pontos de solda aceitáveis os que atendem um diâmetro mínimo após sua formação, e que durante a formação não há a expulsão de material fundido [6].

Portanto no diagrama é possível analisar curvas que delimitam uma área na qual os pontos de solda serão aceitáveis, esta área é chamada de janela operacional. Figura 3.12 [35].

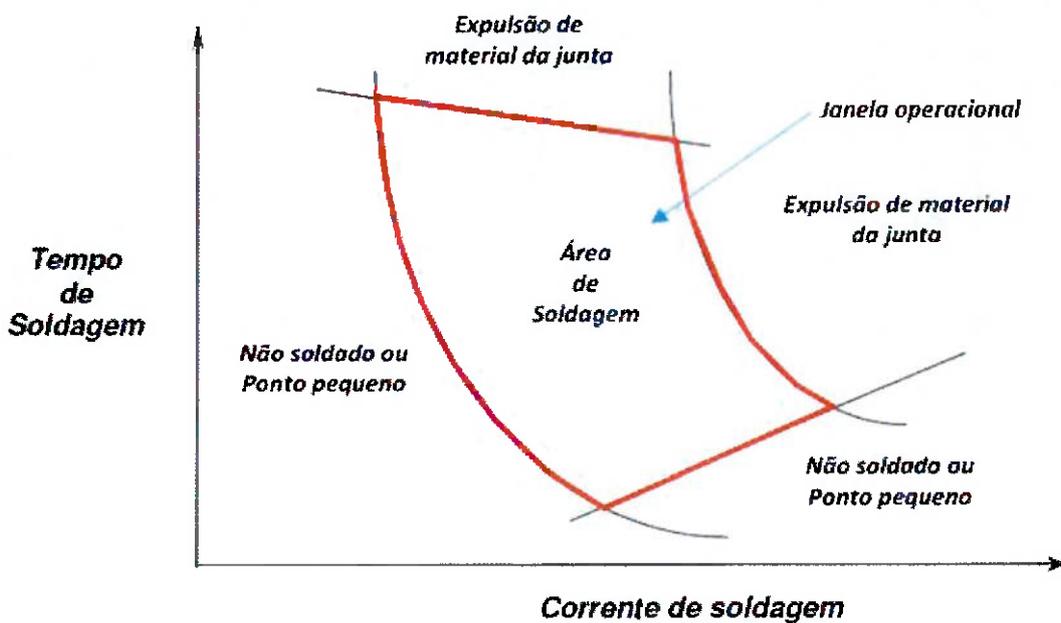


Figura 3. 12 Diagrama operacional típico para o processo de soldagem a ponto por resistência [11].

De forma teórica se entende que quais quer parâmetros de tempo em função da corrente que resultem em um ponto de solda que fique inscrito na janela operacional resultará em um ponto de solda aceitável. Desde que se respeite a mesma força e combinação de chapas utilizada na construção do diagrama [35].

3.4 Equipamento e eletrodo.

3.4.1 Características do equipamento de soldagem a ponto

Como já explanado no texto acima, para se efetuar a soldagem por resistência é necessário se aplicar nas chapas uma dada corrente e uma pressão, durante um determinado tempo [36].

Para este processo ser economicamente viável desenvolve-se ao longo do tempo um equipamento capaz de atender essa expectativa [36].

O equipamento de soldagem a ponto por resistência, de forma geral consiste em um par de eletrodos, um par de porta-eletrodos, sistema de refrigeração dos eletrodos, sistema de controle da pressão dos eletrodos e um transformador. Exemplificados de forma esquemática na figura 3.13 [36].

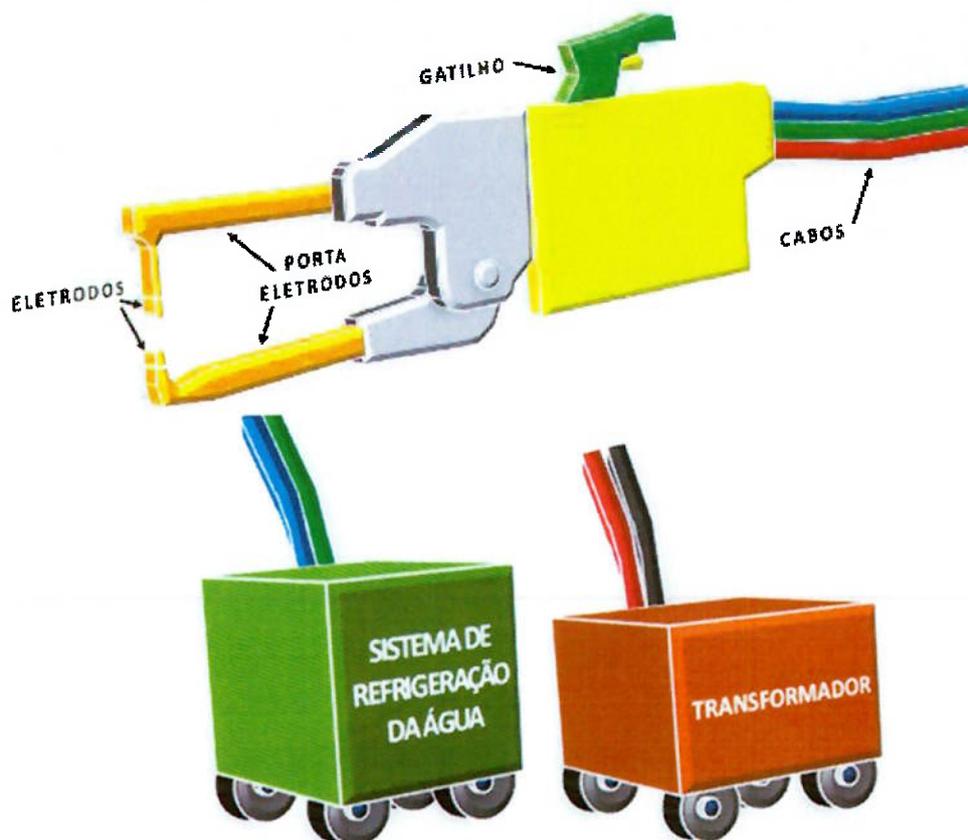


Figura 3. 13 Configuração básica dos equipamentos de soldagem a ponto. Baseado na ref. [36].

3.4.2 Tipos de equipamento de soldagem a ponto

Os equipamentos de soldagem a ponto por resistência podem ser divididos em dois grandes grupos: manuais e automáticos [36].

O ponto elementar que distingue um grupo do outro é a interface de acionamento do equipamento, que no caso dos manuais (figura 3.14) dependem de uma intervenção humana para iniciar o processo de soldagem e já nos automáticos (figura 3.15) este processo de soldagem é controlado por um robô previamente programado [36].

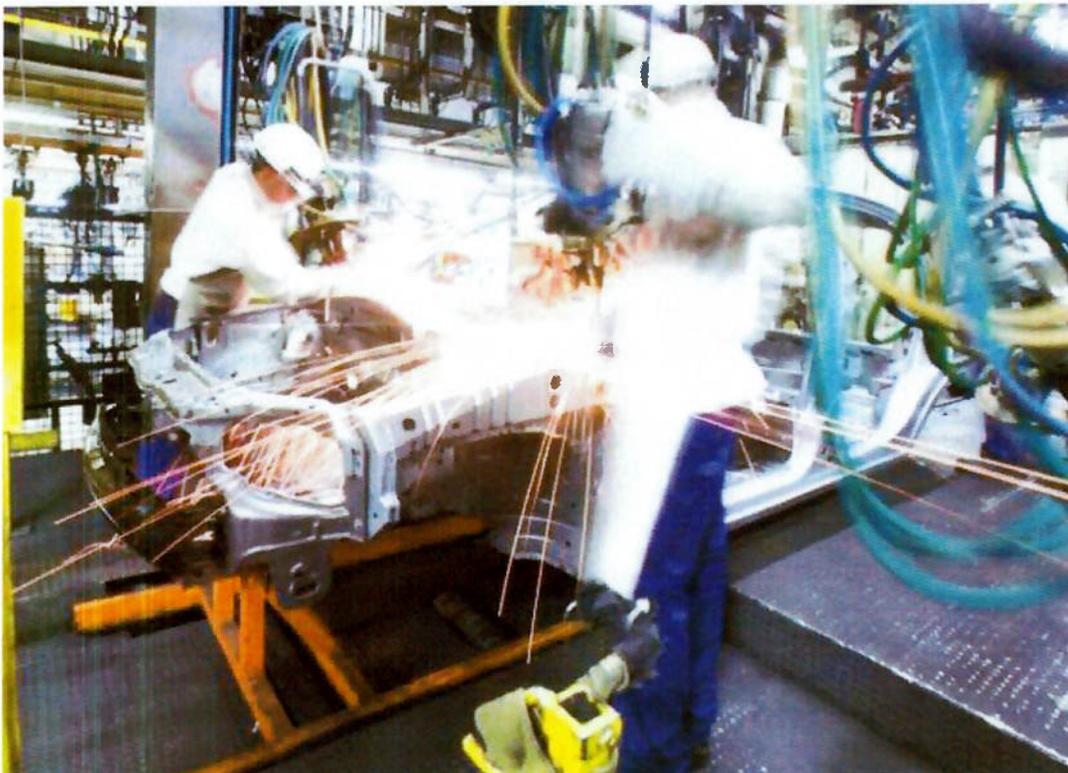


Figura 3. 14 Exemplo de processo de soldagem manual [40].

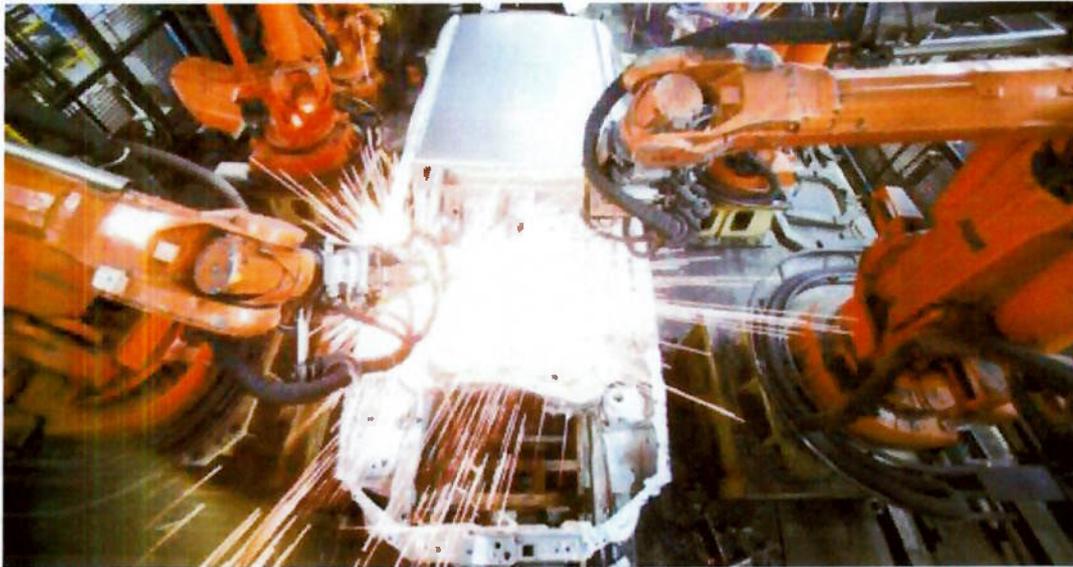


Figura 3. 15 Exemplo de processo de soldagem automática [40].

É possível também caracterizar o equipamento segundo sua silhueta, esta dependerá na maioria das suas aplicações única e exclusivamente das peças a serem soldadas o que proporciona diversas formas possíveis para os porta-eletrodos, podendo ser ambos móveis ou um móvel e outro fixo [36].

Dentre estas formas as mais comuns são conhecidas com “X” e “C”. Esta nomenclatura diz respeito ao tipo de acionamento mecânico que o equipamento está sujeito. Sendo que para o tipo “X” o equipamento remete a uma tesoura no seu conceito construtivo, o que é facilmente observável na figura 3.16. Nesta aplicação a força nos eletrodos resulta em uma distribuição mais homogênea, isto porque a carga aplicada pelo cilindro se divide de forma uniforme nos porta-eletrodos [36].

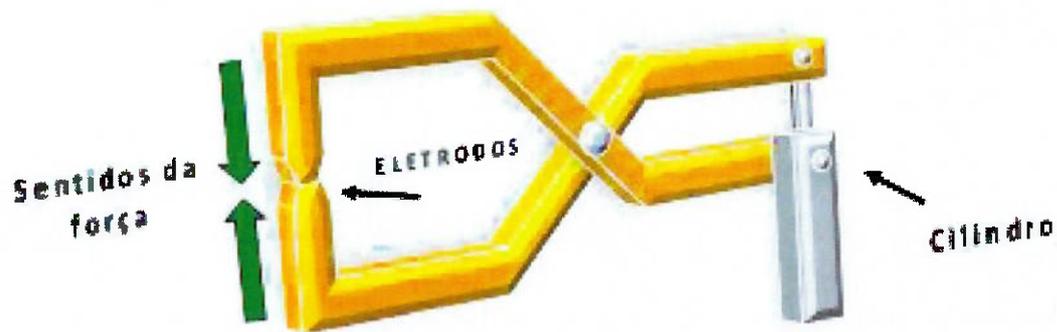


Figura 3. 16 Equipamento de soldagem do tipo "X". Baseado na ref. [36].

Já para o tipo "C" nota-se que a aplicação da força proveniente do cilindro é unidirecional e tem ação direta exclusivamente em um porta-eletrodo [36].

Desta maneira a força não sofrerá decomposições no seu trajeto até os eletrodos, o que é uma vantagem quando necessitamos de uma maior força aplicada na soldagem, contudo o outro porta-eletrodo deverá ser capaz de suportar ao esforço de soldagem sem sofrer flexão. Figura 3.17 [36].

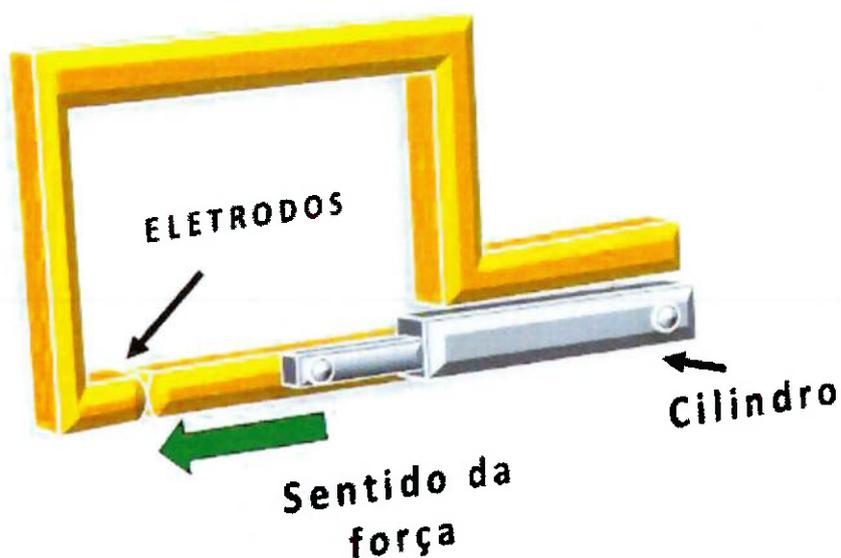


Figura 3. 17 Equipamento de soldagem do tipo "C". Baseado na ref. [36].

Ainda hoje a maioria dos equipamentos de soldagem a ponto são atuados por mecanismos pneumáticos ou alavancas mecânicas, contudo há uma forte tendência destes mecanismos migrarem para um acionamento servo-controlado.

O acionamento servo controlado promove maior controle na velocidade da abertura, fechamento dos eletrodos e também é possível controlar a intensidade da força no decorrer do processo de soldagem [36].

3.4.3 Tipos de eletrodos

Há no mercado um grande gama de perfis de eletrodos disponíveis, estes perfis são construídos com o objetivo de atender diversos critérios, dentre eles acesso na região a ser soldada, otimizar a vida útil do par de eletrodos e até mesmo atender combinações de espessuras das chapas a serem soldadas [39].

De modo geral os diversos perfis de eletrodo irão resultar em um diâmetro diferente na área de contato de solda dos eletrodos nas chapas a serem soldadas. A figura 3.18 demonstra com linhas de cota como podem variar os diâmetros das áreas de contato dos eletrodos [41].

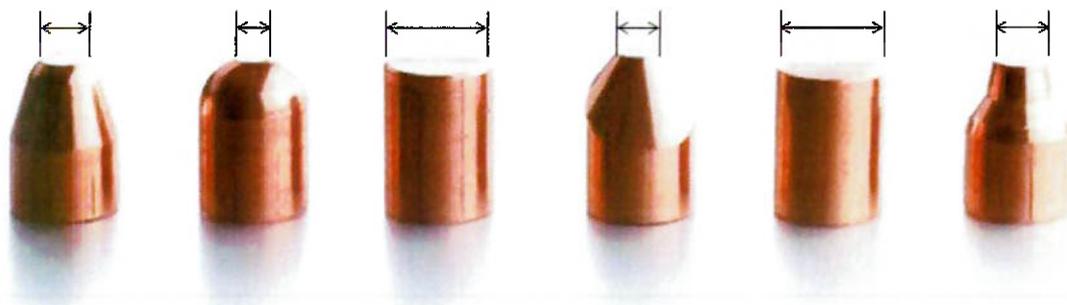


Figura 3. 18 Perfis diversos de eletrodos, que resultam diversos diâmetros na região de soldagem. Baseado na ref. [41].

A variação da área de contato do eletrodo na peça, influi diretamente na pressão exercida durante a soldagem, isto por respeitar a formula 5 da pressão [39].

$$P = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Aonde: P = pressão (N/mm²)
 F = força (N)
 A = área (mm²)

Mesmo a força aplicada pelo equipamento de soldagem sendo uma variável passível de controle, ela deverá respeitar os limites físicos do equipamento [11].

Portanto, para dada aplicação com um eletrodo de grande área de contato, a força ajusta no equipamento deverá ser grande para assim resultar em uma grande pressão de soldagem, isto porque a pressão dos eletrodos tem por finalidade fundamental reduzir a resistência elétrica na interface eletrodo/peça [3].

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 Equipamentos e corpos-de-prova utilizados nos experimentos.

Foram utilizadas chapas de aço processada pela metodologia do "PHS", com espessuras 1.18 mm, estas foram sobrepostas e soldadas com equipamento do tipo "C", de corrente contínua e de média frequência, da marca Düring, como mostra a figura 4.1.



Figura 4. 1 Pinça de Soldagem Düring® MFDC tipo C

O eletrodo utilizado para os testes atende a norma, e tem área plana na face de soldagem com diâmetro de 5 mm, e para se garantir a constância do diâmetro de contato do eletrodo, a cada 5 soldagem era efetuada a fresagem dele, e assim se garantia o dimensional do eletrodo, como mostra a figura 4.2.



Figura 4. 2 Eletrodo utilizado no experimento. - Mat.: CuCrZr

Configuração do dimensional dos corpos de prova foram embasadas na norma EN ISO 14273, como mostra a figura 4.3.

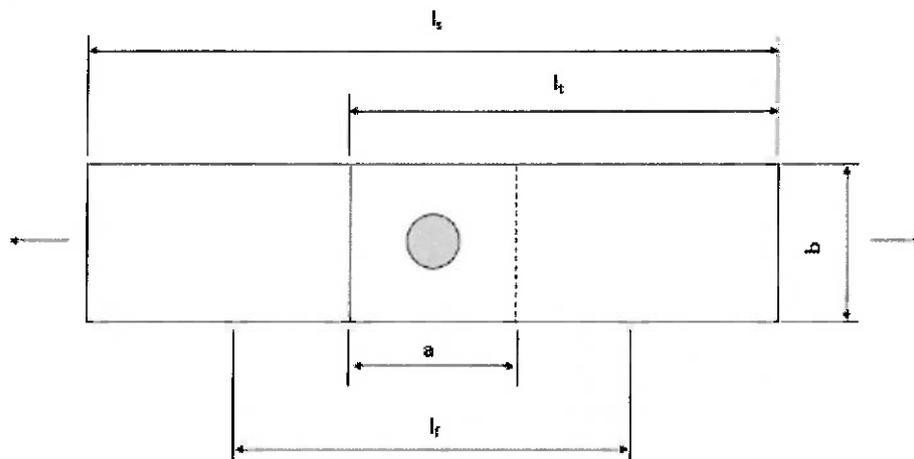


Figura 4. 3 Forma básica conforme norma EN ISO 14273.

Tabela 4. 1 Cotas conforme norma EN ISO 14273.

Dimensões dos corpos-de-prova, conforme Norma - EN ISO 14273					
t (Espessura)	a	b	l_s	l_f	l_t
0.5 < t ≤ 1.5	35	45	175	95	105
1.5 < t ≤ 3.0	46	60	230	105	138
3.0 < t ≤ 5.0	60	90	260	120	160
5.0 < t ≤ 7.5	80	120	300	140	190
7.5 < t ≤ 10.0	100	150	320	160	210

Portanto as dimensões dos corpos de prova de acordo com a norma EN ISO 14273, como mostra a figura 4.4.

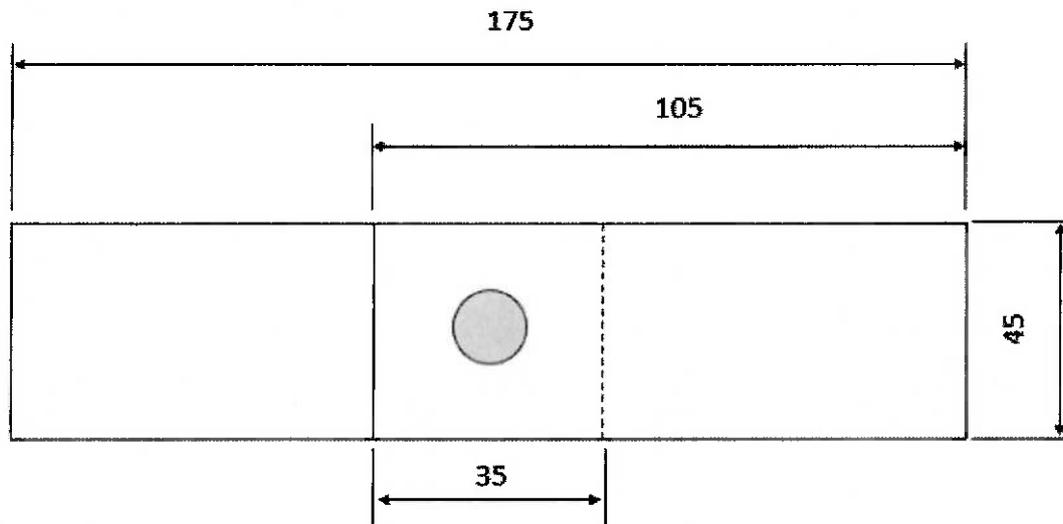


Figura 4. 4 Forma básica conforme norma EN ISO 14273.

A tabela 4.2 e 4.3, mostram respectivamente as propriedades mecânicas e químicas das chapas utilizadas neste no experimento.

Tabela 4. 2 Propriedades Mecânicas do aço PHS

Valores das propriedades mecânicas das chapas "PHS"	
Limite de Escoamento	1100 N/mm ²
Limite de Resistência	1500 N/mm ²
Alongamento	6%

A figura 4.5 demonstra a micro estrutura de metal de base, importante ressaltar que este metal já foi submetido ao processo de conformação PHS e já apresenta estrutura martensítica.



Figura 4. 5 Micro estrutura do metal de base (PHS) aumento 500x.

Tabela 4. 3 Propriedades Químicas do aço PHS

Composição química típica dos aços "PHS"	
Carbono (C)	0.24 %
Manganês (Mn)	1.20 %
Silício (Si)	0.20 %
Boro (B)	0,002 até 0,006 %
Outros	Cr, Mo, Ti

Contudo é relevante esclarecer que os corpos de prova foram obtidos de peças veiculares já manufaturadas, o que se mostrou um grande desafio a obtenção de corpos de provas nas dimensões normatizadas.

Sendo assim a maioria dos corpos de prova foram obtidos após avaliação da área plana disponível da (peça), a ser cortada, conforme ilustra a figura 4.6.



Figura 4. 6 Corpos de prova obtidos de peças veiculares já manufaturadas pelo processo "PHS"

4.2 Critérios de aceitação do ponto de solda.

4.2.1 Determinação da Janela operacional:

Para a determinação da janela operacional de acordo com o explanado no capítulo 3, item 3.3, ou seja, o diagrama de tempo em função da corrente de soldagem, foi fixada a força entre eletrodos em 180, 280, 345, 400 kgf, para cada força se variando o tempo em 100, 200 e 300ms e a corrente entre 4,2kA a 10,3kA.

A aplicação da corrente no processo foi escalonada com intervalos de 100A, até que, pelo menos três amostras apresentassem o menor diâmetro do ponto atingível, igual ou acima do valor mínimo especificado no teste de

arrancamento de acordo com a norma, utilizando talhadeira e martelo, conforme figura 4.7.



Figura 4. 7 Martelo e talhadeira utilizados em testes.

Após o rompimento do ponto foi efetuada a medição com paquímetro e assim foi possível a aplicação da equação 6, a equação que determina o mínimo diâmetro do ponto de solda aceitável.

$$D = 4 \cdot \sqrt{t} \quad (6)$$

A partir deste ponto foi acrescentado 200A para a determinação final do limite mínimo da corrente de soldagem.

Já para ser determinado parâmetro máximo de corrente de soldagem, foi acrescentado para cada ponto de solda 100A a partir do ponto mínimo, e no momento que houve a expulsão de material. Portanto foi determinado como ponto de máxima corrente, o ponto de expulsão menos 200A.

Como exemplo segue o diagrama obtido para uma força de 400 kgf, na figura 4.8.

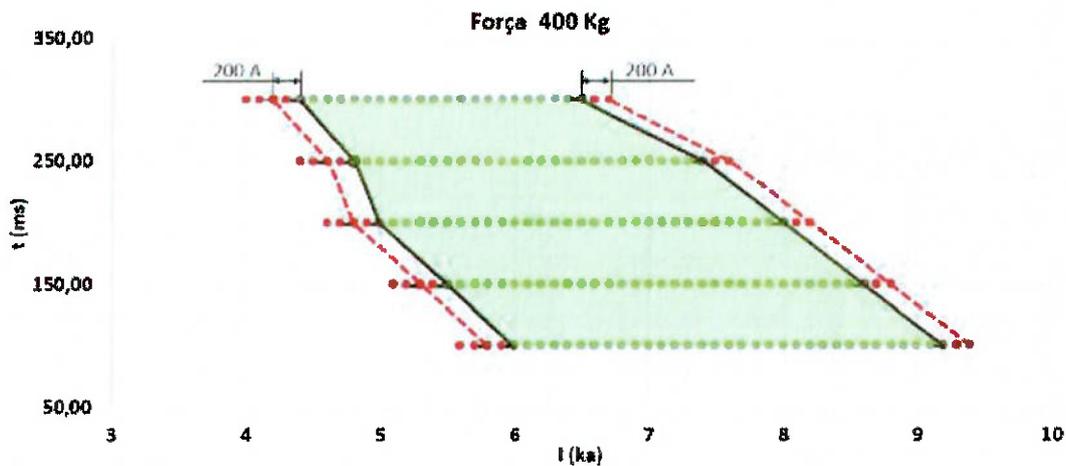


Figura 4. 8 Diagrama de janela operacional para 400kgf.

Na tabela 4.4 de aquisição de dados para força de 400 kgf, aonde as siglas têm os seguintes significados, PP igual a ponto pequeno, PB igual a ponto com diâmetro aceitável e PR igual a ponto com expulsão de material fundido.

Conforme já explanado anteriormente, a tabela foi organizada em função do tempo (ms) e da corrente (kA).

As células coloridas de vermelho remetem ao ponto de solda que foi considerado como o primeiro aceitável para baixas faixas de corrente e os pontos de solda que sofreram expulsão de material fundido.

E as células coloridas de verde delimitam a área interna da janela operacional, ou seja, determinam as curvas de contornos permitidas para obtenção de um ponto de solda aceitável dentro da norma, isto já considerando a os 200 A para obtenção da área interna ideal.

Tabela 4. 4 Tabela de aquisição de dados de soldagem nos ensaios

Tabela de aquisição de Dados (400 kgf)																			
t(ms)	100			t(ms)	150			t(ms)	200			t(ms)	250			t(ms)	300		
I(kA)	PP	PB	PR	I(kA)	PP	PB	PR	I(kA)	PP	PB	PR	I(kA)	PP	PB	PR	I(kA)	PP	PB	PR
5,6	x			5,1	x			4,6	x			4,4	x			4	x		
5,7	x			5,2	x			4,7	x			4,5	x			4,1	x		
5,8		x		5,3		x		4,8		x		4,6		x		4,2		x	
5,9		x		5,4		x		4,9		x		4,7		x		4,3		x	
6		x		5,5		x		5		x		4,8		x		4,4		x	
6,1		x		5,6		x		5,1		x		4,9		x		4,5		x	
6,2		x		5,7		x		5,2		x		5		x		4,6		x	
6,3		x		5,8		x		5,3		x		5,1		x		4,7		x	
6,4		x		5,9		x		5,4		x		5,2		x		4,8		x	
6,5		x		6		x		5,5		x		5,3		x		4,9		x	
6,6		x		6,1		x		5,6		x		5,4		x		5		x	
6,7		x		6,2		x		5,7		x		5,5		x		5,1		x	
6,8		x		6,3		x		5,8		x		5,6		x		5,2		x	
6,9		x		6,4		x		5,9		x		5,7		x		5,3		x	
7		x		6,5		x		6		x		5,8		x		5,4		x	
7,1		x		6,6		x		6,1		x		5,9		x		5,5		x	
7,2		x		6,7		x		6,2		x		6		x		5,6		x	
7,3		x		6,8		x		6,3		x		6,1		x		5,7		x	
7,4		x		6,9		x		6,4		x		6,2		x		5,8		x	
7,5		x		7		x		6,5		x		6,3		x		5,9		x	
7,6		x		7,1		x		6,6		x		6,4		x		6		x	
7,7		x		7,2		x		6,7		x		6,5		x		6,1		x	
7,8		x		7,3		x		6,8		x		6,6		x		6,2		x	
7,9		x		7,4		x		6,9		x		6,7		x		6,3		x	
8		x		7,5		x		7		x		6,8		x		6,4		x	
8,1		x		7,6		x		7,1		x		6,9		x		6,5		x	
8,2		x		7,7		x		7,2		x		7		x		6,6		x	
8,3		x		7,8		x		7,3		x		7,1		x		6,7			x
8,4		x		7,9		x		7,4		x		7,2		x					
8,5		x		8		x		7,5		x		7,3		x					
8,6		x		8,1		x		7,6		x		7,4		x					
8,7		x		8,2		x		7,7		x		7,5		x					
8,8		x		8,3		x		7,8		x		7,6			x				
8,9		x		8,4		x		7,9		x									
9		x		8,5		x		8		x									
9,1		x		8,6		x		8,1		x									
9,2		x		8,7		x		8,2			x								
9,3		x		8,8			x												
9,4			x																

PP: Ponto pequeno; PB: Ponto com diâmetro aceitável; PR: Ponto com expulsão de material fundido

4.2.2 Determinação do ponto ótimo de trabalho para a janela operacional:

Após ter sido determinada a janela operacional, o próximo passo foi encontrar o ponto ótimo de trabalho, com os parâmetros iniciais ideais para ter a maior vida útil do eletrodo e também o maior grau de liberdade de parametrização, afim de atender a norma durante todo o período de desgaste do eletrodo, pois como é sabido, quanto maior o desgaste do eletrodo maior fica o diâmetro do eletrodo o que reduz a densidade de corrente de solda e consequentemente reduz o diâmetro do ponto. Por todos esses motivos, o ponto escolhido na figura 4.9 é ao extremo direito e ao centro da área.

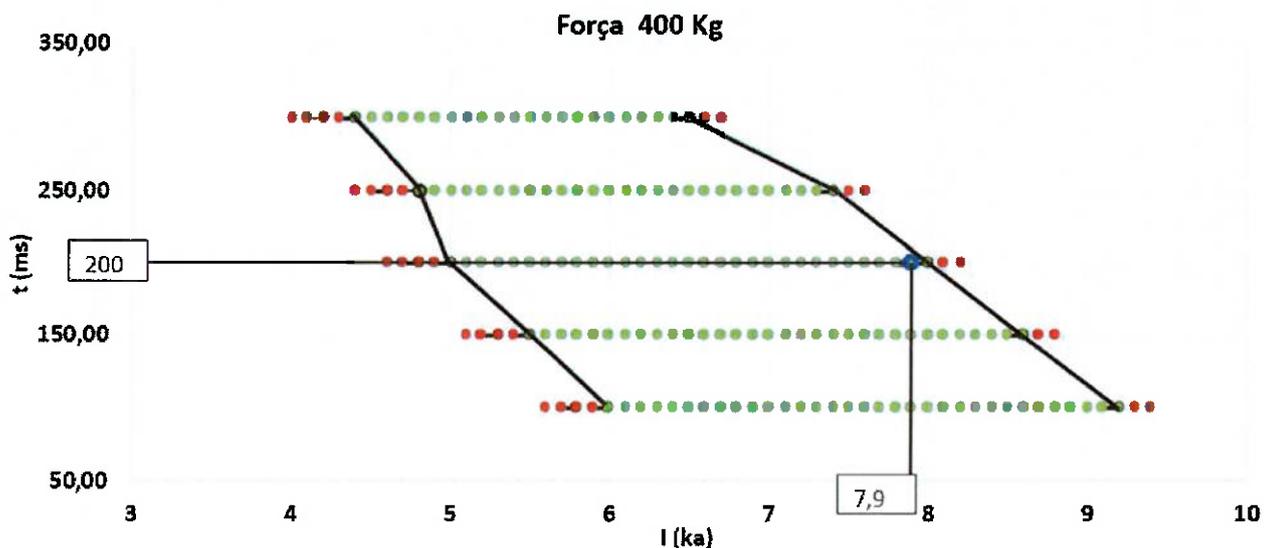


Figura 4. 9 Parâmetro ideal de soldagem para ter um maior grau de liberdade possível.

4.2.3 Equipamentos de calibração e monitoramento utilizados durante os experimentos

Para a determinação/verificação da corrente de soldagem e força aplicada pelo o equipamento de soldagem, foi utilizado o "Weld Tester" conforme figura 4.10.



Figura 4. 10 Weld Tester MYACHI - Modelo MM-360 A (medidor de força e corrente de soldagem)

4.2.4 Equipamento tração

Para a verificação da força de tração que os corpos de prova são resistentes foi utilizado o equipamento EMIC DL 60000, com capacidade de até 60.000 kgf (600 kN), do tipo bifuso autoportante, com duas colunas guias cilíndricas paralelas e faixa de velocidades de 0,01 a 300 mm/min conforme figura 4.11.



Figura 4. 11 Máquina Universal de Ensaio, eletromecânica e microprocessada EMIC modelo DL60000.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1 Janela Operacional 180 kgf.

Para os ensaios com força aplicada de 180 kgf, foi notória uma expulsão de material fundido em todos os pontos aplicados, contudo para validarmos os parâmetros de ponto pequeno e ponto com expulsão e assim delimitarmos os limites das curvas da janela operacional foi considerado empiricamente o volume de expulsão versus a indentação. Assim quando a indentação e a expulsão se denotavam extremas, era considerado ponto ruim.

A tabela 5.1 mostra os parâmetros utilizados para traçar a janela operacional de 180 kgf.

Tabela 5. 1 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para 180 kgf

	I (kA)	t (ms)
180 kg	6,50	100,00
	5,80	150,00
	5,20	200,00
	4,90	250,00
	4,50	300,00
	10,00	100,00
	9,20	150,00
	8,70	200,00
	8,20	250,00
	8,00	300,00

Quando os parâmetros da tabela 5.1 foram inseridos no gráfico para 180 kgf, pode-se notar uma curva dentro do padrão normal para uma janela operacional, como pode ser visto na figura 5.1.



Figura 5. 1 Gráfico de janela operacional para 180 kgf

Na figura 5.1 é possível verificar para essa janela operacional uma grande ocorrência de expulsão de material em virtude da falta de força aplicada na soldagem que causa uma área de contato instável na interface das chapas.

5.2. Janela Operacional 280 kgf.

A tabela 5.2 elenca os parâmetros utilizados para traçar a janela operacional de 280 kgf.

Para os ensaios com força aplicada de 280 kgf, continuou notória a expulsão de material fundido, contudo em menor volume, e também decrescente ao aumentar do tempo.

Tabela 5. 2 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para 280 kgf

	I (kA)	t (ms)
280 kg	7,00	100,00
	6,80	150,00
	6,50	200,00
	6,00	250,00
	5,70	300,00
	10,00	100,00
	9,70	150,00
	9,50	200,00
	9,20	250,00
	9,00	300,00

A figura 5.2 mostra um deslocamento da área da janela operacional para direita em relação ao gráfico de 180kgf, em virtude da instabilidade da área de contato,



Figura 5. 2 Gráfico de janela operacional para 280 kgf

o que mesmo com o acréscimo de 100kgf em relação ao anterior, fica caracterizado então a força aplicada ainda é diminuta.

5.3 Janela Operacional 345 kgf.

A tabela 5.3, lista os parâmetros utilizados para traçar a janela operacional de 345 kgf.

Tabela 5. 3 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para 345 kgf

	I (kA)	t(ms)
345 kg	6,20	100,00
	5,80	150,00
	5,50	200,00
	5,10	250,00
	4,50	300,00
	9,00	100,00
	8,60	150,00
	8,00	200,00
	7,30	250,00
	6,80	300,00

No processo de soldagem com força aplicada de 345 kgf, a expulsão de material fundido deu sinal de redução. Denota-se que o aumento da força aplicada influenciou na redução de material expulso.

Na figura 5.3 pode ser verificado o gráfico para a força de 345 kgf, e é evidenciado que a área da janela operacional se deslocou para a esquerda do gráfico quando comparado com os gráficos de 180 e 280kgf.

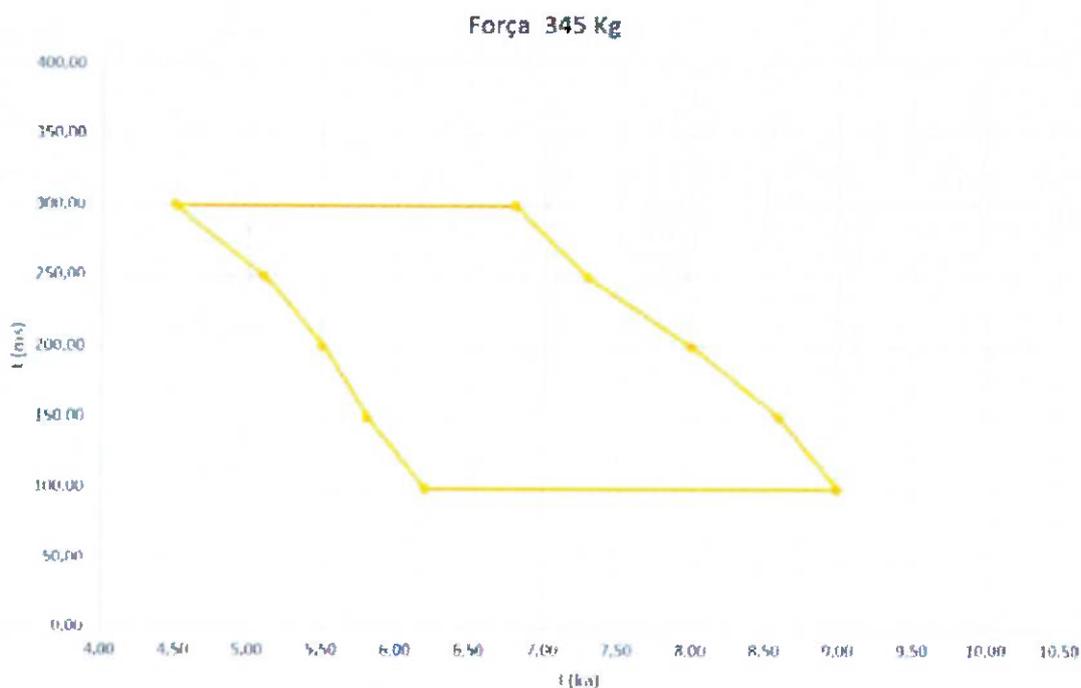


Figura 5. 3 Gráfico de janela operacional para 345 kgf

Este fato se justifica em razão da força de soldagem ter sido aumentada e o que proporciona melhor contato entre as chapas na interface de solda, contudo ainda foi observado a expulsão de material fundido.

5.4 Janela Operacional 400 kgf.

Para a aplicação de 400 kgf, foram organizados os parâmetros que delimitam a curva de soldabilidade na tabela 5.4, mantendo se o padrão de tempos variando entre 100, 200 e 300 ms. E a corrente subindo gradualmente desde 4 kA até 10 kA em uma taxa de 100 A.

Tabela 5. 4 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para 400 kgf

	I (kA)	t(ms)
400 kg	6,00	100,00
	5,50	150,00
	5,00	200,00
	4,80	250,00
	4,40	300,00
	9,20	100,00
	8,60	150,00
	8,00	200,00
	7,40	250,00
	6,50	300,00

Na figura 5.4 o gráfico explora a área da janela operacional obtida com a aplicação de força de 400 kgf. Durante a soldagem com força de 400 kgf, a expulsão de material fundido era mais frequente com tempos maiores e correntes menores, o que aumenta o fluxo de calor e conseqüentemente aumenta o volume de material fundido expulso.

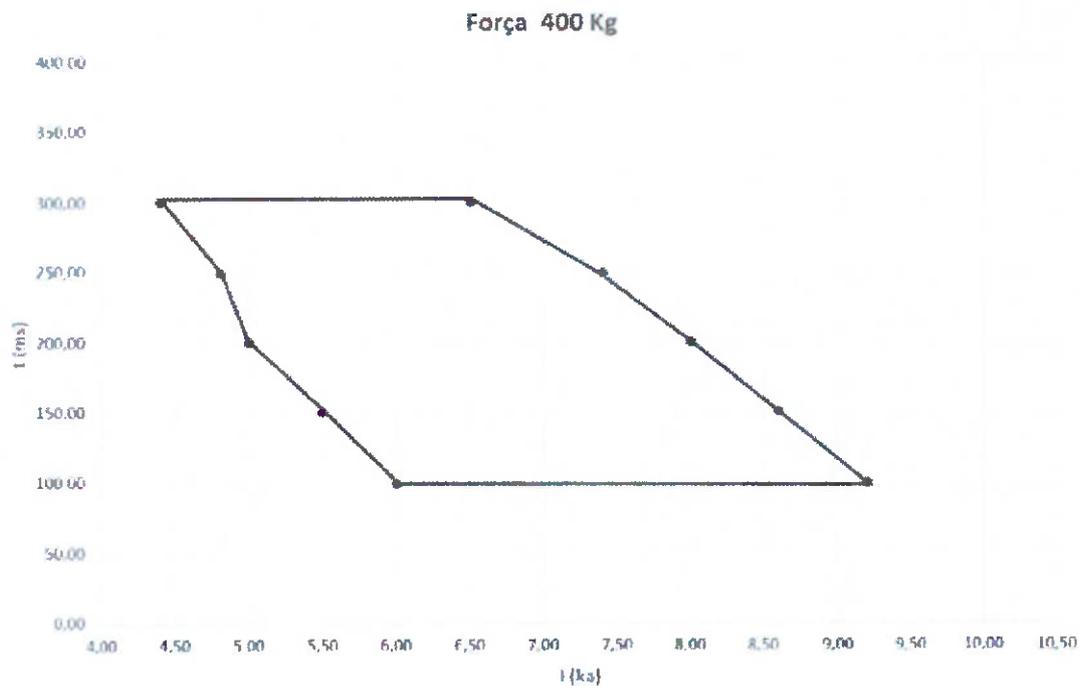


Figura 5. 4 Gráfico de janela operacional para 400 kgf

Pode ser observado então que o aumento da força na soldagem do aço “PHS” promove uma influência de forma positiva do ponto de solda, isto porque reduz o volume de material expulso.

Na figura 5.5 é possível verificar o processo de formação de ponto de solda quando a força aplicada é insuficiente para prover um bom assentamento

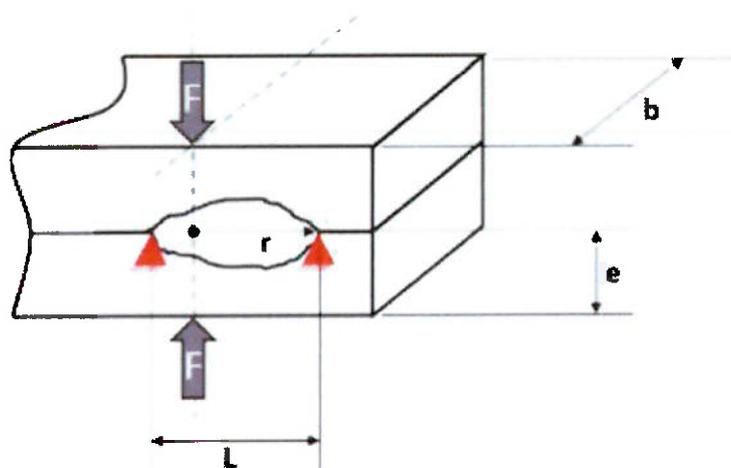


Figura 5. 5 Diagrama com a representação esquemática do ponto assimétrico

das chapas na interface que irá sofrer a fusão, o que conseqüentemente gera um ponto de solda com fusão assimétrica, o que determina a expulsão do metal líquido.

No item 5.6 terá uma explanação mais detalhada sobre o significado de cada variável aplicada mostrada na figura 5.11.

5.5 Sobreposições das Janelas Operacionais.

Com a sobreposição das janelas operacionais é possível visualizar uma área comum entre as quatro janelas como pode ser visto na figura 5.6.

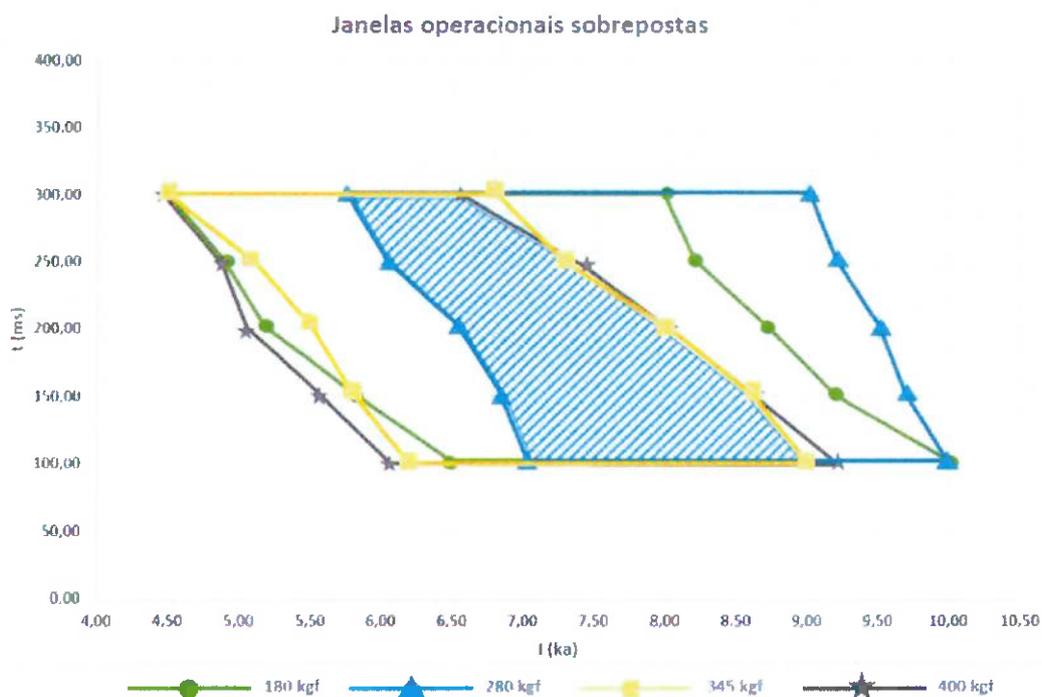


Figura 5. 6 Gráficos de janela operacional sobrepostos

Esta área comum pode ser entendida como um campo teórico que com quaisquer parâmetros de tempo, corrente e forças entre 180 kgf à 400kgf inscritos na área destacada com a hachura, o ponto de solda teria uma qualidade satisfatória.

Gera-se então a tabela 5.5 de dados com os parâmetros limites da janela operacional ideal encontrada.

Tabela 5. 5 Parâmetros delimitadores de soldabilidade para a força de 180 à 400 kgf

	I (kA)	t(ms)
De 180 à 400 kg	7,00	100,00
	6,80	150,00
	6,50	200,00
	6,00	250,00
	5,70	300,00
	9,00	100,00
	8,60	150,00
	8,00	200,00
	7,30	250,00
	6,50	300,00

Porém devido a força entre os eletrodos não chegarem a força ideal, conforme demonstrado no item 5.6 o processo não será estável, devido a instabilidade na área de contato na interface de solda das chapas, logo não deve-se adotar esta área como janela operacional para o processo de soldagem do PHS.

5.6 Determinação da força exigida na soldagem do PHS

Para a determinação da força exigida na soldagem foi adotado como princípio de cálculo a equação 5, respeitando a explanação do capítulo 3.

Sendo assim pode-se então desenvolver o cálculo para a força exigida pelo aço PHS e como comparação é possível calcular também a força exigida para aços comumente utilizados na indústria automotiva.

Na figura 5.7 há um diagrama com a representação esquemática da região de solda na qual a força de soldagem atua, fazendo uma analogia com uma viga bi apoiada.

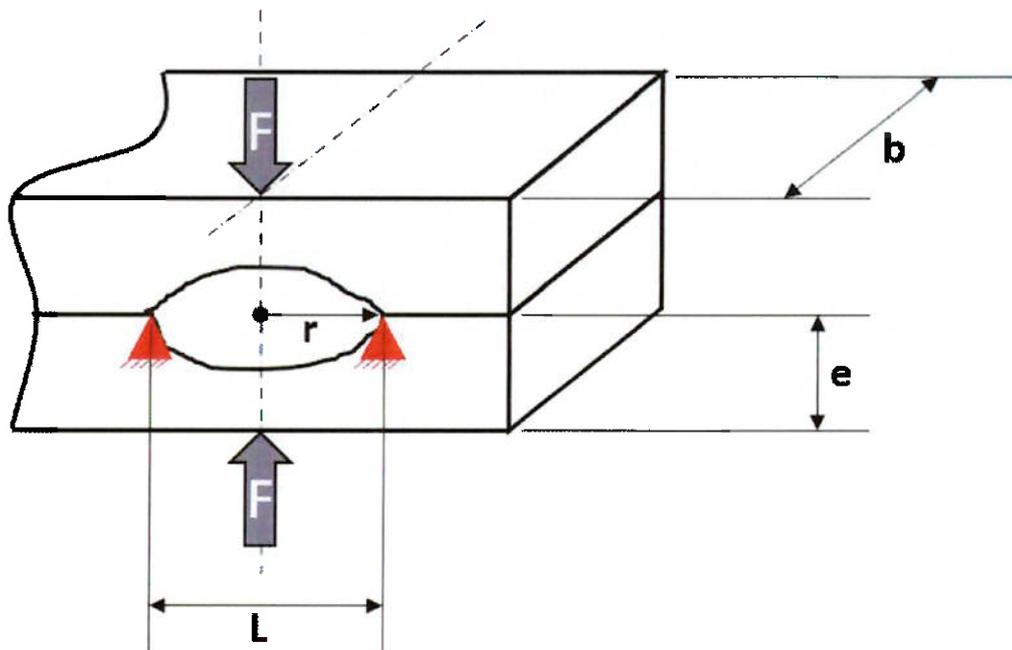


Figura 5. 7 Diagrama com a representação esquemática da região de solda na qual a força de soldagem atua

Aonde:

- F= força (kgf)
- b = Diâmetro de contato do eletrodo (mm)
- e = Espessura da chapa (mm)
- L = Diâmetro de contato do eletrodo (mm)
- r = Raio de contato na interface de soldagem (mm)

Admitindo que durante a soldagem a chapa estará sujeita a duas forças, conforme a equação 7;

$$F_{total} = F_{compressão} + F_{flexão} \quad (7)$$

- Força de compressão: que é a força responsável por melhorar o contato entre as chapas comprimindo os picos e vales encontrados na rugosidade superficial da chapa.

- Força de flexão: que é a força responsável pela flecha encontrada no centro do ponto de solda durante a soldagem, admitindo que os extremos do raio de contato "r" tem a função de apoio quando aplicado conceito de viga bi apoiada.

Decompondo as forças da equação 7, obtém-se duas fórmulas;

$$F_{flexão} = \frac{\sigma_{esc} \times b \times e^2}{L \times 0,75} \quad (8)$$

$$F_{compressão} = \sigma_{esc} \times A \quad (9)$$

Aonde: σ_{esc} = Tensão de escoamento (kgf/mm²)
 b = Diâmetro de contato do eletrodo (mm)
 e = Espessura da chapa (mm)
 L = Diâmetro de contato do eletrodo (mm)
 A = Área (mm²)

Portanto, associando as formulas 8 e 9 na formula inicial 7, é possível formular a força de soldagem exigida para cada par de chapas a serem soldadas e eletrodo utilizado, conforme demonstrado na equação 11;

$$F_{total} = \frac{\sigma_{esc} \times b \times e^2}{L \times 0,75} + \sigma_{esc} \times A$$

$$F_{total} = \sigma_{esc} \left[\left(\frac{e^2}{0,75} \right) + (\pi \times r^2) \right] \quad (11)$$

Após a dedução da equação é possível então substituir as incógnitas por valores conhecidos nos ensaios efetuados e conseqüentemente encontrar a força exigida para a soldagem do PHS ensaiado. Aonde o eletrodo utilizado tem diâmetro da face de contato de 5mm, portanto raio $r=2,5\text{mm}$ e tensão de escoamento de 110Kgf/mm^2 e espessura de $1,18\text{mm}$ conforme equação 12;

$$F_{total} = 110 \left[\left(\frac{1,18^2}{0,75} \right) + (\pi \times 2,5^2) \right] \quad (12)$$

$$\therefore F_{total} \cong 2370 \text{ kgf}$$

Sabendo que a maior força aplicada nos ensaios era de 400 Kgf, e verificando que a força exigida por cálculo é de aproximadamente seis vezes maior (2370 Kgf), é possível correlacionar a expulsão constante de material fundido a baixa força de soldagem aplicada.

Quando o eletrodo não aplica força o suficiente para vencer a tensão de escoamento da chapa, é esperado que não seja possível garantir o melhor contato na interface de solda o que promove poros na solda e principalmente a expulsão de material líquido.

5.7 Validação da equação da força exigida na soldagem do PHS

Como validação da equação que determina a força exigida para a soldagem é proposto efetuar o cálculo para uma chapa de aço comumente utilizada na indústria automotiva e assim verificar a veracidade do resultado obtido na equação com comparação ao valor utilizado de forma empírica em uma linha de produção automotiva.

Sendo assim, para um eletrodo de diâmetro da face de contato de 5 mm, portanto raio $r=2,5$ mm e tensão de escoamento material igual a 18 kgf/mm^2 e espessura de 1,18 mm conforme e aplicando estes valores na equação 12;

$$F_{total} = 18 \left[\left(\frac{1,18^2}{0,75} \right) + (\pi \times 2,5^2) \right] \quad (12)$$

$$\therefore F_{total} \cong 386 \text{ kgf}$$

Então para uma chapa de aço com tensão de escoamento de 18 kgf/mm^2 e 1,18mm de espessura o seria necessário um equipamento de soldagem com força de 386 kgf, o que é considerado um equipamento usual segundo normas empíricas na indústria automotiva, logo validando a equação de força total exigida.

Tendo sido validada a equação que determina a força a ser utilizada na soldagem, é possível efetuar uma variação no diâmetro da face de contato do eletrodo e assim estudar a influência que o eletrodo causa na força exigida.

Portanto, reduzindo o diâmetro de contato de 5 mm para 3 mm, o que significa reduzir a área para 36% da área inicial, considerando o material sendo o PHS com tensão de escoamento igual a 110 kgf/mm^2 , espessura da chapa de 1,18 mm, e por fim aplicando estes valores na equação 12, obtêm-se:

$$F_{total} = 110 \left[\left(\frac{1,18^2}{0,75} \right) + (\pi \times 1,5^2) \right] \quad (12)$$

$$\therefore F_{total} \cong 981 \text{ kgf}$$

É possível então identificar que a força exigida para soldagem seria de 981 kgf o que reduz a força para 41% da força inicialmente calculada que era 2370 kgf.

Nota-se então que a área de contato do eletrodo é uma variável de grande influência na força exigida para a soldagem, isto porque, se a força de soldagem for insuficiente para garantir um contato constante e uniforme na interface das chapas, irá formar um ponto de solda assimétrico em relação a linha de centro

Com os ensaios de tração efetuados foi possível compilar os dados correlacionando a força necessária para rompimento do corpo de prova em função dos tempos de soldagem.

Tabela 5. 6 Dados correlacionando a força necessária para rompimento do corpo de prova e tempos de soldagem.

Força de soldagem (kgf)	Força máxima na tração (Kgf)	tempo de soldagem (ms)
180	1123	100
	1635	200
	1501	300
280	1130	100
	1224	200
	1371	300
345	1457	100
	1358	200
	1086	300
400	1220	100
	1325	200
	1308	300

Após a compilação de dados foi feito um gráfico de força de tração versus tempo de soldagem para poder comparar e as curvas para cada força de soldagem, então na figura 5.14 é possível verificar que de modo geral a força de resistência a tração aumenta quando se aumenta o tempo de soldagem e a força de soldagem, com exceção para a força de soldagem de 345 kgf que se comporta de forma descendente.

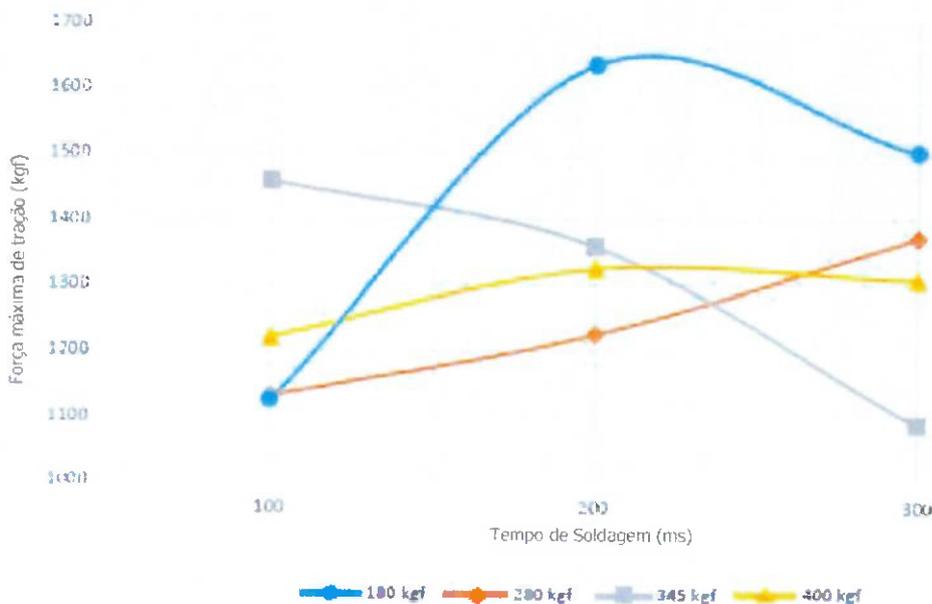


Figura 5. 14 Gráfico de força de ruptura a tração versus tempo de soldagem.

Seguindo com a análise da figura 5.19, pode se observar que para a força de 400 kgf a curva inicia uma estabilidade, isto se explica devido a maior força entre os eletrodos o que aumenta a probabilidade de obter-se um contato mais constante entre as chapas na interface de solda, consequentemente um ponto de solda mais estável dimensionamento.

5.9 Macrografias e Micrografia dos pontos de solda obtidos nos ensaios

Como já relatado anteriormente, durante o ensaio foi identificado a expulsão de material fundido em todos os pontos de solda, isto é evidenciado nas macrografias e micrografias apresentadas a seguir, também é possível verificar vários poros na solda independentemente da força de solda aplicada nos ensaios.

Nas figuras de 5.15 e 5.16 é possível observar os poros encontrados na solda e também resquícios de expulsão de material fundido com 180Kgf de força aplicada pelo equipamento de soldagem.

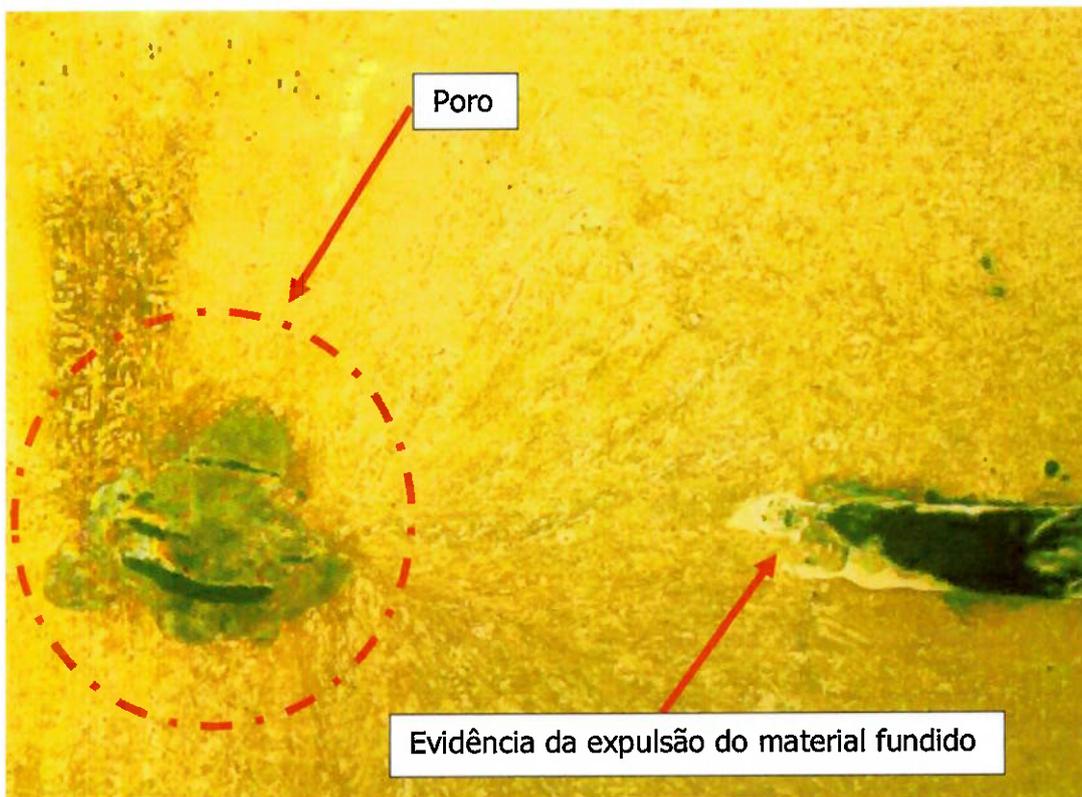


Figura 5. 15 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 200x.

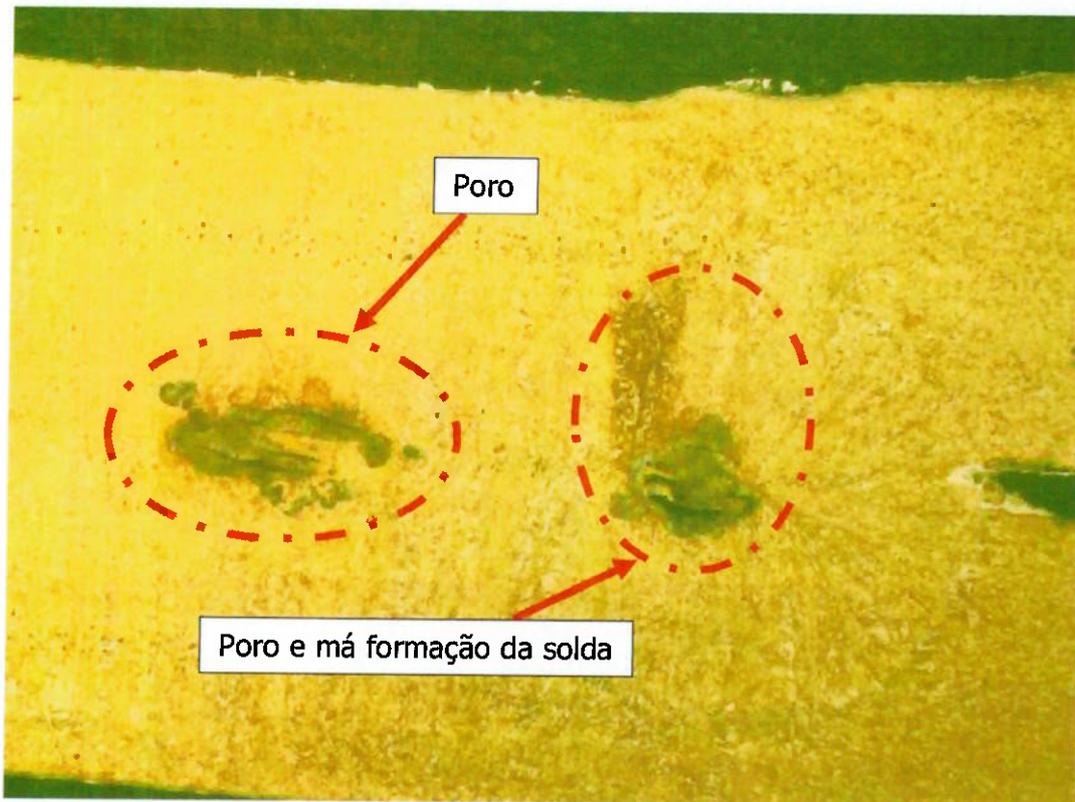


Figura 5. 16 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 50x.

Na soldagem com 280 Kgf também é possível observar a expulsão do material fundido, figuras 5.17 e 5.18.

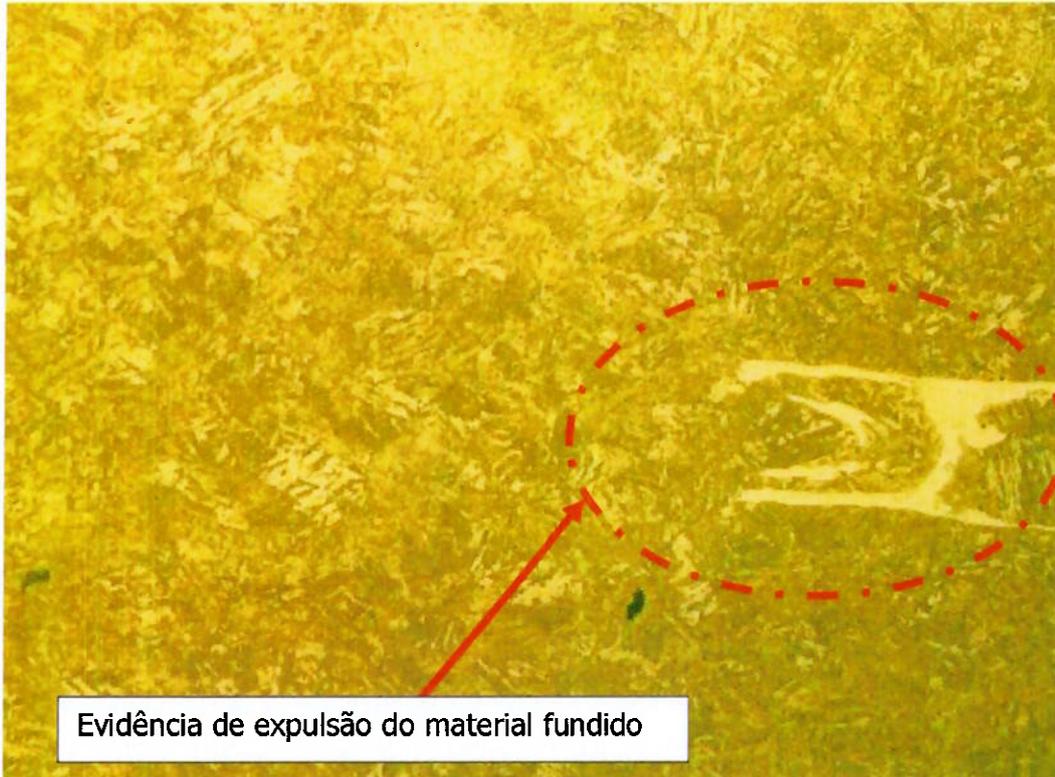


Figura 5. 17 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 200x.

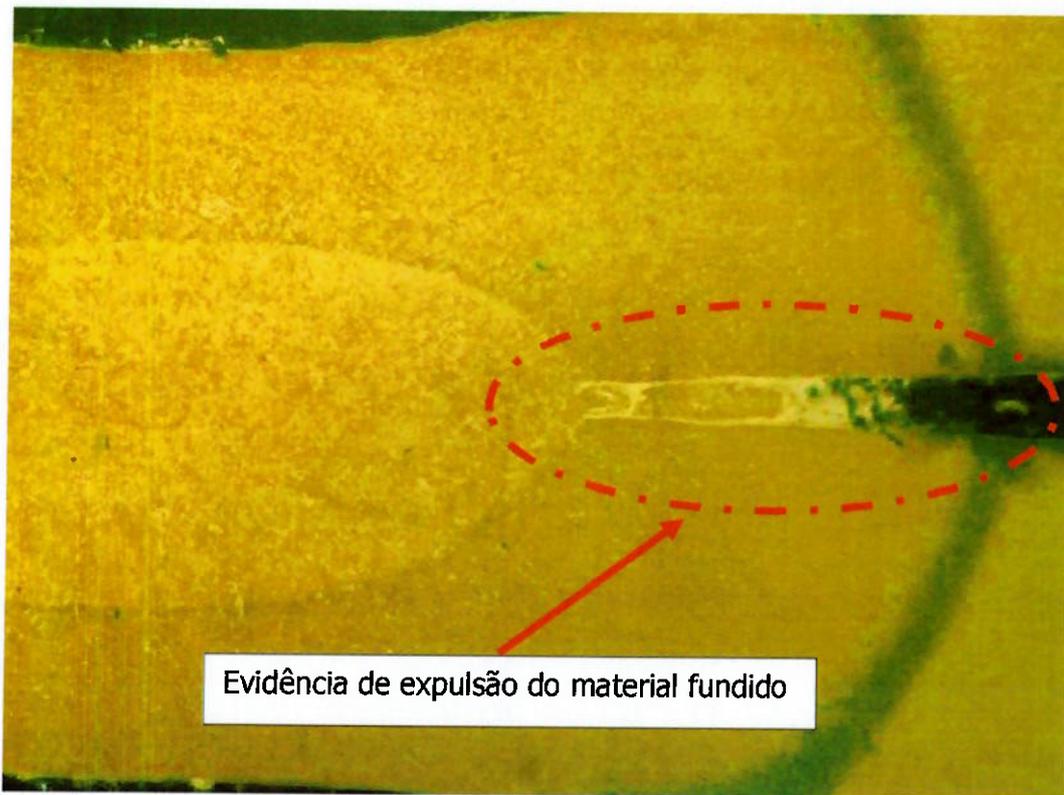


Figura 5. 18 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 50x.

Na soldagem com 345 Kgf a incidência de poros e defeitos na solda é menor, contudo isto pode ser um resultado pontual, figuras 5.19 e 5.20.

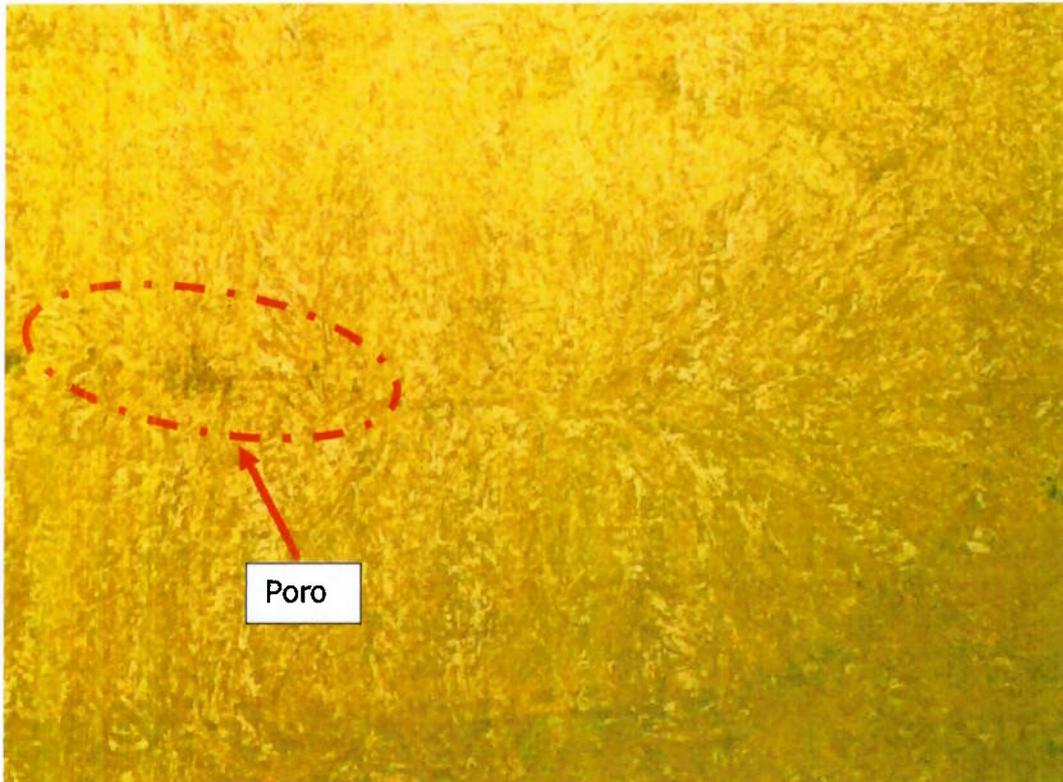


Figura 5. 19 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 100x.

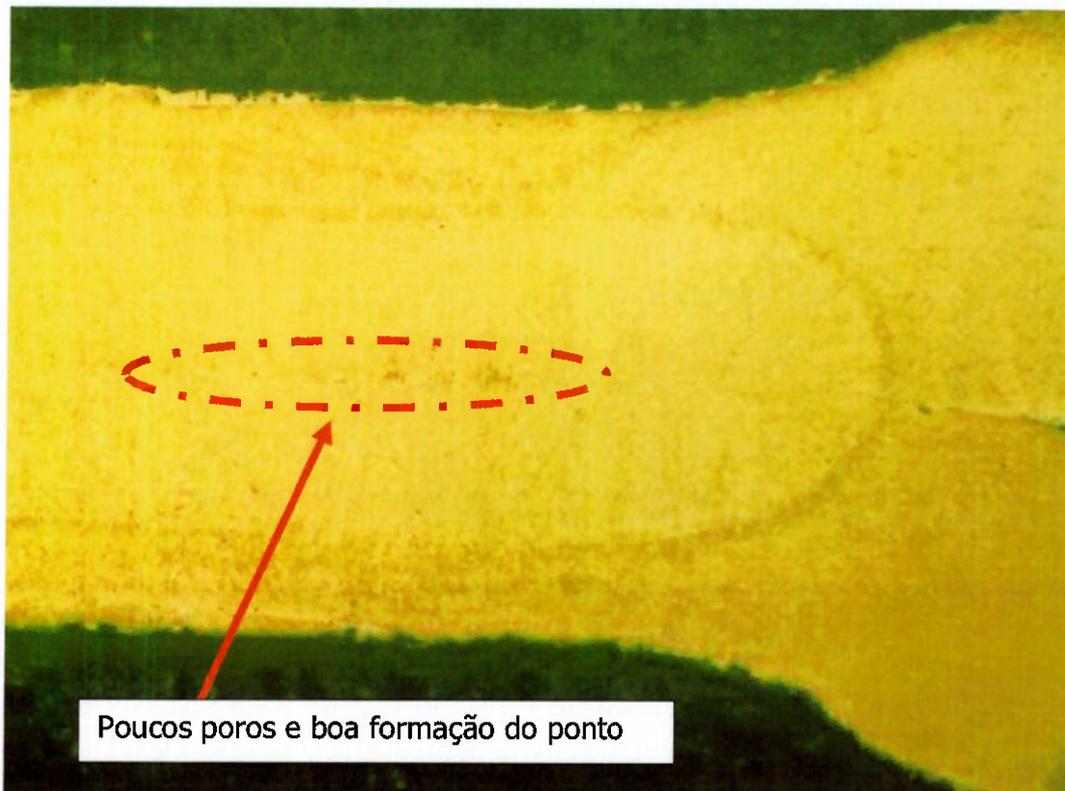


Figura 5. 20 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 50x.

E na soldagem com 400 Kgf a formação do ponto começa a estabilizar com uniformidade notória da região soldada, contudo ainda é possível identificar sinais de fluidez de material fundido, trincas e poros, figuras 5.21 até 5.23.

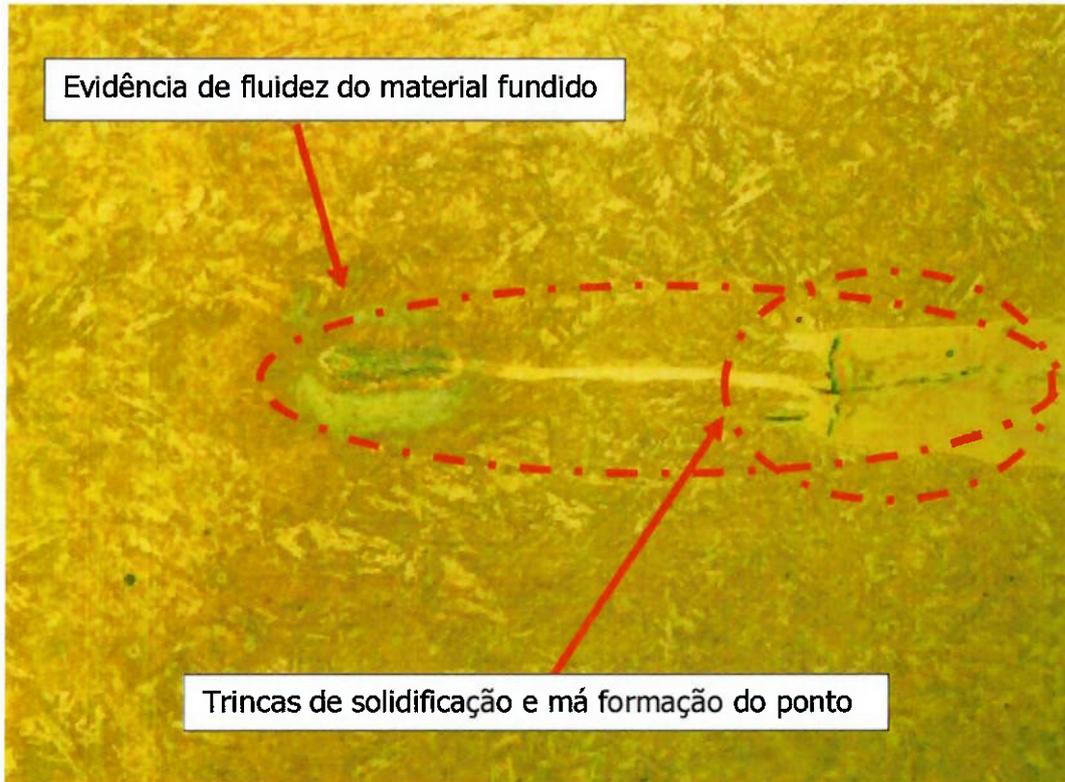


Figura 5. 21 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 200x.

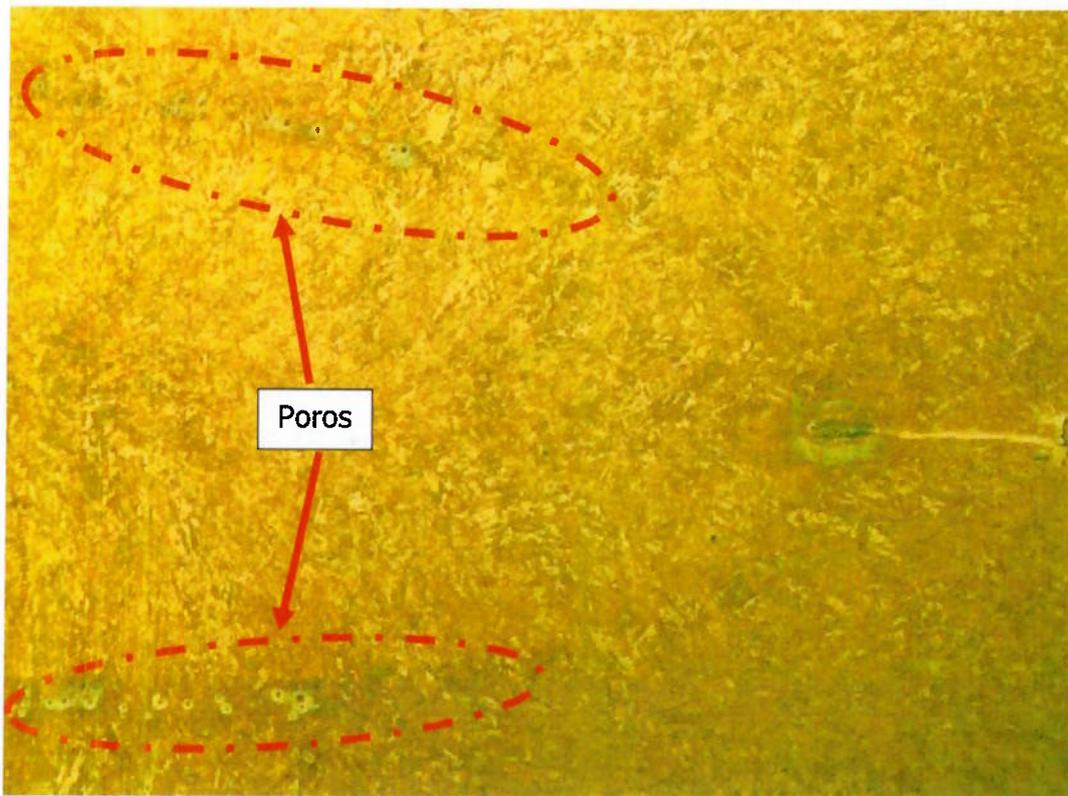


Figura 5. 22 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 100x.

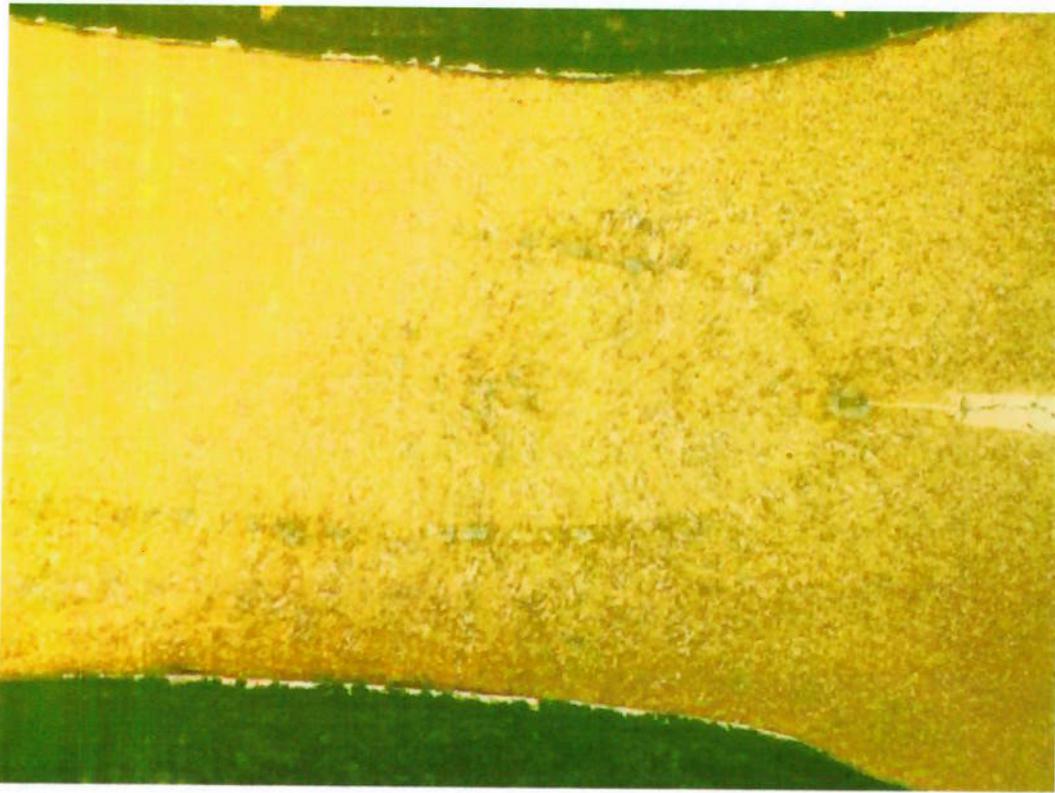


Figura 5. 23 Foto Micrográfica da região fundida da solda com aumento de 50x.

6. CONCLUSÕES.

Com base nos materiais e métodos utilizados, experimentos realizados e nos resultados obtidos, é possível concluir que:

1 – A força de soldagem para o PHS é uma variável fundamental, devido a exigência assentamento pleno na interface de solda das chapas, e a necessidade da formação simétrica do ponto de solda, garantindo que se obtenha o metal no estado líquido do centro do ponto para as periferias;

2 – A equação que foi desenvolvida neste trabalho, envolvendo, tensão de escoamento, espessura do material e área de contato do eletrodo, é válida para encontrar a força exigida para o processo de soldagem a ponto para qualquer aço carbono inclusive o PHS.

3 – Utilizando a equação desenvolvida neste trabalho é possível concluir também que quanto menor o raio da área de contato do eletrodo menor será a força necessária para a soldagem, isto conseqüentemente permite uma vantagem monetária, tendo em vista que quanto menos força o equipamento tenha que produzir mais barato ele se torna, sendo a recíproca verdadeira.

4 – Os testes de tração apresentaram uma instabilidade das forças de ruptura à tração, devido à falta de força no processo de soldagem, apesar da grande quantidade de expulsão de material e poros isto não influenciou de forma negativa a resistência mecânica a tração do ponto de solda pois todos foram aprovados conforme norma . É possível ainda verificar que com 400 kgf iniciou-se uma estabilidade Assentamento ideal das chapas . 400 iniciou o processo de estabilidade,

Sugestões De Trabalhos Futuros.

- 1- Estudar a influência do perfil de eletrodo para a soldagem de aços de alta resistência.
- 2- Estudar a relação da profundidade de indentação e resistência do material.
- 3- Estudar o comportamento da resistência dinâmica na soldagem da chapa de PHS.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 2011. 494 p.
2. MYACHI UNITEK, Folder resistance welding, Fundamentals of Small Parts Resistance Welding. Disponível em <http://br.miyachiamerica.com/educationalresources/fundamentals>. Acesso em 10 Jun. 2014
3. NACIMENTO, VINICIUS CASTANHEIRA DO, 1978. Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseado na medição da resistência elétrica entre chapas, 2008. 130p.
4. CHO, Y.; LI, W.; HU, S. J. WELDING RESEARCH, American Welding Society, Supplement to the Welding Journal – Design of Experiment Analysis and Weld Lobe Estimation for Aluminum Resistance Spot Welding, MARCH 2006. p. 45-s – 51-s
5. M.J. KARAGOULIS, D.R. SIGLER. GM Research and Development. Aluminum Resistance Spot Welding. 2013. 15p.
6. ZHANG, H.; SENKARA, J. Resistance Welding: Fundamentals and Applications. Florida: CRC Press Taylor & Francis Group. 2006. 439p.
7. CHOS, Y.; RHEE, S. WELDING RESEARCH, American Welding Society, Supplement to the Welding Journal – Experimental Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding, AUGUST 2003. p. 195-s – 201-s.
8. XU, L.; KHAN, J. A. WELDING RESEARCH, American Welding Society, Supplement to the Welding Journal – Nugget Growth Model For Aluminum Alloys during Resistance Spot Welding, NOVEMBER 1999. p. 367-s – 372-s
9. CHANG, H. S.; CHO, H. S. WELDING RESEARCH, American Welding Society, Supplement to the Welding Journal – A Study on the Shunt Effect in resistance Spot Welding, AUGUST 1990. p. 308-s – 318-s
10. METALÚRGICA MARIMAX. Apostila de soldagem. Disponível em: <http://www.marimax.com.br/> . Acesso 15 Maio 2014
11. BATISTA, MARCIO. Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por

- resistência – Dissertação de mestrado – São Paulo – Escola Politécnica da USP – 2011.
12. THE ALUMINIUM AUTOMOTIVE MANUAL – Apostila de soldagem a ponto por resistência. Disponível em <http://www.alueurope.eu/publications-automotive/> . Acesso 13 Ago. 2014.
 13. MASSAROTI, VICENTE M; MOREIRA, LUCAS PLADEVALL; MOREIRA, LUCAS PLADEVALL; FURLANETTO, VALDIR; BATALHA, GILMAR FERREIRA. Monitoração do desgaste de capas de eletrodo para processos de soldagem a ponto em condições industriais – Artigo, Escola Politécnica da USP – 2009.
 14. SAMPAIO, DANIEL J. B. S – Dissertação de doutorado, Escola Politécnica da USP – Automação do monitoramento da qualidade do processo de solda a ponto resistiva – São Paulo, 2010.
 15. RECOMMENDED PRACTICES FOR AUTOMOTIVE WELD QUALITY— RESISTANCE SPOT WELDING. American Welding Society D8.7m:2005
 16. ROSSI, GILVAN P. – Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP – Estudo da correlação do comportamento de pontos de solda em corpos de prova pelo método dos elementos finitos – São Paulo, 2007.
 17. OLYMPUS – Application Notes, Spot Weld Testing. Disponível em <http://www.olympus-ims.com/en/applications/spot-weld-testing/>. Acesso 17 Nov. 2014.
 18. CHAO, Y. J, Science and technology of welding and joining – Failure mode of spot welds: interfacial versus pullout, 2003
 19. QUALITY BY VISION – Welding Analyzer – ensure your welds are spot on. Disponível em <http://www.gbyv.com/>. Acesso 17 Nov. 2014.
 20. GOULG, J. E. WELDING RESEARCH, American Welding Society, Supplement to the Welding Journal – An examination of nugget development during spot welding, using both experimental and analytical techniques, JANUARY 1987. p. 1-s – 11-s.
 21. JIYOUNG, YU; JUNGHYUN, SHIM; SEHUN, RHEE. EXPRESS REGULAR ARTICLE, Characteristics of resistance spot welding for 1 GPa grade twin induced plasticity steel. MATERIALS TRANSACTIONS VOL 53 No11, The Japan Institute of Metals – 2012.

22. EAGAR, T. W.; GEDEON, S. A. METALLURGICAL TRANSACTIONS B, Resistance spot welding of galvanized steel: Part I. Material validations and process modifications. Volume 17B, DECEMBER – 1986
23. EAGAR, T. W.; GEDEON, S. A. METALLURGICAL TRANSACTIONS B, Resistance spot welding of galvanized steel: Part II. Mechanisms of spot weld nugget formation. Volume 17B, DECEMBER – 1986
24. ARCELOR MITTAL, DATA SHEET – Steels for hot stamping. Disponível em <http://www.arcelormittal.com/automotive>. Acesso 07 Abr. 2014.
25. RATTE, EVELIN. UNITED STATES PATENT APPLICATION PUBLICATION, Pub No.:US2012/0273092 A1 - Method for manufacturing a hot press-hardened component, use of steel product for manufacturing a hot press-hardened component hot press-hardened component. Thyssenkrupp nirosta GMBH, Krefeld (DE)- Pub. Date: Nov. 1, 2012.
26. SMITH, SIMON DUVAL. AUTOMOTIVE MANUFACTURING SOLUTIONS. Article – Light steel in motion – Disponível em <http://www.automotivemanufacturingsolutions.com/process-materials/light-steel-in-motion>. Acesso 07 Abr. 2014
27. VOESTALPINE STEEL DIVISION: Folder phs-ultraform® The press-hardening steel benchmark. Properties and Selection: Iron Steels and High Performance Alloys. Metals Handbook, Vol 6. American Society of Metals. 10^o Ed., 1997. p. 1009 - 1102. Disponível em www.voestalpine.com/steel. Acesso 31 Mai.2013
28. KOLLECK, RALF. ARTICLE PRESS HARDENING PROCESS OF BORON STEEL SHEETS - AUTOMOTIVE MATERIALS - Auto Focus Asia – Professor, Tools & Forming, Graz Technical University Austria – 10 Jun. 2014
29. CHEN, CHIH-CHANG; ERICSON S. D.; PONKE, R. J.; PAVLOVICH, J. W. UNITED STATES PATENT APPLICATION PUBLICATION, Pub No.:US2009/0155615 A1 – Designed orientation for welded automotive structural components made of press hardened steel. GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS, INC., Detroit, MI (US)- Pub. Date: Jun. 18, 2009.
- KARBASIAN, H; TEKKAYA, A. E. JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY. Article: A review on hot stamping. Disponível em www.elsevier.com/locate/jmatprotec. Acesso 19 Jun. 2014.

30. CATALOGO THYSSENKRUPP STEEL. Hot press hardening manganese-boron steels MBW. Disponível em http://www.thyssenkrupp.com/documents/Publikationen/Techforum/techforum_1_2009_en.pdf. Acesso 07 Jun. 2014.
31. MUNIZ, JEAN CARLOS REIS. Influência da temperatura de austenitização na temperabilidade de um aço SAE1045. Plano de trabalho do aluno de iniciação científica. Instituto federal de educação, ciência e tecnologia – BAHIA, Salvador – 2008.
32. GRABOWSKI, THOMAS. GENERAL MOTORS COMPANY, GREAT DESIGNS IN STEEL 2013. 2014 Chevrolet Silverado/GMC Sierra body 1500 Cad structure Review. Disponível em <http://www.autosteel.org>. Acesso 07 Jun. 2014
33. AUSMANN, THOMAS. BENTELER AUTOMOTIVE. Hot stamp technologies. Detroit, Michigan, USA – 15 Sept. 2010.
34. WOLFF, MARCO ANTONIO; SILVA, RAMSÉS FERREIRA DA; VILARINHO, LOURIEL OLIVEIRA. Determinação dos Campos de Soldabilidade para o Aço Dual-Phase 600 em Equipamentos de Soldagem a Ponto AC e MFDC. Soldag. insp. São Paulo, Vol. 15, No. 3, p.200-208, Jul/Set 2010
35. EAGAR, T. W.; KIM, E. W. Massachusetts Institute of Technology. Parametric analysis of resistance spot welding lobe curve. SAE Technical Paper Series. International Congress and Exposition, Detroit, Michigan. February 29 – March 4, 1988.
36. CATALOGO ARO. Welding technologies group, Manual welding, Ergoline gun range. Disponível em <http://www.arotechnologies.com>. Acesso 25 Out. 2014.
37. GEDEON, S. A.; SORENSEN, C. D.; ULRICH, K. T.; EAGAR, T. W. Measurement of dynamic electrical and mechanical properties of resistance spot welds, displacement curves and dynamic resistance provide significant data for evaluating nugget quality. WRC Bulletin 322, April 1987.
38. BRANCO, HIDERALDO LUIZ OSÓRIO; OKIMOTO, PAULO CESAR. Análise do desgaste de capas de eletrodos de solda ponto e sua influência na qualidade da soldagem de chapas automotivas galvanizadas. Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 17, No 4, p.347-355, Out/Dez 2012.

39. STONE, CARL A.; IMES, ROBERT H.; MURPHY, PETER C.; THOMPSON, ROBERT D. UNITED STATES PATENT APPLICATION PUBLICATION, Pub No.:US3909581 – Disposable resistance welding electrode. P. R. Mallory & Co., Inc., Indianapolis, Ind- Pub. Date: Sept. 30, 1975.
40. DONASCI, FERNANDO. Reportagem UOL Economia. Principais etapas de fabricação de um carro. Disponível em http://economia.uol.com.br/album/110825_conheca_fabrica_carro_album.htm. Acesso 25 Out. 2014.
41. CATALOGO INTERMACHINERY. Eletrodos. Disponível em <http://intermachinery.com.br/eletrodos/>. Acesso 07 Jun. 2014.
42. AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS) STANDARDS - AWS D08.1, Welding in Auto Industry, AISI, 1981.