

HAROLDO AKIRA KAVAMURA

**APLICAÇÃO DE SOLDA LASER EM CARROCERIAS
AUTOMOTIVAS: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A SOLDA
LASER E A SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA**

São Paulo

2007

HAROLDO AKIRA KAVAMURA

**APLICAÇÃO DE SOLDA LASER EM CARROCERIAS
AUTOMOTIVAS: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A SOLDA
LASER E A SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA**

Trabalho de graduação apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador:
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

São Paulo
2007

DEDICATÓRIA

À minha família, amigos e a todos que se interessam pelo fascinante universo da Engenharia e do Automóvel. Espero que esse trabalho ajude de alguma forma a aperfeiçoar a Engenharia no Mundo, e principalmente no país que eu amo, o Brasil.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha pelo incentivo constante, dedicação e pelas diretrizes dadas, sem as quais o presente trabalho não seria possível.

Aos meus pais e meus irmãos, sem os quais nada disso seria possível.

À General Motors do Brasil Ltda, em especial a Valdir Cavinatti, Jorge Bernasi, Antônio Caputo, Roberto P. Ramos, Rita Binda e Luiz Carlos dos Santos. Sinceros agradecimentos também a José A. Castillo, Gilvan Rossi, Douglas Ruiz, Flavio Costa, Leandro Bertaglia , Ivam S. Ferreira, Marcelo Machado Mattos, Rubens Ribeiro, Dorivaldo Bisaió e Marcio Luiz Furlan pela ajuda, oportunidade e compreensão inestimáveis.

A Luciano de Souza, Mauricio Sanchez Moreno, Emerson José Teixeira, Josivânio José da Silva, Bertrand Langrand e Aurea Shinto pela inestimável ajuda e dedicação.

A todos que colaboraram no desenvolvimento e execução desse trabalho e que involuntariamente foram omitidos.

RESUMO

Este trabalho visa uma comparação entre os processos de solda laser e solda ponto por resistência elétrica, usados para montagens de componentes em carrocerias automotivas em uma indústria automotiva brasileira de nível mundial. A comparação foi conduzido através de uma avaliação da resistência mecânica utilizando-se métodos experimentais e numéricos. Na avaliação experimental utilizou-se um dispositivo de ensaio multiaxial baseado no teste de "Arcan", projetado e construído com desenvolvimento próprio, para possibilitar uma condição de carga combinada. As junções metálicas testadas foram feitas com aço de baixo teor de carbono sem camada superficial de proteção (170 MPa de limite de escoamento) de uso corrente na indústria automotiva, com duas espessuras diferentes, 0,80 e 1,20 mm. A análise numérica foi conduzida usando o método de elementos finitos através do programa comercial LS-DYNA. Um assoalho frontal conceitual de um carro de passageiro tipicamente construído com solda ponto por resistência elétrica, foi modificado para solda laser. Uma análise numérica utilizando o programa Nastran estudou ambos os processos para comparar as tensões das juntas, bem como a rigidez dos conjuntos. Finalmente uma revisão do estado da arte da aplicação da solda laser nas plantas de manufatura automotiva brasileira é apresentado nesse trabalho.

Palavras-chave: LASER. Solda ponto por resistência elétrica. Carrocerias automotivas. Soldagem. Carga multiaxial. Teste de Arcan.

ABSTRACT

This work aims a comparison between the laser welding and the electric resistance spot welding processes, used for the assembling of automotive Body in White components at a Brazilian world class manufacturer. It was carried out an evaluation of the mechanical strength by experimental and numerical methods. The experimental evaluation was based on results obtained by testing the specimen under combined loads using a self developed "Arcan" type device, in order to provide an multi-axial loading condition. The material tested was an uncoated mild steel sheet (yield strength 170 MPa) with two different thickness, 0.80 and 1.20 mm. The numerical analysis was carried out using a LS-DYNA FEM code in order to evaluate weld junction strength. A passenger car concept front floor using resistance spot welding was modified to laser welding, and a numerical analysis by the comercial code Nastran studied to evaluate and compares the junctions stresses as well as the assemblies stiffness. Finally a brief review of the state of art of laser welding application on brazilian automotive car manufacturing plants is presented in this work.

Key words: LASER. Electric Resistance Spot Weld. Automotive Body in White. Welding. multi-axial loading. Arcan test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curva de custos para novas tecnologias de junção de carrocerias automotivas.....	2
Figura 2 - Tipos de processos de solda em uma carroceria automotiva.....	3
Figura 3 - Tendências nos processos de junção em carrocerias automotivas produzidas em série, sem considerações especiais de construções tais como estrutura monobloco em aço, "space-frame" em liga de alumínio ou peças com concepção multi-material.	3
Figura 4 - Estação de solda laser para junção de Teto e Lateral.....	5
Figura 5 - Esquema de funcionamento de uma cavidade geradora de laser.....	8
Figura 6 - Formação do cordão de solda laser.	11
Figura 7 - Dispositivo de fixação de peças para soldagem.	12
Figura 8 - Estação de solda laser automática.	13
Figura 9 - Gerador de Laser com cavidades alinhadas em seqüência.	14
Figura 10 - Cabeçote para solda laser do Teto.....	15
Figura 11 - Cabine de solda laser - Opel Europa.....	19
Figura 12 - Estrutura da Carroceria.	20
Figura 13 - Divisão da Estrutura da Carroceria.....	21
Figura 14 - Principais tipos de junções para solda laser.....	22
Figura 15 - Junção de dois blanks por brasagem laser.	23
Figura 16 - Costura não linear para tailored blank de Painel de Porta e costura linear para tailored blank de Lateral Interna.....	24
Figura 17 - Regiões de aplicação do tailored blank.	24
Figura 18 - Longarinas com tailored blank de 3 espessuras.....	24
Figura 19 - Reforço Lateral e Torre do Amortecimento com tailored blank de 2 espessuras.....	25
Figura 20 - Exemplo de aplicação de solda laser no teto.	26
Figura 21 - Brasagem laser no teto com adição de material.....	27
Figura 22 - Aplicação de Brasagem laser no teto com adição de material.	27
Figura 23 - Aplicação de solda laser no teto sem adição de material.	28
Figura 24 - Exemplo de aplicações de solda laser já utilizadas pela indústria automobilística.	28

Figura 25 - Aplicação de solda laser na Longarina Dianteira.....	29
Figura 26 - Aplicação de solda laser no Assoalho Dianteiro.....	29
Figura 27 - Aplicação de solda laser em dobradiças de portas.....	30
Figura 28 - Junção da Coluna B com a soleira da Lateral usando solda ponto por resistência, e solda laser otimizada.	31
Figura 29 - Junção da Lateral com a Caixa de Rodas Traseiro.	32
Figura 30 - Junção da Lateral com Assoalho.....	33
Figura 31 - Principais tipos de testes de solda ponto.....	35
Figura 32 - Gráfico Descolamento x Carga para cisalhamento e tração.....	35
Figura 33 - Teste de Arcan.	36
Figura 34 - Fixação do Corpo de Prova no Modelo de Langrand & Combescure.	37
Figura 35 - Corpo de prova do modelo de teste de Lin.....	38
Figura 36 - Dispositivo e corpo de prova do modelo de Lee.....	38
Figura 37 - Comparação das dimensões existentes de referência – corpos de prova para ensaio de tração.	39
Figura 38 - Modos de falha de um ponto de solda.....	41
Figura 39 - Configuração de um ponto de solda.	41
Figura 40 - Configurações de corpos de prova de Wang & Ewing.....	44
Figura 41 – Seções esquemáticas para cálculo de equivalência inicial por volume.	45
Figura 42 - Gráficos para equivalência de solda pelo modelo de Wang.	46
Figura 43 - Etapas da aplicação de carga de um teste de cisalhamento por tração.....	50
Figura 44 - Formação da rótula plástica.	51
Figura 45 - Tensões e cargas na interface do ponto de solda.	52
Figura 46 - Tensões e cargas na ZTA do ponto de solda.	54
Figura 47 - Tensões e esforços no cisalhamento por esforço de tração.....	55
Figura 48 - Etapas da aplicação de carga de um teste de arrancamento.....	56
Figura 49 - Tensões e esforços no teste de arrancamento.....	57
Figura 50 - Análise de tensões em volta do ponto de solda.	58
Figura 51 - Forças e momentos atuantes em cargas combinadas.	59
Figura 52 - Comparação entre o modelo geral e o simplificado de Lin.	61

Figura 53 - Modelo de cordão de solda laser com elementos de barra.	63
Figura 54 - Modelo de elementos finitos do corpo de prova.	63
Figura 55 - Junta metálica de teste.	65
Figura 56 - MSPP tipo "C".....	66
Figura 57 - Dispositivo de Arcan.	67
Figura 58 - Modelo de elementos finitos do dispositivo de Arcan.	68
Figura 59 - Fotos do dispositivo de Arcan.....	69
Figura 60 - Configurações de ângulos para o teste de Arcan.....	70
Figura 61- Assoalho com solda ponto por resistência.	73
Figura 62 - Assoalho com solda laser.....	74
Figura 63 - Modelo de elementos finitos dos Assoalhos.....	76
Figura 64 - Comparação dos resultados das diferentes configurações angulares em relação à espessura e tipo de processo de solda.....	78
Figura 65 - Análise metalográfica das junções dos corpos de prova.	80
Figura 66 - Tipos de falhas nos corpos de prova.	82
Figura 67 - Início da formação da rótula plástica para testes com 90°.....	83
Figura 68 - Comparação dos resultados dos testes com solda ponto com o modelo de Lin.	84
Figura 69 - Comparação dos resultados dos testes com solda laser com o modelo de Lin	85
Figura 70 - Representação visual das deformações dos corpos de prova virtuais.	86
Figura 71 - Comparação dos testes físicos e virtuais para solda ponto.....	87
Figura 72 - Resultado das análises virtuais de rigidez dos Assoalhos Dianteiros.	89
Figura 73 - Resultado das análises virtuais de tensões dos Assoalhos Dianteiros.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de equivalência de SPR e SL.	46
Tabela 2 - Cálculo da equivalência de SPR x SL.....	47
Tabela 3 - Matriz de DOE para testes de comparação entre SPR e SL.	48
Tabela 4 - Dados do modelo de elementos finitos do corpo de prova.	64
Tabela 5 - Parâmetros usados para solda ponto por resistência.	66
Tabela 6 - Parâmetros usados para solda laser.	67
Tabela 7 - Dados do modelo de elementos finitos do dispositivo de Arcan.	69
Tabela 8 - Dados dos modelos de elementos finitos dos Assoalhos.	76
Tabela 9 - Resultados das cargas de pico das análises virtuais dos corpos de prova	77
Tabela 10 - Resultados das cargas de pico dos testes físicos dos corpos de prova.....	79
Tabela 11 - Corpos de prova com solda laser com baixa penetração.	81
Tabela 12 - Diferença entre as cargas máximas virtuais e as médias das cargas máximas reais.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	American National Standards Institute
AWS	American Welding Society
BFF	Bobina Forjada à Frio
BIW	Body in White
DOE	Design of Experiments
EPP	Estampagem Extra Profunda
EP	Estampagem Profunda
ISO	International Organization for Standardization
LASER	Light Amplificated by Stimulated Emission of Radiation
MAG	Metal Active Gas
MEF	Modelo de Elementos Finitos
MIG	Metal Inert Gas
MSPP	Máquina de Solda a Ponto Portátil
Nd	Neodímio
SL	Solda Laser
SPRE	Solda Ponto por Resistência Elétrica
TSP	Transformador de Solda a Ponto
YAG	Yttrium Aluminium Garnet
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.2.1 Objetivo geral.....	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3 ESCOPO DO TRABALHO.....	6
2 SOLDA LASER.....	8
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DA SOLDA LASER	8
2.1.1 Material Ativo	9
2.1.2 Fonte de Bombeamento	9
2.1.3 Cavidade Ressonante de Pérot-Fabry.....	9
2.1.4 Geração do laser.....	10
2.1.5 Cordão de solda laser.....	10
2.2 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS PARA SOLDA LASER EM CARROCERIAS	11
2.2.1 Dispositivo de fixação do conjunto.....	12
2.2.2 Geradores de Laser	13
2.2.3 Robô.....	14
2.2.4 Cabeçote de soldagem.....	14
2.3 COMPARAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM Nd:YAG VERSUS CO ₂	15
2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SOLDA LASER.....	17
2.4.1 Vantagens da solda laser.....	17
2.4.2 Desvantagens da solda laser.....	18
2.5 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA SOLDA LASER NA CONSTRUÇÃO DE CARROCERIAS	19
2.5.1 Tailored Blank	22
2.5.2 Junção de peças e conjuntos	25
2.6 APLICAÇÕES POTENCIAIS FUTURAS	30

3 MODELOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA PARA JUNÇÕES DE SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA E POR LASER.....	34
3.1 TIPOS DE TESTES	34
3.2 CORPO DE PROVA	39
3.3 EQUIVALÊNCIA DE SOLDA	42
3.3.1 Equivalência por área	42
3.3.2 Equivalência de Wang	45
3.3.3 Cálculo da equivalência	47
3.4 DOE (DESIGN OF EXPERIMENT)	48
3.5 ANÁLISE DE TENSÕES E ESFORÇOS.....	49
3.5.1 Cisalhamento por esforço de tração.....	49
3.5.2 Tração (arrancamento)	56
3.5.3 Esforços combinados de Cisalhamento e Tração (arrancamento).....	58
3.6 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	62
4 SOLDA LASER VERSUS SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA – TESTE FÍSICO	65
4.1 JUNTA METÁLICA DE TESTE.....	65
4.2 DISPOSITIVO DE ARCAN	67
4.3 ENSAIOS DESTRUTIVOS DE ARCAN.....	70
5 ESTUDO DE CASO: ASSOALHO DIANTEIRO	72
5.1 LIMITAÇÕES DO MODELO	72
5.2 ASSOALHO COM SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA.....	73
5.3 ASSOALHO COM SOLDA LASER.....	74
5.4 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	75
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
6.1 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS DOS CORPOS DE PROVA.....	77
6.2 TESTES FÍSICOS DOS CORPOS DE PROVA	77
6.3 COMPARAÇÃO DO MODELO VIRTUAL VERSUS REAL	86
6.4 ESTUDO DE CASO: ASSOALHO DIANTEIRO	89

7 CONCLUSÕES	91
8 TRABALHOS FUTUROS.....	92
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
APÊNDICE A – Resultados dos Testes Físicos de Arcan.....	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

A cada dia as indústrias vêm aperfeiçoando seus produtos e processos produtivos em busca de alternativas que viabilizem um equilíbrio entre custo e benefício, sem prejudicar a qualidade de seus produtos. A tecnologia empregada no produto e seu processo é um fator importantíssimo, e o mesmo pode ser determinante como um diferencial no mercado, seja por custos ou característica do produto (Porter, M). Os custos e riscos ao implementar uma tecnologia nova poderá inviabilizar um projeto de um novo produto, por isso a necessidade de estudos e pesquisas para total domínio da tecnologia é extremamente importante. O resultado desses trabalhos poderão revelar modelos que levem à redução de custos e conseqüentemente a viabilidade técnica/financeira da tecnologia.

Para as montadoras o desafio de adicionar uma nova tecnologia é sempre muito arriscado, e caso a tecnologia não seja aceita ou ocorra problemas em sua implementação, os prejuízos são extremamente onerosos. Por outro lado, a boa aceitação do consumidor e uma implementação bem sucedida pode melhorar a qualidade do produto aliado ao diferencial de mercado e até a uma redução do custo final do produto.

O processo de funcionamento de uma indústria automobilística pode ser dividido de maneira simplificada em: Design, Engenharia de Produtos, Engenharia de Manufatura, Compras, Finanças, Marketing, Qualidade, Produção e Serviços. A Engenharia de Produtos define as características a serem atendidas pelo produto seguindo requisitos de segurança, legislação, com o apoio e suporte do Design e Marketing que definem as condições do produto a ser oferecido ao consumidor. A Engenharia de Manufatura planeja,

projeta e executa os processos para que tais características sejam atendidas com a melhor relação entre custo e qualidade (Ruiz, D, 2005).

O desenvolvimento deste trabalho foi concentrado na área de Funilaria, onde as peças metálicas são posicionadas em dispositivos e soldadas entre si formando subconjuntos (ex.: longarinas, reforços das laterais, painel interno das portas, cofre). Os subconjuntos são soldados formando conjuntos (ex.: assoalho, laterais, portas) e esses por sua vez formam a carroceria. Conforme já citado, pela complexidade do processo de produção o investimento necessário é grande, e a redução de custos assume extrema importância. Na realização da solda podem ser utilizados diversos processos, como solda por resistência, solda a Laser e solda a arco (MIG/MAG).

Dentre esses processos a solda a ponto por resistência é a mais utilizada em virtude da maior simplicidade (Ruiz & Batalha, 2004), facilidade de controle e menor investimento necessário, resultando em um produto com qualidade, conforme mostrado na Figura 1.

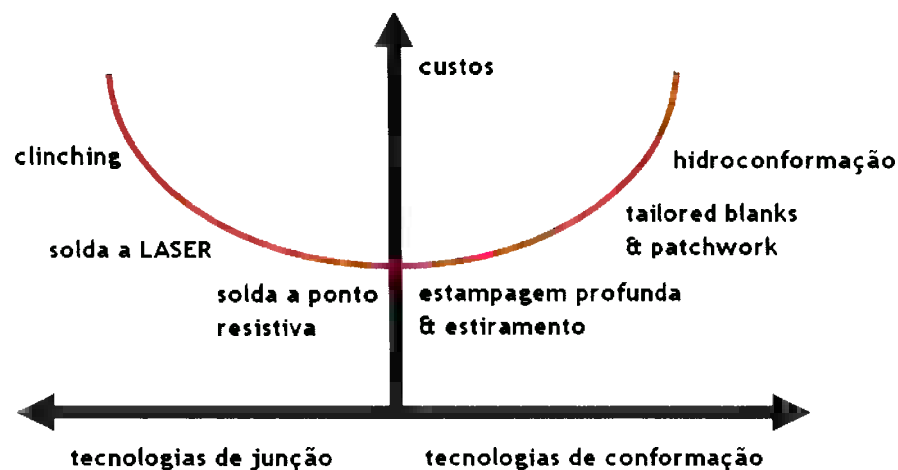


Figura 1 - Curva de custos para novas tecnologias de junção de carrocerias automotivas.

Fonte: Ruiz, D. (2005)

Para exemplificação, um automóvel possui cerca de 4.800 pontos de solda, diversos cordões de solda MIG/MAG e em casos específicos cordões ou pontos de solda a LASER (Figura 2).

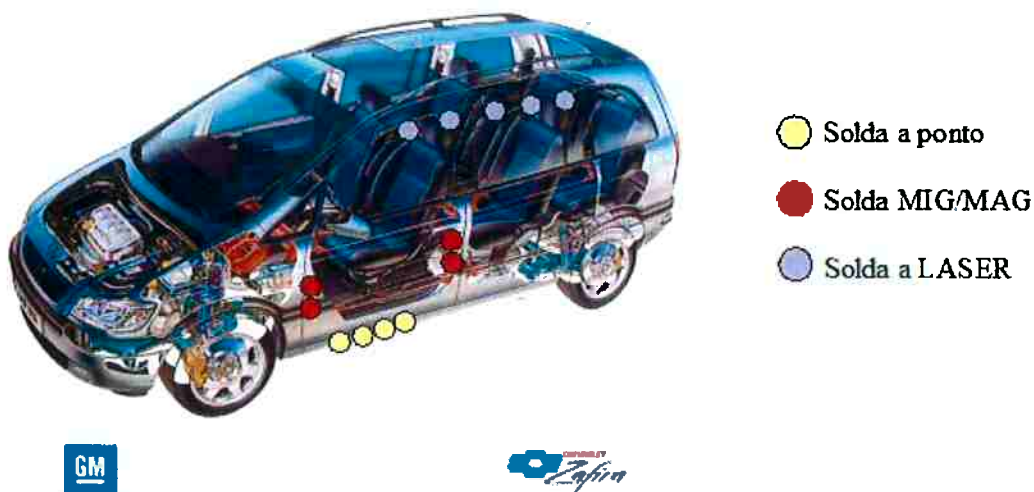


Figura 2 - Tipos de processos de solda em uma carroceria automotiva.

Fonte: Ruiz, D. (2005)

A Figura 3 mostra as tendências no uso das diversas técnicas de junção de carrocerias no decorrer das últimas décadas. O uso da SPRE, em virtude das suas características e qualidade, é ainda o processo dominante na indústria automotiva.

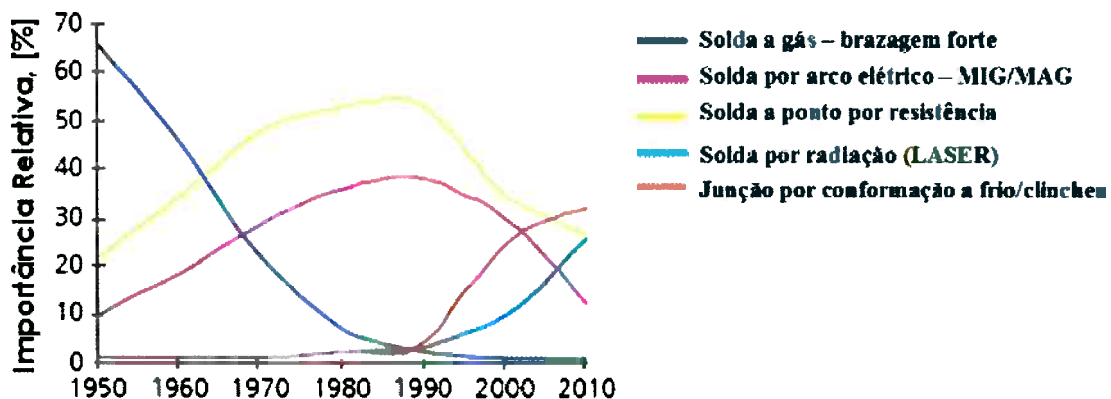


Figura 3 - Tendências nos processos de junção em carrocerias automotivas produzidas em série, sem considerações especiais de construção tais como estrutura monobloco em aço, "space-frame" em liga de alumínio ou peças com concepção multi-material.

Fonte: IWU – Fraunhofer Institute (2003)

Entretanto, o uso da solda a laser tem aumentado consideravelmente nos últimos anos e algumas montadoras visualizam a possibilidade de

produção de um veículo 100% soldado a laser em curto prazo (apesar do custo ainda alto desse tipo de solda). Diversas empresas consideram o processo de solda a laser uma evolução do processo de solda a ponto, sendo portanto difícil de ser evitada. Uma das vantagens do processo da solda a LASER é o fato dela não necessitar acesso pelos dois lados da peça, o que implica na diminuição do número de reforços da carroceria para uma mesma resistência. Como as peças não possuem aberturas ou furos para o acesso da máquina de solda, diminui-se o número de peças e, assim, tem-se a diminuição do peso da carroceria.

Apesar da solda laser já ter um considerável uso em regiões como Europa e Estados Unidos, esse processo ainda é muito pouco usado e explorado no Brasil. Um dos fatores que contribui para seu pouco uso, além do elevado custo de sua implementação, é o desconhecimento ou pouca informação por parte dos Engenheiros de Produto no Brasil sobre as possibilidades de aplicações e exploração das vantagens dessa tecnologia. Com isso a solda laser é praticamente descartada no leque de soluções para desenvolver um novo produto, e seu uso fica limitado às poucas aplicações conhecidas no Brasil como o uso da solda laser na junção do Teto com o Painel Lateral (figura 4).

Sabemos que os custos para uso da solda laser são elevados se comparados à SPRE em investimentos de equipamentos, porém não podemos quantificar ao certo a real diferença final de valores, se levarmos em conta o ganho que potencialmente podemos obter. A nova tecnologia poderá levar a uma redução do preço do veículo que por sua vez poderá compensar essa diferença de valores, pois esse ganho será somado até o final da produção do veículo. E é nesse ponto que o volume de produção pode ajudar na disseminação da solda laser, pois veículos com volumes de produção maiores poderão possibilitar o retorno de investimentos e reduções de custos reais no produto e processo. Não existe uma formula mágica ou algum material no Brasil que mostre como estão os custos no cenário atual da solda laser em relação à SPRE. Existem veículos no Brasil que chegam a usar um volume

considerável de solda laser na construção de sua carroceria, porém o real ganho com essa aplicação é questionável se levarmos em conta o cenário atual do país.

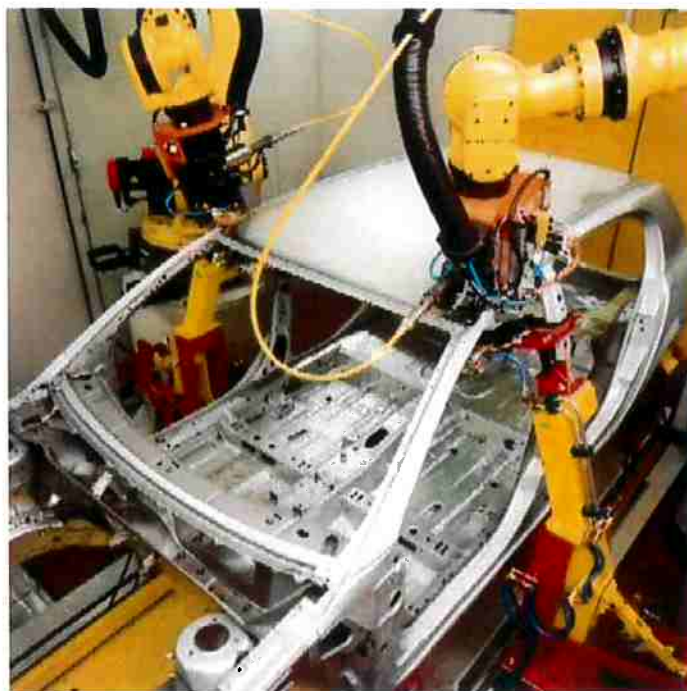


Figura 4 - Estação de solda laser para junção de Teto e Lateral.

Fonte: <http://www.kukausa.com/images> (acesso: 22/Out/2005)

Esse trabalho foi desenvolvido tendo como foco a aplicação de solda laser no desenvolvimento de produto, não havendo profundidade em relação à processos tanto de SPRE (como referência comparativa) como na solda laser, pois existem diversos materiais com excelente conteúdo desses temas. Existe a carência de materiais que mostrem de forma clara as aplicações da solda laser usadas atualmente e as possíveis tendências de uso em um futuro próximo. A comparação da solda laser com a SPRE é inevitável, tanto nas características físicas como construtivas. Experimentos com solda laser foram feitos para sabermos como obter em uma junta um comportamento mecânico no mínimo com desempenho similar à SPRE.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

1. Apresentar os conceitos básicos a respeito de solda laser;
2. Apresentar conceitos atuais de aplicação de solda laser para construção de carrocerias e também potenciais de futuras aplicações;
3. Comparar através do método de elementos finitos os modelos de resistência mecânica da junção de SPRE e solda laser;
4. Comparar através de ensaios mecânicos a resistência mecânica da junção de SPRE e solda laser.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Fazer estudo de caso para modificar um Assoalho de um veículo de passageiro com junção de SPRE para solda laser, com objetivo de buscar um desempenho similar entre ambos.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O capítulo 2 mostra os conceitos básicos da Solda Laser, bem como suas vantagens e desvantagens e suas principais aplicações na indústria automobilística, e algumas aplicações potenciais futuras. No capítulo 3 temos os modelos de resistência mecânica para juntas de SPRE e SL. No capítulo 4 temos a comparação da resistência mecânica dos processos de junção de SPRE e solda laser, através de ensaios mecânicos. O capítulo 5 contém o estudo de caso para modificar uma aplicação no assoalho com junção de SPRE por solda laser, visando um desempenho similar entre ambos. Os

resultados e discussões estão no capítulo 6 e as conclusões no capítulo 7. Os trabalhos futuros estão no capítulo 8. As referências bibliográficas são mostradas no capítulo 9.

2 SOLDA LASER

A palavra LASER é formada pelas iniciais de "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*", que podemos entender por "Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação". Essa fonte de energia que incide sobre o material a ser soldado provoca aquecimento concentrado na faixa de 1,5mm sobre o material (Damoulis & Batalha, 2004). Os tipos de lasers mais usados na indústria de acordo com Mayer (1994) são o laser de CO₂ e laser Nd:YAG.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DA SOLDA LASER

Para a geração do laser há elementos chamados de cavidades, por onde o laser é gerado, sendo então continuamente amplificado. Uma cavidade constitui-se das seguintes partes (ver figura 5):

1. Um material ativo;
2. Uma fonte de bombeamento;
3. Uma cavidade ressonante.

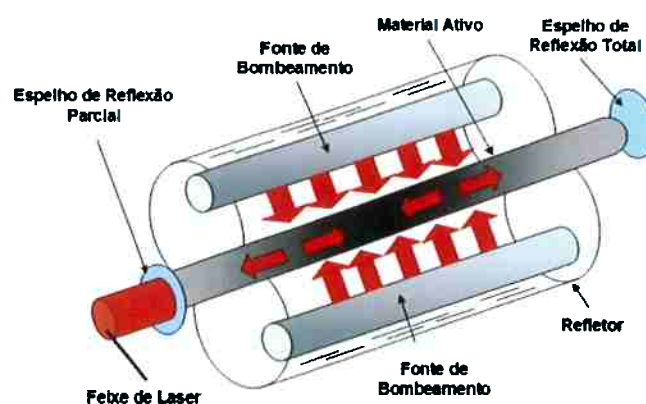


Figura 5 - Esquema de funcionamento de uma cavidade geradora de laser.

Fonte: Damoulis & Batalha (2004)

2.1.1 Material Ativo

O material ativo é o responsável pela amplificação da energia emitida pela fonte de bombeamento. O material usado pode ser sólido, líquido ou gasoso. No caso de sólidos o material ativo pode ser um cilindro usinado de cristal de rubi, vidro de neodímio ou YAG (Yttrium Aluminium Garnet). Os materiais ativos líquidos ou gasosos devem ser fechados em um recipiente e as duas paredes opostas são transparentes e planas. Os materiais líquidos ainda não ultrapassam o âmbito dos laboratórios, porém os gasosos são amplamente usados como o hélio-neônio, anidrido carbônico, argônio ionizado, CO₂ etc.

2.1.2 Fonte de Bombeamento

A fonte de bombeamento é responsável por emitir a energia a ser amplificada. Ele pode emitir um sinal intermitente (pulsado) como flash de luz ou descarga elétrica que resulta em um laser pulsado, ou um sinal contínuo como arco de xenônio que resulta em um laser contínuo, envolvendo o material ativo.

2.1.3 Cavidade Ressonante de Pérot-Fabry

A cavidade ressonante de Pérot-Fabry constitui-se da barra laser (material ativo), uma carcaça refletora e dois espelhos dispostos perpendicularmente ao eixo da barra, situados uma em cada lado dessa barra. Um desses espelhos é semi-transparente de forma a permitir a saída da radiação gerada no oscilador. A cavidade de Pérot-Fabry pode apresentar algumas variantes com relação ao esquema mostrado inicialmente, no caso de um laser com material ativo sólido os espelhos podem as próprias faces do cilindro. Em um laser de gás eles

podem ser constituídos pelas paredes que fecham o recipiente. O espelho oposto à lâmina semi-transparente de saída do feixe pode ser constituído por um prisma de reflexão total. A superfície do espelho pode ser esférico e não necessariamente plano.

2.1.4 Geração do laser

Para geração do feixe de laser a fonte de bombardeamento emite energia (fonte contínua ou intermitente) no material ativo. Quando o material ativo recebe essa energia da fonte de bombeamento ocorre um fenômeno chamado “inversão de população” onde acontece a amplificação das radiações, ocorrendo assim a emissão de energia para todas direções, especialmente no eixo do ressonador. Em seu trajeto formado por múltiplas reflexões entre os espelhos, essa radiação amplifica-se por emissão estimulada a cada passagem no meio ativo. Uma certa Fração de energia atravessa o espelho semi-transparente para constituir o feixe de laser, ao passo que a outra fração é refletida e efetua um trajeto inverso ao longo do eixo, resultando em um aumento de intensidade na cavidade (Unisantia).

2.1.5 Cordão de solda laser

Quando o feixe de laser toca a superfície de metal, a energia concentrada aquece rapidamente a área atingida, fundindo e vaporizando metal. Segundo Loredo & Martin & Andrzejewski & Grevey (2002), a pressão resultante acaba perfurando a superfície formando uma cavidade ou núcleo, cheio de vapor superaquecido em seu interior e cercado de material fundido, ver figura 6. Deslocando-se a cavidade ou núcleo ao longo da superfície forma-se o cordão de SL. Os cordões de solda resultante são de aproximadamente 1,2 a 1,5 mm de largura.

As variações de temperaturas em áreas pequenas e concentradas provocam a formação de um cordão estreito e delgado com uma ZTA pequena.

A brevidade desse processo associado à velocidades de resfriamento muito elevadas, resulta em uma região soldada com características mecânicas, como dureza e resistência à tensão, próximas aos metais base antes da soldagem.

Para proteger a zona de fusão é necessário utilizar um gás inerte (argônio, hélio ou nitrogênio), para evitar problemas de qualidade do cordão de solda (Unisantia).

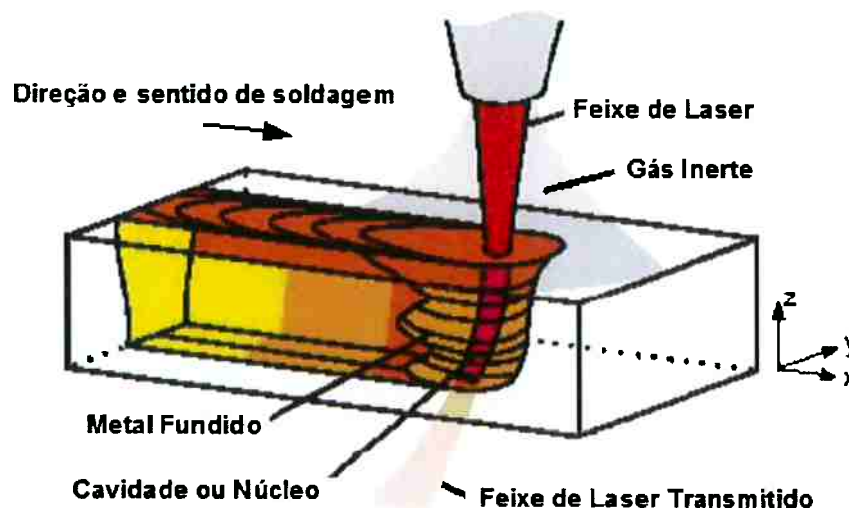


Figura 6 - Formação do cordão de SL.

Fonte: Ribolla & Damoulis & Batalha (2004)

2.2 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS PARA SOLDA LASER EM CARROCERIAS

Na solda de carrocerias são necessários os seguintes equipamentos, segundo Ribolla & Damoulis & Batalha (2004) e Damoulis e Batalha (2004):

- Dispositivo de fixação do conjunto;
- Geradores de Laser;
- Robô;
- Cabeçote de Soldagem.

De acordo com a aplicação e a complexidade construtiva, os equipamentos podem ter variações para se adequar ao produto.

2.2.1 Dispositivo de fixação do conjunto

Para garantir as características dimensionais do produto após a solda, a SL requer um dispositivo de posicionamento altamente preciso e robusto. O campo de variação dimensional admissível requerido para esse processo é de no máximo 10% das espessuras soldadas, segundo Barnes & Pashby (2000), nas regiões de contato, devido à sensibilidade do foco do feixe de laser. As montadoras em geral adotam um critério de admitir uma variação dimensional de no máximo 0,3mm nas regiões de contato, indiferente as espessuras utilizadas, pois esse valor foi o que demonstrou empiricamente o melhor resultado para esse tipo de solda. A figura 7 mostra um exemplo de dispositivo de posicionamento de peças.

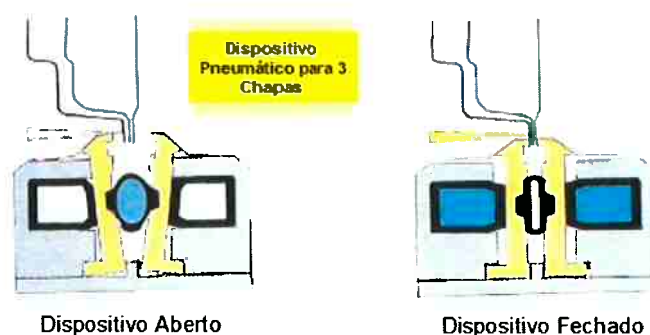


Figura 7 - Dispositivo de fixação de peças para soldagem.

Fonte: Ribolla & Damoulis & Batalha (2004)

Os dispositivos devem permitir acesso as zonas de soldagem. Por exigir um nível de automação relativamente alto, as estações de solda muitas vezes ficam com uma aparência complexa, ver figura 8.

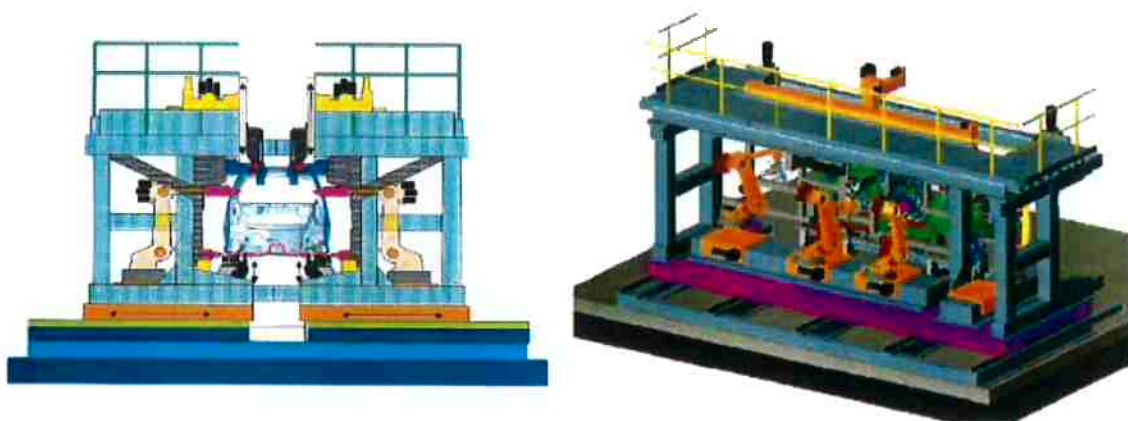


Figura 8 - Estação de SL automática.

Fonte: Ribolla & Damoulis & Batalha (2004)

2.2.2 Geradores de Laser

Conforme foi visto o laser é gerado através das cavidades. Uma máquina de solda utiliza várias cavidades alinhadas em seqüência, e sua quantidade vai depender da potência do feixe de laser requerido, ver figura 9. O equipamento requer um sistema de arrefecimento para as cavidades durante seu funcionamento.

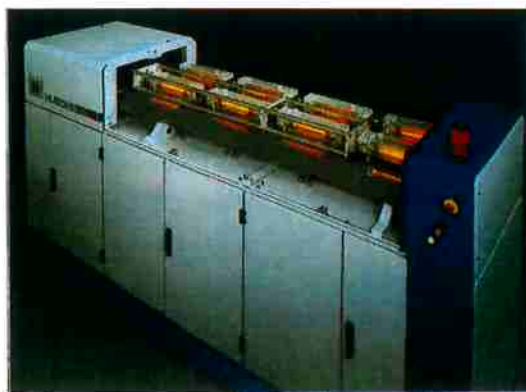


Figura 9 - Gerador de Laser com cavidades alinhadas em seqüência.

Fonte: General Motors (2001)

2.2.3 Robô

Os atuais perigos da exposição às radiações torna a operação manual de soldagem laser praticamente impossível. Sendo assim, o uso de robôs para aplicação é necessária, aumentando os investimentos e custos dessa tecnologia. A quantidade de eixos requeridos vai depender da complexidade que pode chegar a 7 eixos. Com o uso da fibra-óptica, a aplicação de laser com robôs ganhou maior flexibilidade. Um gerador de laser pode alimentar mais de um robô por vez.

2.2.4 Cabeçote de soldagem

Atualmente o cabeçote recebe o feixe de laser dos geradores através de fibras ópticas, e dotada de lentes convergentes, ela concentra o feixe de laser em um ponto relativamente estreito, favorecendo a produção de uma ZTA relativamente pequena. Segundo Barnes & Pashby (2000) e Yang e Lee (1999) a fibra óptica foi um dos fatores que possibilitou o crescente interesse pela SL na indústria em geral.

O bico injetor de gás inerte, o vidro protetor das lentes convergentes, o *cross jet* (ajuda a evitar respingos nas lentes), os roletes sujeitadores e o alimentador de eletrodo consumível (no caso de brasagem à laser) estão acoplados no cabeçote, ver figura 10.

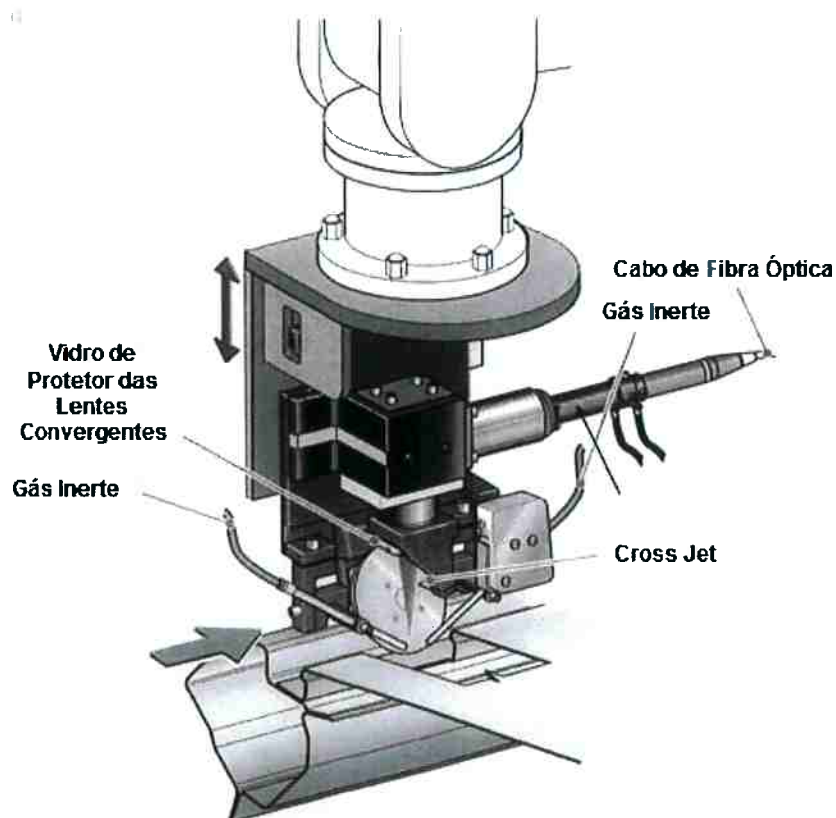


Figura 10 - Cabeçote para SL do Teto.

Fonte: General Motors (2001)

2.3 COMPARAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM Nd:YAG VERSUS CO₂

Cada tipo de laser possui algumas características próprias. O laser de CO₂ começou com uma certa vantagem em relação ao Nd:YAG por se conseguir do

mesmo, potências elevadas, porém com as melhorias nos processos atuais essa diferença praticamente não têm influenciado muito nos processos de junção, pois cada laser tem suas características, e potências muito altas nem sempre nos leva a melhor solução.

Conseguimos potencias de feixes que chegam a 5 kW para Nd:YAG, e lasers de CO₂ com potencias iguais ou maiores que 15 kW, e uma velocidade de soldagem de mais de 65 mm/s para ambos. Segundo Hoffmann & Geiger (1995) o laser de Nd:YAG possui vantagem na soldagem de chapas finas porque conseguimos uma melhor flexibilização de movimentos em sua aplicação devido ao uso de fibras ópticas, e também pelo seu custo mais barato em relação ao laser de CO₂. A aplicação em solda Nd:YAG para chapas finas pode ser confirmada por Barnes & Pashby (2000), onde os autores afirmam que esse tipo de laser consegue uma profundidade de penetração que varia de 2 a 6 mm, e o laser de CO₂ consegue uma profundidade de penetração por volta de 15 mm, dependendo da potência adotada. No fator absorção de energia laser pelo metal base, o Nd:YAG é 3,16 vezes maior que o laser de CO₂ segundo Xie & Kar (1999), isso quer dizer que o Nd:YAG possui um aproveitamento melhor do feixe de laser na soldagem.

Devido às vantagens acima podemos entender o interesse das industrias automobilísticas no uso do laser Nd:YAG, principalmente para sua aplicação de construções de carrocerias em larga escala. Porém o laser de CO₂ ainda possui uma grande fatia do mercado dessa tecnologia, principalmente onde grandes profundidades são exigidas na soldagem. Sendo assim não podemos dizer se algum dia um deles deixará de ser usado, ou se continuarão coexistindo juntos no mercado.

2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SOLDA LASER

O laser já é usado pela indústria a muito tempo, sendo assim os trabalhos que existem a respeito dessa tecnologia já possuem dados aprofundados e difundidos no mundo. Podemos notar que diversos autores possuem a mesma opinião das vantagens e desvantagens do laser, Barnes & Pashby (2000) demonstram muito bem isso.

2.4.1 Vantagens da solda laser

- O processo produz distorções pequenas nas peças soldadas, devido a energia relativamente baixa e concentrada usada nesse tipo de soldagem.
- Cordões de solda estreitos (aproximadamente 1,2 a 1,5 mm).
- ZTA pequena.
- Possibilita altas velocidades de soldagem.
- Resulta em geral na formação de soldas de alta qualidade.
- Solda visivelmente mais agradável aos olhos do cliente, o que favorece a qualidade percebida no veículo.
- Alta resistência mecânica.
- Flexibilidade e versatilidade para a automação do processo através de robôs.
- Menor investimento no caso de modificações no produto. Muitas vezes apenas a reprogramação dos robôs já engloba toda a modificação necessária.
- Não necessita de acesso do equipamento pelos dois lados da área de contato para ser feito a soldagem. Por causa disso a SL possibilita construções que antes eram impossíveis com a SPRE.

2.4.2 Desvantagens da solda laser

- Requer um nível de automação alto como robôs e dispositivos, pois não existe a possibilidade de usar um processo manual devido ao nível de periculosidade do laser.
- Limitação de profundidade de penetração do cordão de solda.
- Requer uma tolerância dimensional acurada entre peças, cerca de 10% das espessuras a serem soldadas. Na indústria, usa-se um valor de 0,3 mm de variação máxima da área de contato a ser soldado.
- O nível de equipamentos e aparatos para proteção contra acidentes é altíssimo, proporcionalmente ao alto risco de acidentes. Os operadores não devem ter acesso à cabine de soldagem enquanto o equipamento está em funcionamento, ver figura 11.
- O retrabalho no caso de falhas na soldagem é complexo e caro em relação a outros processos de junção.
- Devido aos fatores mostrados anteriormente os investimentos necessários são altíssimos se compararmos com outros processos, como a SPRE.
- Requer um volume de produção relativamente alto para amortizar o investimento, salvo a exceção de veículos de alto valor agregado, onde o custo final do produto compensa o baixo volume produzido.

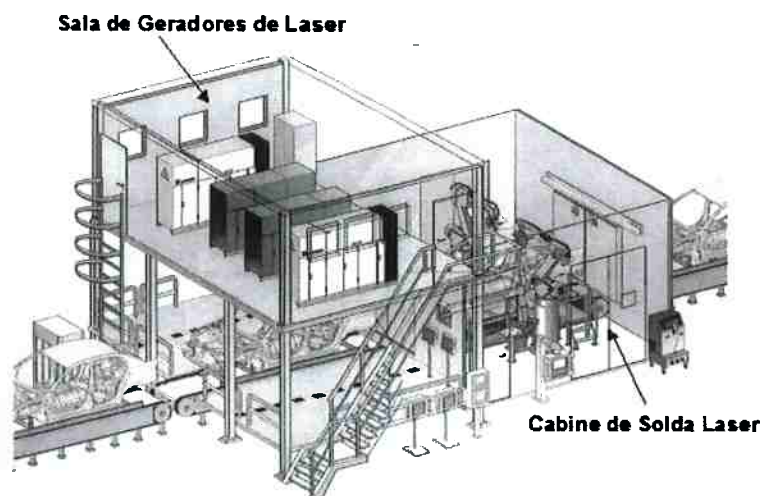


Figura 11 - Cabine de SL - Opel Europa.

Fonte: General Motors (2001)

2.5 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA SOLDA LASER NA CONSTRUÇÃO DE CARROCERIAS

A indústria automotiva está atualmente, segundo Barnes & Pashby (2000), trabalhando para acomodar os requisitos conflitantes de meio-ambiente e legais, e ainda atender desejos dos clientes por veículos com uma melhor performance, segurança, conforto e autonomia. Além de tudo isso ainda existe a tendência da redução de massa dos veículos para aumentar a autonomia e melhorar o consumo de combustível. Messler & Bell & Craigue (2003) descrevem a redução de massa como a chave para a economia de combustível, pois 10% de redução de massa resulta de 6% a 8% de melhoria na economia de combustível. A SL pode ser um grande aliado na redução de massa na carroceria, especialmente na estrutura ou no como é conhecida *Body in White* (BIW), ver figura 12.

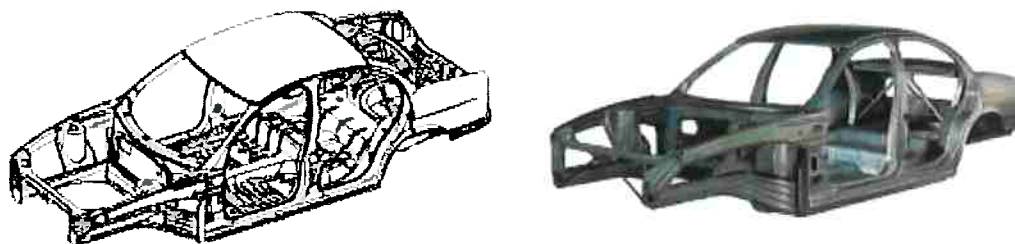


Figura 12 - Estrutura da Carroceria.

Fonte: http://www.ulsab.org/ulsab/image_library (acesso: 13/Ago/2006)

Para falarmos de aplicações é importante visualizar as partes que compõem a estrutura da carroceria. Devido a quantidade de peças e complexidade de visualização, vamos dividir simplificadamente em Estrutura Superior, Estrutura Inferior e Estrutura Frontal, ver figura 13. Temos dois tipos de peças na estrutura: Peças de plataforma ou *black metal* e peças de exterior.

As peças de plataforma ou *black metal* são componentes que possuem uma superfície “classe B”, ou seja, não possuem um impacto visual de *design* para o cliente, ou são componentes que não são visualizados como no caso de reforços, que muitas vezes estão cobertos por uma peça de acabamento ou inacessíveis. Para esse tipo de peça existe um campo muito grande de aplicação nos processos de junção pois a aparência resultante não será um problema.

As peças de exterior são componentes que possuem uma superfície “classe A”, ou seja, possuem um impacto visual de *design* no veículo, sendo assim as linhas e forma caracterizam o modelo do carro. Para esse tipo de peça não é admitido nenhum defeito ou marca resultante de processo. Peças que se encaixam nesse tipo de componente são os Painel Laterais Externos, Teto, Paralama, Painel Tampa Traseira Externa, Painel das Portas Externo. A SL é um dos poucos processos de junção usados que ficam aparentes na superfície externa do veículo, devido a excelente qualidade do acabamento dessa junção.

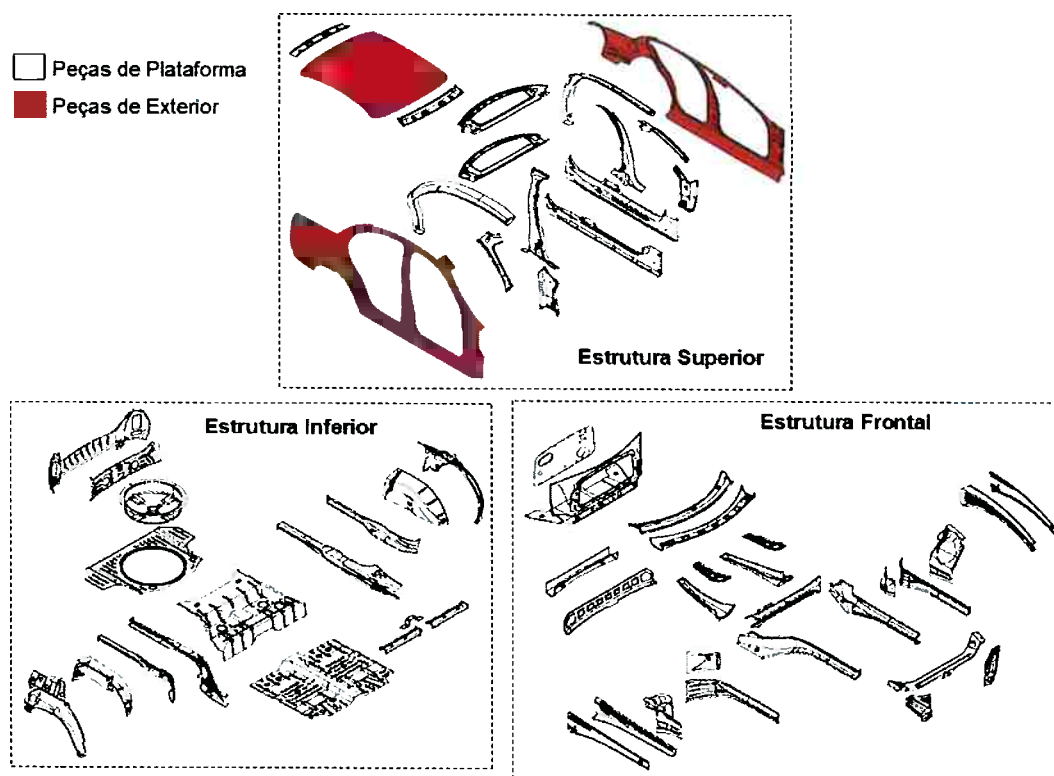


Figura 13 - Divisão da Estrutura da Carroceria.

Fonte: http://www.ulsab.org/ulsab/image_library (acesso: 13/Ago/2006)

A Estrutura Superior compreende as Laterais e o Teto. A Estrutura Inferior compreende os Assoalhos Dianteiro e Traseiro, Longarina Traseira, Caixa de Rodas Traseira. A Estrutura Frontal compreende o Painel Frontal do Habitáculo (*Dash*), Longarinas Dianteiras, Caixa de Rodas Dianteira e Painel Frontal.

Para aplicarmos a SL precisamos conhecer os tipos de junções que existem na aplicação da soldagem. A figura 14 mostra exemplos das principais junções usados na SL. Segundo Zhang (2002) a junção sobreposta é uma configuração comum para SL.

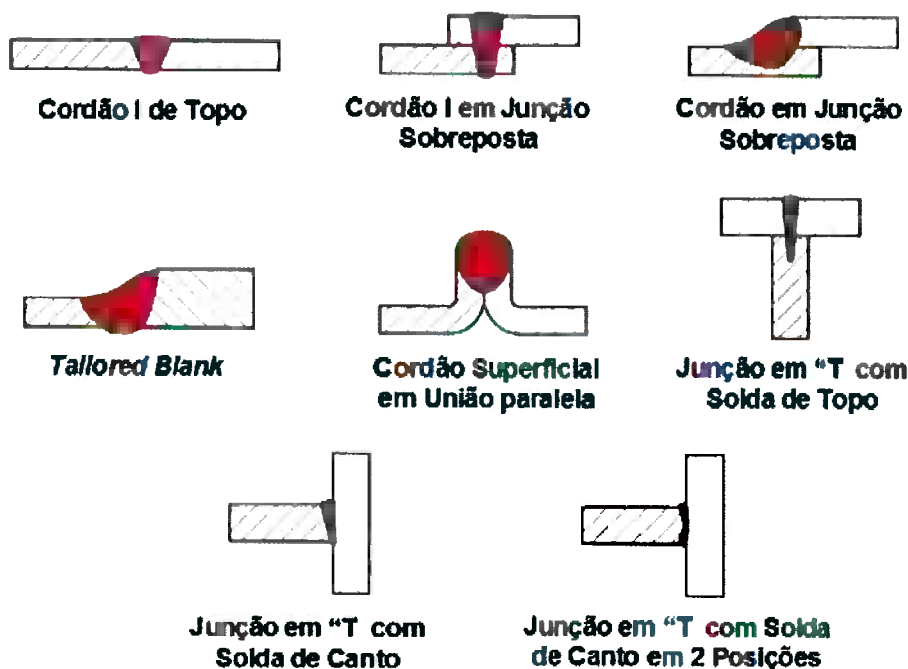


Figura 14 - Principais tipos de junções para SL.

Fonte: http://www.zmb-aachen.de/lehre/material/umdrueke/STI/e_WT1_KAP09 (acesso: 13/Ago/2006)

O uso da SL está se tornando cada vez mais importante na indústria automotiva. Segundo Hoffmann & Geiger (1995), no mercado Europeu 11% de todas as das aplicações do laser estão relacionadas com a indústria automotiva. A seguir as principais utilizações da SL na estrutura de carrocerias de veículos automotivos.

2.5.1 Tailored Blank

O tailored blank já era utilizado na indústria automotiva desde 1975, onde retalhos de chapas que sobravam eram soldadas para estampo de peças pequenas, porém vemos que o seu uso não vislumbrava uma vantagem técnica e sim uma redução de custos. O tailored blank obtidos a partir de placas parciais diferentes foram usados pela primeira vez em grande volume em 1990 pela Volkswagen Alemanha no modelo Golf III, com o objetivo de

explorar as vantagens técnicas. No mercado europeu são consumidos atualmente 250.000 toneladas ano desse material. Existe tailored blank que utiliza SPRE, porém a tendência é o predomínio da SL (Unisantia).

O conceito básico do tailored blank é unir ou costurar uma ou mais espessuras com blanks diferentes, onde essa união é feita através de brasagem laser, ver figura 15. Podemos ter diversas configurações de espessuras, porém a relação de espessuras de 2:1 raramente é ultrapassada. A costura poderá ser linear ou não linear (ver figura 16). A idéia é utilizar espessuras menores onde ocorra uma menor solicitação de esforços, e espessuras e/ou um aço de maior resistência em regiões que sofrem maiores esforços e solicitações.



Tailored Blank

Figura 15 - Junção de dois blanks por brasagem laser.

Fonte: http://www.zmb-aachen.de/lehre/material/umdrueke/STI/e_WT1_KAP09 (acesso: 13/Ago/2006)

Os pontos negativos do tailored blank é o aumento nos preços do ferramental na ordem de 30 a 100%, além do preço do blank ficar aproximadamente 50% mais caro.

Atualmente a aplicação do tailored blank atingiu sua maturidade, podemos ver isso pela gama de regiões onde já existe aplicação dessa tecnologia, ver figura 17.

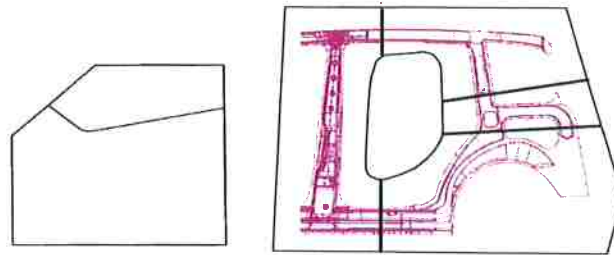


Figura 16 - Costura não linear para tailored blank de Painel de Porta e costura linear para tailored blank de Lateral Interna.

Fonte: <http://www.steel.org/AM/Template> (acesso: 13/Ago/2006)

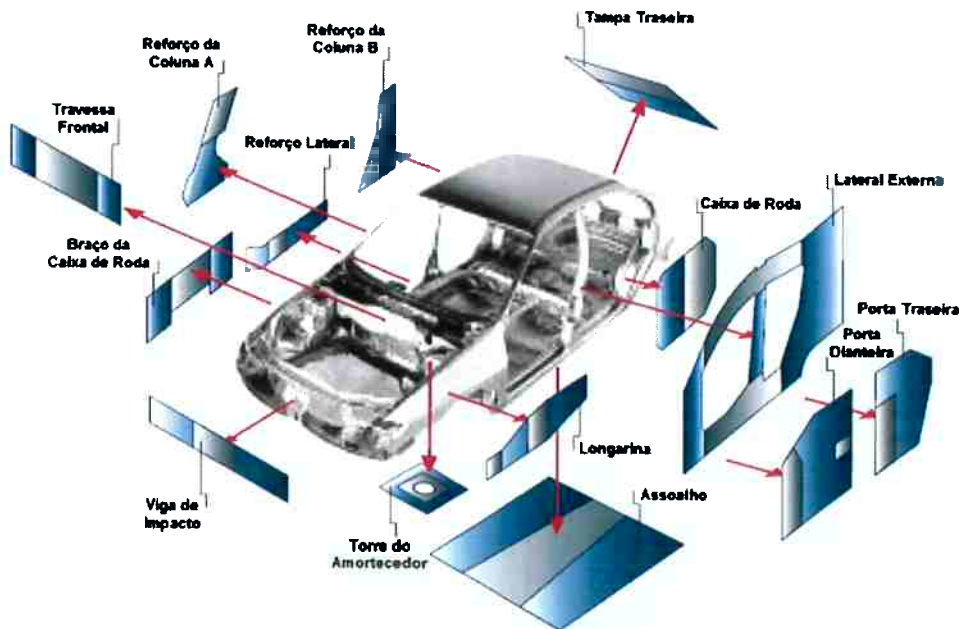


Figura 17 - Regiões de aplicação do tailored blank.

Fonte: <http://www.arcelor.com/fcse/repository/Publications> (acesso: 13/Ago/2006)

As figuras 18 e 19 abaixo mostram peças com tailored blank aplicado.



Figura 18 - Longarinas com tailored blank de 3 espessuras.

Fonte: http://www.ulsab.org/ulsab/image_library (acesso: 13/Ago/2006)

É evidente que o tailored blank permite uma construção mais correta em relação aos esforços e com economia de peso, devido à combinação dirigida de placas parciais. Peças estruturais importantes para segurança como Longarinas ou Reforço da Coluna B podem ser dispostas de tal forma que áreas com grandes solicitações possuam chapas de alta resistência, enquanto em lugares de pequenos esforços seja possível o uso de chapas com boa deformidade.



Figura 19 - Reforço Lateral e Torre do Amortecimento com tailored blank de 2 espessuras.

Fonte: http://www.ulsab.org/ulsab/image_library (acesso: 13/Ago/2006)

Algumas montadoras acreditam que 25% será o máximo que um veículo utilizará de tailored blank. Já os fabricantes de tailored blank acreditam que o volume chegará a 60%.

2.5.2 Junção de peças e conjuntos

Nos processos de junção de peças e conjuntos, a SL vem ganhando espaço substituindo os processos de SPRE e solda MIG/MAG (Ruiz, 2005). Apesar do alto investimento envolvido, a qualidade final e o desempenho dessa junção possuem sem dúvida um diferencial dos demais processos de junção.

A SL é superior na resistência à fadiga, podemos ver isso bem claro em Wang & Ewing (1991), Wang & Ewing (1994) e Yang & Lee (1999). Isso possibilita uma durabilidade melhor da estrutura da carroceria em suas junções.

Uma grande vantagem da SL é não precisar de acesso pelos dois lados das chapas para efetuar a soldagem, isso permite construções complexas de estruturas que antes seriam impossíveis com SPRE como é mostrado na figura 20.

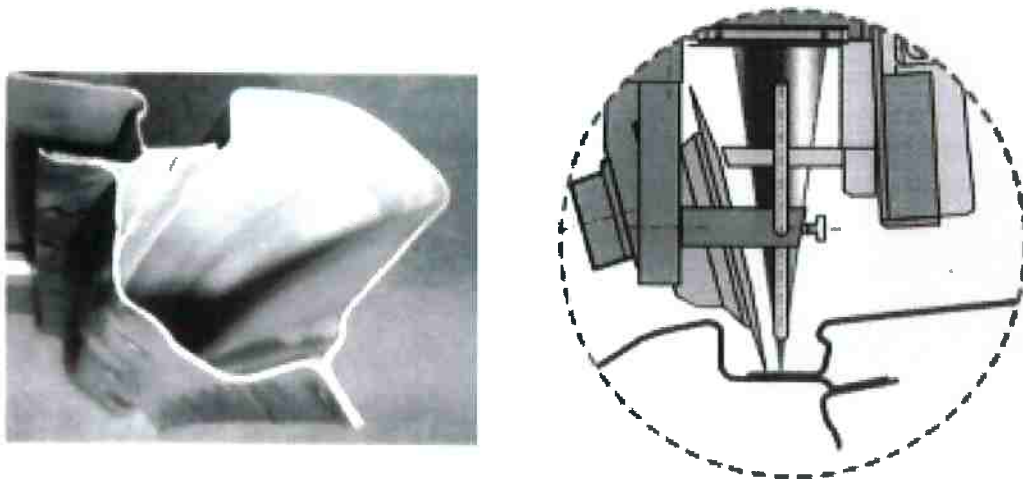


Figura 20 - Exemplo de aplicação de SL no teto.

Fonte: General Motors (2001)

A SL é um dos poucos processos de junção que podem ser feitas em áreas externas e visíveis para o cliente devido a qualidade final desse processo. A aplicação mais comum usada pelas montadoras é a junção das Laterais com o Teto do veículo na Estrutura Superior do veículo, onde se usa brasagem laser com adição de material consumível que deixa apenas um pequeno e delgado cordão contínuo ao longo das laterais do Teto, e dispensa o uso de molduras aplicadas nas canaletas de solda, ver figura 21 e 22.

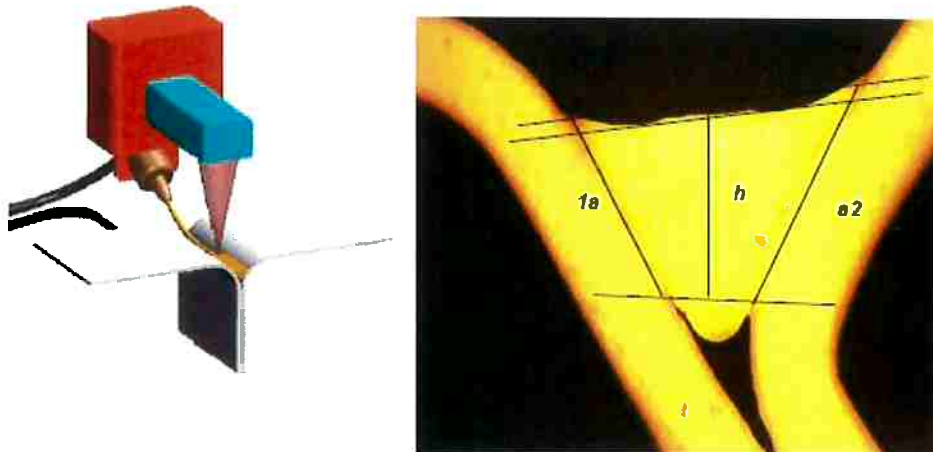


Figura 21 - Brasagem laser no teto com adição de material.

Fonte: Ribbola & Damoulis & Batalha (2004)



Figura 22 - Aplicação de Brasagem laser no teto com adição de material.

Fonte: <http://www.volkswagen.com.br> (acesso: 13/Ago/2006)

Existe soldagem laser no teto que não utiliza brasagem com adição de material, mesmo assim a canaleta necessária para o processo de junção é mais estreita que a requerida pela SPRE, conseqüentemente a moldura utilizada na região é menor e visualmente mais agradável, ver figura 23.



Figura 23 - Aplicação de SL no teto sem adição de material.

Fonte: <http://www.volkswagen.com> (acesso: 13/Ago/2006)

Muitas aplicações de junções com SL não são visíveis para o cliente, o que não exige um acabamento visivelmente agradável. A figura 24 mostra algumas regiões onde a aplicação da SL já possui utilização na indústria automobilística.

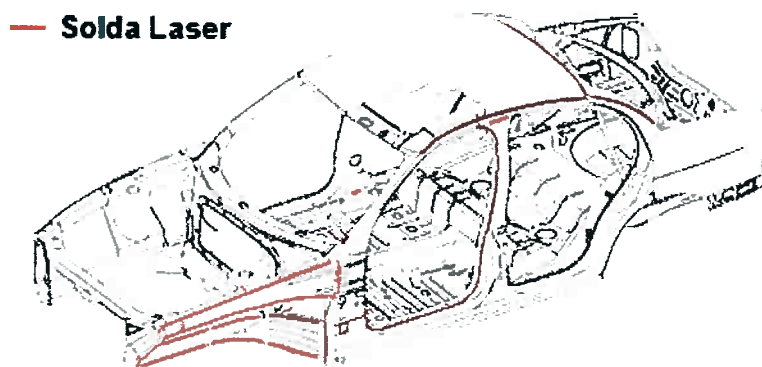


Figura 24 - Exemplo de aplicações de SL já utilizadas pela indústria automobilística.

Fonte: http://www.ulsab.org/ulsab/image_library (acesso: 13/Ago/2006)

Quanto mais simples for a trajetória do cordão de solda, menos movimentos o robô deverá executar e mais fácil de controlar será o processo. A junção do Teto é uma das soldas mais difíceis de serem feitas por exigir movimentos não lineares em 3 dimensões. A figura 25 mostra um robô aplicando SL na junção da Longarina Dianteira. Apesar do movimento não ser

linear, os cordões de solda dessa região exigem movimentos em apenas 2 dimensões.



Figura 25 - Aplicação de SL na Longarina Dianteira.

Fonte: http://www.ulsab.org/ulsab/image_library (acesso: 13/Ago/2006)

Foram mostradas aplicações e exemplos de SL na Estrutura Superior e Estrutura Frontal. A figura 26 mostra exemplos de aplicação na Estrutura Inferior, especificamente a aplicação é no Assoalho Dianteiro na junção do Painel do Assoalho com a Extensão do Assoalho e também da Junção de Travessas.

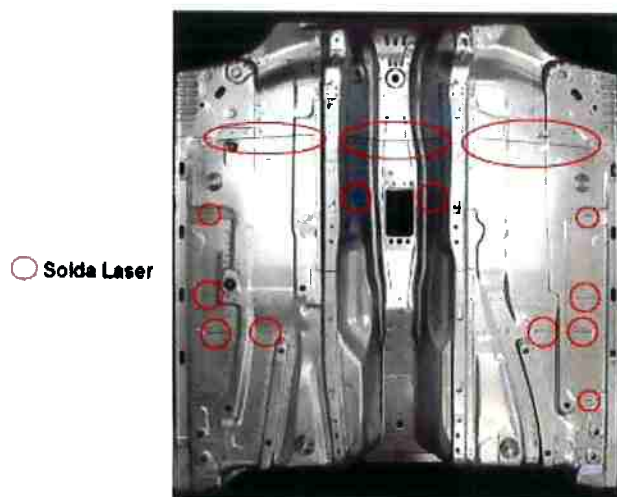


Figura 26 - Aplicação de SL no Assoalho Dianteiro.

Fonte: <http://www.steel.org/AM/Template> (acesso: 13/Ago/2006)

2.6 APLICAÇÕES POTENCIAIS FUTURAS

As junções com SL ainda possuem um potencial de aplicação grande e ainda inexplorados na construção de estruturas de carrocerias automotivas. O alto investimento envolvido é um dos fatores que no momento impossibilita a total substituição da SPRE pela SL.

Uma aplicação muito interessante foi estudado por Quintino & Vilaça & Rodrigues & Bordalo (2001), onde a aplicação de SL para fixação das dobradiças das portas foi usada para substituir as junções atuais que são por solda MIG ou parafusadas. As dobradiças por solda MIG resultam em muitas distorções além da aparência desagradável resultante, e a aplicação de parafusos possui um custo mais alto em relação às junções por solda, devido aos reforços requeridos para distribuir os esforços concentrados. Os testes para essa aplicação de durabilidade não funcionaram até o final, somente o teste de talhadeira obteve sucesso. Devemos esse resultado negativo à configuração usada de um cordão de solda por dobradiça, ver figura 27. O uso de dois cordões de solda provavelmente resultaria em um resultado satisfatório. Apesar do problema de acesso na aplicação do cordão de SL, esse experimento demonstrou-se muito útil para ser estudado em um veículo futuro, onde o problema de distorções e aparência do cordão seriam solucionados.

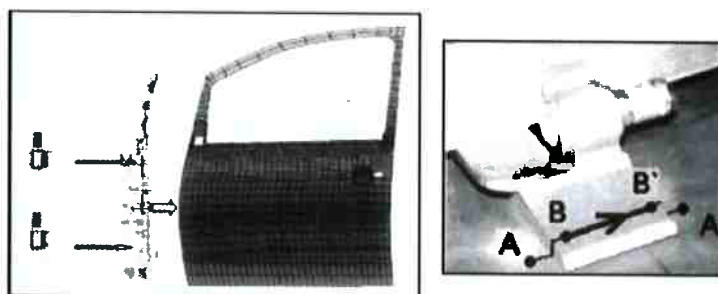


Figura 27 - Aplicação de SL em dobradiças de portas.

Fonte: Quintino & Vilaça & Rodrigues & Bordalo (2001)

Outra aplicação promissora é o uso do laser nas colunas e seus reforços. Essas regiões sofrem grandes solicitações, tanto esforços cíclicos ao longo da vida do carro, como esforços de resistência no caso de impactos. Wang & Ewing (1994) fizeram um experimento para testar a SL e SPRE na coluna B com a soleira da Lateral, onde a resistência à fadiga demonstrou-se maior com a SL, contanto que uma otimização do cordão de laser seja feita, ver figura 28. Isso mostra que, para a estrutura da carroceria em determinadas regiões, não basta apenas um simples cordão contínuo. A aplicação deve ser otimizada para melhor atender os esforços solicitantes e dessa forma melhorar a performance da estrutura. O estudo não verificou se a proposta possui resultados positivos para testes de impacto, para comprovar se essa otimização funciona para testes cíclicos e para testes de resistência.

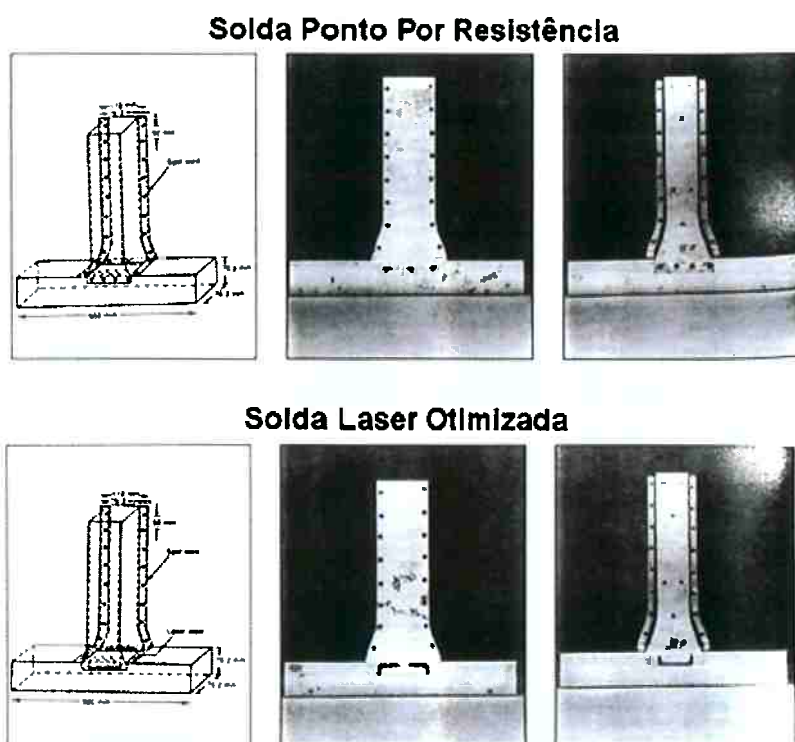


Figura 28 - Junção da Coluna B com a soleira da Lateral usando SPRE, e SL otimizada.

Fonte: Wang & Ewing (1994)

As aplicações mais interessantes nos dias de hoje são certamente feitas em regiões onde existem problemas de acesso, qualidade ou dimensionais.

Além dos exemplos anteriores, existem regiões onde a construção não permite um acesso robusto da pinça de SPRE. Em consequência disso, cordões de solda MIG ou adesivos estruturais são aplicados para efetuar essa junção. Um exemplo comum desse problema é a junção da Lateral com a Caixa de Rodas Traseiro, ver figura 29.

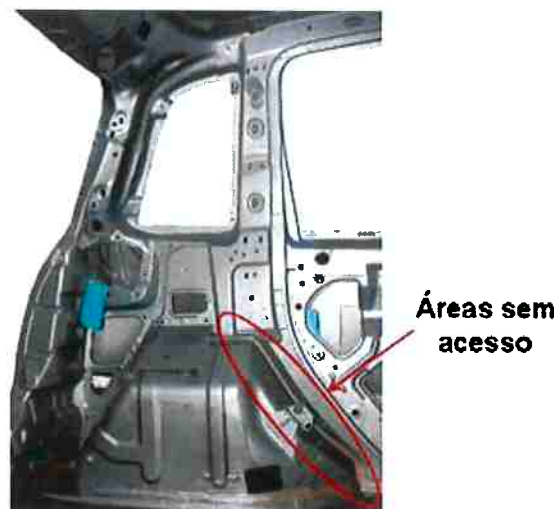


Figura 29 - Junção da Lateral com a Caixa de Rodas Traseiro.

Fonte: General Motors (2006)

A SL possui um potencial de aplicação interessante na junção da Lateral com o Assoalho, onde uma flange longitudinal entre eixos fica muitas vezes aparente para o consumidor. Em geral as montadoras ou mesmo concessionárias ou lojas de acessório vendem uma moldura plástica para essa região que ajuda a melhorar o efeito visual. A SL poderia ajudar nos problemas dimensionais gerados por esse tipo de construção, pois atualmente essa junção requer uma flange de topo, que não absorve eventuais variações dimensionais. Com a aplicação de laser essa flange passaria a ser sobreposta, e dessa forma eventuais desvios dimensionais seriam compensados, ver figura 30.



Figura 30 - Junção da Lateral com Assoalho.

Fonte: <http://www.ford.com.br> (acesso: 13/Ago/2006)

As aplicações mostradas são exemplos potenciais a serem explorados pela indústria automobilística. Vale lembrar que a construção e configuração podem variar de um veículo para outro, e também do tipo de veículo construído.

3 MODELOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA PARA JUNÇÕES DE SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA E POR LASER

Para substituímos o processo de SPRE por SL, devemos ter certeza que o processo novo é capaz de cumprir as funções do processo atual oferecendo um desempenho mínimo aceitável. Existem diversos estudos com diversos testes disponíveis que comparam ambos os processos, porém não existe uma padronização definitiva de testes e corpos de prova comparativos. Cada autor direciona o material para sua necessidade, e isso dificulta achar um modelo que melhor se adequa à necessidade desse trabalho, portanto nesse capítulo estaremos estudando materiais que melhor se encaixam às necessidades da indústria automobilística. Esse material será a base para os testes físicos.

3.1 TIPOS DE TESTES

Entre todos os testes existentes, o mais comum e mais usado por causa de sua simplicidade é o teste estático de cisalhamento por tração (*tensile-shear lap test*), usado para determinar a resistência da solda. Existem também os testes de arrancamento (*pull-out test*) e o arrancamento com flange (*coach peel test*). Esses três testes são os mais usados, podemos ver uma ilustração deles na figura 31.

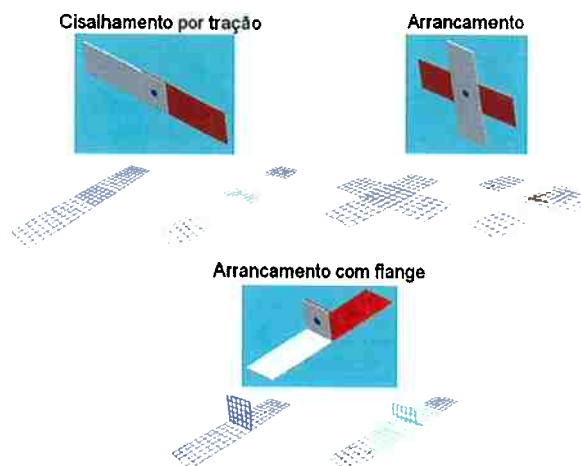


Figura 31 - Principais tipos de testes de SPRE.

Fonte: Langrand & Combescure (2004)

Cada teste avalia um tipo de carga isoladamente, o que na prática não acontece no ponto de solda, pois o mesmo sofre diversas cargas combinadas. Segundo Lee et al. (1998) negligenciar os efeitos de cargas combinadas poderá resultar em falhas prematuras nas regiões de solda por subestimar esse tipo de carga. As duas cargas mais importantes no ponto de solda são o cisalhamento causado por tração e o arrancamento (tração) causado pela força normal ao ponto. Na figura 32 podemos ver a carga máxima suportado em ambos os testes separadamente, e podemos ver que a carga de tração (arrancamento) é sempre menor que o de cisalhamento por volta de 20% ou mais.

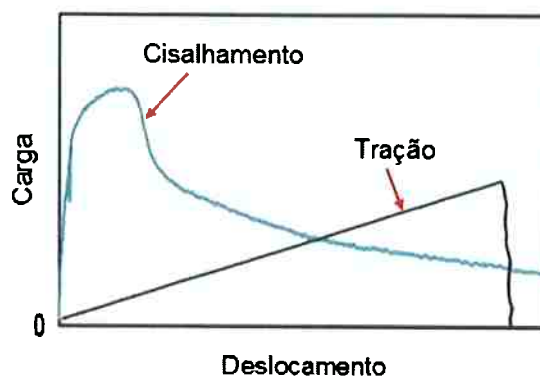


Figura 32 - Gráfico Descolamento x Carga para cisalhamento e tração.

Fonte: Lee et al (1998)

Em Langrand & Combescure (2004) é apresentado um modelo de teste com carga combinada de cisalhamento e tração, baseado em um teste de Arcan modificado, ver figura 33. O teste de Arcan consiste em construir um dispositivo que possibilite por meio de uma máquina de ensaios de tração, obter uma carga combinada de cisalhamento e tração ao mesmo tempo no ponto de junção dos corpos de prova, além e possibilitar um ajuste angular para termos diferentes configurações de testes. Podemos notar na figura 33 que na condição de 0° temos tração (arrancamento) puro e na condição de 90° temos cisalhamento puro. O teste de Arcan original apresenta um corpo de prova em forma de gravata, que é fixado por meio de parafusos diretamente no dispositivo. A modificação do teste consiste em mudar a região de fixação dos corpos de prova para teste de junções como a SPRE ou mesmo a SL. Não existe nenhum material publicado atualmente que execute teste com cargas combinadas em juntas com SL.

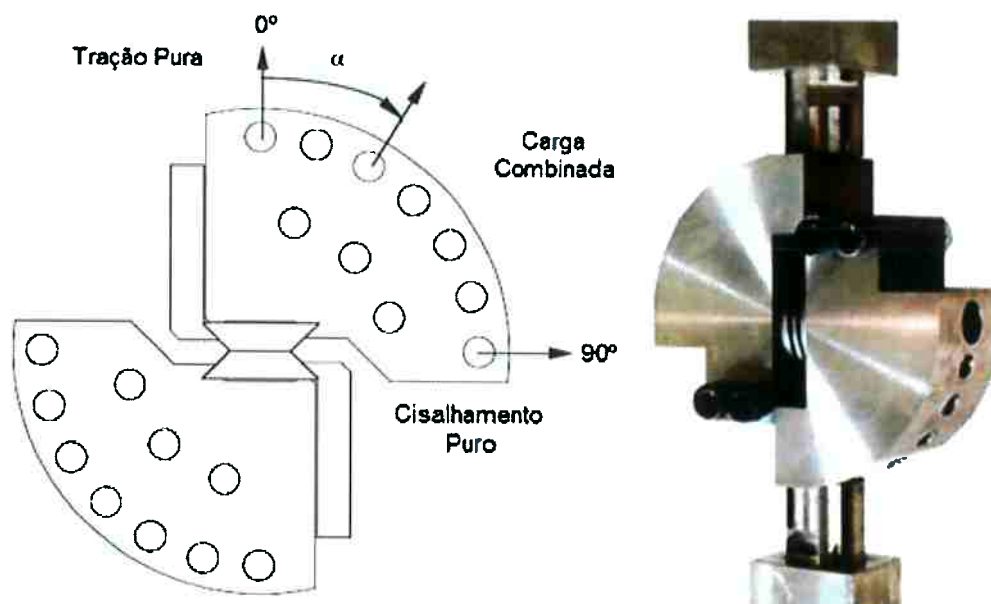


Figura 33 - Teste de Arcan.

Fonte: Langrand & Combescure (2004)

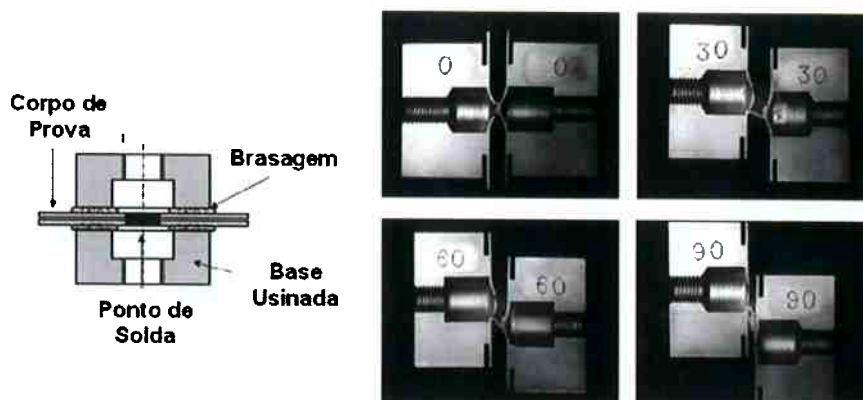
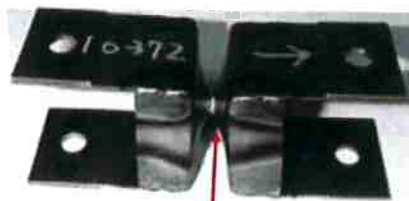


Figura 34 - Fixação do Corpo de Prova no Modelo de Langrand & Combescure.

Fonte: Langrand & Combescure (2004)

Dos modelos de testes apresentados atualmente para cargas combinadas, o de Langrand & Combescure (2004) foi o que melhor representou a resistência da junção em termos práticos, pois ele elimina eventuais problemas com dimensões de corpos de prova e mede efetivamente a resistência da junção. Na figura 34 são mostrados os resultados de diferentes configurações angulares de testes com a falha do ponto de solda. Mas o modelo apresenta problemas pois ele exige uma usinagem de uma base de fixação dos corpos de prova, que deve ser feito para cada teste e isso encarece o procedimento pois não existe o reaproveitamento da base. Existe também o problema da junção dos corpos de prova com a base usinada, que requer uma brasagem feita em um forno à aproximadamente 635°C (ver figura 34). O próprio autor explica que não foram investigados os efeitos da temperatura no ponto de solda.

Em Lin et al. (2002) foi apresentado um modelo de teste com cargas combinadas que elimina os problemas do modelo de Langrand & Combescure (2004), mas ele está sujeito a problemas com dimensões do corpo de provas. Porém o maior problema que esse modelo mostra é o corpo de prova do tipo copo-quadrado (*square-cup*) que recai no mesmo problema do modelo anterior de encarecer o teste pela complexidade de construção, ver figura 35.



Ponto de Solda

Figura 35 - Corpo de prova do modelo de teste de Lin.

(Fonte: Lin et al. (2002))

O modelo apresentado por Lee et al. (1998) possui um corpo de prova em formato “U”, muito mais simples para ser construído e apresenta resultado de teste similar aos demais modelos. Vale lembrar que ele também está sujeito a problemas de dimensões do corpo de provas como no modelo de Lin et al. (2002). Na figura 36 podemos ver o dispositivo e uma figura do corpo de provas.

Para esse trabalho o modelo de Lee et al. (1998) demonstrou ser mais adequado para uso como teste comparativo entre SPRE e SL, devido a maior simplicidade, qualidade dos resultados de teste e uso de cargas combinadas de cisalhamento e tração. É importante ressaltar que todos os modelos de testes de cargas combinadas são baseados no teste de Arcan modificados, sem o qual não seria possível a execução dos testes nas máquinas de ensaios de tração.

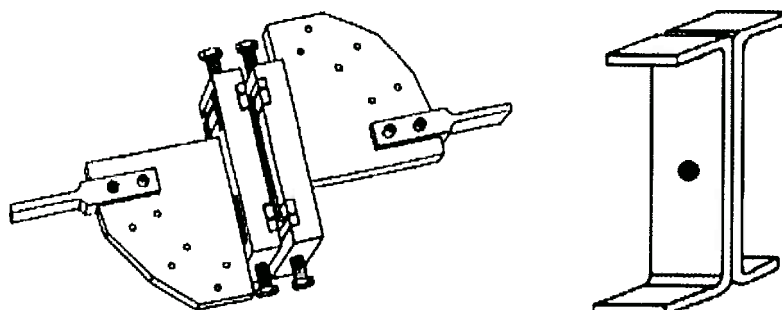


Figura 36 - Dispositivo e corpo de prova do modelo de Lee.

Fonte: Lee et al. (1998)

3.2 CORPO DE PROVA

Para todos os testes existentes para junção de chapas, não existe um padrão de dimensões que seja estabelecido como oficial a ser usado. Mesmo para o teste de cisalhamento por tração que é o mais usado atualmente, existem modelos de corpos de prova dimensionados apenas como referência por instituições como a AWS ou a ISO, ver figura 37.

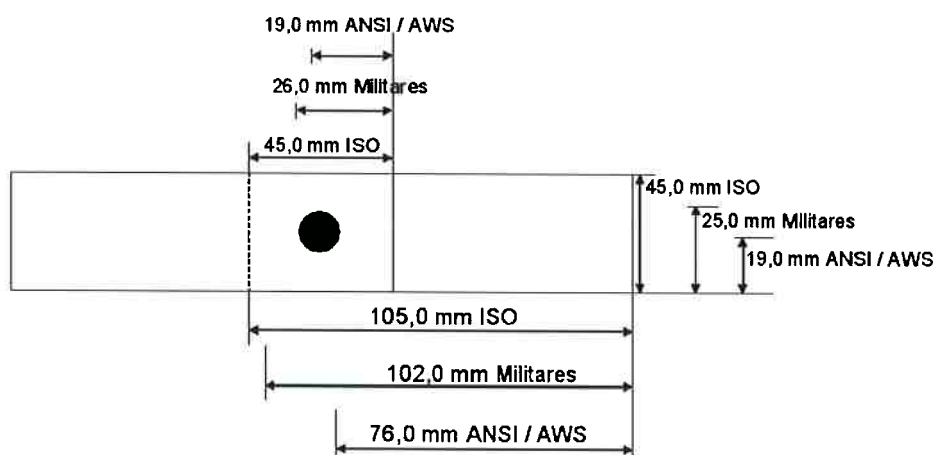


Figura 37 - Comparação das dimensões existentes de referência – corpos de prova para ensaio de tração.

Fonte: Zhou et al. (1999)

Conforme definido, o modelo a ser usado no trabalho é o teste de Lee et al (1998) que possui um corpo de prova para carga combinada em formato “U”. Como não existem muitos materiais a respeito de testes com cargas combinadas, é de se esperar que não exista uma padronização do teste e do corpo de prova.

Diversos autores reconhecem a importância das dimensões do corpo de prova nos resultados de testes. Estudos experimentais e analíticos tem sido conduzidos para determinar medidas críticas para testes de pontos de solda por resistência. Métodos estatísticos são empregados na fase de planejamento experimental para análise dos resultados, com um propósito genérico de achar

uma relação entre dimensões críticas e variáveis como dimensões geométricas e propriedades dos materiais dos corpos de prova. A largura do corpo de prova foi identificada como a mais influente segundo Zhou et al. (1999), e o comprimento como o menos significativo para o teste.

Zhou et al. (1999) desenvolveu um modelo para calcular a largura crítica de um corpo de prova, baseado em testes de cisalhamento por tração que apresentam maior resistência no ponto de solda. A figura 38 mostra os diferentes tipos de modos de falha de um ponto de solda. Os modos A e B não são desejáveis pois eles não testam a resistência da solda e sim as propriedades do material base. Os modos A e B acontecem porque a resistência do ponto de solda é maior que a resistência da configuração de espessura, largura e propriedades do material base do corpo de prova. O modelo de Zhou et al. (1999) tem o objetivo de eliminar os modos de falha tipo A e B, e dessa forma possibilitar o acontecimento apenas dos modos de falhas desejáveis relativos à resistência do ponto de solda (modos C, D e E). O modo de falha E é o ideal de acontecer pois com ele ocorre a ruptura total do ponto de solda na ZTA, a figura 39 mostra a configuração de um ponto de solda.

Para aços com baixo teor de carbono a fórmula proposta é:

$$L_{crítica} = 13,404 + (18,598 \times t) \quad (1)$$

Onde " $L_{crítica}$ " é a largura crítica e "t" é a espessura do material base.

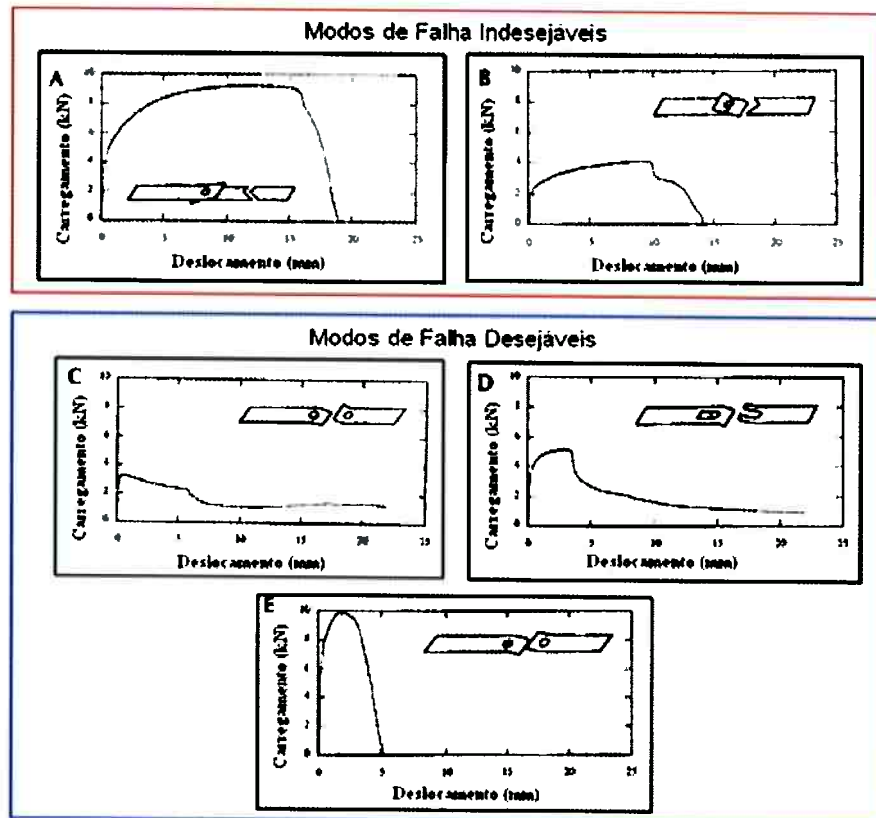


Figura 38 - Modos de falha de um ponto de solda.

Fonte: Zhou et al. (1999)



Figura 39 - Configuração de um ponto de solda.

Fonte: Ruiz, D. (2005)

As espessuras a serem usadas na comparação de SPRE e SL são 0,80 e 1,20 mm. Utilizando a fórmula (1) teremos as seguintes larguras críticas:

Para $t=0,80$, $L_{crítica} = 28,28$ mm

Para $t=1,20$, $L_{critica} = 35,72$ mm

Os valores calculados acima são mínimos, portanto será estabelecido o valor de largura de 55 mm para satisfazer todas as configurações de espessuras. O comprimento do corpo de prova será utilizado 90 mm, conforme foi mencionado. O comprimento é a dimensão que menos influi no teste, mas construtivamente ela é importante porque o formato de "U", caso seja estabelecido um comprimento relativamente pequeno, o mesmo poderá impossibilitar o acesso para o ponto de solda ou o cordão de laser.

3.3 EQUIVALÊNCIA DE SOLDA

Para haver uma troca eficaz do processo de SPRE pela SL é importante estabelecer um parâmetro de equivalência entre as junções, lembrando que a SL possui uma junção resultante em forma de uma linha contínua, ou cordão de solda como é chamado, similar às soldas MIG/MAG. Podemos citar dois métodos de equivalência de solda por resistência e SL, o primeiro é o método de equivalência por área, o segundo é o modelo de Wang de equivalência.

3.3.1 Equivalência por área

Os materiais disponíveis que comparam SL com SPRE usam o critério de equivalência de área para determinar o comprimento do cordão de SL. Para se fazer a equivalência devemos primeiramente calcular o diâmetro teórico do ponto de solda por resistência. Ruiz (2005) e Nakano (2005) propõem a seguinte fórmula para o cálculo do diâmetro do ponto de solda em relação à espessura:

$$D_{SPR} = a \times \sqrt{t} \quad (2)$$

Onde “ D_{SPR} ” é o diâmetro teórico do ponto de solda por resistência, “ a ” é um fator que varia de 3 à 6 e “ t ” é espessura da chapa mais fina da junção. Para chapas de baixo teor de carbono o valor de “ a ” pode ser adotado de 3 à 4, e para chapas de alta resistência esse valor sobe de 5 à 6. Para o trabalho será adotada a fórmula utilizada pela General Motors que é:

$$D_{SPR} = 4 \times \sqrt{t} \quad (3)$$

O D_{SPR} resultará na área do ponto de solda por resistência A_{PSR} . A área do cordão de SL A_{LS} deve ser igual a área do ponto de solda por resistência. Para isso devemos definir a largura do cordão de SL que pode variar de 0,8mm até 2,5mm dependendo da aplicação. Nas montadoras os valores mais usados são 1,2 mm ou 1,5 mm. Para o trabalho será adotado o valor de 1,2 mm. Com o valor da largura do cordão de laser basta fazer a equivalência de $A_{LS} = A_{PSR}$, definindo assim a única incógnita que temos que é o comprimento do cordão de laser.

Em Yang & Lee (1998) é apresentada uma comparação entre processos para resistência à fadiga usando a equivalência de solda através da área. O resultado final mostrou um desempenho melhor com a SL, porém o material não apresenta representatividade com as indústrias por não utilizar um cordão reto de SL e sim uma espécie de círculo de cordão de laser.

Em Wang & Ewing (1991) foi feita uma comparação com relação à fadiga mostrando o cordão de SL em duas disposições diferentes conforme mostra a figura 40, lembrando que o critério de equivalência de solda usado foi o de área. Na configuração A temos o cordão de laser perpendicular à carga, na configuração B o cordão de laser é paralelo à carga, e na configuração C temos a SPRE. O cordão de laser perpendicular apresentou 40% a mais de resistência à fadiga que a SPRE, o cordão paralelo apresentou 17% a mais de

resistência à fadiga que a SPRE. Com isso podemos afirmar que a configuração A (cordão de laser perpendicular à carga) é a mais adequada para o uso da SL.

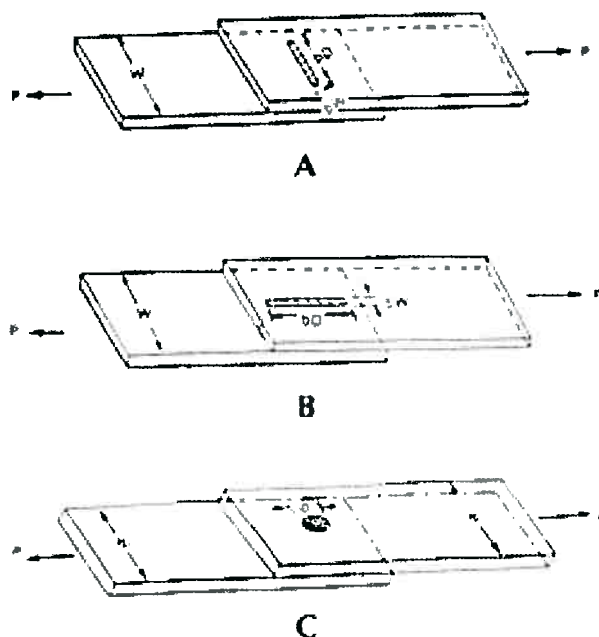


Figura 40 - Configurações de corpos de prova de Wang & Ewing.

Fonte: Wang & Ewing (1991)

É importante ressaltar que os resultados de comparação podem apresentar diferenças com relação à outros materiais, dependendo do tipo de solicitação e construção que a junção é submetida. Em Wang & Ewing (1994) é feita uma comparação com equivalência de solda por área, simulando uma aplicação de junção da coluna central com a soleira. Essa região é crítica pois sofre condições de cargas muito severas. O resultado do teste mostrou que com a SL apenas com um cordão reto e contínuo não seria suficiente para substituir a SPRE. O cordão de laser sofreu uma otimização para então superar a SPRE, deixando de ser apenas reto e contínuo para assumir um formato “U”, ver figura 28.

3.3.2 Equivalência de Wang

Em Wang (1993) um novo modelo de equivalência entre SPRE e SL é apresentado para aços com baixo teor de carbono. Nesse modelo a área da junção deixou de ser o principal ponto de equivalência, sendo o volume a base para comparações analíticas através de elementos finitos primeiramente, e testes físicos posteriormente. Como ponto de partida o modelo tem como base o volume da lentilha da SPRE e o volume do cordão de laser, a figura 41 mostra uma imagem das dimensões teóricas consideradas.

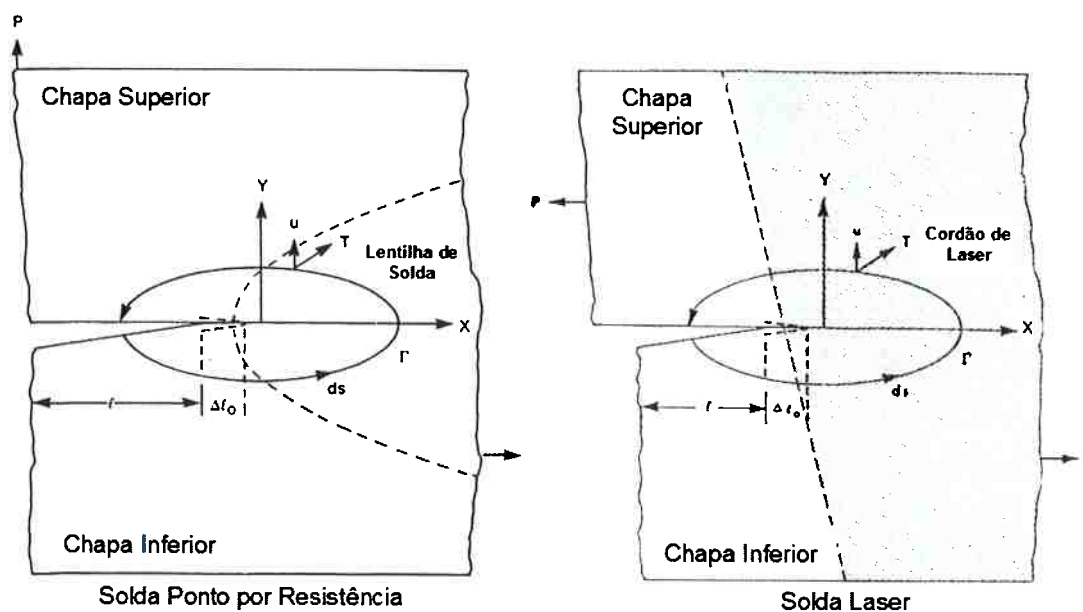


Figura 41 – Seções esquemáticas para cálculo de equivalência inicial por volume.

Fonte: Wang (1993)

O fator crítico para achar a equivalência segundo Wang (1993) é a resistência à fadiga. Os modelos foram feitos para dimensionar o cordão com base na espessura do material base e na largura do cordão de SL. A figura 42 mostra o gráfico resultante das análises.

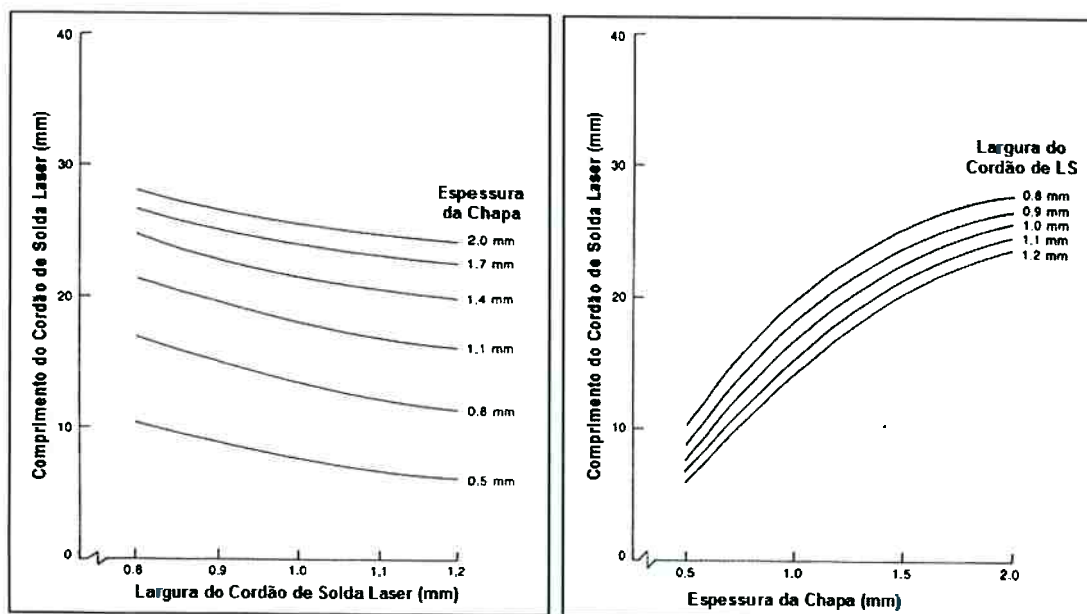


Figura 42 - Gráficos para equivalência de solda pelo modelo de Wang.

Fonte: Wang (1993)

Para facilitar a equivalência o autor publicou uma tabela com valores dos gráficos da figura 42 para medidas de chapas padronizadas de 0,5 à 2,0 mm e espessuras de cordão de laser de 0,8 à 1,20 mm. Sendo assim precisamos apenas indicar a espessura do cordão de laser e a espessura da chapa mais fina da junta a ser soldada, para que automaticamente tenhamos um valor de cordão equivalente a um ponto de solda por resistência. A tabela 1 mostra os valores da tabela de equivalência de Wang para espessuras a serem usadas no trabalho, ou seja, para chapas de 0,8 mm e 1,2 mm.

Tabela 1 - Tabela de equivalência de SPR e SL.

Espessura da Chapa (mm)	Largura do Cordão de LS (mm)	Largura do Cordão de LS (mm)
0,80	0,80	16,33
	9,00	14,56
	1,00	13,18
	1,10	11,94
1,20	0,80	21,83
	9,00	20,14
	1,00	18,77
	1,10	17,51
	1,20	16,45

Fonte: Wang (1993)

O maior problema do critério de Wang é a limitação das larguras de cordões de SL apresentadas, sendo o valor máximo de 1,2 mm e na prática podemos encontrar o valor de 1,5 mm muito usado na indústria automobilística, e até valores próximos à 2,5 mm de largura para outros usos na indústria. A limitação das espessuras de chapas também restringe esse modelo apesar do intervalo de espessuras de 0,5 à 2,0 mm representar a maior parte das chapas usadas na indústria automobilística.

3.3.3 Cálculo da equivalência

Conforme mencionado o critério para cálculo do diâmetro teórico de SPRE será a equação (3) usado pela General Motors. A tabela 2 mostra o valor calculado do diâmetro teórico do ponto de solda para chapas de 0,8 mm e 1,2 mm. A tabela 2 também possui a equivalência do cordão de SL para os critérios de área e Wang, lembrando que a largura do cordão de SL adotado é de 1,2 mm.

Tabela 2 - Cálculo da equivalência de SPRE versus SL.

EQUIVALÊNCIA DA LENTILHA DE SPR E O CORDÃO DE SL				
Espessura (mm)	Diâmetro da Lentilha (mm)	Solda Ponto Área da Lentilha (mm ²)	Critério por Área Solda Laser Comprimento do Cordão (mm)	Critério de Wang Solda Laser Comprimento do Cordão (mm)
0,8	3,578	10,053	8,378	10,930
1,2	4,382	15,080	12,566	16,450

Podemos notar que os valores do cordão de SL pelo critério de Wang foram maiores que os valores do critério por área. Isso na prática indica que o modelo de Wang é um primeiro passo para uma equivalência de junção robusta e com uma base científica. Os especialistas em SL na indústria não recomendam usar simplesmente o valor resultante do critério por área, por que na prática esse tipo de equivalência mostrou-se insuficiente, porém não existe

uma padronização de junção usada e o valor da equivalência vai depender da experiência de capa especialista. Podemos concluir que o valor recomendado para uso deve ser maior que o valor do critério por área, por esse motivo os valores indicados na tabela 2 do critério Wang serão usados no trabalho para comparação de SPRE e SL.

3.4 DOE (DESIGN OF EXPERIMENT)

Para ajudar na definição do número de combinações nas análises, foi feito um plano de testes baseado no *Design Of Experiments* (DOE) para facilitar a visualização e as combinações necessárias.

A tabela 3 mostra a matriz de DOE para o experimento.

Tabela 3 - Matriz de DOE para testes de comparação entre SPRE e SL.

Configuração Número	Tipo de Solda	Espessura	0°	15°	30°	45°	60°	90°
1	1	1	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C
2	1	2	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C
3	2	1	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C
4	2	2	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C

Para o tipo de solda teremos:

1 = SPRE;

2= SL.

Nas espessuras:

1 = 0,80 mm;

2= 1,20 mm.

A matriz resultou em quatro combinações de corpos de prova com seis configurações de ângulos de ensaios (0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 90°). Para cada

combinação de corpo de prova e uma configuração de teste temos três repetições representadas pelas letras "A", "B" e "C" que foram usadas no teste físico, para nos certificarmos que problemas relativos ao processo de junção não foram incluídos na coleta de dados. No total foram feitos 72 testes.

3.5 ANÁLISE DE TENSÕES E ESFORÇOS

Nas análises de tensões e esforços é mostrado os modelos que estudam o cisalhamento e a tração (arrancamento) da junção separadamente, e em seguida os modelos com efeito simultâneo e combinado dos esforços. Os materiais existentes de modelos de tensões por enquanto só existem para SPRE, portanto não foi apresentado um modelo com SL.

3.5.1 Cisalhamento por esforço de tração

Nas análises de cisalhamentos por esforços de tração vamos apresentar dois modelos de análise de tensões e esforços ou cargas de falha. O primeiro será o modelo clássico de VandenBossche, e o segundo será o modelo de Chao.

Antes de estudar os modelos é importante entender como a junção, que no caso é um ponto de solda por resistência, se comporta durante a carga inicial até a sua falha. Foi apresentado conforme figura 38 que o modo de falha tipo E é o ideal para um ponto de solda, pois toda a ruptura da junção ocorre na ZTA. Na figura 43 são mostradas as etapas da carga na junção.

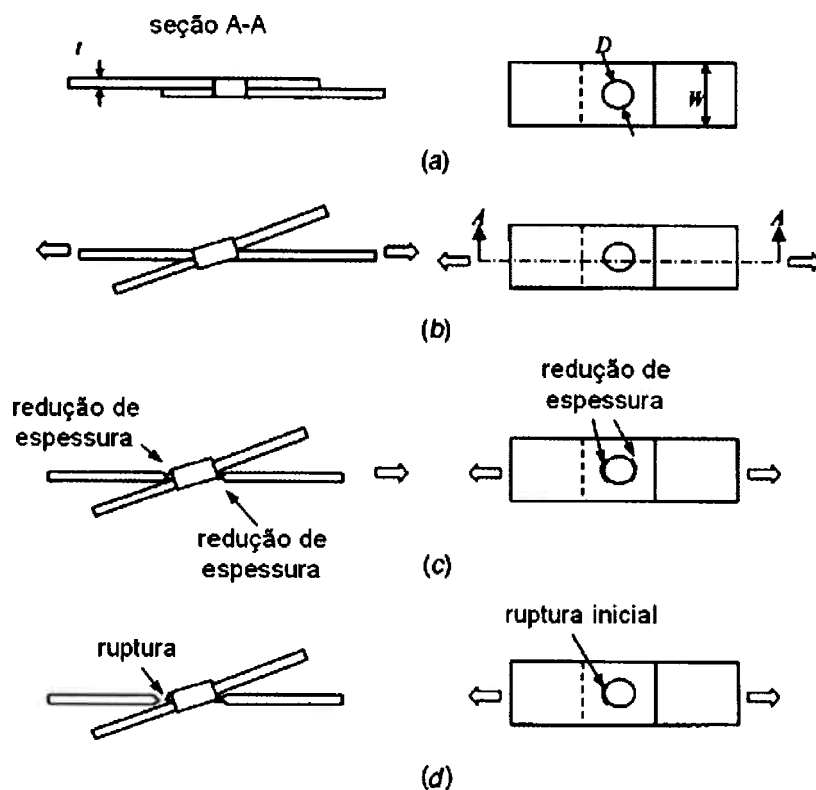


Figura 43 - Etapas da aplicação de carga de um teste de cisalhamento por tração.

Fonte: Chao (2003)

Na etapa "a" os corpos de prova não possuem carga. Logo em seguida em "b" a carga começa a ser aplicada e ocorre o fenômeno da rótula plástica que será explicado posteriormente. Em "c" ocorrem reduções de espessuras na ZTA principalmente na direção da carga, caracterizando a proximidade da falha. Na fase "d" ocorre o início da falha.

O fenômeno da rótula plástica ocorre devido ao desalinhamento das chapas na direção da carga aplicada. Apesar do desalinhamento ser muito pequeno, podemos ver na figura 44 que ele é suficiente para provocar um momento fletor que deforma os corpos de prova e resulta no ângulo α para forçar um alinhamento dos esforços.

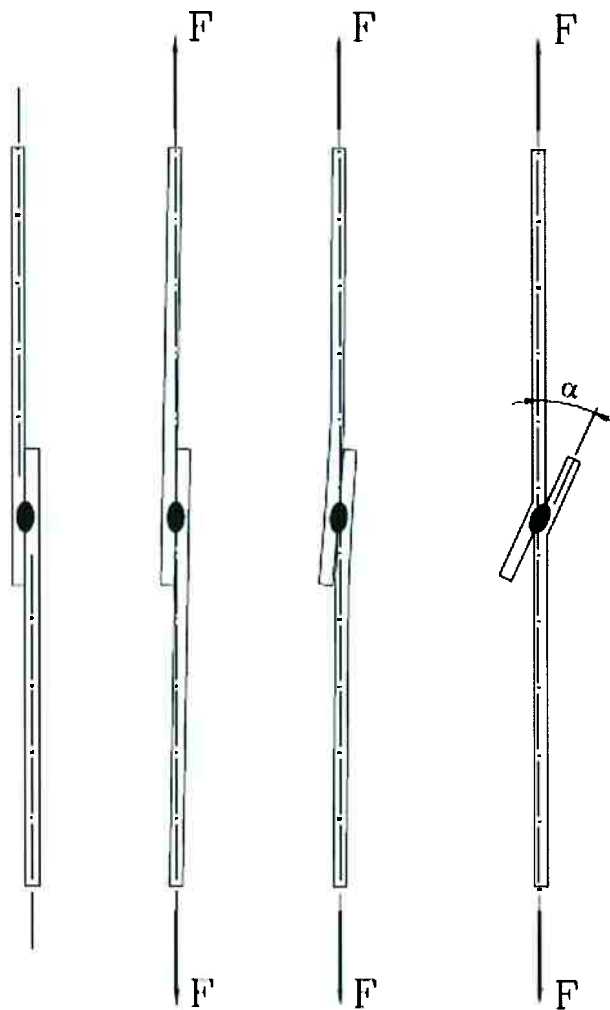


Figura 44 - Formação da rótula plástica.

Fonte: Nakano (2005)

Em VandenBossche (1977) é estudado um modelo de falha na interface da junção. É importante observar que o modelo parte do princípio que o efeito da deformação plástica já resultou na rotação do ponto de solda, causada pela formação da rótula plástica. Com a formação da rótula plástica apenas tensões de tração e cisalhamento estão atuando, ver figura 45.

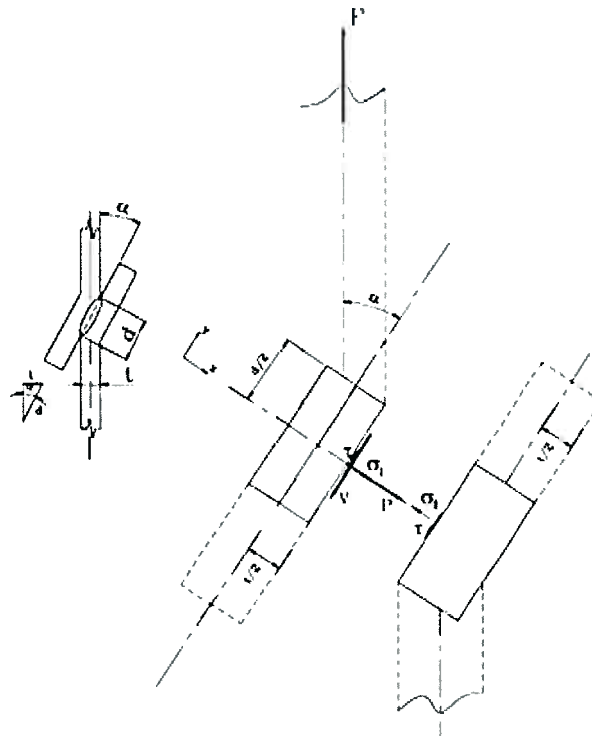


Figura 45 - Tensões e cargas na interface do ponto de solda.

Fonte: Nakano (2005)

O esforço atuante pode ser decomposto em duas direções, uma normal ao ponto que chamaremos de P , e outra a carga de cisalhamento V dadas por:

$$P = F \times \text{sen}(\alpha) \quad (4)$$

$$V = F \times \text{cos}(\alpha) \quad (5)$$

Sendo:

$$\alpha = \text{arcsen}\left(\frac{t}{d}\right) \quad (6)$$

Como o modelo apresenta tensões de cisalhamento atuando juntamente com tensões de tração, VandenBossche utilizou a teoria da tensão equivalente de Huber-von Mises.

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma^2 + 3 \times \tau^2)} \quad (7)$$

Onde σ_e é a tensão equivalente, σ é a tensão de tração atuando na interface do ponto de solda e τ é a tensão de cisalhamento atuando na interface do ponto de solda.

A fórmula final para cálculo da tensão equivalente na interface do ponto de solda fica:

$$\sigma_{eINT} = \frac{3 \times S_{yMB} \times w \times t}{2 \times d^2} \quad (8)$$

Onde σ_{eINT} é a tensão equivalente na interface do ponto de solda, S_{yMB} é a tensão de escoamento do metal base, w é a largura do corpo de prova, t a espessura e d é o diâmetro do ponto de solda.

VandenBossche também desenvolveu um modelo de falha para tensões na ZTA, onde as tensões e cargas são mostrados na figura 46. Como também existem tensões de tração e cisalhamento a teoria da tensão equivalente de Huber-von Mises foi utilizada nesse modelo, fórmula (7). A fórmula final para o cálculo da tensão equivalente na ZTA do ponto de solda é:

$$\sigma_{eZTA} = \left(\frac{S_{yMB} \times w \times t}{2 \times d^2} \right) \times \left(\frac{d}{t} + \frac{1}{2} \right) \quad (9)$$

Onde σ_{eZTA} é a tensão equivalente na ZTA do ponto de solda.

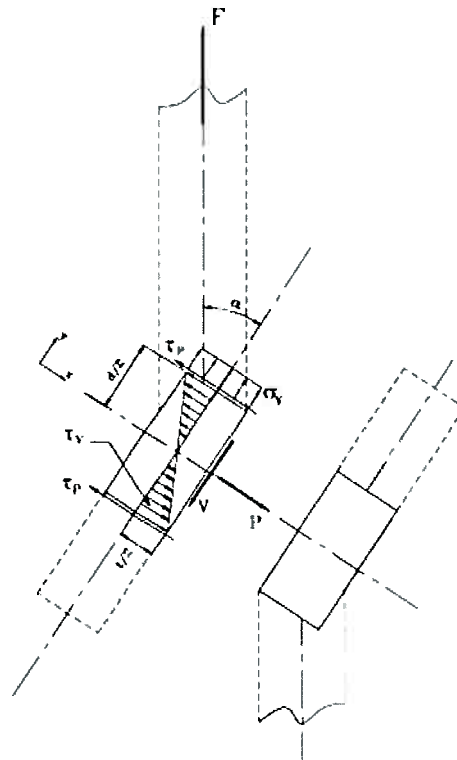


Figura 46 - Tensões e cargas na ZTA do ponto de solda.

Fonte: Nakano (2005)

O modelo de Chao (2003) estuda apenas as tensões e o modo de falha na ZTA. Devido à complexidade existente nas variáveis envolvidas Chao não estudou um modelo para tensões e modo de falha na interface do ponto de solda, considerando no modelo o ponto de solda como um cilindro rígido. Vale lembrar que a falha na interface classifica o ponto de solda como ruim, sendo assim estudar a interface do ponto de solda não é considerado como uma prioridade. A figura 47 mostra as tensões e esforços considerados no modelo de Chao para ensaios de cisalhamento por esforço de tração.

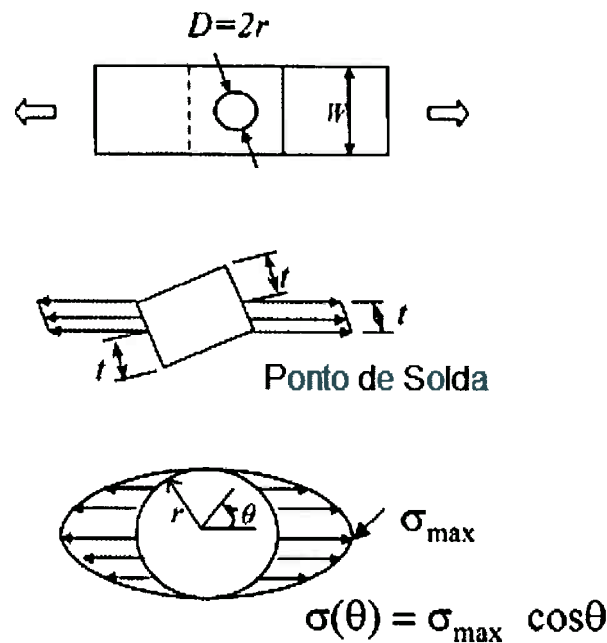


Figura 47 - Tensões e esforços no cisalhamento por esforço de tração.

Fonte: Chao (2003)

É importante notar que a tensão máxima fica no centro do ponto de solda, na direção da carga aplicada. Como o modelo considera o ponto de solda como um corpo rígido a falha ocorre por tensões de tração entre o ponto de solda e a ZTA. A fórmula abaixo mostra o modelo de Chao:

$$\sigma_f = \frac{P_f}{0,785 \times t \times d} \quad (10)$$

Onde σ_f é a tensão de falha do ponto de solda, P_f a carga de falha do ponto de solda, t é a espessura do material base e d é o diâmetro do ponto de solda. Falha nesse caso quer dizer tensão ou esforço máximo (ou de pico) suportado pela junção.

3.5.2 Tração (arrancamento)

No modelo de Chao para teste de tração ou arrancamento, foi estudado o teste com os corpos de prova dispostos perpendicularmente entre si, formando uma espécie de “cruz” com dimensões iguais. Esse modelo considera apenas as tensões e modo de falha na ZTA pelos mesmos motivos do modelo de cisalhamento por tração, e o ponto de solda é considerado como um cilindro de corpo rígido. A figura 48 mostra as etapas de aplicação da carga até a falha do ponto de solda.

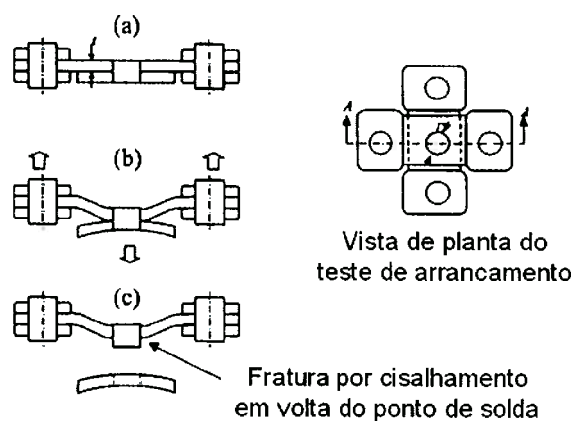


Figura 48 - Etapas da aplicação de carga de um teste de arrancamento.

Fonte: Chao (2003)

Na etapa “a” os corpos de prova não possuem carga. Na etapa “b” os corpos de prova sofrem a aplicação de carga e ocorre a deformação de ambos. Em “c” é representada a falha, que nesse teste é caracterizada pelo destacamento na região da ZTA do ponto de solda em uma das chapas. A figura 49 mostra as tensões atuantes do ponto de solda.

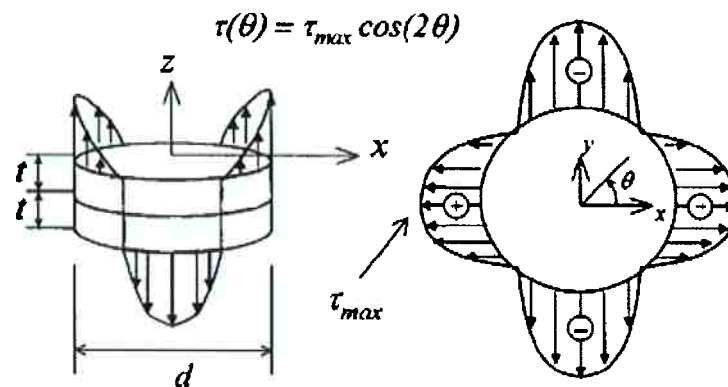


Figura 49 - Tensões e esforços no teste de arrancamento.

Fonte: Chao (2003)

É importante notar que o ponto de solda sofre esforços e tensões de tração, porém no modelo ele é considerado um corpo rígido, e como a falha ocorre na ZTA os esforços e tensões atuantes na falha da junção são de cisalhamento. Existem quatro picos de tensão máxima, sendo duas na chapa superior e duas na inferior, sempre na posição central ao ponto de solda e na direção da carga.

A fórmula abaixo mostra o modelo de Chao para cálculo da tensão de cisalhamento no teste de arrancamento:

$$\tau_f = \frac{P_f}{t \times d} \quad (11)$$

Onde τ_f é a tensão de falha do ponto de solda, P_f a carga de falha do ponto de solda, t é a espessura do material base e d é o diâmetro do ponto de solda. Falha nesse caso quer dizer tensão ou esforço máximo (ou de pico) suportado pela junção.

3.5.3 Esforços combinados de Cisalhamento e Tração (arrancamento)

Para esforços combinados será mostrado dois modelos analíticos, o de Lin para esforços relativos e o de Chao para tensões. Ambos os modelos focam o estudo de esforços e tensões na ZTA por motivos previamente explicados, e o critério de Von Mises foi empregado devido à atuação simultânea de tensões de tração e cisalhamento. Testes com cargas combinadas ainda são muito difíceis de serem estudados e por esse motivo existe pouco material disponível sobre o assunto.

Em Lin et al. (2003) o modelo de elementos finitos revelou que existe uma grande diferença de tensão em volta do ponto de solda, sendo a área de maior tensão a porção de 50% no sentido da aplicação de carga, como mostra a figura 50 onde a área mais escura mostra tensões maiores.

No modelo de Lin todos os esforços e momentos foram previamente considerados para construção da análise, ver figura 51.



Figura 50 - Análise de tensões em volta do ponto de solda.

Fonte: Lin et al. (2003)

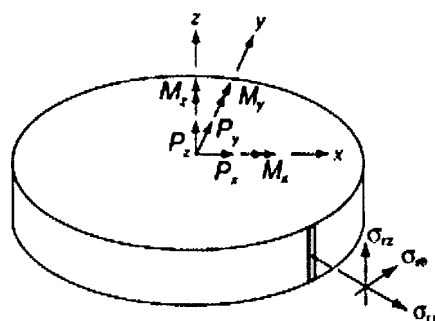


Figura 51 - Forças e momentos atuantes em cargas combinadas.

Fonte: Lin et al. (2003)

Lin a princípio chegou em um modelo altamente complexo que abrange diferentes combinações e direções de cargas, o que gera esforços em condições diferentes aos encontrados nos ensaios físicos. Para facilitar os estudos o autor propõe dois modelos sendo um geral e o outro simplificado onde as forças atuantes são P_x , P_z , M_x e M_y . P_x é a carga de cisalhamento por tração e P_z é a carga de tração (arrancamento). Para as fórmulas simplificadas é considerado $P_y = 0$ e $M_z = 0$.

O primeiro modelo com uma fórmula geral é:

$$\frac{1}{3} \times \left(K_{Pxy} \times \bar{P}_x \right)^2 + \left[\alpha \bar{P}_z + K_{Pxy} \times \bar{P}_x \left(\frac{4 \times t}{\pi \times d} \right) \right]^2 + \left[(1 - \alpha) \bar{P}_z \right]^2 = 1 \quad (12)$$

Onde:

t é a espessura da chapa e d o diâmetro do ponto de solda.

K_{Pxy} é um fator de correção com o valor de 1,11 para aços de baixo carbono.

$\bar{P}_x = \frac{P_x}{P_{m\acute{a}x}}$, onde $P_{m\acute{a}x}$ é a carga máximo até a falha em um teste uniaxial de tração (arrancamento).

$$\bar{P}_z = \frac{P_z}{P_{máx}}, \text{ onde } P_{máx} \text{ é a carga máxima até a falha em um teste uniaxial}$$

de tração (arrancamento).

$$\alpha = \frac{P}{P_z}, \text{ onde } P \text{ é a carga resultante aplicada no corpo de prova, sendo}$$

assim $\alpha = 1$ para um teste uniaxial de arrancamento ou $\alpha = 0,5$ para um teste com cargas de cisalhamento e tração com valores iguais.

O segundo modelo com a fórmula geral simplificada é:

$$(1 - 2\alpha + 2\alpha^2) \bar{P}_z^2 + \left[\frac{1}{3} + \left(\frac{4 \times t}{\pi \times d} \right)^2 \right] \times \left(K_{p_{xy}} \times \bar{P}_x \right)^2 = 1 \quad (13)$$

O valor de $K_{p_{xy}}$ nesse caso muda para 1,25, o restante dos componentes da fórmula são exatamente os mesmos que a fórmula geral (12).

A complexidade do modelo resultou nas fórmulas (12) e (13). Para cada aplicação deve ser estudado o modelo que melhor se encaixa, pois o autor não deixa claro a relação do primeiro modelo com o segundo. Lin recomenda que seja usado primeiramente a fórmula simplificada (13) para eventuais estudos em chapas de baixo carbono. Caso os dados obtidos apresentem resultados divergentes é necessário partir para a fórmula (12). A figura 52 mostra uma comparação entre ambos.

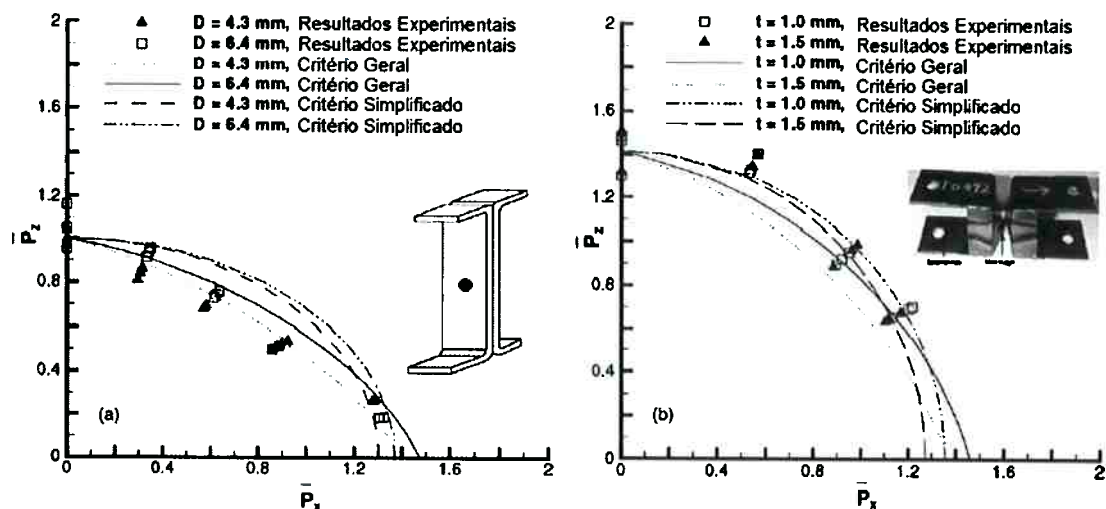


Figura 52 - Comparação entre o modelo geral e o simplificado de Lin.

Fonte: Lin et al. (2003)

Para testar a aplicação do modelo foram usados os dados obtidos em experimentos de Lee et al. (1998) com o corpo de prova em forma de “U” e o de Lin et al. (2002) com o corpo de provas do tipo copo-quadrado. Para os dados obtidos no teste de Lee et al. (1998) o modelo geral foi o que melhor representou os resultados, sendo assim a fórmula (12) é a recomendada para esse modelo de teste. Já para os resultados no teste de Lin et al. (2002) o modelo simplificado saiu-se melhor sendo então recomendada a fórmula (13) para esse modelo de teste.

Para o modelo de Chao são apresentadas duas fórmulas para o cálculo de tensões, cada uma usa um critério para equivalência devido a atuação de esforços e tensões de cisalhamento e tração.

$$\sigma_f = \sqrt{1,623 \left(\frac{Px}{t \times d} \right)^2 + 3 \left(\frac{Pz}{t \times d} \right)^2} \quad (\text{Von Mises}) \quad (14)$$

$$\sigma_f = \sqrt{1,623 \left(\frac{Px}{t \times d} \right)^2 + 4 \left(\frac{Pz}{t \times d} \right)^2} \quad (\text{Tresca}) \quad (15)$$

Onde σ_f é a tensão de ruptura, P_x a carga de cisalhamento, e P_z a carga de tração (arrancamento), t é a espessura da chapa e d é o diâmetro do ponto de solda. A fórmula (14) usa o critério de Von Mises para equivalência enquanto a fórmula (15) usa Tresca.

3.6 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Para modelagem dos corpos de prova para análise de elementos finitos, os elementos usados foram superfícies com malhas quadráticas de 4 mm. Os modelos em 3D foram feitos com o software *Unigraphics NX3*, utilizando uma estação *HP Workstation 8200* com sistema operacional *Windows XP*. O pré-processador utilizado foi o *Hypermesh 7.0*, o processador utilizado foi o *LS-DYNA 970* e o pós-processador foi o *LS-PREPOST 2.0*, calculado em uma estação *HP Workstation 8200* com sistema operacional *Windows XP*. Foram utilizados equipamentos e instalações da General Motors do Brasil no Centro Tecnológico de São Caetano do Sul.

Em Nakano (2005) e em Wang et al. (2006) são apresentados modelos com malhas muito bem refinadas para estudar as propriedades dos pontos de solda, deixando o modelo muito complexo. Em Combescure et al. (2003) e Langrand & Combescure (2004) são apresentados modelos mais simples utilizando uma mola com comportamento não linear. Tais modos apresentaram respostas satisfatórias para efeito comparativo com testes físicos, e não foram modelados os efeitos das diferentes propriedades do material base, sua zona termicamente afetada e o ponto de solda ou cordão de laser.

Para representar o ponto de solda foi usado elemento de barra com seção circular sólida, com o diâmetro correspondente à espessura do corpo de prova de 0,80 mm e 1,20 mm (ver tabela 2 do capítulo 3) e o elemento foi configurado para ter 244 MPa de limite de escoamento. Para representar o cordão de SL foram utilizados diversos elementos de barra com diâmetro 1,2

mm lado a lado, para representar o comprimento do cordão eles foram espaçados entre si em no mínimo 0,1 mm até atingir o valor do comprimento estipulado na tabela 2 do capítulo 3, ver figura 53.

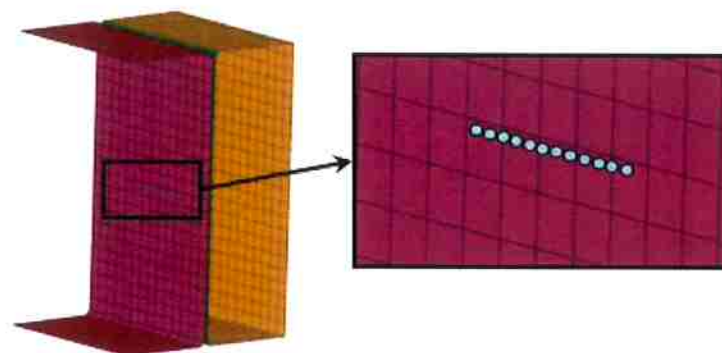


Figura 53 - Modelo de cordão de SL com elementos de barra.

As partes dos corpos de prova que são fixadas no dispositivo de teste e que supostamente não sofreriam deformação foram feitas em elementos rígidos, ver figura 54. O material utilizado foi o EMS.ME.1508 BFF EEP, com 170 MPa de limite de escoamento.

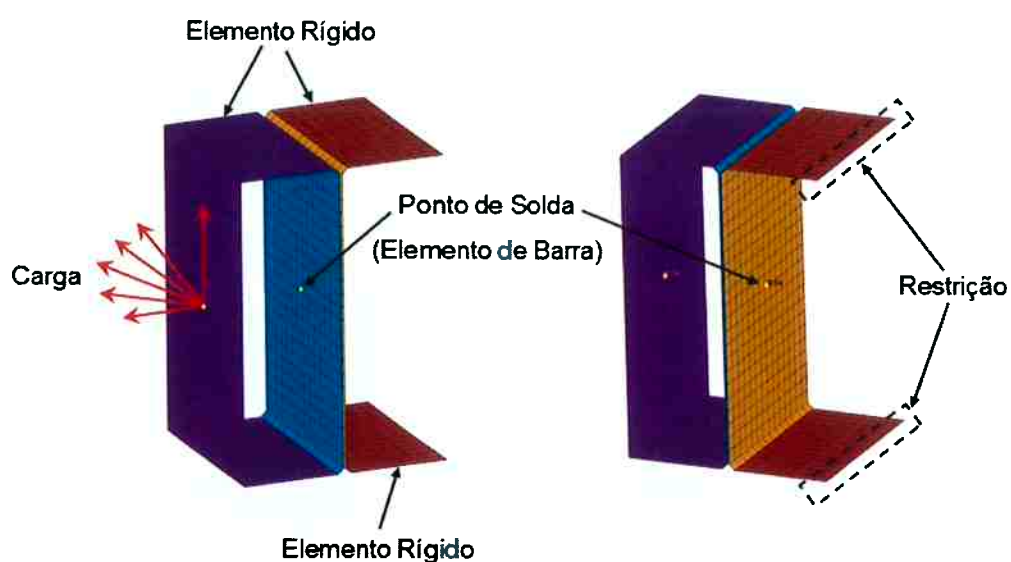


Figura 54 - Modelo de elementos finitos do corpo de prova.

Para representar a máquina de ensaios de tração, um dos corpos de prova da junta teve os elementos rígidos colocados com restrições, representando a parte fixa da máquina. O outro corpo de prova, representando a parte móvel, teve os elementos rígidos ligados entre si por um terceiro elemento, e a carga de teste foi aplicada em um ponto central com as variações angulares de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 90°. A tabela 4 possui o resumo de toda a configuração usada na modelagem.

Tabela 4 - Dados do modelo de elementos finitos do corpo de prova.

Tipo de Elemento	Superfície
Tipo de Malha	Quadrática
Dimensão da Malha	4 x 4 mm
Material	EMS.ME.1508 BFF, EEP - limite de escoamento 170 MPa
Espessura	0,8 mm e 1,2 mm
Solda Ponto	Elementos de barra com seção circular sólida com \varnothing 3,578 mm para espessura de 0,8 mm e \varnothing 4,382 para chapas de 1,2 mm - limite de escoamento 244 MPa
Solda Laser	Elementos de barra com seção circular sólida com \varnothing 1,2 mm espaçados entre si em 0,1 mm mínimo. Para chapa de 0,8 mm foram usados 9 elementos e para chapa de 1,2 mm foram usados 12 elementos - limite de escoamento 244 MPa
Velocidade de deslocamento	0,5 m/s ou 30.000 mm/min
Pré-Processador	Hypermesh 7.0
Processador	LS-DYNA 970
Pós-Processador	LS-PREPOST 2.0

Um limitante do modelo foi a velocidade de deslocamento de teste 0,5 m/s ou 30.000 mm/min, fora da recomendado por Lin et al. (2003) e Lee et al. (1998) de 5 mm/minuto para obedecer o critério de “condição quase estática”. Esse critério não foi respeitado devido a quantidade de modelos a serem analisados e os recursos disponíveis para estudos.

4 SOLDA LASER VERSUS SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA – TESTE FÍSICO

No capítulo anterior foram definidos os parâmetros e características necessárias para execução dos testes físicos. Será necessário definir o projeto do dispositivo e do corpo de provas para ser usado nos ensaios de tração adaptado para executar o teste de Arcan.

4.1 JUNTA METÁLICA DE TESTE

Conforme foi visto no capítulo 3 o corpo de prova possui um formato “U” e configuração e dimensões conforme figura 55 abaixo. Para a formação da junta metálica foram utilizados 2 corpos de prova sendo sua união feita por SPRE ou cordão de SL. A medida de 90 mm foi controlada na parte interna do formato “U”, pois essa região é montada no dispositivo.

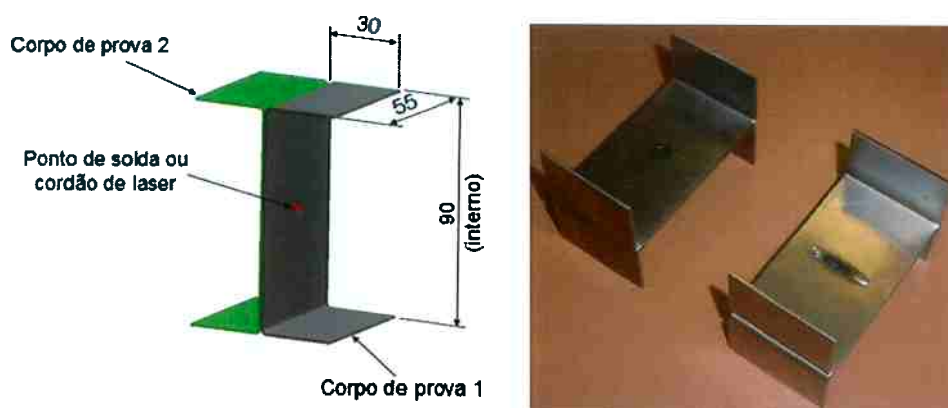


Figura 55 - Junta metálica de teste.

O material utilizado é o EMS.ME.1508 BFF EEP, que é um aço comum sem revestimento utilizado na indústria automotiva, com as espessuras de 0,80 e 1,20 mm. A configuração de ponto de solda e do cordão de laser é mostrada

na tabela 2 do capítulo 3, lembrando que o critério de equivalência utilizado foi o de Wang.

Para a SPRE foi utilizada uma MSPP tipo "C", ver figura 56, instalada em um TSP *Roman* de 170 kVA de potência. A tabela 5 mostra os parâmetros utilizados na SPRE.



Figura 56 - MSPP tipo "C".

Fonte: Ruiz, D. (2005)

Tabela 5 - Parâmetros usados para SPRE.

Corpo de Prova (mm)	Pré-Solda		Solda		Pós-Solda		Retenção (ms)	Força dos Eletrodos (kN)
	Corrente (kA)	Tempo (ms)	Corrente (kA)	Tempo (ms)	Corrente (kA)	Tempo (ms)		
0,8	2,90	20	8,70	161	0	0	133	2,3
1,2	3,00	20	9,00	220	0	0	167	2,3

Para SL foi utilizada uma máquina *Trulaser Weld 3010* com 2 kW de potência, com laser Nd:YAG, utilizando o gás inerte argônio. Todos os corpos de prova foram construídos na Engenharia Experimental da General Motors do Brasil em São Caetano do Sul, com exceção da SL que foi feita na empresa *Masipack* em São Bernardo do Campo. A tabela 6 mostra os parâmetros usados na SL.

Tabela 6 - Parâmetros usados para SL.

Corpo de Prova	Potência (kW)	Velocidade (m/min)	Fluxo de Gás (L/min)
0,8	2,00	2,50	30,00
1,2	2,00	1,50	30,00

4.2 DISPOSITIVO DE ARCAN

Para que o teste seja bem sucedido, o dispositivo deve ser projetado para acomodar os corpos de prova, resistir às solicitações e prover flexibilidade para a combinação de ângulos. O dispositivo proposto foi baseado nos ensaios de Lee et al. (1998), ver figura 57.

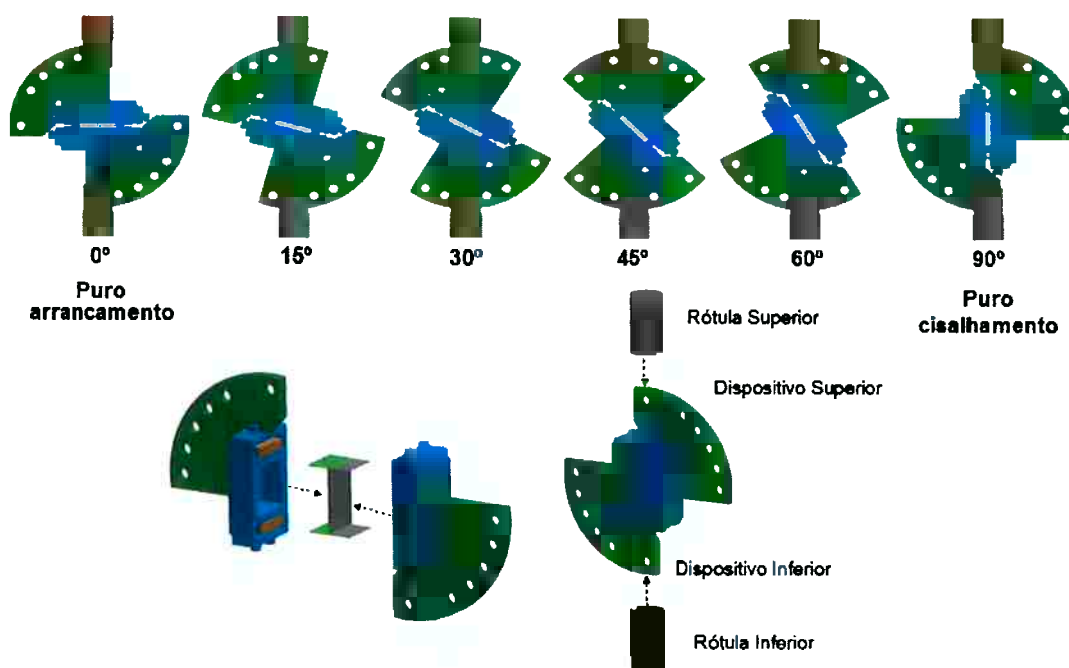


Figura 57 - Dispositivo de Arcan.

É importante verificar que a rótula de fixação possui um eixo vertical alinhado, correspondente à máquina de ensaios de tração. É necessário a construção de dois dispositivos para fixar a junta metálica, e as mesmas devem permitir um ajuste para pequenos desvios dimensionais nos corpos de prova.

Para verificação do dispositivo foi efetuada uma análise de elementos finitos do modelo 3D para evitar possíveis problemas construtivos e melhorar possíveis regiões com concentrações de tensões acima do esperado, conforme figura 58. A análise foi feita no Centro Tecnológico da General Motors do Brasil em São Caetano do Sul.

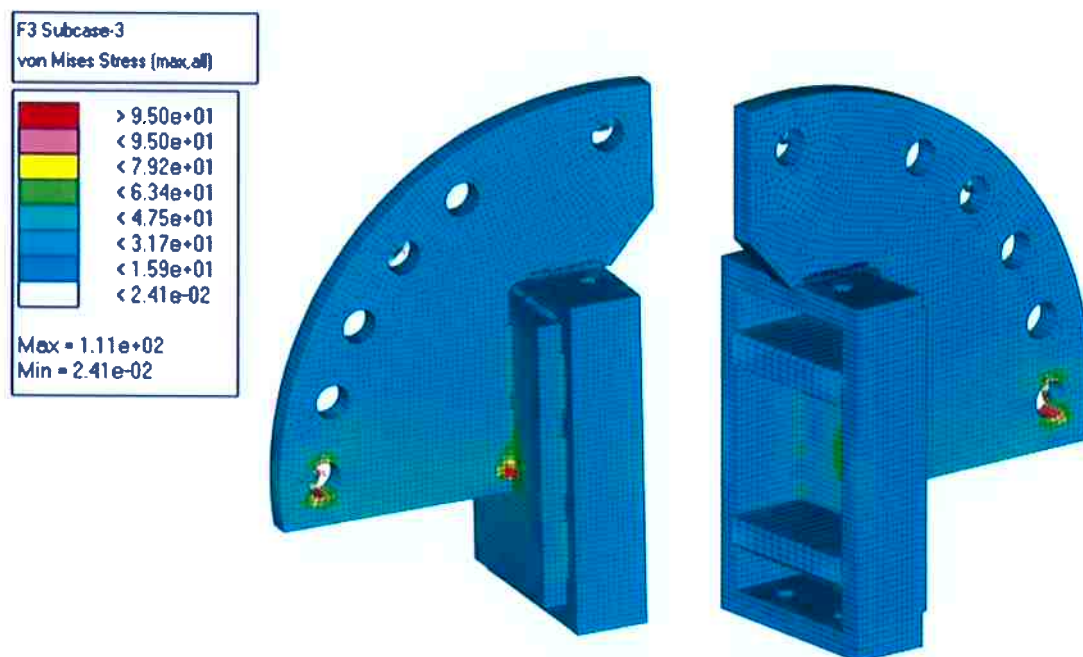


Figura 58 - Modelo de elementos finitos do dispositivo de Arcan.

Os elementos utilizados foram sólidos. A malha utilizada na construção do modelo foi quadrática de 2,5 mm. A carga aplicada foi de 10 kN em 3 diferentes ângulos (0°, 45° e 90°) separadamente, sendo a área de fixação do corpo de prova utilizada como restrição. O pré-processador utilizado foi o *Hypermesh 7.0*, o processador utilizado foi o *Nastran 2005* e o pós-processador foi o *Hypermesh 7.0*, calculado em uma estação *HP Workstation 8200* com sistema operacional *Windows XP*. O aço usado foi o SAE 1020 que possui um limite de escoamento de aproximadamente 210 MPa. A tabela 7 possui o resumo de toda a configuração usada no modelo do dispositivo.

Tabela 7 - Dados do modelo de elementos finitos do dispositivo de Arcan.

Tipo de Elemento	Sólido
Tipo de Malha	Quadrática
Dimensão da Malha	2,5 x 2,5 mm
Material	Aço SAE 1020
Solda MIG	Elemento sólido
Pré-Processador	Hypermesh 7.0
Processador	Nastran 2005
Pós-Processador	Hypermesh 7.0

No modelo, o ângulo de aplicação crítico foi de 0° , onde a tensão máxima chegou a 111 MPa em uma pequena região localizada. Como o limite de escoamento do material é de 210 MPa, concluímos que o dispositivo satisfaz as condições do ensaio com base nos dados de Lee et al. (1998), e suportaria uma carga de até 20.000 N (aproximadamente 2.000 kgf) sem apresentar problemas. Também em Lee et al. (1998) é verificado que os testes a 90° foram os que exigiram maior carga de aplicação, uma vez que o mesmo exige apenas cisalhamento do ensaio. Isso reforça a afirmação que o dispositivo atende sem problemas o teste, pois na configuração de 90° é onde obtemos a maior rigidez estrutural do dispositivo.

O dispositivo de Arcan foi construído na Engenharia Experimental da General Motors do Brasil, localizada em São Caetano do Sul, a figura 59 mostra fotos do dispositivo físico construído para os ensaios.



Figura 59 - Fotos do dispositivo de Arcan.

4.3 ENSAIOS DESTRUTIVOS DE ARCAN

Todos os testes foram executados nas instalações da General Motors do Brasil na planta de São Caetano do Sul. Na execução dos testes foi utilizado uma máquina Instron 4482 com capacidade de 10 toneladas de carga máxima. Para montagem e desmontagem dos corpos de prova no dispositivo, foi utilizada uma chave com catraca. Devido ao número de parafusos e ao formato do corpo de prova, o dispositivo deve ser retirado para desmontagem e remontagem de um corpo de prova e logo em seguida recolocado na máquina, para cada teste.

O teste consiste em aplicar um deslocamento constante, medindo-se a carga necessária. Foi mantida uma velocidade de 5 mm/minuto para obedecer o critério de “condição quase estática” recomendado por Lin et al. (2003) e Lee et al. (1998). O teste finaliza assim que ocorre a falha da solda, que caracteriza-se pela diminuição repentina da carga. Logo após a falha, os corpos de prova podem separar-se por inteiro ou permanecer ainda unidas por uma junção com ruptura. A figura 60 mostra testes físicos executados em diferentes configurações de ângulos.

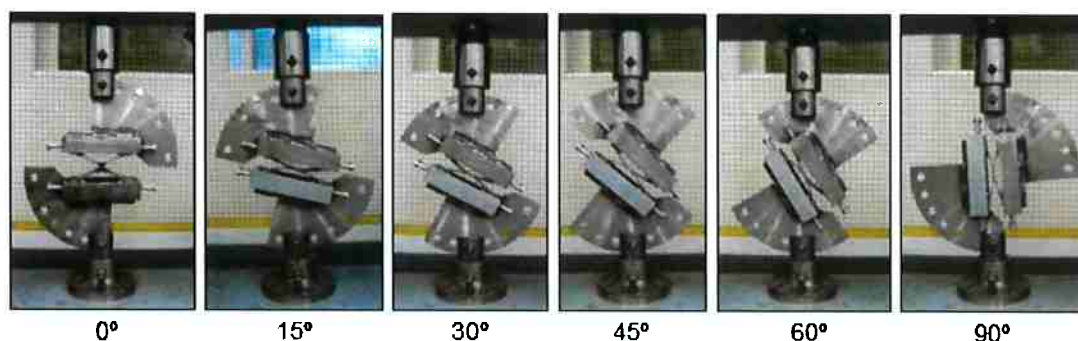


Figura 60 - Configurações de ângulos para o teste de Arcan.

Após a ruptura é possível detectarmos o pico de carga, ou carga máxima do teste. O teste é destrutivo, portanto não há a reutilização dos corpos de prova, a não ser para uma análise pós-teste e coleta de dados.

5 ESTUDO DE CASO: ASSOALHO DIANTEIRO

A proposta desse capítulo é estudar um assoalho dianteiro conceitual de um veículo de passageiros, feito com peças estampadas com pontos de solda, modificando a maior parte das junções para SL. É esperado um desempenho de rigidez e tensões localizadas no mínimo similar entre ambas, ou maior para o assoalho com SL. O estudo é baseado em uma análise estrutural por elementos finitos. A construção dos modelos 3D e a análise virtual foram feitas no Centro Tecnológico da General Motors do Brasil em São Caetano do Sul.

5.1 LIMITAÇÕES DO MODELO

Apesar do estudo utilizar ferramentas modernas baseadas em teorias e pesquisas atuais, ainda existem uma série de limitações que devem ser levadas em consideração.

1. Não foi construído um protótipo e executados testes físicos para comprovar a validade do modelo;
2. O modelo estuda o assoalho separadamente, não levando em conta os efeitos de um veículo inteiro;
3. O modelo se limita ao assoalho;
4. Não é levado em conta o fator econômico e construtivo do processo;
5. O modelo não considera eventuais problemas de defeitos de processos de solda, ou desvios dimensionais;
6. A análise estudou os efeitos da flexão e rigidez sem verificar os impactos frontais e laterais.

5.2 ASSOALHO COM SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA

Na figura 61 mostra a configuração do assoalho conceitual com SPRE, representando o modelo que é usado atualmente em veículos de passageiros.

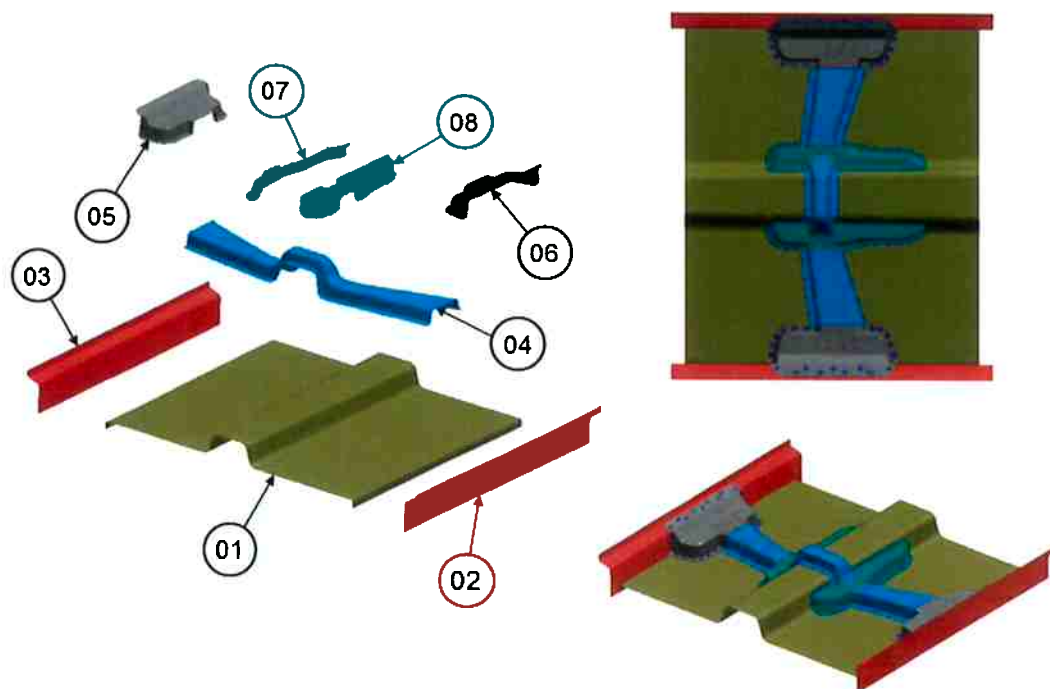


Figura 61- Assoalho com SPRE.

As peças que compõe esse conjunto são:

1. Assoalho Dianteiro (espessura 0,80 mm e massa 9,726 kg);
2. Soleira Lado Direito (espessura 1,5 mm e massa 2,958 kg);
3. Soleira Lado Esquerdo (espessura 1,5 mm e massa 2,958 kg);
4. Travessa do Assoalho (espessura 1,2 mm e massa 3,102 kg);
5. Reforço Externo Lado Esquerdo (espessura 1,2 mm e massa 1,096 kg);
6. Reforço Externo Lado Direito (espessura 1,2 mm e massa 1,096 kg);
7. Reforço Interno Lado Esquerdo (espessura 1,2 mm e massa 0,752 kg);
8. Reforço Interno Lado Direito (espessura 1,2 mm e massa 0,752 kg).

Os modelos 3D foram feitos com o *software Unigraphics NX3*, utilizando uma estação *HP Workstation 8200* com sistema operacional *Windows XP*. Ao todo o conjunto utiliza 204 pontos de solda e possui uma massa total de 19,483 kg.

5.3 ASSOALHO COM SOLDA LASER

Para o assoalho com SL foi utilizado um conceito tubular nos reforços para possibilitar a redução de espessura, e utilizar a possibilidade de solda em apenas um dos lados, conforme figura 62. O painel do assoalho dianteiro e as soleiras são os mesmos do modelo de SPRE.

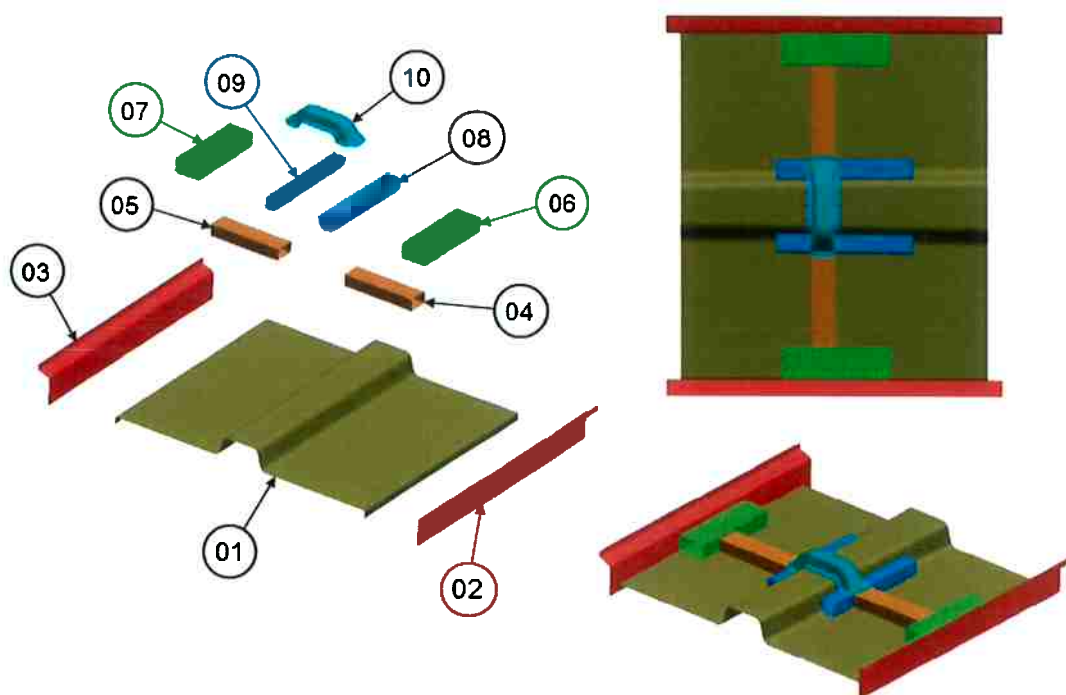


Figura 62 - Assoalho com SL.

As peças que compõe esse conjunto são:

1. Assoalho Dianteiro (espessura 0,80 mm e massa 9,726 kg);

2. Soleira Lado Direito (espessura 1,5 mm e massa 2,958 kg);
3. Soleira Lado Esquerdo (espessura 1,5 mm e massa 2,958 kg);
4. Travessa do Assoalho Lado Direito (espessura 0,9 mm e massa 0,690 kg);
5. Travessa do Assoalho Lado Esquerdo (espessura 0,9 mm e massa 0,690 kg);
6. Reforço Externo Lado Direito (espessura 0,9 mm e massa 0,983 kg);
7. Reforço Externo Lado Esquerdo (espessura 0,9 mm e massa 0,983 kg);
8. Reforço Interno Lado Direito (espessura 0,9 mm e massa 0,756 kg);
9. Reforço Interno Lado Esquerdo (espessura 0,9 mm e massa 0,756 kg);
10. Reforço Central (espessura 1,2 mm e massa 0,670 kg).

Os modelos 3D foram feitos com o *software Unigraphics NX3*, utilizando uma estação *HP Workstation 8200* com sistema operacional *Windows XP*. Ao todo o conjunto utiliza 192 cordões de SL de 11 mm de comprimento, 10 pontos de solda, 8 cordões de MIG de 55 mm de comprimento, 8 cordões de MIG de 30 mm de comprimento, e possui uma massa total de 18,100kg. A utilização de solda MIG foi usada para termos o maior numero de peças tubulares possíveis.

5.4 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

O modelo de elementos finitos foi construído utilizando o elemento superfície com uma malha quadrática de 10 mm. O pré-processador utilizado foi o *Hypermesh 7.0*, o processador utilizado foi o *Nastran 2005* e o pós-processador foi o *Hypermesh 7.0*, calculado em uma estação *HP Workstation 8200* com sistema operacional *Windows XP*.

A restrição utilizada foi todo o contorno do assoalho dianteiro e soleiras, dessa forma a maior parte dos esforços se concentram nos reforços. Foi

aplicada uma carga de 1.000 N na região central do assoalho causando uma flexão no conjunto, ver figura 63.

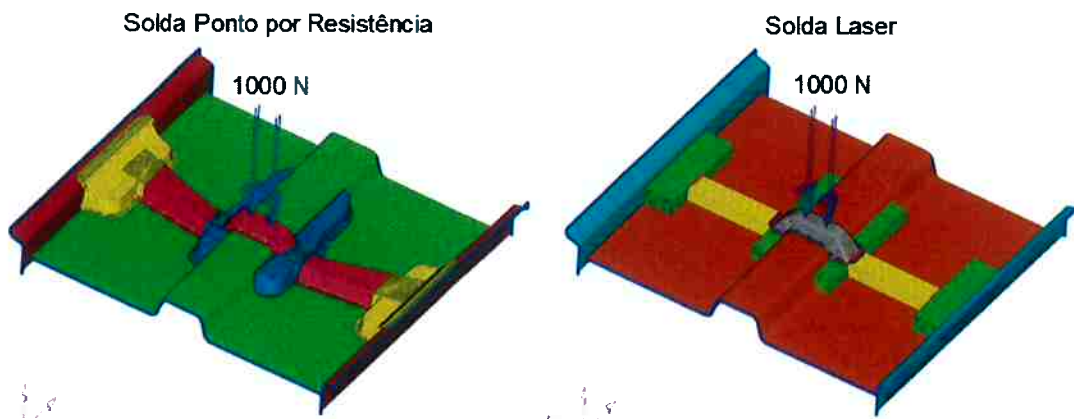


Figura 63 - Modelo de elementos finitos dos assoalhos

O material utilizado foi o EMS.ME.1508 EP que possui 170 MPa de limite de escoamento. Não foi utilizado nenhum aço de alta resistência pois o objetivo do estudo foi comparar o efeito das junções.

Para representar os pontos de solda foram usados elementos de molas lineares, lembrando que esse modelo não possui critério de falha. Para solda MIG e laser foram utilizados elementos rígidos com restrições nos seis graus de liberdade. A tabela 8 possui o resumo de toda a configuração usada nos modelos dos Assoalhos.

Tabela 8 - Dados dos modelos de elementos finitos dos Assoalhos.

Tipo de Elemento	Superfície
Tipo de Malha	Quadrática
Dimensão da Malha	10 x 10 mm
Material	EMS.ME.1508 BFF, EP
Solda Ponto	Mola linear
Solda Laser	Elemento rígido com restrição nos 6 graus de liberdade
Solda MIG	Elemento rígido com restrição nos 6 graus de liberdade
Pré-Processador	Hypermesh 7.0
Processador	Nastran 2005
Pós-Processador	Hypermesh 7.0

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS DOS CORPOS DE PROVA

A tabela 9 abaixo fornece os resultados das cargas máximas, ou cargas de pico, das análises virtuais dos corpos de prova.

Tabela 9 - Resultados das cargas de pico das análises virtuais dos corpos de prova

Ângulo	Solda Ponto		Solda Laser	
	Espessura 0,8 mm	Espessura 1,2 mm	Espessura 0,8 mm	Espessura 1,2 mm
0°	3.950 KN	6.050 KN	1.500 KN	2.150 KN
15°	4.100 KN	6.300 KN	1.550 KN	2.150 KN
30°	4.400 KN	7.000 KN	1.700 KN	2.550 KN
45°	4.450 KN	7.250 KN	1.600 KN	3.900 KN
60°	4.450 KN	7.300 KN	1.850 KN	3.750 KN
90°	5.250 KN	8.200 KN	1.900 KN	3.700 KN

O modelo apresentou uma carga de pico crescente, com a menor carga para a configuração de 0° e a maior para a configuração de 90°. Os ângulos entre 30° e 60° apresentaram diferenças de valores pequenos entre si.

6.2 TESTES FÍSICOS DOS CORPOS DE PROVA

Os resultados gráficos dos testes físicos de Arcan para chapas de 0,80 e 1,20 mm para SPRE e SL são mostrados na figura 64, comparando-se os diferentes ângulos de teste. Foram feitas três repetições para cada configuração, porém o gráfico mostra apenas uma das curvas para facilitar a visualização. O relatório com os gráficos dos resultados completos pode ser visto no APÊNDICE A – Resultados dos Testes Físicos de Arcan. Podemos notar claramente que a maior carga foi a do ângulo de 90° (puro cisalhamento)

seguida da carga do ângulo de 0° (puro arrancamento). Os ângulos entre 30° e 60° apresentaram as menores cargas, sinalizando uma situação crítica para as junções, lembrando que a maioria dos estudos ensaia apenas cisalhamento e/ou tração e os dados obtidos são usados como parâmetros do material ensaiado.

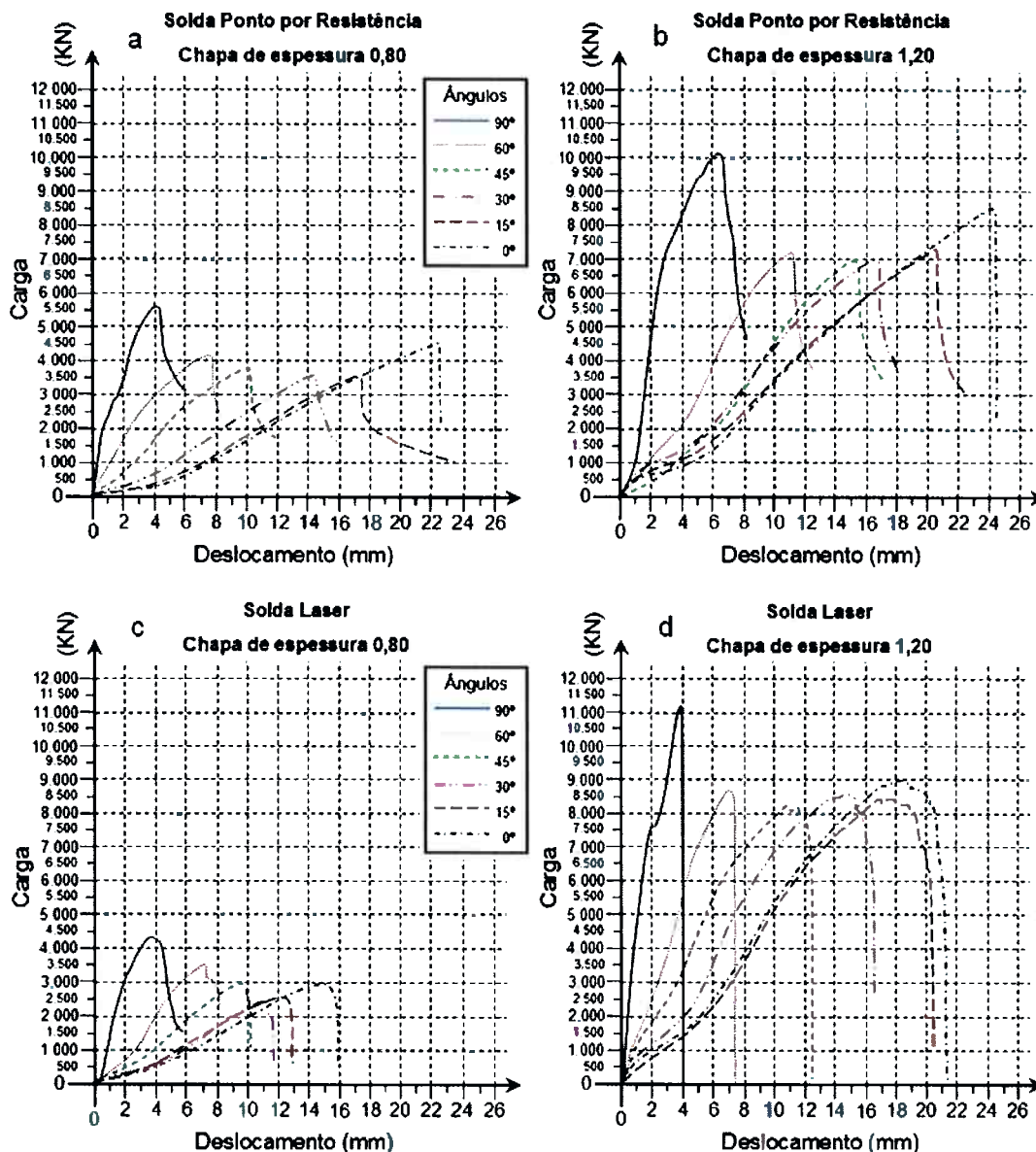


Figura 64 - Comparação dos resultados das diferentes configurações angulares em relação à espessura e tipo de processo de solda

(a) SPRE espessura 0,80 mm (b) SPRE espessura 1,20 mm (c) LS espessura 0,80 mm (d) LS espessura 1,20 mm.

Tabela 10 - Resultados das cargas de pico dos testes físicos dos corpos de prova.

Solda Ponto por Resistência - Chapa de 0,80 mm						
Repetição						
Ângulo	A (kN)	B (kN)	C (kN)	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)	Correção (t-student 95%) (kN)
0°	4.486,00	4.497,00	4.510,00	4.497,67	12,01	4.497,67 ± 20,25
15°	4.011,00	3.882,00	3.557,00	3.816,67	233,95	3.816,67 ± 394,40
30°	3.544,00	3.579,00	3.678,00	3.600,33	69,50	3.600,33 ± 117,17
45°	3.734,00	3.683,00	3.742,00	3.719,67	32,01	3.719,67 ± 53,96
60°	4.003,00	3.581,00	4.129,00	3.904,33	287,01	3.904,33 ± 483,87
90°	5.549,00	5.538,00	5.557,00	5.548,00	9,54	5.548,00 ± 16,08

Solda Ponto por Resistência - Chapa de 1,20 mm						
Repetição						
Ângulo	A (kN)	B (kN)	C (kN)	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)	Correção (t-student 95%) (kN)
0°	8.164,00	8.236,00	8.472,00	8.290,67	161,11	8.290,67 ± 271,61
15°	7.468,00	7.450,00	7.243,00	7.387,00	125,03	7.387,00 ± 210,79
30°	6.781,00	6.703,00	6.956,00	6.813,33	129,56	6.813,33 ± 218,42
45°	6.647,00	6.789,00	6.902,00	6.779,33	127,77	6.779,33 ± 215,41
60°	7.310,00	7.157,00	7.144,00	7.203,67	92,32	7.203,67 ± 155,63
90°	10.220,00	10.070,00	10.120,00	10.136,67	76,38	10.136,67 ± 128,76

Solda Laser - Chapa de 0,80 mm						
Repetição						
Ângulo	A (kN)	B (kN)	C (kN)	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)	Correção (t-student 95%) (kN)
0°	2.819,00	2.934,00	2.754,00	2.836,67	91,15	2.836,67 ± 153,67
15°	2.287,00	2.706,00	2.558,00	2.517,00	212,49	2.517,00 ± 358,23
30°	2.411,00	2.024,00	2.725,00	2.386,67	351,13	2.386,67 ± 591,96
45°	2.647,00	2.945,00	3.138,00	2.910,00	247,36	2.910,00 ± 417,02
60°	2.942,00	3.506,00	2.848,00	3.098,67	355,88	3.098,67 ± 599,96
90°	2.161,00	2.819,00	4.344,00	3.108,00	1.119,83	3.108,00 ± 1887,88

Solda Laser - Chapa de 1,20 mm						
Repetição						
Ângulo	A (kN)	B (kN)	C (kN)	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)	Correção (t-student 95%) (kN)
0°	8.945,00	8.247,00	9.431,00	8.874,33	595,15	8.874,33 ± 1003,35
15°	8.234,00	9.079,00	8.413,00	8.575,33	445,28	8.575,33 ± 750,67
30°	9.114,00	8.534,00	8.000,00	8.549,33	557,16	8.549,33 ± 939,29
45°	8.228,00	8.293,00	8.634,00	8.385,00	218,08	8.385,00 ± 367,65
60°	9.648,00	8.424,00	8.711,00	8.927,67	640,12	8.927,67 ± 1079,15
90°	11.170,00	11.190,00	10.650,00	11.003,33	306,16	11.003,33 ± 516,14

Para os ângulos de 90° as junções apresentaram maior rigidez devido ao menor deslocamento. O ângulo de 0° apresentou o maior deslocamento. Os demais ângulos mostram deslocamento crescente desde 15° até 60°.

Após o início da falha, o ponto de solda mostrou-se menos resistente à propagação da trinca devido à queda brusca de carga, fazendo o pico de carga ficar mais agudo no gráfico. A SL possui um pico de carga com característica mais suave, com uma queda com menor intensidade. As cargas máximas para cada teste é mostrado na tabela 10.

Para chapas de 0,80 mm as cargas para SPRE ficaram em média 35% maiores que a SL. Para verificar o que poderia ter causado essa diferença foi feita uma análise metalográfica de amostras de juntas, ver figura 65. O reagente químico utilizado nas análises metalográficas foi Nital 4%. Para a chapa de 0,80 mm foi constatado que o diâmetro da solda estava com aproximadamente 6,4 mm, cerca de 2,83 mm (79,2%) maior que o diâmetro estipulado de 3,57 mm, e isso foi o causador da grande diferença de carga máxima a favor da SPRE. O cordão de laser apresentou uma largura média de 1,11 mm, cerca de 0,09 mm menor que o valor nominal de 1,2 mm.

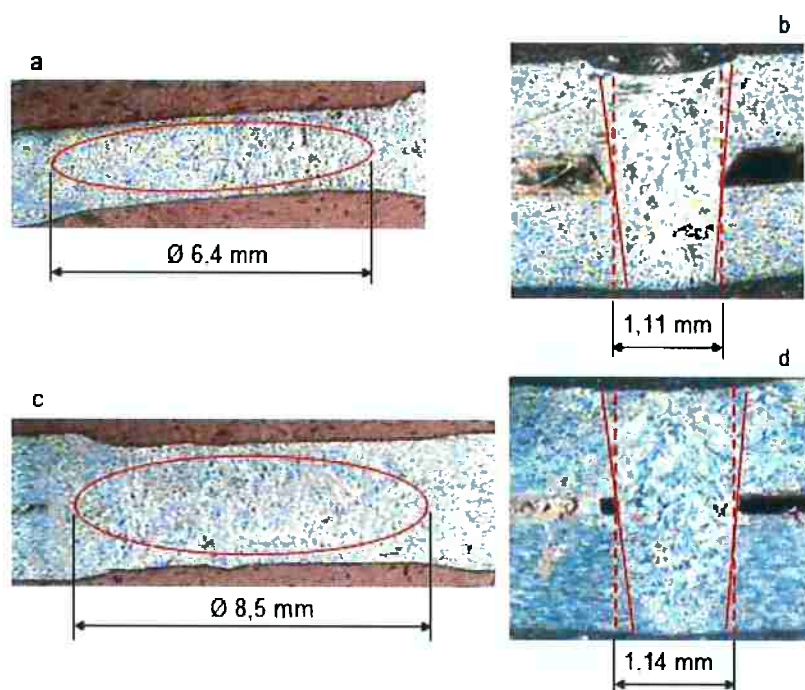


Figura 65 - Análise metalográfica das junções dos corpos de prova.

(a) SPRE – espessura 0,8 mm (b) SL – espessura 0,8 mm (c) SPRE – espessura 1,2 mm (d) SL – espessura 1,2 mm.

Na chapa de 1,2 mm as cargas ficaram bem próximas, com SL levemente maior que a SPRE. Apesar do diâmetro do ponto de solda para chapa de 1,2 mm estar com aproximadamente 8,5 mm, ou seja, 4,12 mm (94%) maior que o diâmetro estipulado de 4,38 mm, a SL conseguiu um desempenho melhor que a SPRE. A largura média do cordão de laser ficou em 1,14 mm, cerca de 0,06 mm menor que a largura nominal de 1,2 mm.

Um dos fatores que prejudicaram a SL da chapa de 0,80 mm foi a dimensão da espessura, que por ser muito fina requer um controle dimensional mais rigoroso na construção dos corpos de prova, e na soldagem da junta para garantir o ponto focal do laser. Como os corpos de prova são feitos artesanalmente, é muito difícil controlar tal requisito. Os corpos de prova da tabela 10 para chapas de 0,8 mm de espessura apresentaram penetração insuficiente, e conseqüentemente as cargas máximas foram muito abaixo do esperado. Para a chapa de 1,2 mm, o problema de penetração de solda não foi detectado.

Tabela 11 - Corpos de prova com SL com baixa penetração.

Corpos de Prova com Solda Laser com penetração baixa (espessura 0,8 mm)	
Ângulo	Repetição
15°	A
30°	B
60°	C
90°	A e B

As falhas nos corpos de prova durante os testes apresentaram algumas diferenças. Para SPRE 100% dos corpos de prova permaneceram unidos pela junta com ruptura na zona termicamente afetada (figura 66 c). Para a SL, ocorreram dois tipos de falhas. O primeiro tipo foi a separação total dos corpos de prova com a ruptura no cordão de laser, que aconteceu em 100% dos corpos de prova de 1,2 mm e em 10% dos corpos de prova de 0,8 mm (figura 66 b). A SL apresentou essa separação total devido à sua característica de ser

mais concentrada em um cordão delgado e com maior dureza que o material base. O segundo tipo foi o destacamento do cordão de SL na região da zona termicamente afetada, que ocorreu em 90% dos corpos de prova de 0,8 mm (figura 66 a).



Figura 66 - Tipos de falhas nos corpos de prova.

(a) Ruptura na ZTA do cordão de LS - espessura 0,80 mm (b) Separação total – espessura 0,80 e 1,20 mm (c) Ruptura na ZTA da SPRE – espessura de 0,80 e 1,20 mm.

A deformação dos corpos de prova foi similar em todas configurações de ambas as soldas, com exceção dos testes de 90° (puro cisalhamento) onde ocorreu o início da formação da rótula plástica que provocou um leve giro na região de solda, e um ganho de rigidez que é identificado na curva do gráfico, ver figura 67.

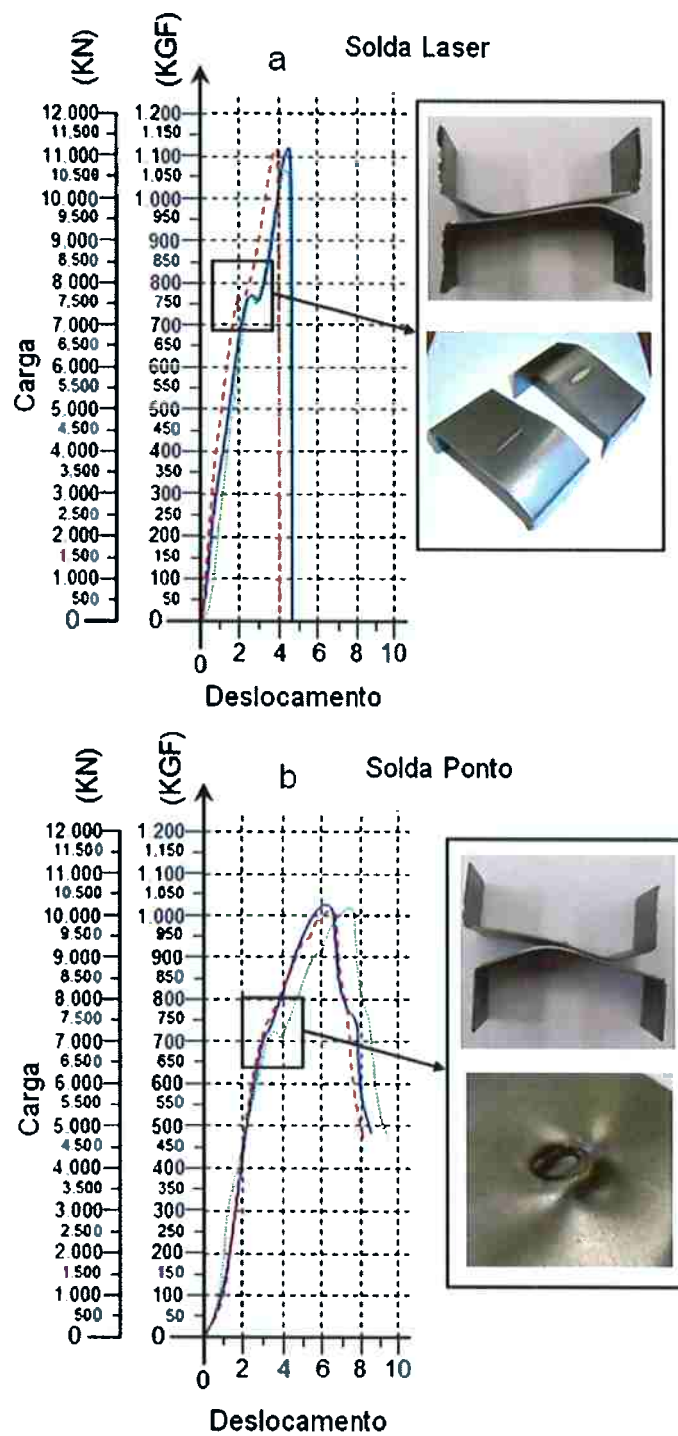


Figura 67 - Início da formação da rótula plástica para testes com 90° .

(a) SL com 90° (b) SPRE 90° .

Os resultados dos testes físicos para SPRE foram comparados com o modelo geral de Lin para carga combinada equivalente, ver figura 68. O modelo geral de Lin mostrou-se representativo para SPRE.

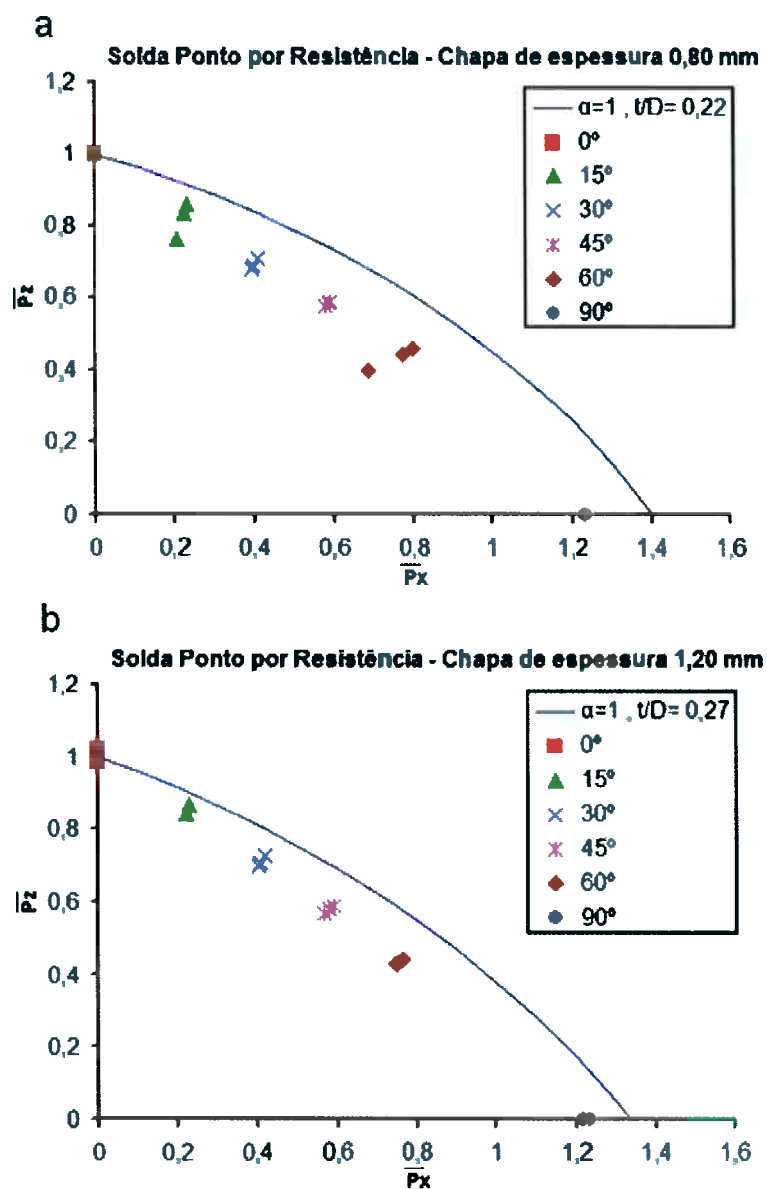


Figura 68 - Comparação dos resultados dos testes com SPRE com o modelo de Lin.

(a) Modelo de Lin para SPRE espessura 0,80 mm (b) Modelo de Li para SPRE espessura de 1,20 mm.

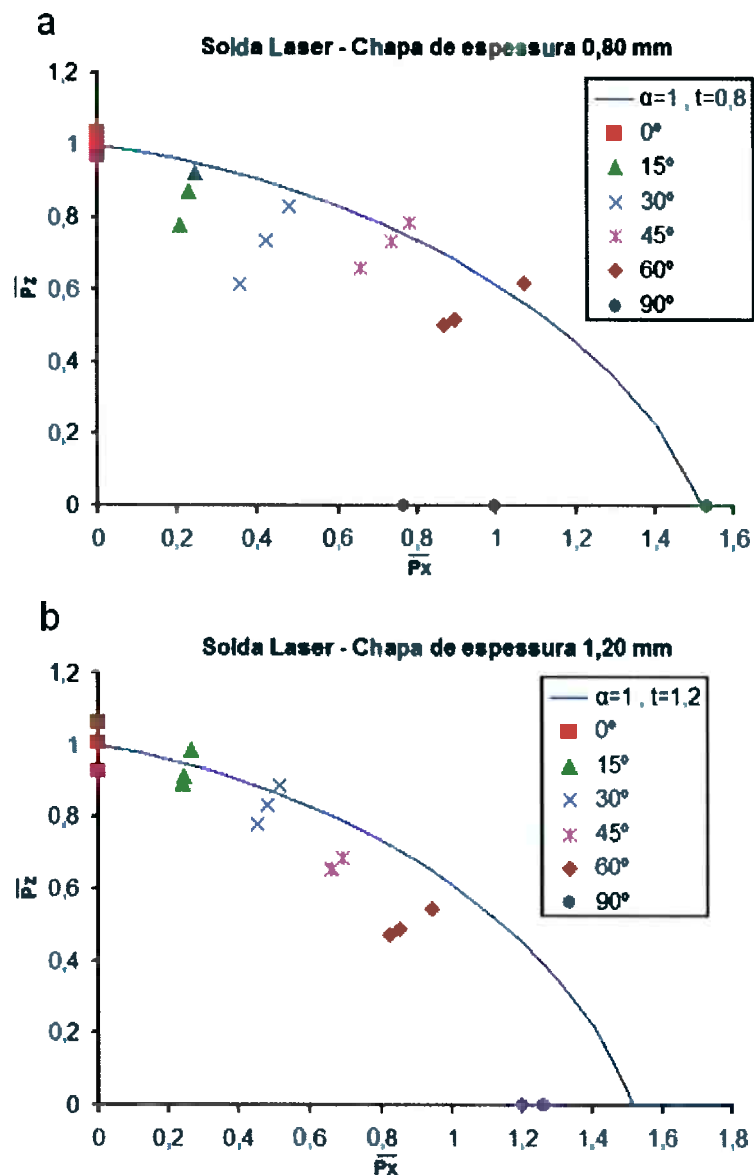


Figura 69 - Comparação dos resultados dos testes com SL com o modelo de Lin
 (a) Modelo de Lin para SL espessura 0,80 mm (b) Modelo de Li para SL espessura de 1,20 mm.

Não existe nenhum modelo para cargas combinadas equivalentes para SL, mas para efeito comparativo foi utilizado o modelo geral de Lin com pequenas modificações na fórmula para avaliar a SL. Na fórmula (12) o único termo que relaciona a geometria da junta é $\left(\frac{4 \times t}{\pi \times d}\right)$, onde $\pi \times d$ é relativo ao perímetro do ponto de solda. Mudando-se esse termo para cálculo do perímetro do cordão de laser e considerando o mesmo como um oblongo, a fórmula ficaria:

$$\frac{1}{3} \times \left(K_{Pxy} \times \bar{P}_x \right)^2 + \left\{ \alpha \bar{P}_z + K_{Pxy} \times \bar{P}_x \left[\frac{4 \times t}{(\pi \times L) + 2 \times (C - L)} \right] \right\}^2 + \left[(1 - \alpha) \bar{P}_z \right]^2 = 1 \quad (16)$$

Onde L é a largura do cordão de laser e C é o comprimento do cordão de laser. A figura 69 mostra o modelo de Lin modificado para laser.

Para a chapa de 0,8 mm o modelo representou bem as cargas equivalentes, mas para a chapa de 1,2 mm os pontos mostram uma outra tendência de curva, sinalizando que o modelo precisa ser trabalhado para melhor representar o comportamentos das cargas combinadas da SL.

6.3 COMPARAÇÃO DO MODELO VIRTUAL VERSUS REAL

Os modelos de elementos finitos obtiveram uma representação visual da deformação muito parecido com o corpo de prova real, ver figura 70.

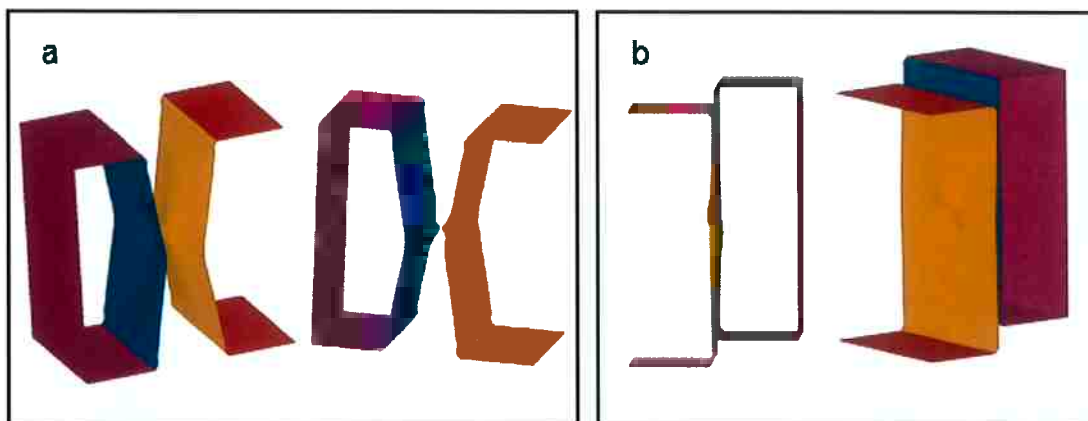


Figura 70 - Representação visual das deformações dos corpos de prova virtuais.

(a) corpos de prova de 0°, 15°, 30°, 45° e 60° (b) corpo de prova de 90°.

Em “a” da figura 70 mostra a representação visual das configurações de 0° à 60°, e em “b” vemos que o efeito inicial da rótula plástica também foi

identificado pelo modelo para a configuração de 90° . A representação visual da deformação é muito subjetiva, por isso na figura 71 podemos verificar o gráfico com as cargas de pico para SPRE, obtidas das análises virtuais (representadas por uma reta) de 0° , 45° e 90° , e as respectivas curvas obtidas nos testes físicos.

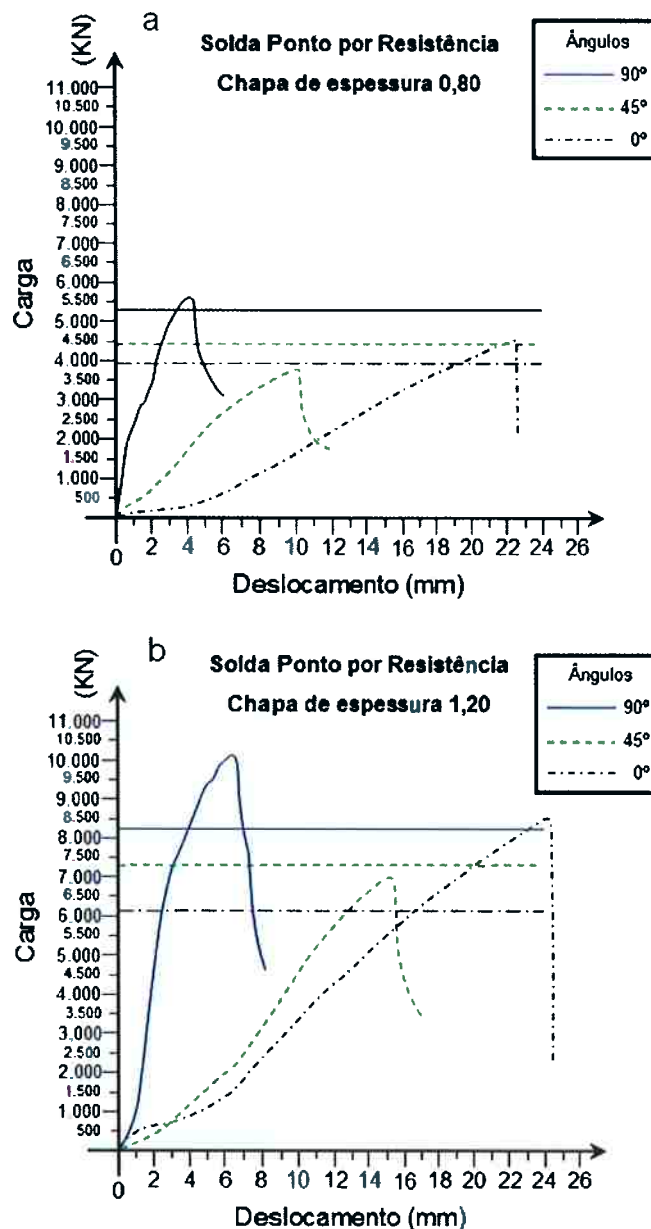


Figura 71 - Comparação dos testes físicos e virtuais para SPRE.

(a) SPRE espessura 0,80 mm (b) SPRE espessura 1,20 mm.

Para os testes físicos, o valor de pico da configuração de 90° é o maior, seguido do valor da configuração de 0°, e logo em seguida das demais configurações com valores intermediários. Os resultados das análises virtuais mostram no entanto um valor crescente começando de 0° até 90°. Isso mostra que o modelo virtual não está totalmente representativo com o teste físico.

A tabela 12 compara a média dos valores de picos obtidos nos testes físicos, e os valores obtidos nas análises virtuais.

Tabela 12 - Diferença entre as cargas máximas virtuais e as médias das cargas máximas reais.

Solda Ponto por Resistência - Chapa de 0,80 mm					Solda Ponto por Resistência - Chapa de 1,20 mm				
Ângulo	Média Teste Físico (kN)	Análise Virtual (kN)	$\Delta = \text{Real} - \text{Virtual}$ (kN)	Δ (%)	Ângulo	Média (kN)	Análise Virtual (kN)	$\Delta = \text{Real} - \text{Virtual}$ (kN)	Δ (%)
0°	4.497,67	3.950,00	547,67	12,18	0°	8.290,67	6.050,00	-2.240,67	27,03
15°	3.816,67	4.100,00	-283,33	7,42	15°	7.387,00	6.300,00	-1.087,00	14,72
30°	3.600,33	4.400,00	-799,67	22,21	30°	6.813,33	7.000,00	-186,67	2,74
45°	3.719,67	4.450,00	-730,33	19,63	45°	6.779,33	7.250,00	-470,67	6,94
60°	3.904,33	4.450,00	-545,67	13,98	60°	7.203,67	7.300,00	-96,33	1,34
90°	5.548,00	5.250,00	298,00	5,37	90°	10.136,67	8.200,00	-1.936,67	19,11

Solda Laser - Chapa de 0,80 mm					Solda Laser - Chapa de 1,20 mm				
Ângulo	Média (kN)	Análise Virtual (kN)	$\Delta = \text{Real} - \text{Virtual}$ (kN)	Δ (%)	Ângulo	Média (kN)	Análise Virtual (kN)	$\Delta = \text{Real} - \text{Virtual}$ (kN)	Δ (%)
0°	2.835,67	1.500,00	1.335,67	47,10	0°	8.874,33	2.150,00	-6.724,33	75,77
15°	2.517,00	1.550,00	967,00	38,42	15°	8.575,33	2.150,00	-6.425,33	74,93
30°	2.386,67	1.700,00	686,67	28,77	30°	8.549,33	2.550,00	-5.999,33	70,17
45°	2.910,00	1.600,00	1.310,00	45,02	45°	8.385,00	3.900,00	-4.485,00	53,49
60°	3.098,67	1.850,00	1.248,67	40,30	60°	8.927,67	3.750,00	-5.177,67	58,00
90°	3.108,00	1.900,00	1.208,00	38,87	90°	11.003,33	3.700,00	-7.303,33	66,37

A diferença dos resultados físicos com os virtuais para SPRE de 0,8 mm foi em média 13,46%, e para a chapa de 1,2 mm a média foi de 11,98%. Para a SL de 0,8 mm a média das diferenças foi de 39,74% e para 1,2 mm foi 66,45%. Para a SPRE o modelo de análise virtual possui um grau aceitável de variação em relação ao teste físico, mas o modelo de SL resultou em valores muito baixos, se comparado com os testes físicos. Isso descarta uma possível comparação dos modelos virtuais de SPRE e laser por não haver representatividade suficiente dos modelos.

A diferença dos resultados virtuais e reais pode ser explicado primeiramente pela velocidade usado nas análises de elementos finitos, que não obedeceu o critério de condição quase estática. Para a SPRE tivemos

cargas mais elevadas nos testes físicos, devido aos diâmetros de solda maiores que o estipulado nos corpos de prova, lembrando que a simulação considerou o diâmetro do ponto no seu valor nominal.

6.4 ESTUDO DE CASO: ASSOALHO DIANTEIRO

A figura 72 mostra o resultado da análise de rigidez dos assoalhos dianteiros. O assoalho com SPRE obteve um deslocamento máximo de 0,336 mm e o assoalho com SL 0,382 mm, mostrando que ambos possuem praticamente a mesma rigidez estrutural.

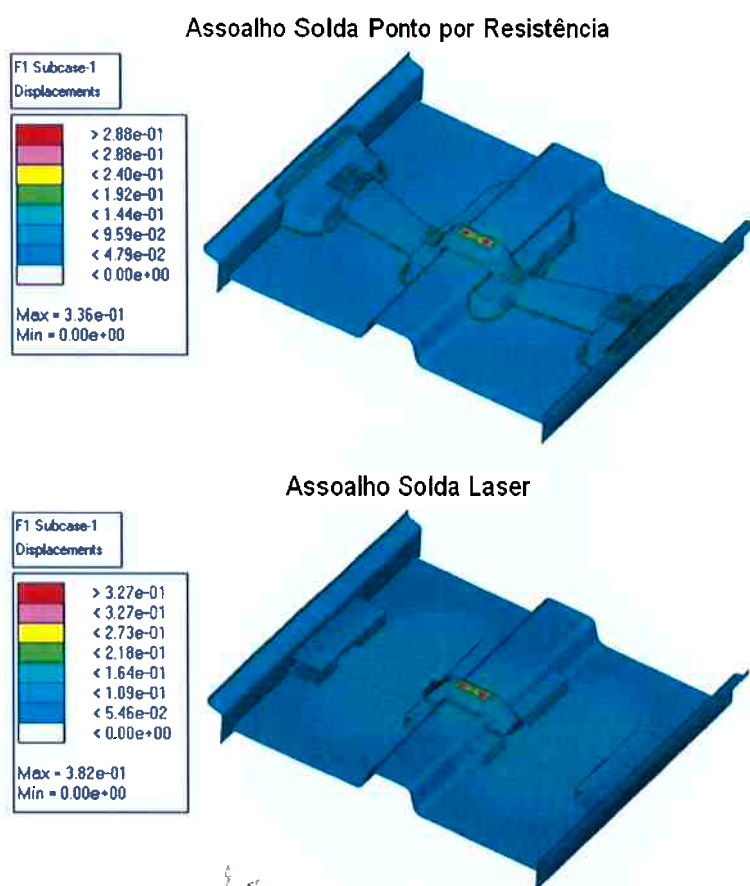
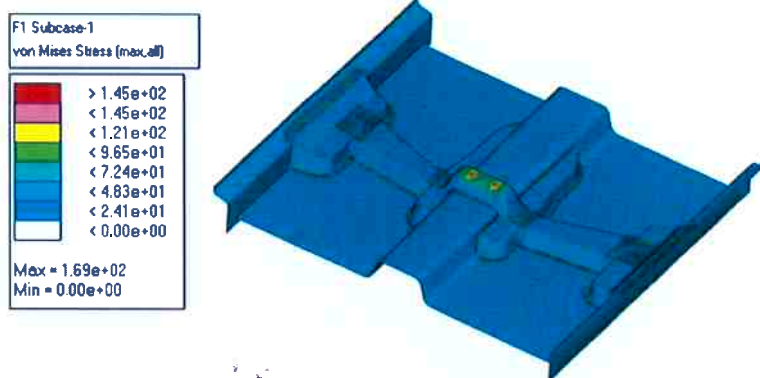


Figura 72 - Resultado das análises virtuais de rigidez dos assoalhos dianteiros.

Na análise de tensões, o assoalho com SPRE obteve uma tensão máxima de 169 MPa e o assoalho com SL obteve 170 MPa, ver figura 73.

Tanto os deslocamentos máximos quanto as tensões máximas ocorreram em regiões localizadas, correspondentes aos pontos de aplicações das cargas. Ambos os assoalhos mostraram um comportamento similar, sem o aparecimento de picos de deslocamentos ou concentrações de tensões em regiões diferentes entre si. O assoalho com SL possui uma massa menor que o de SPRE, cerca de 1,383 kg, sinalizando um potencial de redução de massa.

Assoalho Solda Ponto por Resistência



Assoalho Solda Laser

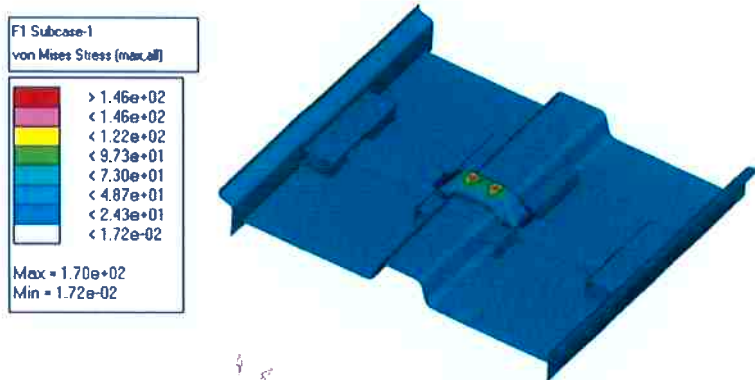


Figura 73 - Resultado das análises virtuais de tensões dos assoalhos dianteiros.

7 CONCLUSÕES

O dispositivo de Arcan projetado e construído permitiu uma avaliação adequada de junções soldadas por SPRE e SL sobre a condição de cargas combinadas.

Nos resultados dos testes de Arcan verificou-se que para a chapa de 0,80 mm a junta de SPRE apresentou uma junção com maior resistência mecânica. Para a chapa de 1,20 mm a SL apresentou um desempenho melhor na junta soldada.

Os resultados dos testes de Arcan mostraram que os carregamentos críticos nas junções são diferentes dos trabalhos uniaxiais clássicos apresentados. Somente ensaios de tração uniaxiais não são suficientes, pois as cargas críticas apareceram nas configurações multiaxiais entre 30° e 60°.

No atual estágio das técnicas de modelagem utilizadas neste trabalho deixaram claras as limitações de sua capacidade preditiva da resistência mecânica, e dos modos de falha das junções soldadas.

Para comparação do processo de junção de SL e o processo de SPRE, verificou-se na modelagem por elementos finitos do assoalho dianteiro que a configuração com SL apresentou o mesmo desempenho de concentração de tensão e rigidez apresentado do modelo de SPRE. Não obstante o assoalho com SL conseguiu uma redução de massa de 1,303 kg.

8 TRABALHOS FUTUROS

Novos estudos com o teste de Arcan devem ser feitos combinando outras espessuras, processos de junções e avaliando os efeitos de diferentes materiais.

Um desenvolvimento de um elemento específico para representar a SL nas análises de elementos finitos deve ser estudado, de tal forma que o mesmo obtenha um comportamento que represente fisicamente essa junção.

Estudar os aspectos da mecânica da fratura e fadiga de peças soldadas por processos de SL e SPRE com cargas multiaxiais.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barnes, T., Pashby, I. **Joining Techniques For Aluminium Spaceframes Used in Automobiles: Part I – Solid and Liquid Phase Welding.** J. Material Processing Technology, V99, 1-3, March 2000, p. 62-71.

Barnes, T., Pashby, I. **Joining Techniques For Aluminium Spaceframes Used in Automobiles: Part II – Adhesive Bonding and Mechanical Fasteners.** J. Material Processing Technology, V99, 1-3, March 2000, p. 72-79.

Chao, Y. J. **Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear, or Combined Tensile/Shear Loads.** Journal of Engineering Materials and Technology, V125, April, 2003, p. 125 – 132.

Combescure, A., Delcroix, F., Caplain, L., Espanol, S., Eliot, P. **A Finite Element to Simulate the Failure of Weld Points on Impact.** International Journal of Impact Engineering, V28, 2003, p. 783 – 802.

Damoulis, G. L., Batalha, G. F. **Solda Laser Aplicada ao Processo de Fabricação de Carrocerias Automotivas,** 16th National Conference on Sheet Metal Forming, Ed. Lírio Schaeffler, LDTM-UFRGS, Porto Alegre, 21 outubro 2004.

Hoffmann, P., Geiger, M. **Recent Development in Laser System Technology for Welding Applications.** Annals of the CIRP, January, 2005, V44, p. 151-156.

IWU – 2003 Annual Report – Fraunhofer Institute – Chemnitz, Alemanha.

Langrand, B., Combescure, A. **Non-linear and failure behavior of spot welds: a “global” finite element and experiment in pure and mixed modes I/II**. International Journal of Solids and Structures, June, 2004, p. 6631 – 6646.

Lee, Y. L., Wehner, T. J., Lu, M. W., Morrisett, T. W., Pakalnins, E. **Ultimate Strength of Resistance Spot Weld Subject to Combined Tension and Shear**. Journal of Testing and Evaluation, V26, may, 1998, p. 213 – 219.

Lin, S. H., Pan, J., Tyan, T., Prasad, P. **A general failure criteria for spot welds under combined loading conditions**. International Journal of Solids and Structures, V40, 2003, p. 5539 – 5564.

Lin, S. H., Pan, J., Tyan, T., Wung, P. **Failure loads of spot weld under combined opening and shear static loading conditions**. International Journal of Solids and Structures, V39, 2002, p. 19 – 39.

Loredo, A., Martim, H., Andrzejewski, H., Grevey, D. **Numerical Support for Laser Welding of Zinc-Coated Sheets Process Development**. Applied Surface Science, 2002, V195, p. 297-303.

Mayer, A. **Der Lasermarkt in Europe. Process of the European Laser Marketplace '94** (1994), p. 6-11.

Messler, R. W., Bell, J., Craigue, O. **Laser Beam Weld Bonding of AA5754 for Automobile Structures**. Welding Journal, June, 2003, p. 151s-159-s.

Nakano, R. K. **Influência da Taxa de Deformação na Falha de Uniões por Solda a Ponto**. 2005. 75p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

Porter, M. **Estratégia Competitiva: Os conceitos Centrais**, p. 1-23.

Quintino, L., Vilaça, P., Rodrigues, R., Bordalo, L. **Laser Beam Welding of Automobile Hinges**. Welding Research Supplement, November, 2001, p. 261-s-267-s.

Ribolla, A., Damoulis, G. L., Batalha, G. F. **The Use of Nd:YAG Laser Weld for Large Scale Volume Assembly of Automotive Body in White**, COMMENT'2005 – AMPT2005 – Gliwice-Wisla, Polônia. In: Journal of Material Processing Technology, Lausanne, V164-165, p. 1120-1127, jan, 2005.

Ruiz, D. **Contribuição ao Desenvolvimento de Processos de Montagem e Soldagem de Carrocerias Automotivas**. 2005. 107p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

Ruiz, D. C., Batalha, G. F. **Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência**. Workshop Novos Desenvolvimentos em Engenharia de fabricação, Universidade de São Paulo, novembro/2004.

Unisantia. Santos. **Processo de Solda Laser**. Disponível em: <http://cursos.unisantia.br/mecanica/polari/solda-laser.pdf>. Acesso em 07/06/2005.

VandenBossche, D. J., 1977. **Ultimate strength and failure mode of spot-weld in high strength steels**. SAE Technical Paper n° 770214, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, EUA.

Xie, J., Kar, A. **Laser Welding of Thin Sheet Steel with Surface Oxidation**. Welding Research Supplement, October 1999, p. 343-s-348-s.

Yang, Y. S., Lee, S. H. **A Study on the Joining Strength of Laser Spot Weld for Automotive Applications**. J. Material Processing Technology, V94, 1999, p. 151-156.

Wang, J., Xia, Y., Zhou, Q., Zhang, J. **Simulation of Spot Weld Pullout by Modeling Failure Around Nugget**. SAE Technical Paper Series, January, 2006.

Wang, P. C. **Calculation of Laser Beam Weld Specification for Automotive Sheet Steel**. Welding Research Supplement, April, 1993, p. 155-s – 163-s.

Wang, P. C., Ewing, K. M. **A Comparison of Fatigue Strengths: Laser Beam vs. Resistance Spot Welds**. Welding Journal, October, 1991, p. 43-47.

Wang, P. C., Ewing, K. M. **Effect of Weld Design on the Fatigue Strength of Laser and Resistance Spot Welded Tubular T-Joints for Automotive Applications**. Welding Journal, September, 1994, p. 209-216.

Zhang, S. **Stresses in Laser-Beam-Welded Lap Joints Determined by Outer Surface Strains**. Welding Journal, January, 2002, p. 14s-18-s.

Zhou, M., Hu, S. J., Zhang, H. **Critical Specimen Sizes for Tensile-Shear Testing of Steel Sheets**. Welding Research Supplement, September, 1999, p. 305-s – 312-s.

APÊNDICE A – Resultados dos Testes Físicos de Arcan

