

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

ALEXANDRE PINHO DA SILVA

**SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA DE UM AÇO
ABNT 1006: processo e propriedades**

São Bernardo do Campo
2013

ALEXANDRE PINHO DA SILVA

**SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA DE UM AÇO
ABNT 1006: processo e propriedades**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro
Universitário da FEI como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica, orientado pelo Prof. Dr.
Roberto Bortolussi.

São Bernardo do Campo
2013

Silva, Alexandre Pinho da.

Soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica de um aço
ABNT 1006: processo e propriedades / Alexandre Pinho da Silva.
São Bernardo do Campo, 2013.

101 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi.

1. União no Estado Sólido. 2. Fricção. 3. Mistura. I. Bortolussi,
Roberto, orient. II. Título.

CDU 621.791



Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGM-10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Alexandre Pinho da Silva

Matrícula: 210335-6

Título do Trabalho: Soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica de um aço ABNT 1006: processo e propriedades.

Área de Concentração: Materiais e Processos

ORIGINAL ASSINADA

Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Data da realização da defesa: 04/09/2013

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 04 de Setembro de 2013.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Ass.: _____

Prof. Dr. Maurício David M. das Neves

Ass.: _____

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

Aos meus amados pais, pelo companheirismo,
motivação e formação do meu caráter.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um
novo começo, qualquer um pode começar agora e
fazer um novo fim.”

Chico Xavier

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Roberto Bortolussi, pela ajuda na definição do tema da pesquisa e orientação da mesma, pelos ensinamentos e paciência dispensada durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Sergio Delijaicov e ao Mestre Felipe Brandão, por ter disponibilizado o dinamômetro de mesa, assim como orientado quanto à aquisição e manipulação dos dados, que foram de suma importância para análise dos resultados e conclusões.

Ao Prof. Mestre William Naville e Airton Luis Morassi, do Instituto de Pesquisas e estudos industriais IPEI, pelas críticas, dicas e orientações.

Aos técnicos do laboratório do Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos da FEI (CDMatM-FEI), especialmente aos Srs. Gustavo Estrela, Ricardo Alexandre, Fabrizio Piedade, Geleci Silva, Vlamir Anaia Rodrigues.

Aos técnicos da usinagem Douglas Oliveira Mathias de Souza, Davi Maciel Ferreira, Luis lento e Sebastião Mariano Brandão.

Aos colegas do departamento de matérias da General Motors do Brasil, Dr. Marco A Colosio, Dr. Eduardo Nunes, Mestre Jose Castillo, Mestre Roberto R. Piovatto, Ivan H Umesaki e Mestre Ailton Garcia pelas orientações, suporte e incentivo.

Ao meu amigo Rafael Duarte Nepomuceno, por toda ajuda dispensado e companheirismo.

RESUMO

A necessidade de veículos mais leves e seguros induz a indústria automobilística a desenvolver ou aperfeiçoar projetos utilizando novos conceitos que confirmem ao produto soluções com desempenho melhor ou equivalente.

A Solda ponto por fricção e mistura mecânica (SPFMM), é um processo de união no estado sólido variante da solda por fricção e mistura (SFMM), que tem mostrado ser bastante eficiente na substituição da solda ponto por resistência elétrica (SPRE) principalmente em alumínio e suas ligas, que devido a elevada condução elétrica e térmica, desenvolve grande gradiente térmico e alto consumo energético.

As vantagens da SPFMM, não estão ligadas somente à resistência mecânica que é melhor ou equivalente a SPRE, mas também no menor investimento em equipamentos e menor consumo energético.

Motivado pelas vantagens técnicas e econômicas e também pela carência em publicações, este trabalho teve como objetivo estudar a influencia das variáveis de processo: rotação e tempo de mistura na resistência em ensaio de tração em juntas sobrepostas de um aço baixo carbono ABNT 1006 laminado a frio através da SPFMM.

A ferramenta rotativa utilizada na produção das juntas foi construída em aço rápido e sua geometria foi desenvolvida através de trabalhos já publicados e interações feitas durante essa pesquisa. As juntas foram produzidas com rotações de 800, 1200 e 1600 rpm com tempo de mistura de 1, 3 e 5 s.

As juntas realizadas com rotação de 1200 rpm e tempo de mistura de 5 s apresentaram os melhores resultados médios em ensaio de tração e 88% de todos os espécimes produzidos atingiram a resistência mínima recomendada para SPRE.

Palavras-chave: União no estado sólido. Fricção. Mistura

ABSTRACT

The requirement of lighter and safer vehicles drives the automobile industry to develop and/or optimize product design employing new concepts that grants to the product solutions with equivalent or better performance.

The friction stir spot welding (FSSW) is a solid-state joining, variant of friction stir welding (FSW), which has shown to be very effective in replacing the electric resistance spot welding (ERSW) mainly when applied over aluminum and its alloys, which due to the high electrical and thermal conduction, develops great thermal gradient and high energy consumption.

The advantages of FSSW are not linked only to the mechanical stress behavior which is equivalent or better than RSW, but also on lower investments in equipment and reduced energy consumption.

Motivated by technical and economic advantages and also over the shortage in technical publication, this research has as objective analyzing the influence of the process variables in the FSSW: rotation speed and dwell time regarding shear tension test on overlapped joints of a cold rolled low carbon steel ABNT 1006 using FSSW.

The rotating tool used in the joints' production was built in high speed steel and its geometry was developed over publication already done and interactions made during this research. The joints were produced with rotational speed of 800, 1200 and 1600 rpm and dwell time of 1, 3 and 5 s.

Joints made with rotation of 1200 rpm and dwell time of 5 s, showed the best average results in shear tension test and 88% of all specimens produced reached the recommended minimum resistance for RSW.

Keywords: Solid-state joining. Friction. Stir.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do processo da SPRE:.....	22
Figura 2 - Máquina de SPRE, tanto por ponto como por resalto.	24
Figura 3 - Modelos de pistolas para SPRE:.....	25
Figura 4 - Processo global de deformação e falha por cisalhamento de um espécime em ensaio de tração:.....	27
Figura 5 - Região de iniciação da fratura de um espécime submetido a um ensaio de tração.	27
Figura 6 - Micrografia ótica mostrando os estágios do processo de falha de um espécime submetido a um ensaio de tração: (a), (b), e (c) mostra o processo da estrição localizada e (d) a fratura final (reproduzido do Zuniga e Sheppard)	28
Figura 7 - Fractografia em MEV de espécime: As ondulações circulares indicam um mecanismo de fratura dútil.	28
Figura 8 - Distribuição de tensão assumida envolta do botão de solda em ensaio de tração. ..	29
Figura 9- Valores de força mínima de resistência ao cisalhamento para aços do grupo 2.	31
Figura 10 - Representação esquemática do processo de solda costura por resistência.	32
Figura 11- Exemplos de montagem a frio.	34
Figura 12- Comparação de distribuições de tensão em vários tipos de juntas.	35
Figura 13 - Vista isométrica do processo de solda por fricção e mistura.	37
Figura 14 - Vista frontal e de topo do processo de solda por fricção e mistura	37
Figura 15 – Perfis de ferramenta para SFMM.	38
Figura 16 - Princípio básico de “Re-stir”- mostrando a técnica de inversão.	40
Figura 17 - Equipamento da SFMM Marca ESAB.	41
Figura 18 - Diferentes detalhes de ombros utilizados para aumentar o fluxo do material e a eficiência do ombro	43

Figura 19 - Perfis de ferramentas rotativas. a) Pino cilíndrico com filetes; b) Protrusão oval “Whorl”; c) Protrusão “Flared-Triflute”	44
Figura 20 - Ferramenta "bobbin" de auto-reação	45
Figura 21 - Ferramenta "bobbin" de auto-reação – Forças de reação: 1) Metal base; 2) Ombro superior; 3) Protrusão; 4) Ombro inferior; 5) forças de reação.	46
Figura 22 - Etapas do processo de solda ponto por fricção e mistura mecânica:	48
Figura 23 - Ilustração esquemática do modelo de fluxo da SPFMM	49
Figura 24 - Comparação entre os dados de saídas de força e deslocamento da ferramenta durante SPFMM utilizando controle de processo por força controlado e deslocamento controlado.	50
Figura 25 - Diagrama esquemático do processo de soldagem por SPFMM convencional.	52
Figura 26 - Diagrama esquemático do processo de soldagem por SPFMM de reenchimento.	53
Figura 27 - Figura esquemática do movimento da ferramenta rotativa e vista superior das variantes de processo de SPFMM. (a) Convencional, (b) Transversal, (c) Balanço.	54
Figura 28 - Dispositivo de soldagem por fricção e mistura mecânico - Tipo C.	55
Figura 29 - Sistema robotizado multiaxial de seis eixos para SPFMM	55
Figura 30 - Figura esquemática da ferramenta rotativa.	58
Figura 31 - Modo de falha de um espécime em alumínio 6111-T4 - ferramenta de ombro côncavo.	59
Figura 32 - Micrografia ótica de uma falha em um espécime feito em alumínio 6111-T4 – ferramenta de ombro côncavo.	60
Figura 33 - Modo de falha de um espécime em alumínio 6111-T4 - ferramenta de ombro côncavo.	61
Figura 34 - Micrografia ótica de uma falha em um espécime feito em alumínio 6111-T4 – ferramenta de ombro plano.	62

Figura 35 - Microestrutura do metal base ABNT 1006 laminado a frio observada em MO Olympus SC30 (ataque Nital 2%).	63
Figura 36 - Corpo de provas conforme ASTM E8/E8M – 11, com modificações na região de fixação das garras.	64
Figura 37 - Perfil da ferramenta rotativa	64
Figura 38 - Base de apoio dos espécimes (interface do dinamômetro de mesa)	65
Figura 39 – Dinamômetro de mesa.	66
Figura 40 - Esquema de montagem das células de carga no dinamômetro	67
Figura 41 - Fotos do dinamômetro de mesa	67
Figura 42- Gráfico esquemático da representação do tempo total de processo.....	68
Figura 43 - Dimensões principais do eletro de cobre eletrolítico.....	69
Figura 44- Dimensões do espécime para ensaio de tração.	70
Figura 45 - Máquina universal de ensaios MTS utilizada na realização dos ensaios de tração, com capacidade de carga de 250kN. LabMat-FEI.	70
Figura 46 – Embutidor Techpress 2.	71
Figura 47 - Politriz automática Struers Abramim	72
Figura 49 - Gráfico de superfície – Análises prévias para definição do planejamento experimental.	73
Figura 50 - Forças máximas obtidas em ensaio de tração para cada condição de soldagem em sequência aleatória.....	74
Figura 51 - Forças máximas obtidas em ensaio de tração para cada condição de soldagem em sequência de execução.....	75
Figura 52 - Força máxima obtidas em ensaio de tração comparada ao valor de resistência mínima esperada conforme AWS D8.1M: 2007	76
Figura 53 - Projeto de Experimentos sem o desgaste da ferramenta.....	77

Figura 54 - Gráfico das médias marginais e confiabilidade - Projeto de experimentos sem desgaste da ferramenta.....	77
Figura 55 - Gráfico de Pareto - Projeto de Experimentos com o desgaste da ferramenta.....	78
Figura 56 - Gráfico das médias marginais e confiabilidade - Projeto de Experimentos com desgaste da ferramenta.....	79
Figura 57 - Gráfico de superfície – Projeto de Experimentos sem desgaste da ferramenta.	80
Figura 58 - Gráfico de superfície – Projeto de Experimentos com desgaste da ferramenta.....	81
Figura 59 - Gráfico qualitativo da energia fornecida e força máxima obtida em ensaio de tração.	83
Figura 60 - Gráfico energia aplicada em cada configuração do processo	83
Figura 61 - Foto do projetor de perfil aplicação 100x.....	84
Figura 62 - Fotos da ferramenta rotativa sem e com desgaste.....	84
Figura 63 - Imagem sobreposta da ferramenta rotativa sem e com desgaste.	85
Figura 64 - Secção transversal sobreposta da ferramenta rotativa sem e com desgaste.....	86
Figura 65 – Aquisição dados do processo - força normal/torque/energia - 1200 rpm x 5 s de tempo de espera esp. 06 - seq. 06	87
Figura 66 - Aquisição dados do processo - força normal/torque/energia - 1200 rpm x 5 s de tempo de espera esp. 15 - seq. 11	87
Figura 67 - Aquisição dados do processo - força normal/torque/energia - 1200 rpm x 5 s de tempo de espera esp. 24 - seq. 41	88
Figura 68 - Gráfico percentual do comportamento da força máxima em ensaio de tração, força normal máxima, torque máximo e energia fornecida em função do desgaste da ferramenta...	89
Figura 69 - Macroestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, mostrando as diferentes zonas formadas, ataque com Nital 2%.....	89

Figura 70 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, ataque com Nital 2%.....	90
Figura 71 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, mostrando as diferentes zonas formadas em função da granulação encontrada, ataque com Nital 2%.....	91
Figura 72 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, mostrando a transição da zona de ligação com o metal base, ataque com Nital 2%..	91
Figura 73 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, ataque com Nital 2%.....	92
Figura 74 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 1600 rpm e 1 s tempo de mistura, ataque com Nital 2%.....	93
Figura 75 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 3 s tempo de mistura, ataque com Nital 2%.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ciclo da SPRE para chapas de aço-1010.....	23
Tabela 2 - Classificação de aços para fins de soldagem a ponto de resistência.	31
Tabela 3 - Sumário de dimensões básicas de ferramentas de SFMM para dado metal base....	43
Tabela 4 - Sumário dos materiais atualmente utilizados em ferramentas rotativas de SFMM.	46
Tabela 5 - Composição química do aço baixo carbono ABNT 1006 laminado a frio.	63
Tabela 6 - Sequencia de preparação das amostras (etapas de lixamento e polimento) para caracterização microestrutural.	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 JUSTIFICATIVA	17
3 OBJETIVO	19
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1 Processos de união de carrocerias	20
4.1.1 Solda ponto por resistência elétrica (SPRE).....	21
4.1.2 Solda costura por resistência	32
4.1.3 Processo de montagem a frio.....	34
4.1.4 Uniões adesivas	34
4.1.5 Solda por fricção e mistura mecânica (SFMM).....	36
4.1.6 Solda ponto por fricção e mistura mecânica (SPFMM)	47
5 MATERIAIS E MÉTODOS	63
5.1 Materiais.....	63
5.2 Métodos	64
5.2.1 Ferramenta rotativa.....	64
5.2.2 Base de apoio para espécimes.	65
5.2.3 Dinamômetro de mesa.	66
5.2.4 Produção das Juntas com SPFMM.....	68
5.2.5 Produção das Juntas com SPRE	69
5.2.6 Ensaio de tração	70
5.2.7 Microscopia ótica	71
6 RESULTADOS	73
6.1 Forças obtidas em ensaio de tração.....	73
6.2 Forças normal, torque e energia aplicados na junta.	81
6.3 Macro e microestrutura	89
7 CONCLUSÕES.....	94

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
---	-----------

REFERÊNCIAS	97
--------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

Solda ponto por fricção e mistura mecânica (SPFMM) é um processo de união no estado sólido, onde a combinação entre a força e a rotação de uma ferramenta provoca o aquecimento por atrito e a deformação plástica do metal base, que concomitantemente gera calor devido à mistura do metal base (dissipação viscosa). Variante do processo de solda por fricção e mistura mecânica (SFMM), a SPFMM tem recebido considerável atenção em várias indústrias, entre elas a automobilística, onde, devido a regulamentações de segurança para os veículos de passageiros e emissão de poluentes mais severas, focou-se no desenvolvimento de componentes com menor massa, sem perda de desempenho. A substituição e/ou aplicação de novos materiais tornou-se uma das principais alternativas para a redução de massa, porém um dos maiores limitantes técnicos desta opção é o método de união destes materiais.

A necessidade de redução de massa foi identificada pela indústria automobilística desde 1973, com a primeira crise do petróleo, quando se tornaram claras a vulnerabilidade e a insustentabilidade quanto aos recursos naturais. Naquele momento, surgiram os chamados aços de alta resistência e baixa liga. Mesmo após o término da crise do petróleo em meados de 1985, a crescente exigência dos consumidores por maior conforto dos veículos implicou na adição de componentes, que aumentaram a massa do veículo como, por exemplo: ar condicionado, direção hidráulica, vidros elétricos, e outros componentes. Soma-se a esse fato a globalização na década de 90, marcada pelo aumento da competitividade e dos desafios ecológicos, que impulsionaram o contínuo desenvolvimento de uma nova família de aços, conhecidos como aços avançados de alta resistência (GORNI, 2008, p.2).

Não somente os aços, mas também o alumínio e magnésio e suas ligas tiveram um grande impulso no desenvolvimento, alavancado pela indústria automobilística nos anos 90. O alumínio, magnésio e ligas de ambos são, certamente, mais caros se comparados ao aço e ferro fundido em aplicações similares, entretanto, sua capacidade de ter paredes mais finas e variáveis no seu processo de fundição, melhor usinabilidade e acabamento próximo ao produto final tornam esses materiais mais competitivos (GHASSEMIEH, 2011, p. 368).

Apesar do grande aumento da aplicação dos aços avançados na indústria automobilística, a solda ponto por resistência elétrica (SPRE) ainda é a principal escolha para a união dos mesmos, entretanto, apresenta limitações técnicas e/ou dificuldades no controle de seu processo. O gradiente térmico apresentado após a soldagem a ponto por resistência pode ser um limitante técnico em uniões de materiais de mesma espécie, similares e dissimilares,

portanto a aplicação de solda por fricção e mistura mecânica, por se tratar de um processo de união no estado sólido, apresenta viabilidade técnica e econômica em vários tipos de materiais como ligas de magnésio (YANG, *et al.*, 2010, p. 4390), alumínio e sua ligas (REYNOLD, HOOD e TANG, 2004, p.491), aço martensítico para estampagem a quente (HOVANSKI, SANTELLA e GRANT, 2007, p. 873), aços bifásicos (FENG, *et al.*, 2005, p. 1), aços TRIP (MAZZAFERRO, 2008) e aços ao carbono (CUI, *et al.*, 2006, p. 673) e também em união de materiais dissimilares como ligas de alumínio com aço de baixo carbono e magnésio com fibra de vidro e Poli (sulfeto de p-fenileno) (AMANCIO, *et al.*, 2011, p. 1).

2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de veículos mais leves e seguros induz a indústria automobilística a desenvolver ou aperfeiçoar projetos utilizando conceitos do chamado “ECODESIGN” que seria “ECONomy” e “ECOlogy”. Este conceito integra vários aspectos de projeto e de meio ambiente objetivando criar soluções sustentáveis, que satisfaçam as necessidades e desejos do consumidor. Existem várias motivações, além dos aspectos ambientais, para a aplicação do conceito “ECODESIGN”, como por exemplo: redução de custos, vantagem competitiva, imagem da empresa, melhoria da qualidade e cumprimento de requisitos legais (BADARINARAYAN, HUNT e OKAMOTO, 2007, p. 137). O conceito-eco pode liderar três níveis de intervenção no projeto do produto: (a) aperfeiçoamento para menor impacto no meio ambiente, (b) intensivo esforço no desenvolvimento, como a modificação do produto e (c) intervenção radical, como a substituição de produtos ou serviços (BADARINARAYAN, HUNT e OKAMOTO, 2007, p. 138).

Um estudo comparativo vislumbrando a substituição da SPRE pela SPFMM se enquadra no nível (b) do conceito de Eco projetos, que seria a modificação do processo de união do produto buscando-se melhorias ao produto, processo e ao meio ambiente.

Podemos utilizar como exemplo o trabalho feito pela Mazda Motor Corporation que introduziu a SPFMM no processo produtivo da porta traseira e capô do modelo RX-8, onde era utilizada SPRE. Até aquele presente momento, a utilização da SPRE tinha se mostrado como a tecnologia de união mais viável e disponível para a montagem de peças de carroceria em alumínio. Porém, a SPRE necessita que uma alta corrente passe instantaneamente pelo alumínio para a execução da solda. Além do alto consumo de energia elétrica, há a necessidade de equipamento especial para a soldagem, porque o alumínio tem maior condução elétrica e térmica comparado ao aço, o que dificulta a soldagem por SPRE.

A Mazda reportou uma redução no consumo de energia elétrica em 99% usando esse processo, que diferente da SPRE, não precisa de refrigeração, ar comprimido e alta corrente elétrica. Além disso, o equipamento envolvido para a produção apresenta custo 40% menor em relação ao processo antecessor (MAZDA MOTOR CORPORATION, 2003).

A SPFMM também apresenta outras vantagens como (SMITH, et al., 2004):

- a)Qualidade da solda;
- b)Menor distorção do metal base devido ao aporte térmico;
- c)Não requer metal de adição e gás de proteção;

- d) Não gera fuligem, fumos ou ozônio;
- e) Pode ser aplicada em qualquer posição;
- f) Vida a fadiga de 2 a 10 vezes maior que soldagem por arco elétrico;
- g) Solda materiais de mesma espécie similares e dissimilares;
- h) Pode soldar espessuras que variam entre 1 a 50 mm;
- i) Processo silencioso, sem faíscas e emissão de luz ultravioleta;
- j) Não requer preparo químico antes da realização da solda.

3 OBJETIVO

Estudar a influencia das variáveis de processo da SPFMM, rotação e tempo de mistura nas propriedades mecânicas obtidas em ensaio de tração usando uma ferramenta de perfil de ombro convexo com superfície lisa e pino cônico liso com ponta plana.

O estudo é desenvolvido conforme os seguintes tópicos:

- a) Analise dos valores de resistência mecânica por meio de planejamento experimental 2^k , considerando como variáveis independentes a rotação e tempo de mistura e variável dependente a força máxima atingida em ensaio de tração;
- b) Identificar através da macrografia as diferentes zonas formadas na junta;
- c) Caracterizar através da micrografia as diferentes zonas formadas na zona de ligação.

I

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Processos de união de carrocerias

Carroceria é definida em uma configuração padrão como uma montagem da parte estrutural e painéis feitos com material homogêneo, como aço, alumínio e compósitos. Contudo, as atuais regulamentações veiculares de segurança de passageiros e de emissão de poluentes, exigem a construção da carroceria com materiais de classes de resistência e composições diferentes, de forma que as características de desempenho sejam mantidas.

Após a união da carroceria, outros componentes desmontáveis são adicionados, como elementos móveis (portas, capô, tampa traseira, travas e dobradiças), elementos externos (para-choques, espelho retrovisores, spoilers, vidros, faróis e lanternas) e itens de acabamento interno (painel de instrumentos, assentos, carpetes, painéis, cintos de segurança e air-bags) que juntos constituem a estrutura do veículo.

A carroceria tem como as principais funções:

- a) Estética: para fornecer uma aparência geral agradável, superfície consistente e com qualidade nos detalhes.
- b) Função estrutural: Suportar o peso dos passageiros transportados e carga, bem como o sistema de propulsão do veículo, assim como resistência a tensões mecânicas provenientes do sistema de suspensão e resistência ao impacto em caso de colisão.
- c) Ergonomia e espaço: para fornecer fácil acesso e espaço adequado para o motorista, passageiros e mercadorias transportadas (MORELLO, *et al.*, 2011, p.91).

Diversas técnicas são aplicadas na união dos componentes de uma carroceria, entre elas pode citar as principais: SPRE, solda a arco elétrico, solda brasagem, brasagem, solda laser, SFMM e SPFMM; fixação fria permanente que são rebiteagem e punctionamento; união química com adesivo (MORELLO, *et al.*, 2011, p.136). Todos os processos mencionados possuem larga aplicação na união de carroceria e demais componentes automotivos, porém só devem ser abordados neste estudo os que possuem similaridades em aplicação e potencial de substituição por SFMM e SPFMM, que são: SPRE, solda costura por resistência elétrica, processos de montagem a frio e uniões adesivas (MORELLO, *et al.*, 2011, p.132).

4.1.1 Solda ponto por resistência elétrica (SPRE)

A união entre duas chapas na soldagem por resistência elétrica ocorre através da fusão localizada na região de contato entre ambas devido ao calor gerado pela resistência ao fluxo da corrente elétrica, que passa através das chapas comprimidas pontualmente por eletrodos.

A SPRE tem seu processo composto por três fases: compressão, soldagem e fase de espera. Compressão consiste na aplicação da força dos eletrodos contra a peça, com o objetivo de obter a quantidade de pressão apropriada, antes de se iniciar o fluxo de corrente elétrica. Na soldagem, a corrente elétrica passa pelas chapas, enquanto a compressão dos eletrodos é mantida, gerando o calor. Durante a fase de espera a corrente é desligada e a força é conservada, permitindo que a solda seja resfriada sobre compressão.

O ponto de solda é o volume de material fundido, formado entre a interface das peças soldadas com um diâmetro similar ao dos eletrodos, como indicado na figura 1. A penetração do ponto de solda deve ser pelo menos 20% da chapa mais fina, e não deve exceder 80% desta espessura (PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 55). A passagem da corrente se inicia após a aplicação da força dos eletrodos contra as chapas, levando ao aumento da temperatura na interface delas, desenvolvendo a fusão do ponto de solda. No final da soldagem ocorre a deformação plástica entre as peças, produzindo uma visível e permanente contração da espessura. Se a corrente ou a pressão for muito alta, o material fundido pode ser expulso para a atmosfera.

A SPRE tem larga aplicação na união de aços de baixo carbono, devido sua alta resistividade elétrica e baixa condutividade térmica, diferente dos eletrodos que possuem baixa resistividade elétrica e alta condutividade térmica. Já o alumínio e suas ligas têm resistividade elétrica e condutividade térmica próxima ao do bronze, um dos materiais mais utilizados na fabricação de eletrodos, o que dificulta a aplicação deste processo de união, necessitando de um nível alto de corrente elétrica, e consequentemente alto consumo de energia, podendo danificar os eletrodos de forma considerável. Outros materiais como aço galvanizado, ligas com maior resistência ao calor e metais reativos também são soldados por este processo.

A SPRE é um processo de relativo baixo custo, é amplamente utilizado na indústria automotiva e aeroespacial, bem como na fabricação de equipamentos industriais e domésticos.

As maiores vantagens deste processo são: a alta velocidade de soldagem com baixa distorção térmica, respectivamente mais rápido e menor do que na solda a arco elétrico, é de fácil automação, não requer um operador com alta qualificação e nem preparação prévia do

material a ser soldado e tampouco material de adição. Quanto as limitações, há a necessidade de juntas de sobreposição em materiais finos, usualmente até a espessura de 4 mm, as juntas não são rígidas e têm baixa resistência a tração e a fadiga, além dos custos iniciais do equipamento serem maiores que os da solda arco convencional (PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 56).

4.1.1.1 Resistência elétrica na SPRE

O calor gerado depende basicamente da corrente elétrica, do tempo de aplicação e da resistência elétrica total. Esta resistência total é composta por cinco resistências parciais, como indicado na figura 1. As resistências R_1 e R_5 são indesejáveis, pois provocam calor e consequentemente a degradação dos eletrodos, portanto, devem ser as mais baixas possíveis, principalmente em casos de solda de metais de baixa resistividade. As resistências R_2 e R_4 são as resistências das peças que assumem importância particular no período final da soldagem. A resistência R_3 é a mais importante porque determina a formação do ponto de solda, provocada a partir da fusão localizada do metal base devido ao calor gerado na região de contato entre as peças. Portanto, a resistência total é a soma das resistências elétricas parciais, calculada a partir da equação (1) (BRANDI, 1992, p.217).

$$RT = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (1)$$

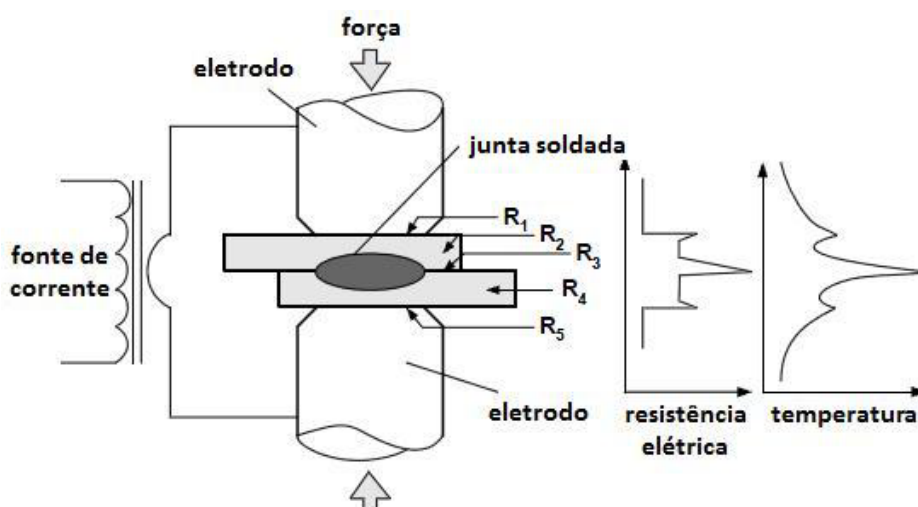


Figura 1 - Representação esquemática do processo da SPRE:

R_1 e R_5 - resistência de interface entre eletrodo e peça; R_2 e R_4 - Resistência da peça; R_3 - Resistência entre as chapas.

Fonte: “adaptado de” PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 46.

4.1.1.2 Ciclo da SPRE.

As fases da SPRE são: compressão, soldagem e fase de espera. Estes são expressos em ciclos, que se divididos por 60, resultarão no tempo de soldagem em segundos, se a frequência da corrente for de 60 Hz. A tabela 1 foi desenvolvida para demonstrar o ciclo da SPRE para chapas de aço SAE 1010 (BRANDI, 1992, p.226).

Tabela 1 - Ciclo da SPRE para chapas de aço-1010.

Espessura da chapa mais fina (mm) a	Tipos de Eletrodo I e II (R = 75 mm)		Força entre eletrodos (N)	Tempo de soldagem (impulso único) ciclos	Corrente de soldagem (A)	Contato mínimo p/ superposição	Espaçamento mínimo entre os centros das soldas (mm)	Diâmetro do ponto de solda (mm)	Resistência mínima ao cisalhamento (N)	
									Limite de resistência a tração	
	D máx. (mm)	d máx. (mm)							<480 MPa	> 480 MPa
0,25	15,9	3,2	890	4	4.000	9,5	3,2	2,5	580	800
0,5		4,8	1.350	6	6.500	11,1	9,5	3,3	1.420	1.96
0,8		4,8	1.800	8	8.000	11,1	13	4,0	2.540	3.56
1,0	12,7	6,4	2.250	10	9.500	12,7	19	4,8	4.100	5.4
1,3		6,4	2.900	12	10.500	14,2	22	5,6	6.000	-
1,6		6,4	3.500	14	12.000	15,8	25	6,4	8.230	-
2,0	15,9	8,0	4.500	17	14.000	17,4	32	7,4	12.000	-
2,4		8,0	5.800	20	15.500	19,0	38	7,9	15.350	-
2,5	22,2	9,5	7.100	23	17.500	20,6	41	8,1	18.460	-
3,2		9,5	8.000	26	19.000	22,2	44	8,4	22.250	-

Fonte: “adaptado de” BRANDI, 1992, p.226.

4.1.1.3 Máquina de soldagem por resistência elétrica

As máquinas de soldagem por resistência elétrica são classificadas como suspensas ou estacionárias, ambas apresentam três componentes fundamentais: sistema mecânico, circuito primário e sistema de controle, a representação esquemática pode ser vista na figura 2.

O sistema mecânico é utilizado para fixação da peça e aplicação da força no eletrodo. O sistema primário consiste de um transformador, cuja função é regular a corrente de soldagem, já o sistema de controle pode atuar somente sobre o tempo de soldagem ou também sobre a ação mecânica da aplicação da força no eletrodo. Todos os componentes trabalham em conjunto para regular as variáveis mais importantes para o processo, controlando a força do eletrodo, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente de soldagem. (BRANDI, 1992, p. 235)

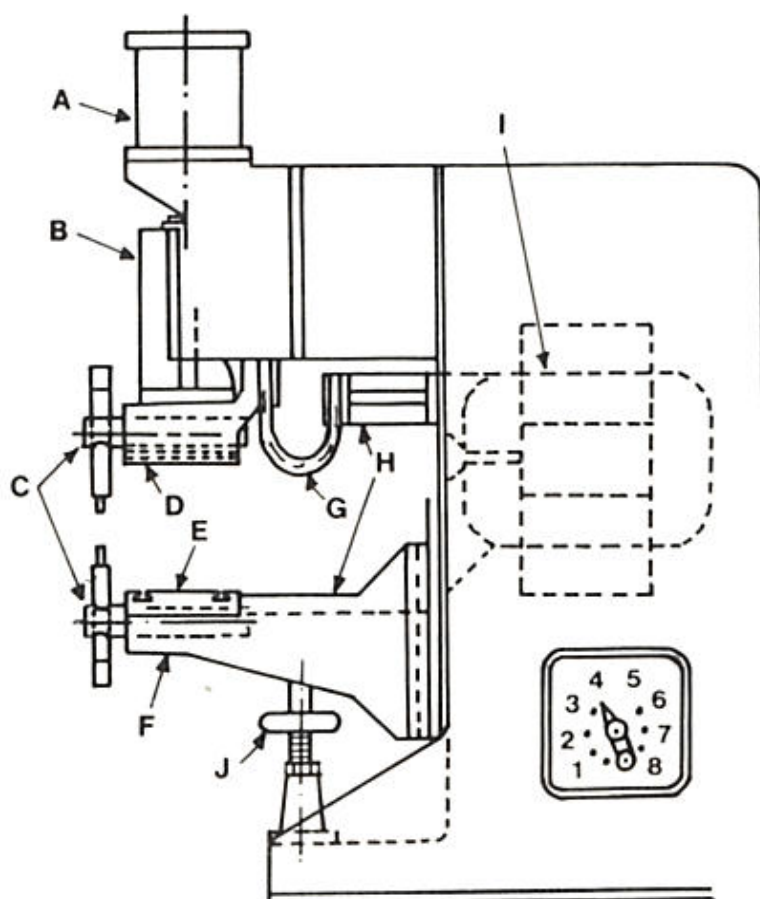


Figura 2 - Máquina de SPRE, tanto por ponto como por ressalto.

A- cilindro hidráulico ou pneumático; B - cabeçote de solda; C- eletrodos com seus suportes; D - mesa superior; F - chapa inferior de reforço; G - contatos flexíveis; H - terminais de contato superior e inferior; I- transformador secundário; J - suporte da chapa de reforço e macaco de parafuso.

Fonte: BRANDI, 1992, p.235.

Existem duas variações de soldagem a ponto, solda ponto direta e indireta. A solda ponto é direta, quando gerada através de dois eletrodos opostos, executada através de pistolas de soldagem de vários tamanhos, configurações e modos de fixação (figura 3A). Em contrapartida, a solda ponto indireta é gerada através de um eletrodo que impõe uma pressão sobre uma das chapas da união, enquanto uma placa de bronze apoia a chapa do lado oposto, com o propósito de manter a chapa em uma superfície plana evitando marcas e amassamentos, que pode apresentar no lado do nariz do eletrodo devido às imperfeições que possam existir na ponta do eletrodo. (figura 3B) (MORELLO, *et al.*, 2011, p. 137).

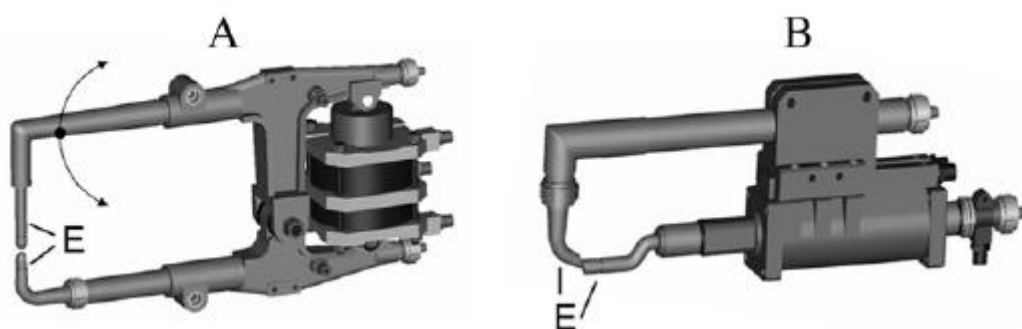


Figura 3 - Modelos de pistolas para SPRE:

A) Pistola de solda ponto Tipo X; B) Pistola de solda ponto tipo C; E eletrodos.

Fonte: MORELLO, *et al.*, 2011, p. 139.

4.1.1.4 Eletrodos, materiais e dimensionamento.

Os eletrodos apresentam uma função fundamental na operação de soldagem por resistência, pois são eles que ficam em contato direto com as peças a serem soldadas, transportam a corrente de soldagem, aplicam a força na região da solda e dissipam parte do calor gerado. Desta forma, devem possuir resistência mecânica elevada, principalmente em altas temperaturas, pois são submetidos a densidades de corrente que podem chegar a 10000 A/cm² e pressões de até 400 MPa, não podendo deformar e nem formar liga com o metal base (BRANDI, 1992, p. 236).

Os materiais mais utilizados para os eletrodos são ligas de cobre-cromo, cobre-cromo-zircônio, cobre-cadmio, cobre-berílio, etc. Possuem temperaturas de recozimento elevadas e grande resistência à compressão com boa resistência ao atrito. Essas ligas são submetidas a tratamento mecânico e térmico, onde podem ser trefilados, forjados, entre outros, sendo solubilizados e resfriados rapidamente para que em seguida sofram um tratamento de

envelhecimento em temperaturas que excedem a temperatura de trabalho (BRANDI, 1992, p. 236).

As faces de contato do eletrodo com a peça, de forma geral, devem ser aproximadamente 1,6 mm maiores que o diâmetro do ponto de solda formado, o qual pode ser calculado através das equações (2) e (3), que possuem resultados semelhantes, desde que as chapas não sejam nem muito finas nem muito grossas, isto é, em relação entre elas. De forma geral chapas grossas são aquelas cuja espessura varia de 6,1 mm a 76,2 mm e com largura variando de 600 a 1220 mm. e as chapas finas a quente são chapas cuja espessura varia de 1,9 a 6,00 mm e com largura variando de 600 a 1220 mm, chapas de dimensão mais finas são relaminadas a frio. Caso os valores obtidos através das equações (2) e (3) sejam muito diferentes, deve-se usar somente a equação (3) (BRANDI, 1992, p. 221).

$$d = 5\sqrt{S} \quad (2)$$

$$d = 2,5 + 2S \quad (3)$$

4.1.1.5 Modos de falha de soldagem a ponto por resistência elétrica.

Ensaio de tração em corpo de prova em cisalhamento – O processo de falha em espécimes em cisalhamento pode ser representado conforme figura 4. Ao iniciar a aplicação da força de tração, o ponto de solda sofre uma rotação, conforme a figura 4 (b), alinhando-se a força. Este efeito ocorre mesmo com a adição de contra chapas, de mesma espessura, na garra da máquina de tração durante o ensaio. Essa adição garante a linha de centro da aplicação de força no centro longitudinal do botão de solda. No estágio mostrado na figura 4 (c), o material em volta do ponto de solda é predominantemente submetido a uma carga de tração e a deformação próxima ao ponto de solda é similar a de um botão rígido embutido em um material dúctil. Com o aumento da tensão, na região entre a junção do botão de solda e o metal base, ocorre uma estricção em uma das duas extremidades, $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$, do metal base. Note que cada extremidade pertence a uma das chapas (superior ou inferior) da união. Uma fratura dúctil ocorre em um dos dois pontos, estágio (c), quando a tensão limite de resistência do material é atingida. Eventualmente, a falha por destacamento da solda ocorre, com o crescimento de uma trinca, que se iniciou em volta do botão da solda (CHAO, 2003, p. 126).

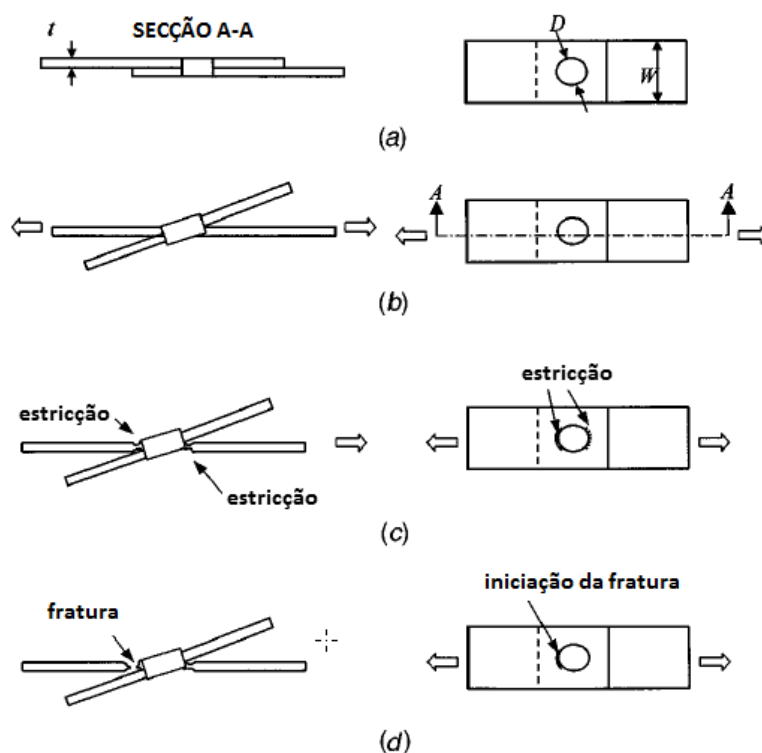


Figura 4 - Processo global de deformação e falha por cisalhamento de um espécime em ensaio de tração: (a) configuração inicial, (b) rotação do ponto de solda (alinhamento com a linha de força do carregamento); (c) alongamento, afinamento e estricção, e (d) fratura dúctil devido à estricção localizada. Fonte: “adaptado de” CHAO, 2003, p.127.

O carregamento é reduzido a zero, a partir do instante que é observada a fratura durante o ensaio de tração (figura 5). A linha preta na parte inferior do botão da solda é a trinca indicando o local do início da fratura. Como pode ser visto na figura 5, o início da fratura encontra-se em $\theta = 0^\circ$ e algumas propagações de trincas ao longo da circunferência de 2 a 4 mm do botão de solda já ocorreram no espécime.

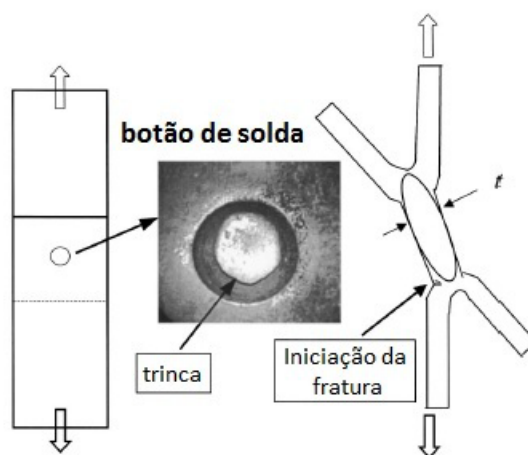


Figura 5 - Região de iniciação da fratura de um espécime submetido a um ensaio de tração. A linha preta abaixo do botão de solda é uma trinca. Fonte: “adaptado de” CHAO, 2003, p.127.

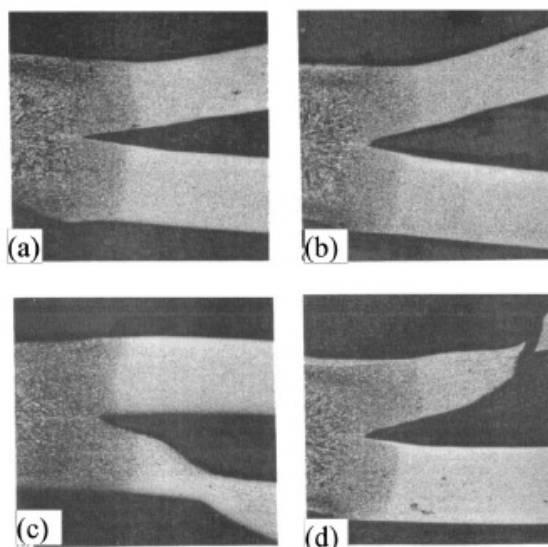


Figura 6 - Micrografia ótica mostrando os estágios do processo de falha de um espécime submetido a um ensaio de tração: (a), (b), e (c) mostra o processo da estrição localizada e (d) a fratura final (reproduzido do Zuniga e Sheppard)

Fonte: “adaptado de” CHAO, 2003, p.128.

As análises feitas nas figuras 4 a 6 demonstram que o mecanismo de falha nos espécimes é causado por carregamento trativo, mesmo sendo cisalhante o carregamento global. Para melhor análise deste ponto, um espécime foi cortado e preparado na região da fratura a $\theta = 0^\circ$ e analisado com microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 7 mostra uma fractografia com 1000x de ampliação. As ondulações circulares indicam um mecanismo de fratura dúctil por tração com grande plasticidade na superfície do material (CHAO, 2003, p. 128).

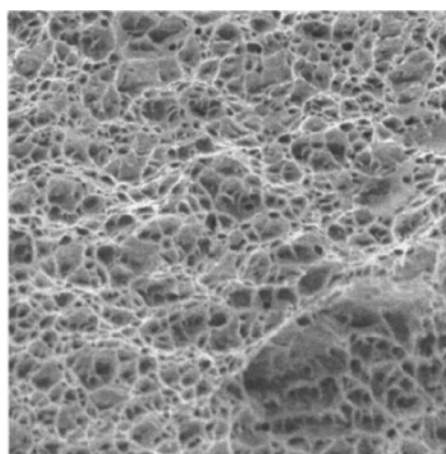


Figura 7 - Fractografia em MEV de espécime: As ondulações circulares indicam um mecanismo de fratura dúctil.

Fonte: “adaptado de” CHAO, 2003, p.128.

4.1.1.6 Análise de tensão e carga de falha.

As falhas em pontos de solda são geralmente associadas a muitos parâmetros como, por exemplo, tensão residual, heterogeneidade do material, parâmetros de solda, espessura, tamanho do ponto, propriedade do material na ZAC e metal base. Para incluir todos esses parâmetros em uma análise de falha, seria uma tentativa de substancial esforço analítico, numérico e experimental. Além disso, qualquer critério complexo iria limitar severamente o seu uso em aplicações de engenharia, portanto uma abordagem mais simplificada de distribuição de tensão com base nos mecanismos de falha em corpos de prova submetidos a ensaio de tração tem maior aplicabilidade no campo da engenharia. Desta forma, estas tensões podem ser relacionadas com as forças aplicadas no espécime e subsequentemente com a carga de ruptura e a tensão limite de resistência.

Para corpos de provas de cisalhamento onde a falha ocorre predominantemente por um carregamento de tração uniaxial e o ponto de solda é circular, uma tensão de tração distribuída harmônica envolta do ponto de solda é assumida, como mostrado na figura 8.

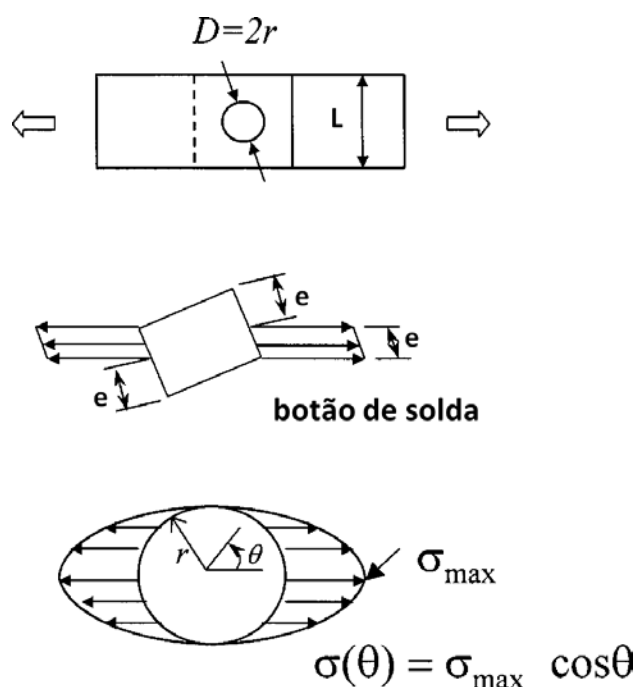


Figura 8 - Distribuição de tensão assumida envolta do botão de solda em ensaio de tração.

Fonte: “adaptado de” CHAO, 2003, p.129.

A distribuição de tensão pode ser escrita por:

$$\sigma(\theta) = \sigma_{\max} \cos \theta \quad (4)$$

Onde $\theta = -90^\circ$ a $\theta = 90^\circ$ tensão de tração distribuída máxima é $\sigma_{\max}$ que ocorre em $\theta = 0^\circ$. Devido à simetria, existe outra tensão de tração distribuída similar em $\theta = 90^\circ$ e $\theta = 270^\circ$, com $\sigma_{\max}$ em $\theta = 180^\circ$ sobre a outra peça. A condição de equilíbrio requer que:

$$P = \int_{\pi/2}^{\pi/2} \sigma(\theta) \cdot \frac{d}{2} \cdot \cos \theta \cdot d\theta = \frac{\pi}{4} t f \sigma_{\max} = 0.785 t d \sigma_{\max} \quad (5)$$

A equação (5) refere-se à tensão máxima local devido à força aplicada no corpo de provas, onde P é força aplicada. No início da fratura, a equação (6) torna-se:

$$P_f = 0.785 t d \sigma_f \quad (6)$$

Onde t é a espessura do metal base ou metade do ponto de solda, d é o diâmetro do ponto de solda e P_f é a força de ruptura ou o escoamento do material do espécime e σ_f é a tensão de ruptura do espécime tracionado. A falha do espécime é definida na iniciação da fratura o que corresponde ao pico da carga no ensaio de tração (CHAO, 2003, p. 129).

4.1.1.7 Resistência mínima em ensaio de cisalhamento

A resistência mínima esperada em ensaios de tração para SPRE pode ser calculada através da equação 7 (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2007, p. 8). A tabela 2 classifica e divide os aços em quatro grupos em função do limite de resistência em ensaio de tração, para chapas de mesma espessura.

$$ST = \frac{(-6,36E^{-7} \times S^2 + 6,58E^{-4} \times S + 1,674) \times S \times 4 \times t^{1,5}}{1000} \quad (7)$$

Onde:

ST = Resistência mínima esperada (kN)

S = Tensão limite de resistência (MPa)

t = Espessura (mm)

Tabela 2 - Classificação de aços para fins de soldagem a ponto de resistência.

Classificação de aço para fins de soldagem a ponto de resistência				
Grupo	1. Baixa resistência	2. Resistência Intermediária	3. Alta resistência	4. Ultra-alta resistência
Limite de Resistência (MPa)	<350	350-500	>500-800	>800
Materiais Típicos	Mild 140YS/270TS	BH 260YS/370TS	DP 350YS/600TS	DP 700YS/1000TS
	BH 180YS/300TS	HSLA 280YS/350TS	TRIP 350YS/600TS	MS 950YS/1200TS
	BH 210YS/320TS	HSLA 350YS/450TS	DP 500YS/800TS	MS 1150YS/1400TS
	BH 240YS/340TS	DP 300YS/500TS	TRIP 500YS/800TS	MS 1250YS/1520TS
			CP 700YS/800TS	HS 950YS/1300TS

Mild: Aço Baixo Carbono; BH: Bake Hardenable - Aço de Encruamento Térmico; HSLA: High Strength Low Alloy - Aços de Alta Resistência e Baixa Liga; DP: Dual Phase - Aço Bifásico; TRIP: Transformation induced plasticity - Plasticidade Induzida por Transformação; MS: Martensitic - Martensítico; CP - Complex Phase - Fase Complexa, YS: Yield Strength - Tensão limite de escoamento, TS: Tensile Strength - Tensão limite de resistência.

Nota: Aços com tensão limite de ruptura acima de 500 MPa (Grupos 3 e 4) são geralmente considerados como AHSS - Advanced High Strength Steels – AHSS - aços avançados de alta resistência.

Fonte: “adaptado de” INTERNATIONAL IRON & STEEL INSTITUTE, 2006, p. 1-3

O gráfico da figura 9, foi construído através da equação 7, utilizando os valores mínimos de resistência levantados através de diversos ensaios de tração com os materiais descritos do grupo 2 da tabela 2.

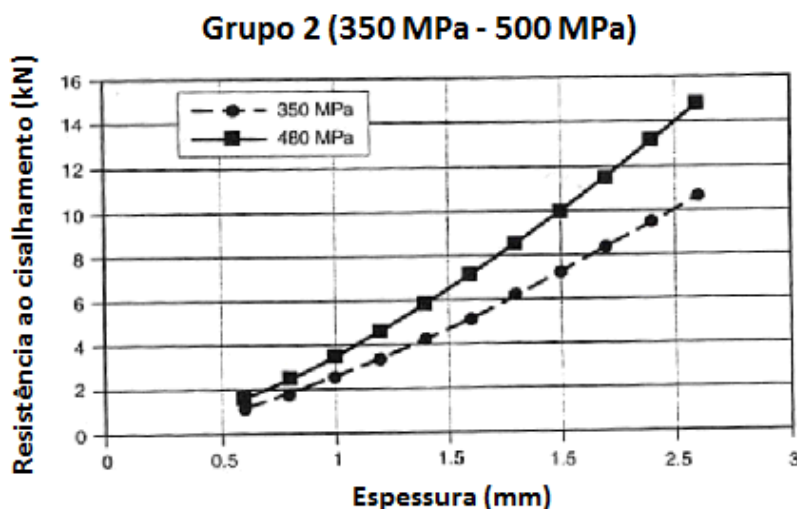


Figura 9- Valores de força mínima de resistência ao cisalhamento para aços do grupo 2.

Fonte: “adaptado de” AMERICAN WELDING SOCIETY, 2007, p. 18

Pode-se tomar como exemplo o material da chapa utilizada neste trabalho onde $S=324$ MPa, $t=1$ mm e $E=200$ GPa, o valor de resistência mínima esperada é de 2,17 kN.

$$ST = \frac{(-6,36.200^{-7} \times 324^2 + 6,58.200^{-4} \times 324 + 1,674) \times 324 \times 4 \times 1^{1,5}}{1000} \quad ST = 2,17 \text{ kN}$$

4.1.2 Solda costura por resistência

Solda costura por resistência é um processo similar à solda ponto por resistência, porém os eletrodos são substituídos por rodas motoras ou rolos que se deslocam sobre a junta sobreposta, com pressão e corrente determinados (MORELLO, *et al.*, 2011, p.137). A corrente elétrica passa de forma intermitente enquanto os rolos permanecem estacionários, sem a necessidade de elevar ou abaixar o cabeçote de soldagem. Este cordão de solda consiste, portanto em uma série de pontos de solda com sobreposição entre eles de 25 a 50%. O processo pode ser utilizado como solda ponto simplesmente ajustando o tempo de passagem de corrente, formando pontos espaçados (figura 10). A largura em solda continua está entre $2\sqrt{t}$ e $5\sqrt{t}$, onde t é a espessura de uma das chapas. (PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 61).

A costura tende a se deformar devido ao trabalho contínuo e um dispositivo é necessário para corrigir a forma da aresta do eletrodo circular.

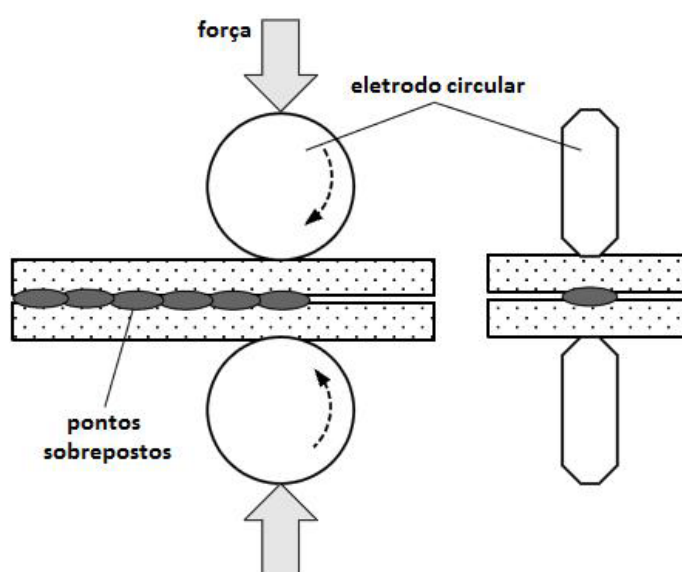


Figura 10 - Representação esquemática do processo de solda costura por resistência.
Fonte: “adaptado de” PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 61.

As máquinas de solda costura por resistência são classificadas em três tipos: circular, longitudinal e universal. Na circular, o eixo de rotação do eletrodo é perpendicular à frente da máquina, na longitudinal o eixo de rotação do eletrodo é paralelo à frente da máquina, já na universal a orientação do eixo de rotação do eletrodo pode ser alterado.

Os eletrodos circulares são fabricados em liga de cobre, o mesmo material utilizado nos eletrodos de solda ponto por resistência, os diâmetros variam entre 50 e 610 mm, podendo ter o sistema de arrefecimento interno ou externo. O resfriamento interno apresenta maiores custos operacionais e, em alguns casos, problemas ao resfriar a solda.

A máxima corrente utilizada em máquinas convencionais de solda costura por resistência estão normalmente entre 20 a 30 kA, embora alguns equipamentos utilizem até 100 kA em soldagem de ligas leves, devido a baixa resistividade do material. A força aplicada pelos eletrodos contra a peça varia entre 2000 e 16000 N com uma variação de deslocamento do cabeçote de 1 a 12 m/min quando a solda é aplicada em aços, porém no caso de solda em ligas de alumínio as forças e velocidades aplicadas são menores (PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 61).

Aço ao carbono, baixa liga, inox e revestido são soldados utilizando este processo. Nas soldagens de ligas de alumínio e magnésio precauções adicionais são necessárias devido à baixa resistividade elétrica e baixa temperatura de fusão.

Solda costura por resistência é largamente utilizada na indústria automobilística assim como, na fabricação de trocadores de calor, tanques não pressurizados e diversos tipos de reservatórios.

As maiores vantagens neste tipo de processo quando comparados à solda ponto por resistência são a capacidade de produção de soldas herméticas, estanques e a possibilidade de redução de material pela diminuição da sobreposição entre as chapas. Porém, a solda deve ser produzida em linha reta ou em uma curva uniforme com um raio bem grande, senão a distorção térmica pode ser maior que a encontrada na solda ponto por resistência (PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 62).

4.1.3 Processo de montagem a frio

Processo de montagem a frio, esta sendo cada vez mais aplicado devido ao potencial de redução do gasto energético, redução em investimento e manutenção de equipamentos e, especialmente, pela possibilidade de unir materiais heterogêneos não soldáveis com relativa facilidade. Entre os processos a frio, o puncionamento é o mais eficiente, uma vez que não necessita de materiais de adição, diferente do processo de união por rebite cego. Tanto a rebiteagem quanto o puncionamento não podem ser utilizados em superfície estética. Além disso, eles normalmente devem ser executados em uma base de fixação e, portanto, podendo unir apenas subconjuntos (Figura 11) (MORELLO, *et al.*, 2011, p.138).

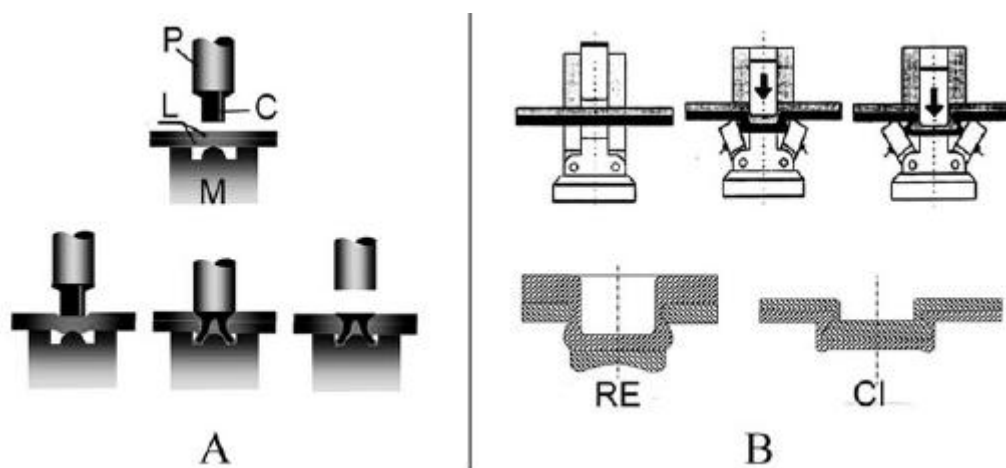


Figura 11- Exemplos de montagem a frio.

A) Rebitagem Cega; P Punção; M Matriz; C Rebite; L Chapas. B) Puncionamento com a deformação permanente da chapa; CI Cilíndrico; RE Retangular.

Fonte: MORELLO, *et al.*, 2011, p 139

4.1.4 Uniões adesivas

As uniões adesivas, são geralmente utilizadas como função complementar ao processo de soldagem de chapas em alumínio principalmente, também em operação para unir partes internas com externas de painéis, como os das portas, capô e tampa traseira. A união adesiva é obrigatória em montagem estrutural de componentes plásticos (como compósitos) e uniões de materiais heterogêneos que não podem ser rebitados, como por exemplo, a fixação do para-brisa e vidro traseiro na carroceria.

Adesivos são normalmente fornecidos na forma de pasta semilíquida ou fitas semissólidas; eles são extrudados e em sua grande maioria, possuem composição química da família do poliuretano ou resinas epóxi. A cura do adesivo requer tempo e agentes

aceleradores como umidade ou calor. Portanto, há o risco de deslizamento relativo entre as peças unidas quando as peças precisam ser transportadas para o processo de pintura, neste caso é necessário um aquecimento por indução local ou total. No desenvolvimento de peças coladas, devem ser levadas em conta as regiões de tensões críticas, pois nelas ocorrem a descolagem ou a progressiva separação entre as camadas do adesivo. Por esta razão, é sempre recomendado utilizar um fixador mecânico (rebites ou parafusos) nas extremidades e regiões de alta tensão (MORELLO, *et al.*, 2011, p. 138).

Ao contrário dos outros métodos de união, como rebitagem, solda ponto por fusão e aparafusamento, a ligação adesiva não apresenta nenhum efeito adverso sobre as características da superfície dos materiais a serem unidos, por exemplo, furos desenvolvidos para aplicação de parafusos ou rebites geram concentradores de tensão (Figura 12). Por esse motivo, ligações adesivas possuem bom desempenho quando submetidas a carregamento de fadiga. Também, não há alteração nas propriedades mecânicas a altas temperaturas ou distorções pelo aquecimento local, como ocorrem na maioria dos processos de união por solda (SCHWARTZ, 2011. p.14).

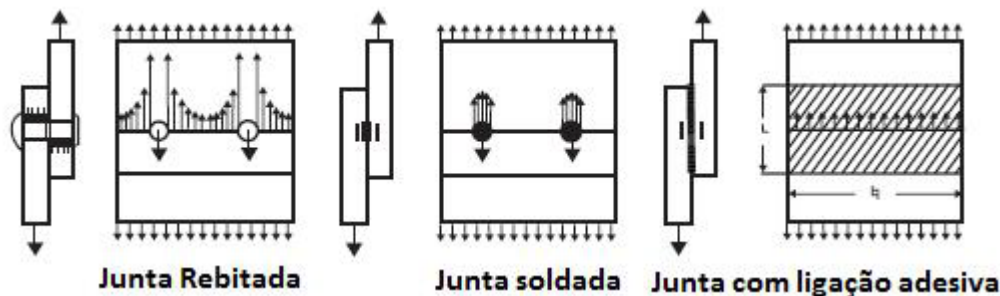


Figura 12- Comparação de distribuições de tensão em vários tipos de juntas.
Fonte: “adaptado de” SCHWARTZ, 2011, p.14.

A tecnologia de união adesiva garante que as propriedades mecânicas do material sejam utilizadas ao máximo. Por exemplo, estruturas em sanduíche, onde o aço de alta resistência é utilizado como cobertura de um material com resistência mecânica bem menor e espuma utilizada como núcleo, desenvolvendo uma excelente relação entre a rigidez, flexão e o peso, possibilitando novas soluções em projetos estruturais. Através da tecnologia de laminação, os materiais podem ser criados com características mecânicas melhores, quando comparados aos materiais base utilizados.

Entretanto, esse processo possui desvantagens, juntas com ligações adesivas são difíceis de serem desmontadas. Se por algum motivo for necessário a desmontagem do

componente durante sua vida útil, uma junta parafusada é preferível. Além disso, na maioria dos casos, os materiais adesivos apresentam resistência mecânica menor que o metal base a ser unido e devem ser utilizados preferencialmente em juntas submetidas a cargas de cisalhamento. (SCHWARTZ, 2011, p. 15).

4.1.5 Solda por fricção e mistura mecânica (SFMM)

O processo de solda por fricção e mistura também chamado como solda de topo por mistura, foi desenvolvido em 1991 pelo Instituto de solda (TWI) para unir juntas de liga de alumínio. O processo foi desenvolvido primeiramente com uma ferramenta não consumível, com uma protrusão cilíndrica ligeiramente angular na extremidade, que é pressionada e penetra com rotação na junção das peças. A ferramenta também sofre translação na linha de união entre as peças, mas não ultrapassa completamente a espessura do material a ser soldado (Figura 13 e 14) (THOMAS, *et al.*, 1995, p. 1).

O mecanismo de união da SFMM é feito através da rotação, translação e força normal aplicada por uma ferramenta rotativa, cujo perfil pode variar em função do material, espessura e parâmetros de processo. A combinação entre força normal e rotação da ferramenta provoca aquecimento por atrito e deformação plástica do metal base, que concomitantemente gera calor devido à mistura do metal base (dissipação viscosa). Este método pode ser usado para reparar trincas e recuperar uniões entre o metal base e outro componente, como um parafuso ou buchas (THOMAS, *et al.*, 1995, p. 19).

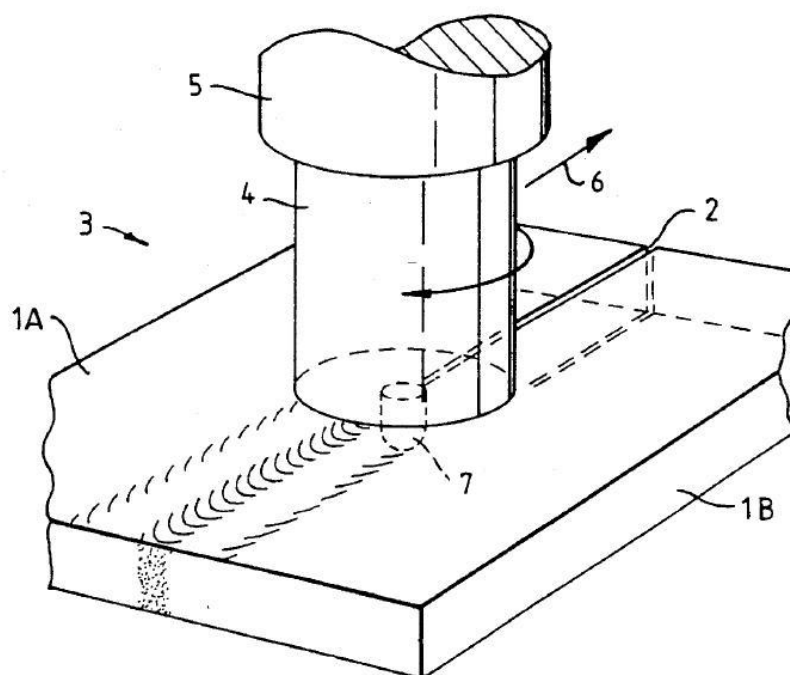


Figura 13 - Vista isométrica do processo de solda por fricção e mistura.

1A, 1B – Placas de liga de alumínio; 2) Placas dispostas de topo na linha de união; 3) Ferramenta não consumível de aço com uma estreita parte cilíndrica central; 4) Corpo cilíndrico entre a protrusão e o suporte da ferramenta; 5) Suporte da ferramenta; 6) Movimento de translação; 7) Protrusão cilíndrica ligeiramente angular na extremidade.

Fonte: “adaptado de” THOMAS, *et al.*, 1995, p. 9

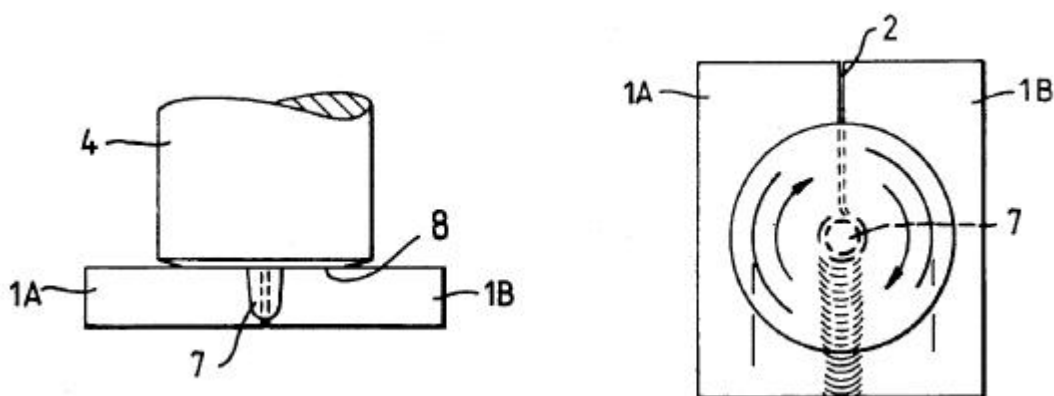


Figura 14 - Vista frontal e de topo do processo de solda por fricção e mistura

2) Placas dispostas de topo na linha de união; 4) Corpo cilíndrico entre a protrusão e o suporte da. 7) Protrusão cilíndrica ligeiramente angular na extremidade; 8) Face de contato “ombro”, com ligeira angulação de 2°.

Fonte: “adaptado de” THOMAS, *et al.*, 1995, p. 9

As temperaturas alcançadas na zona de mistura do metal base são próximas as de fusão em materiais dúcteis, como o alumínio e de austenitização, no caso dos aços (GERLICH e NORTH, 2011, p. 193).

O perfil da ferramenta é importante, uma simples conicidade na ponta permite que a ferramenta entre com uma maior facilidade na junta entre as peças, porém resulta em um estreitamento na região plastificada nas adjacências da ferramenta (Figura 15A). Uma alternativa de geometria de ferramenta seria um cone truncado, como mostrado na figura 15B, onde é necessário um canal pré-usinado na junção entre as peças. Preferencialmente, a ferramenta deve possuir geometria cilíndrica com ligeiro ângulo, como mostrado na figura 15C. Isso permite que a ferramenta penetre com maior facilidade na junção, sem prejudicar significativamente a região plastificada.

Como exemplo de processo de união, vamos citar a união de uma liga de alumínio com 6 mm de espessura, utilizando-se o método mostrado na figura 13, onde a ferramenta opera com uma rotação de 850 rpm e velocidade de deslocamento transversal de 240 mm por minuto. Valores maiores que 1000 rpm, permitem uma velocidade maior de deslocamento transversal, até 300 mm por minuto, mas esse aumento causa defeitos tipo porosidades, que são encontrados em um dos lados da zona de mistura. Para determinadas velocidades de deslocamento transversal existe uma faixa de rotação razoável a ser considerada, para avanço de 4 mm por segundo (240 mm por minuto). Em ligas de alumínio silício magnésio (BS6082), resultados satisfatórios são encontrados entre 440 a 850 rpm (THOMAS, *et al.*, 1995, p. 16). Subsequentemente, a SFMM tem sido utilizada na união de ligas de magnésio, titânio, aço e austeníticos (REYNOLD, HOOD e TANG, 2004, p. 1). Este sistema de soldagem se mostrou viável entre espessuras que variam entre 0,8 a 75 mm (THOMAS, THREADGILL e NICHOLAS, 1999, p. 1). A SFMM é, portanto uma técnica de união no estado sólido, onde o processo envolve a penetração normal e rotação da ferramenta, seguido do deslocamento transversal sobre o material a ser unido.

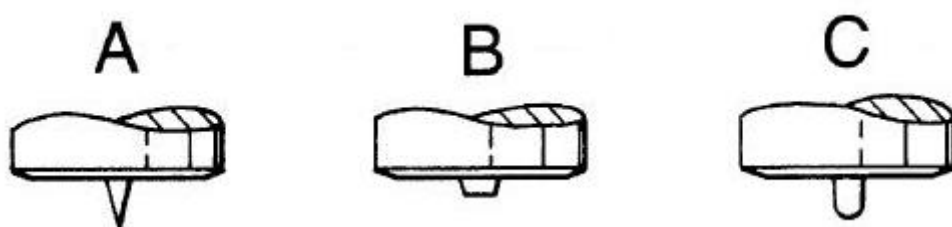


Figura 15 – Perfis de ferramenta para SFMM.

A) conicidade simples; B) Cone truncado; C) Cilíndrica com ligeiro ângulo.

Fonte: “adaptado de” THOMAS, NICHOLAS, *et al.*, 1995, p. 9

Além da viabilidade de soldar ligas de alumínio de diferentes grupos, magnésio, chumbo, zinco, cobre, aço baixo carbono-cromo e aço carbono, a SFMM possui diversas vantagens quando comparada a solda arco convencional, principalmente em soldagem de ligas de alumínio. Dificuldades relacionadas ao desenvolvimento de trincas devido à solidificação, porosidade por contaminação de hidrogênio e distorção térmica, defeitos comuns em soldagem por fusão, não ocorrem na SFMM. Outros benefícios deste processo incluem: boa resistência mecânica e ductilidade, juntamente com a minimização da tensão residual e a distorção térmica. Estas qualidades da SFMM são geralmente atribuídas à natureza do processo de união no estado sólido e a suposta baixa energia inserida durante o processo de união (THOMAS, THREADGILL e NICHOLAS, 1999, p. 1). Não há material de adição e nem gás protetivo, e requer mínima preparação da superfície. Não produz fumos, gases tóxicos ou a radiação do arco elétrico, excluindo assim a preocupação em relação ao ambiente de operação.

No entanto, ainda existem várias desvantagens que devem ser consideradas na aplicação industrial deste processo. O equipamento necessita suportar altas forças para mover a ferramenta através do material plastificado, as quais desgastam a ferramenta rotativa, principalmente em materiais de alta resistência. São necessárias bases robustas de fixação para as peças a serem unidas, devido à força longitudinal exercida pela ferramenta rotativa. Por esse motivo, a SFMM é geralmente executada em máquinas rotativas de trabalho pesado, onde as juntas soldadas são frequentemente limitadas a um ou dois eixos de deslocamento. O uso de robôs aumentou a flexibilidade deste processo para a soldagem em três eixos.

Este processo tem sido utilizado na indústria naval, para a fabricação de painéis, plataformas e perfis pesados, na indústria aeroespacial para a produção de tanques de combustível, asas e fuselagens, na indústria férrea para trens de alta velocidade e na indústria automobilística, para a produção de painéis e outros componentes (PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 64).

4.1.5.1 Variantes do processo de SFMM.

Nos últimos anos, com o aumento da aplicação da SFMM em escala industrial, gerou-se a necessidade de desenvolver técnicas que auxiliassem o aumento da produtividade, aumentando-se o desenvolvimento de formas derivativas do processo de SFMM, em busca de

melhorias no próprio processo de SFMM ou a substituição de processos convencionais de união. Desta forma foi desenvolvida a solda ponto por fricção em mistura mecânica (SPFMM) que será descrita com maiores detalhes em capítulos posteriores e o mais recente aprimoramento na SFMM, chamado de “Re-Stir” desenvolvido pela TWI. O “Re-Stir” que poderia ser traduzido como re-mistura (figura 16), é um processo que funciona basicamente como o SFMM, porém ao invés de aplicar rotações no mesmo sentido de revolução, são feitas inversões no sentido da rotação após uma ou mais revoluções. Esta técnica de soldagem desenvolve um processo cíclico e essencialmente simétrico, evitando problemas de assimetria inerentes ao processo convencional de SFMM.

Uma alternativa encontrada para o aumento da produtividade foi o desenvolvimento da SFMM com assistência térmica, que nada mais é que o aquecimento prévio do metal base, com o intuito de reduzir os esforços na ferramenta rotativa.

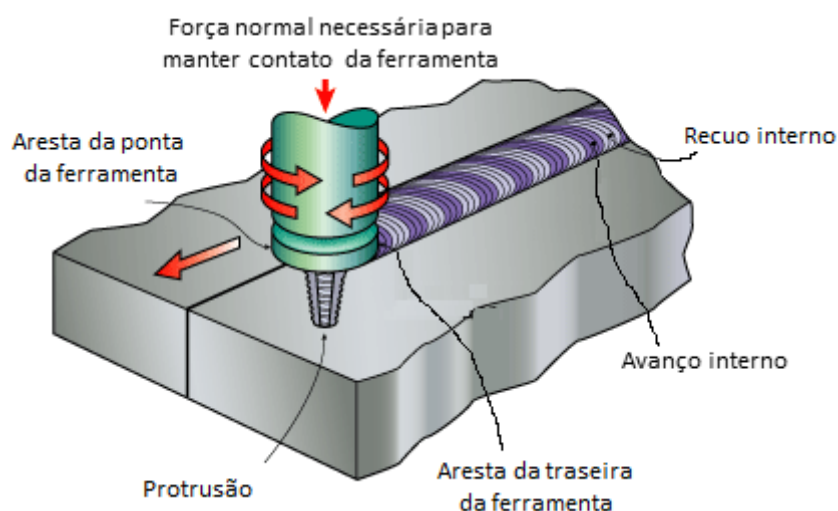


Figura 16 - Princípio básico de “Re-stir” - mostrando a técnica de inversão.
Fonte: “adaptado de” WAYNE, *et al.*, 2003, p. 112

4.1.5.2 Equipamento de soldagem da SFMM.

No início da aplicação da SFMM na indústria, os equipamentos eram desenvolvidos conforme necessidades do cliente e eram bastante pesados e de alta rigidez, hoje em dia os equipamentos são padronizados, flexíveis e modulares. Os equipamentos mais atuais consistem em uma robusta estrutura básica, bem parecida com a dos robôs de solda a laser. A capacidade de força axial de trabalho destes equipamentos é entre 1 a 15 kN, com potência

mecânica imposta na ferramenta rotativa tipicamente na ordem de 2 a 5 HP (1,5 a 3,7 kW). Além da força axial e do torque agindo na ferramenta, existe, no mesmo plano, uma força transversal na direção do avanço do pino, em um ângulo de 90 graus em relação à direção do deslocamento e uma força de translação em um ângulo de 180 graus em relação à direção do deslocamento.

Um robô de SFMM deve manter uma força axial constante para obter uma solda de boa qualidade. Equipamentos robustos de usinagem podem ser feitos simplesmente com a movimentação da ferramenta rotativa, precisamente paralelo às peças a serem soldadas. Com uma pequena deflexão do cabeçote do equipamento e uma ferramenta rígida, a força pode ser mantida sem a necessidade de um sensor de força e retorno ao sistema de comando. Na teoria, um sistema de CNC poderia fazer isso sem problemas, porém na prática existem deformações elásticas no equipamento, tornando-se difícil manter a força axial constante. Por esse motivo, são utilizados robôs de alta rigidez, equipados com sensores de força, que constantemente realimentam o sistema de comando com os valores de força. A força axial reduz com o aumento da rotação da ferramenta, mas aumenta com o acréscimo do avanço, portanto o sistema robotizado da SFMM tem a tarefa de manter a força constante, considerando as variações de parâmetro do processo. (COOK, *et al.*, 2003, p. 28-29).



Figura 17 - Equipamento da SFMM Marca ESAB.
Fonte: ESAB AB - WELDING AUTOMATION, 2013, p. 27

4.1.5.3 Ferramenta rotativa para SFMM.

Como já mencionando no capítulo 4.1.6 a definição da geometria da ferramenta é muito importante na produção das juntas soldadas através de SFMM, porém não somente a geometria, mas também o material da ferramenta e os parâmetros de processo precisam ser bem definidos para garantir uma soldagem de boa qualidade. O desenvolvimento de geometrias e materiais aplicados na construção das ferramentas rotativas está sendo alvo de diversas pesquisas, onde as chamadas ferramentas não consumíveis são fabricadas a partir de materiais com propriedades mecânicas e temperaturas de fusão bem superiores a do metal base (THOMAS, JOHNSON e WIESNER, 2003, p. 485).

Essencialmente, a protrusão (pino) da ferramenta é aplicada na interface da junta (união das peças) com rotação, gerando aquecimento por atrito, formando uma região plastificada envolta do pino e ombro da ferramenta. O ombro, pelo mesmo efeito adiciona calor por atrito no metal base e também possui um papel importante no fluxo do material deslocado pela protrusão, ao garantir que o material plastificado não seja expulso na união da junta. Devido ao calor gerado, o material plastificado torna-se menos resistente, dando início à translação da ferramenta, formando-se uma solda contínua (FULLER e COMPANY, 2007, p. 13). O pino também é responsável pela profundidade da deformação e a velocidade do deslocamento é governada pelo perfil do pino. O dimensionamento do pino é determinado pela espessura do material, inclinação da ferramenta e penetração desejada na junta. O diâmetro do pino deve ser dimensionado para resistir as cargas transversais impostas durante a translação da ferramenta e para fornecer energia suficiente para que ocorra uma boa zona de coalecência. Diversos estudos têm sido feitos para encontrar relações ótimas, entre diâmetro do ombro e pino, com o intuito de se obter a melhor solda possível, porém como já mencionado, os parâmetros de processo, espessura e resistência mecânica do metal base têm grande influência no resultado final. A tabela 3 é resultado de estudos desenvolvidos para definir a melhor relação entre o diâmetro do ombro e o diâmetro do pino para diversos materiais (FULLER e COMPANY, 2007, p. 25).

Tabela 3 - Sumário de dimensões básicas de ferramentas de SFMM para dado metal base.

Ø ombro (mm)	Ø cilíndrico do pino (mm)	Relação entre Ø ombro/pino	Material	Esp. (mm)
13	5	2,6:1	6061-T6 Al	3
20-30	8-12	2,5:1, 1,6:1	7050, 2195, 5083, 2024, 7075 Al	6,35
23	8,2	2,8:1	2024-T351 Al	6,4
20-16	6	3,3:1, 2,7:1	5083 e 6061 Al	5,5
12	4	03:01	1050 AL e cobre livre de oxigênio	1,8
25,4	7,87	3,22:1	7075-T7351 Al	9,53
23	8,4	2,7:1	2524-T351 Al	6,4
20	4	05:01	6064 Al para aço carbono	4,5
23	8,2	2,8:1	2024-T351 Al	7
10	3,8	2,6:1	2095 Al	1,63
25	9	2,8:1	5251 Al	5

Fonte: “adaptado de” FULLER e COMPANY, 2007, p. 9

O perfil do ombro pode ser plano, côncavo ou convexo, com superfície lisa ou possuir arestas em espirais, cristas ou recartilho, retas, entalhadas, serrilhado e sulcos concêntricos ou espirais (figura 18). O ombro côncavo foi o primeiro a ser desenvolvido e ainda é o mais utilizado (THOMAS, *et al.*, 1995, p. 9). Ele possui boa usinabilidade e produz uma soldagem de boa qualidade, com ângulos entre 6 a 10° em relação ao pino. O perfil de ombro côncavo tem uma vantagem quando comparado ao perfil de ombro plano, pois direciona o fluxo do material de volta, em direção à protrusão. O ombro estriado, em geral tem o mesmo efeito. Há também alguns que possuem facas para raspar a solda, dando lhes um melhor acabamento. O perfil convexo, ao contrario do côncavo, não direciona o material para o centro, em direção ao pino, e sua aplicação é bastante restrita, com poucas aplicações de sucesso (FULLER e COMPANY, 2007, p. 14).

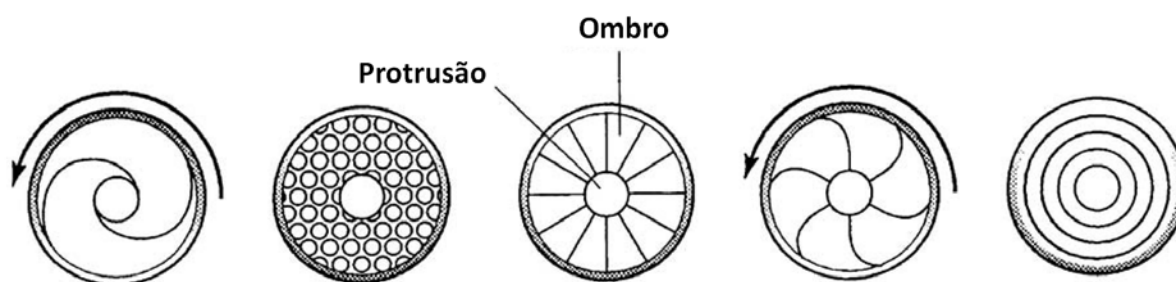


Figura 18 - Diferentes detalhes de ombros utilizados para aumentar o fluxo do material e a eficiência do ombro
Fonte: “adaptado de” FULLER e COMPANY, 2007, p. 14

Ferramentas rotativas com pino cônico liso geram calor por atrito e são bastante usuais quando a força normal necessária pode ser aplicada pelo equipamento. Infelizmente, as características para a quebra da camada de óxido não são muito boas, e com o aumento da espessura do material, o calor gerado pode ser insuficiente para atingir a parte inferior das juntas. Entretanto, com os ajustes de parâmetros e a seleção correta da geometria esta camada de óxido é facilmente quebrada. Essa necessidade em aumentar a geração do calor por fricção e a de quebra mais eficaz da camada de óxido, tem impulsionado o desenvolvimento de ferramentas (ESAB AB - WELDING AUTOMATION, 2013, p. 8).

Dentro de inúmeras geometrias já desenvolvidas, podemos citar algumas que possuem aplicação específica; para solda de topo em ligas de alumínio até 12 mm, é recomendado o pino cilíndrico com filetes, enquanto para chapas mais espessas, as protrusões tipo “Whorl” e “MX-Triflute” podem ser usadas (figura 19). Os tipos “Whorl” e “MX-Triflute” permitem soldagem com velocidades bem superiores às do pino cilíndrico com filetes, pelo menos por um fator multiplicador 2. Existem também, os perfis chatos (sem protrusão) ou reentrância e os de seção transversal oval, que reduzem o volume sondável (volume estático), permitindo um alcance adequado de volume varrido (volume dinâmico). Quanto maior for esta proporção entre os dois volumes, maior será o caminho para o fluxo de material e a eficiência da penetração.

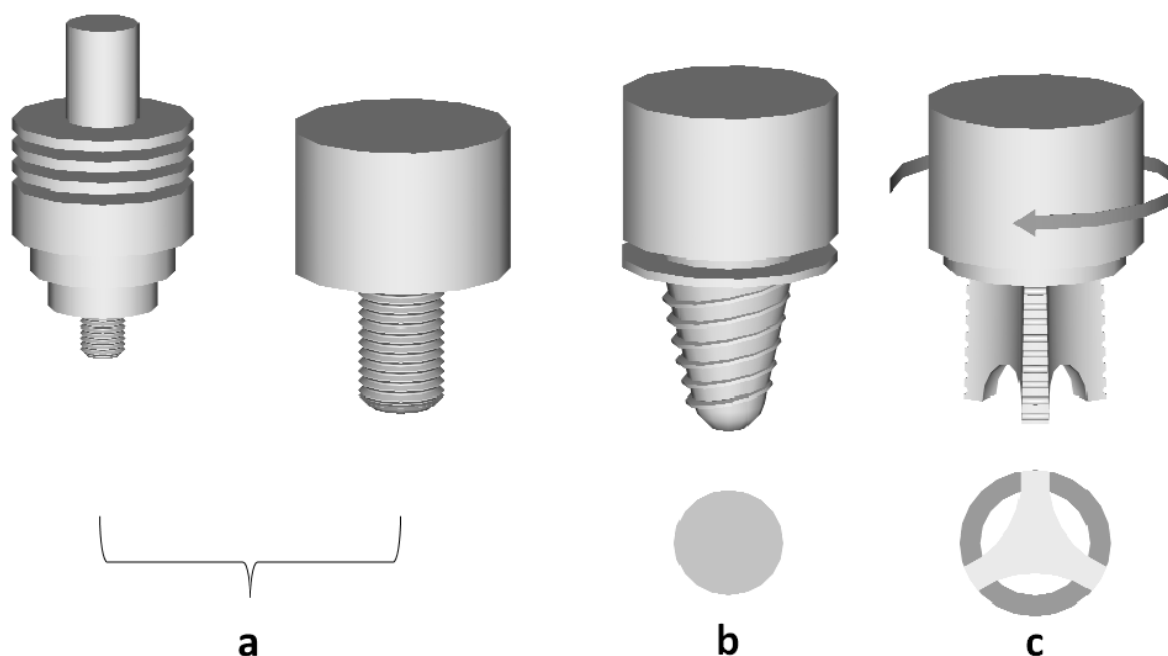


Figura 19 - Perfis de ferramentas rotativas. a) Pino cilíndrico com filetes; b) Protrusão oval “Whorl”; c) Protrusão “Flared-Triflute”

Fonte: “adaptado de” PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 65

A soldagem de ligas de alumínio com solda de sobreposição é mais difícil, pois é necessário um cordão de solda maior do que o encontrado na solda de topo e conseqüentemente a remoção de uma quantidade maior de óxido da superfície da peça. Para esses casos, recomenda-se o uso de ferramentas rotativas com protrusões tipo “Flared-Triflute” e A-Skew. Estas ferramentas permitem que a relação entre o volume dinâmico e estático seja aumentada, melhorando a qualidade da solda (PIRES, LOUREIRO e BÖLMSJO, 2006, p. 64).

Nos casos onde é necessário cordões de soldas de ambos os lados, pode ser usado o perfil de ferramenta chamado “bobbin”. Neste caso o cordão de solda é realizado de ambos os lados da peça ao mesmo tempo. A ferramenta “bobbin” possui um segundo ombro conectado ao final da protrusão, que mantém a união e fornece força normal de compressão com o metal base. Este tipo de fixação exclui a necessidade de uma base de apoio durante a soldagem.

A soldagem com ferramenta “bobbin” de auto-reação (figura 20), tem se mostrado bastante eficiente na união de componentes extrudados ocos e uniões de topo.

Essencialmente, existem duas técnicas de ferramentas de auto-reação (figura 21), a de espaçamento fixo e a ajustável, chamada também de técnica adaptativa (THOMAS e VILAÇA, 2011, p. 111).

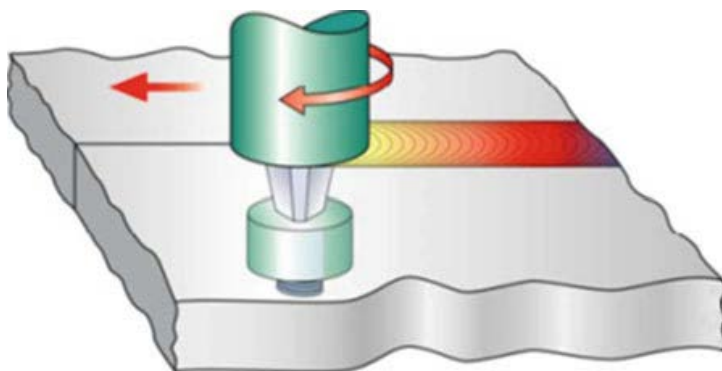


Figura 20 - Ferramenta "bobbin" de auto-reação
Fonte: “adaptado de” THOMAS, et al., 2012, p. 112

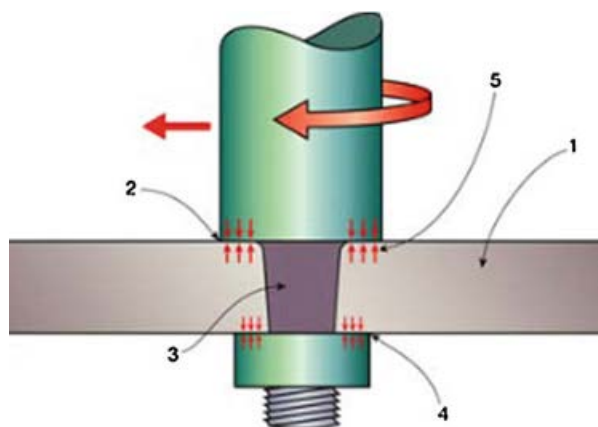


Figura 21 - Ferramenta "bobbin" de auto-reação – Forças de reação: 1) Metal base; 2) Ombro superior; 3) Protrusão; 4) Ombro inferior; 5) forças de reação.

Fonte: “adaptado de” THOMAS, et al., 2012, p. 112

A grande parte das ferramentas de SFMM é desenvolvida em aço, pois a maioria do desenvolvimento e publicações é relativa à união de ligas de alumínio, o qual é facilmente misturado com uma ferramenta em aço. As ferramentas em aço possuem diversas vantagens na aplicação, pois utilizam material de baixo custo, fácil acesso e de boa usinabilidade, com características mecânicas bem conhecidas e definidas (FULLER e COMPANY, 2007, p. 25). Já os demais materiais aplicados na construção de ferramentas, conforme mostrado na tabela 4, foram desenvolvidos após o aumento dos estudos e aplicações de materiais de maior resistência mecânica utilizando a SFMM. Desta forma, a aplicação do aço tornou-se menos viável em função do desgaste excessivo da ferramenta e das temperaturas elevadas durante o processo de soldagem.

Tabela 4 - Sumário dos materiais atualmente utilizados em ferramentas rotativas de SFMM.

Ligas	Espessuras (mm)	Material da ferramenta
Ligas de alumínio	<12	Aço ferramenta, WC/Co
	<26	MP159
Ligas de magnésio	<6	Aço ferramenta, WC.
Cobre e suas ligas	<50	Ligas de níquel, Nitreto cúbico de boro policristalino.
		Ligas de tungstênio.
Ligas de Titânio	<6	Ligas de tungstênio.
Aço Inoxidável	<6	Ligas de tungstênio, Nitreto cúbico de boro policristalino.
Ligas de baixo carbono	<10	WC, Nitreto cúbico de boro policristalino.
Ligas de níquel	<6	Nitreto cúbico de boro policristalino.

Fonte: “adaptado de” FULLER e COMPANY, 2007, p. 25

4.1.6 Solda ponto por fricção e mistura mecânica (SPFMM)

Solda ponto por fricção e mistura mecânica (SPFMM) é um processo de união, variante da solda por fricção e mistura mecânica (SFMM) (HIRANO, *et al.*, 2009, p. 1). Onde, duas chapas sobrepostas são unidas sem a penetração total de uma ferramenta rotativa, que consiste basicamente de um ombro cilíndrico e uma protrusão em formato de pino, que combina força normal e rotação provocando o aquecimento por atrito e a deformação plástica do metal base (THOMAS, *et al.*, 1995, p. 1). A combinação do aquecimento por fricção, intensa deformação plástica e dissipação viscosa produzem altas temperaturas na zona de mistura, que leva a recristalização do material e a mistura dos materiais das chapas superior e inferior (MAZZAFERRO, 2008, p. 15).

A SPFMM tem recebido considerável atenção em várias indústrias, incluindo a automobilística, onde devido a regulamentações de segurança para veículos de passageiros e emissão de poluentes cada vez mais severas, como citado anteriormente, tem buscado o desenvolvimento de componentes com menor massa, sem perda de desempenho. A redução de massa é ainda a melhor relação custo-benefício para a redução do consumo de combustível e conseqüentemente a redução de gases nocivos ao meio ambiente. É estimado que a cada 10% de redução de massa no veículo, a economia de combustível aumenta para 7%. Isto representa que a cada quilograma retirado da massa total do veículo, há uma redução de 20 kg de emissão de dióxido de carbono. A substituição do aço por alumínio, magnésio e compósitos é uma ótima alternativa para redução de massa sem perda de desempenho (GHASSEMIEH, 2011, p. 366).

Portanto, a aplicação da SPFMM apresenta viabilidade técnica e econômica em vários tipos de metais, pois se trata de um processo de união no estado sólido (HOVANSKI, SANTELLA e GRANT, 2007, p. 873), como: ligas de magnésio (YANG, *et al.*, 2010, p. 4390), alumínio e sua ligas (REYNOLD, HOOD e TANG, 2004, p.491), aço martensítico para estampagem a quente (HOVANSKI, SANTELLA e GRANT, 2007, p. 873), aços bifásicos (FENG, *et al.*, 2005, p. 1), aços TRIP (MAZZAFERRO, 2008) e aços ao carbono (CUI, *et al.*, 2006, p. 673) e também em união de materiais dissimilares como ligas de alumínio com aço de baixo carbono e magnésio com fibra de vidro e Poli (sulfeto de p-fenileno) (AMANCIO, *et al.*, 2011, p. 1).

A SPFMM mostra-se bastante eficiente na substituição da SPRE, em processos de montagem a frio com o uso de rebites e no puncionamento com deformação em alumínio. Algumas desvantagens podem ser citadas nestes processos atualmente utilizados, por exemplo

para a SPRE: o desgaste dos eletrodos, o alto consumo de energia devido as propriedades físicas do alumínio. No caso do processo de montagem a frio, o uso de consumíveis (rebites) possuem um custo considerável na manufatura de componentes automotivos como painéis de portas, entre outros (BADARINARAYAN, HUNT e OKAMOTO, 2007, p. 235).

A ferramenta possui geometria igual ou semelhante ao processo anterior (SFMM) e na maior parte das aplicações possui ombro e uma protrusão na extremidade (pino). O processo pode ser dividido em três etapas (figura 22); penetração da ferramenta (etapa 1), a ferramenta rotativa age com força normal ou penetração pré-determinada contra as chapas a serem soldadas, esta pressão e rotação geram calor de fricção entre a ferramenta e o metal base, que é aquecido e plastificado. Nesta etapa, o pino penetra totalmente até que o ombro entre em contato com a chapa superior, dando-se início a mistura (etapa 2), durante certo intervalo de tempo a ferramenta permanece em rotação, plastificando e misturando mecanicamente o material das chapas, mantendo-se nesta posição até a etapa de retração (etapa 3), deixando uma depressão em formato circular, seguindo a geometria do pino (MAZZAFERRO, 2008, p. 14).

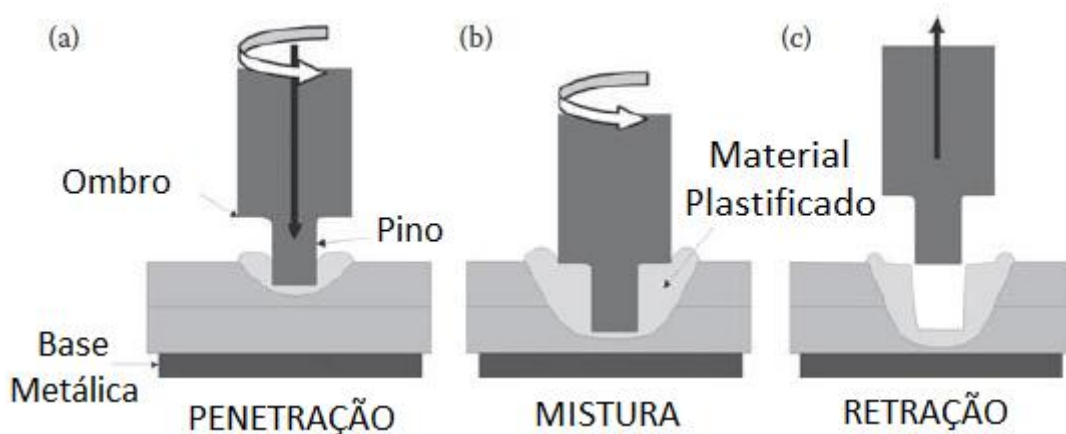


Figura 22 - Etapas do processo de solda ponto por fricção e mistura mecânica:

a) Penetração; b) Mistura; c) Retração.

Fonte: “adaptado de” GERLICH e NORTH, 2011, p. 195.

A operação de soldagem é geralmente realizada entre 1 a 5 segundos e envolve um rápido aquecimento e uma taxa lenta de resfriamento. A coalescência é criada entre a sobreposição das chapas, na zona de mistura, onde o material foi plastificado e misturado nas adjacências da ferramenta (GERLICH e NORTH, 2011, p. 194).

O fluxo de material durante a SPFMM é investigado pelo (YANG, *et al.*, 2010, p. 4397) através da técnica de rastreamento de traçador de Cu, que analisa o fluxo de Cu durante

a execução do processo de soldagem, desta forma é possível descrever o que ocorre em relação ao fluxo do material plastificado (figura 23).

Na fase de penetração, o pino entra em contato com a chapa superior, iniciando-se o aquecimento e plastificação do material, que é empurrado para baixo contra o material da chapa inferior, que também é plastificado pelo aquecimento e transferido para a parte superior da junta, antes do início da fase de mistura. Após o contato do ombro da ferramenta com a chapa superior da junta, desenvolvem-se três regiões distintas na solda. Essas regiões são classificadas como: zona de fluxo de transição (abaixo do ombro da ferramenta), zona de mistura (em volta do pino), e a zona de torção. Elas são desenvolvidas pela combinação dos movimentos de rotação, horizontais e verticais do material plastificado.

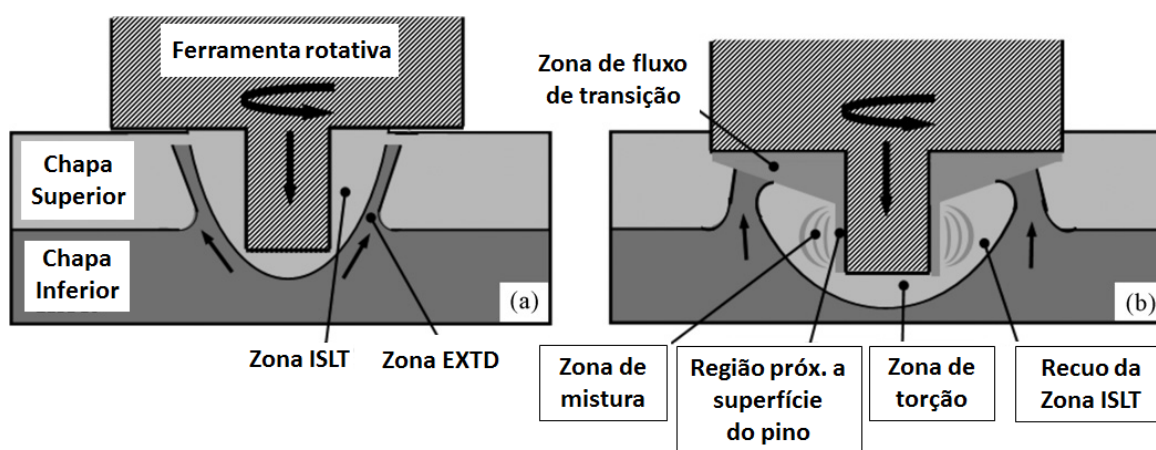


Figura 23 - Ilustração esquemática do modelo de fluxo da SPFMM

(a) antes do ombro da ferramenta rotativa encontrar no topo da chapa superior; (b) após a penetração do ombro na chapa superior.

Fonte: “adaptado de” YANG, *et al.*, 2010, p. 4396

Os principais parâmetros de processo da SPFM são:

- a) Velocidade de rotação da ferramenta;
- b) Profundidade de penetração da ferramenta, isto é, a total penetração do pino e penetração parcial do ombro;
- c) Força normal de penetração;
- d) Tempo de mistura – compreendido como o tempo em que a ferramenta não se desloca verticalmente e permanece em movimento de rotação;
- e) Velocidade de penetração da ferramenta no metal base;
- f) Geometria da ferramenta (pino e ombro).

O processo da SPFMM pode ser controlado de duas formas; por deslocamento e por força. No controle por deslocamento, a penetração da ferramenta é controlada e quando esta distância prevista é alcançada, aplica-se o tempo de mistura. Já no controle por força, a força é pré-estabelecida e quando é atingida, aplica-se o tempo de mistura. Existem deficiências em ambos os processos, o controle por deslocamento não é capaz de garantir a exata profundidade de penetração da ferramenta nas chapas, devido às limitações de resistência à carga (rigidez) no equipamento de soldagem. Já o sistema de controle por força, possui uma tolerância porque há sobrecarga em casos de grandes variações de espessura nas chapas a serem soldadas e danos ao equipamento devem ser evitados.

Para controlar a penetração é necessário um controle da quantidade de energia transformada em calor, para identificar o comportamento mecânico do material e assim, determinar a deformação e escoamento, garantindo o controle da posição da ferramenta que pode neste caso, ser excessiva ou abaixo do necessário. Ambos os controles produzem juntas de resistência similares, quando utilizam a mesma ferramenta e parâmetros similares na soldagem. A força e o deslocamento da ferramenta são parâmetros que não podem ser controlados simultaneamente, pois durante o escoamento e a plastificação do material, os picos de força não são facilmente determinados (GERLICH e NORTH, 2011, p. 196).

O gráfico da figura 24 é uma comparação entre os dados de saída de força e deslocamento da ferramenta durante a execução da SPFMM, utilizando controle de processo por força controlado e deslocamento controlado, sendo dividido em três fases as mesmas descritas no processo que são: penetração, mistura e retração.

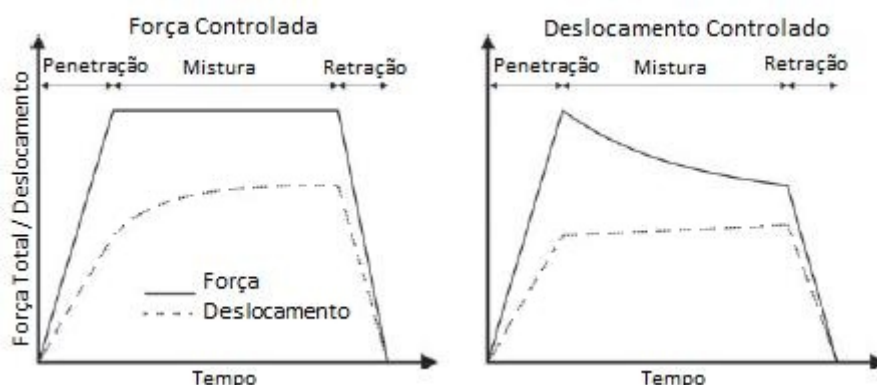


Figura 24 - Comparação entre os dados de saídas de força e deslocamento da ferramenta durante SPFMM utilizando controle de processo por força controlado e deslocamento controlado.

Fonte: “adaptado de” GERLICH e NORTH, 2011, p. 197.

Curva do processo com força controlada: a força normal na penetração é representada por uma reta, isto é possível desde que a força tenha taxa constante em função do tempo, e sendo o deslocamento variável depende da força pelo tempo descreve uma curva crescente suave, não sendo possível definir o instante que é dado do tempo de mistura. No trecho da mistura para que a força normal seja constante e descreva uma reta horizontal, deve-se manter o deslocamento da ferramenta, pois a resistência do material decai em função do tempo devido à plastificação do material, por esse motivo é necessário ter um sistema de retroalimentação com sinal de força para que seja aplicado um deslocamento pré-determinado que a força seja mantida constante durante toda essa fase, e por fim o trecho de retração que é descrita por uma reta cuja inclinação é determinada pela velocidade de deslocamento adotada na retirada da ferramenta.

Curva em processo por deslocamento controlado: o deslocamento na penetração é representado por uma reta que é constante em função do tempo, já a representação de uma reta para a força normal neste trecho seria de difícil obtenção, pois além ser dependente do deslocamento pelo tempo, a resistência do metal base varia com a deformação, aquecimento, recristalização dinâmica, fluxo do material, etc. No trecho da mistura, o deslocamento é representado por uma reta ascendente de baixa inclinação, demonstrando um baixo deslocamento e a curva da força normal descreve uma função descendente devido a queda da resistência mecânica.

O tempo de mistura pode ser aplicado com o deslocamento da ferramenta rotativa como nas curvas da figura 24. Essas velocidades de deslocamento são bem menores que as utilizadas na etapa de penetração (HOVANSKI, SANTELLA e GRANT, 2007), por exemplo, utilizou velocidades na etapa de penetração que variaram de 0,4 a 3 mm/s enquanto no deslocamento o tempo de mistura variou de 0,2 a 0,07 mm/s. Já outros trabalhos como da (MAZZAFERRO, 2008) utilizou deslocamento zero na etapa do tempo de mistura, mesma técnica utilizada neste trabalho.

Variações nos parâmetros do processo (associados a variações da velocidade rotação, taxa de penetração e tempo de mistura) da solda levam a uma grande variação na resistência mecânica da união em ensaio de tração (HOVANSKI, SANTELLA e GRANT, 2007) A variação destes e outros parâmetros de processo já mencionados, têm influencia direta nas propriedades da zona de ligação entre as chapas e são responsáveis pelo aporte de energia, fluxo do material, tamanho da zona de ligação, dureza, microestrutura e geometria da interface entre as chapas.

A zona de ligação é dividida em três zonas (MAZZAFERRO, 2008. p. 15):

Zona de mistura (ZM), a combinação do aquecimento por fricção e a intensa deformação plástica e dissipação viscosa produzem altas temperaturas na zona de mistura, que levam a recristalização do material e a mistura dos materiais das chapas superior e inferior.

Zona termomecanicamente afetada (ZTMA), caracterizada por um menor grau de deformação plástica do material em relação à ZM e um nível moderado de temperatura, dando origem a uma recuperação e/ou recristalização do material;

Zona termicamente afetada (ZTA), onde normalmente não se observa a deformação nos grãos, mas a temperatura pode atingir níveis suficientes para causar mudanças microestruturais, como por exemplo, a recuperação.

4.1.6.1 Variantes do processo de SPFMM

Foram desenvolvidos até hoje três tipos de soldagem por SPFMM, classificados como: SPFMM pura, reenchimento e transversal ou balanço. Sendo que a SPFMM pura, também chamada de processo convencional é a de maior aplicação e comumente utilizada em produção em massa.

A **SPFMM convencional**, já descrita no capítulo 4.1.6, opera com uma ferramenta rotativa com movimento vertical no sentido normal ao material base, onde ao final da operação deixa um furo que segue perfil e volume da protrusão da ferramenta.

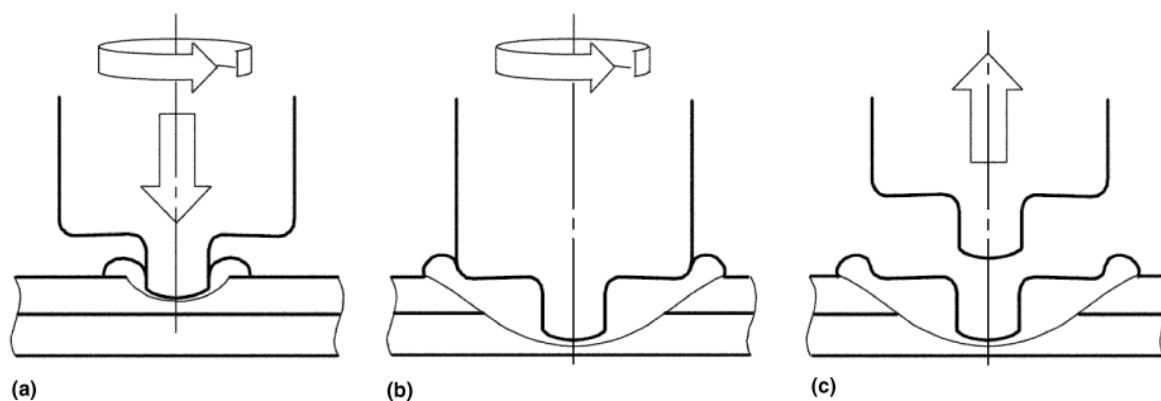


Figura 25 - Diagrama esquemático do processo de soldagem por SPFMM convencional.
(a) penetração, (b) mistura, (c) retração.

Fonte: “adaptado de” BADARINARAYAN, HUNT e OKAMOTO, 2007, p. 236

A **SPFMM de reenchimento**, diferente da SPFMM convencional, utiliza o material plastificado e expulso da junta para o preenchimento ou reenchimento do volume deixado pela própria protrusão. Este processo possui ferramenta rotativa mais complexa, sendo dividida em três partes: anel de fixação, ombro exterior e pino interior (figura 26). Todos esses componentes, possuem sua atuação na operação de soldagem com movimentos independentes no eixo axial da ferramenta. O pino e o ombro operam com rotação no mesmo sentido e velocidade. O anel de fixação atua com força normal sobre o metal base, sendo responsável por manter a chapa fixa e posicionada, além de vedar o sistema, evitando que o material plastificado seja expulso (etapa 1). Após o total assentamento do anel, o pino e o ombro descem solidários com rotação pré-determinada e entram em contato com a chapa superior do metal base, que começa a ser aquecida, iniciando-se a plastificação. O pino continua descendo até atingir a profundidade determinada na chapa inferior, enquanto o ombro se retrai simultaneamente, formando um reservatório, que será ocupado pelo material plastificado e expulso pelo pino (etapa 2). Quando o processo de mistura é finalizado pela rotação e penetração total do pino, o mesmo se retrai e o ombro é estendido simultaneamente, extrudando o material para dentro do furo formado pelo volume, outrora ocupado pelo pino (etapa 3). No final do processo, a rotação é eliminada e em alguns casos é empregada uma força de forjamento para aumentar a consolidação do material, antes da retração total da ferramenta (etapa 4). Assumindo que nenhum material foi perdido, ao final do processo se encontrará um furo totalmente preenchido com a mínima ou nenhuma endentação (BADARINARAYAN, HUNT e OKAMOTO, 2007, p. 239).

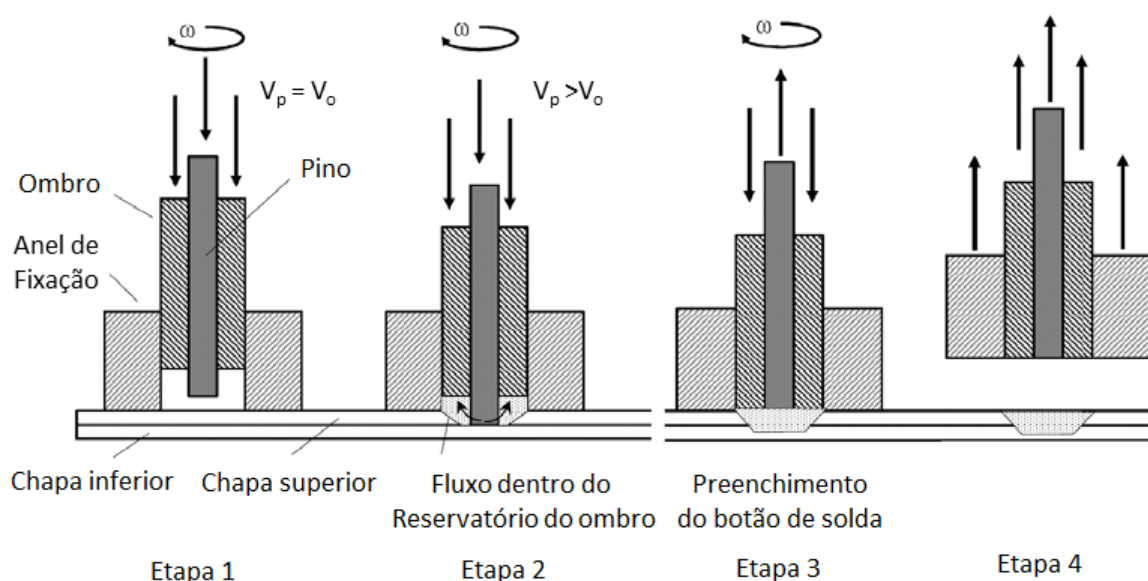


Figura 26 - Diagrama esquemático do processo de soldagem por SPFMM de reenchimento.
Fonte: “adaptado de” BADARIN BADARINARAYAN, HUNT e OKAMOTO, 2007, p. 242

Apesar de ser um processo que demanda vários segundos, na SPFMM de reenchimento, a resistência mecânica é aumentada e a soldagem apresenta o mínimo de endentação e formação de vazio (descontinuidade). Por esse motivo, essa técnica tem sido sugestionada como uma possível substituta dos rebites em aplicações aeroespaciais, onde a qualidade da superfície é importante (GERLICH e NORTH, 2011, p. 198).

A **SPFMM transversal ou balanço** foi desenvolvida pela Hitachi. Neste processo (figura 27), após a penetração total da ferramenta rotativa, a mesma se desloca horizontalmente ou se articula no eixo vertical com um grande raio e pequeno ângulo de rotação, diferente do SPFMM convencional, onde a ferramenta rotativa apenas se desloca verticalmente, resultando em ambos os casos em uma pequena distância percorrida no sentido transversal da peça. Após o deslocamento, a ferramenta é retraída por completo, deixando não apenas um furo, mas um curso ortogonal da ferramenta rotativa. A vantagem neste processo de soldagem, comparado à SPFMM convencional, é o acréscimo na área de contato com a ferramenta, aumentando a área de mistura e consequentemente uma maior área de ligação e resistência mecânica.

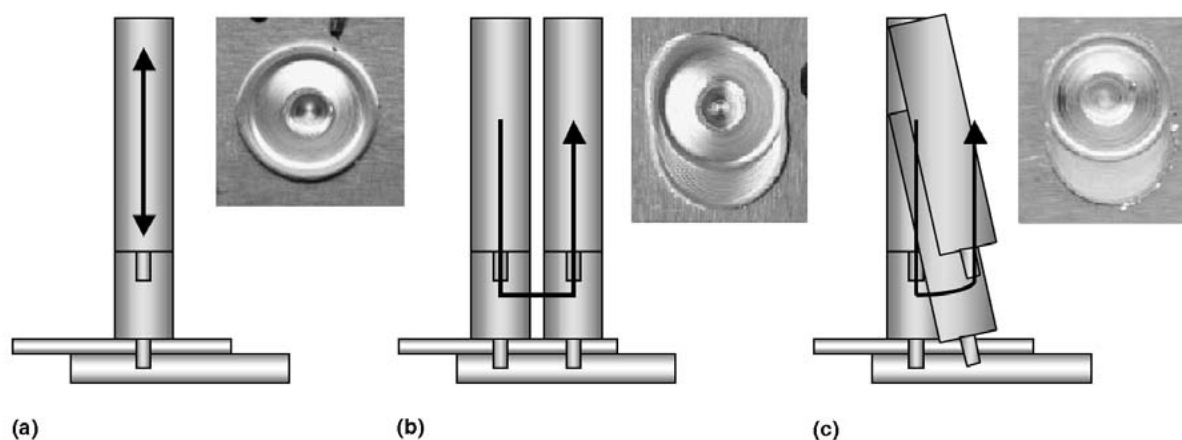


Figura 27 - Figura esquemática do movimento da ferramenta rotativa e vista superior das variantes de processo de SPFMM. (a) Convencional, (b) Transversal, (c) Balanço.

Fonte: “adaptado de” BADARINARAYAN, HUNT e OKAMOTO, 2007, p. 242

4.1.6.2 Equipamento de soldagem da SPFMM

O sistema exclusivo para SPFMM foi desenvolvido e patenteado por (NAGAO, 2003), é conhecido como pistola de estrutura tipo C (figura 28) que pesa aproximadamente 80 kg. Esta pistola pode ser instalada em robôs multiaxiais de seis eixos, conforme a figura 29, ambos são controlados por uma unidade de processamento central (UPC) ou inglês (CPU).

Este sistema de soldagem é equipado com dois servomotores, um motor rotativo que promove o movimento de rotação e torque na ferramenta e um motor linear que promove o movimento e força axial no sentido normal as chapas.

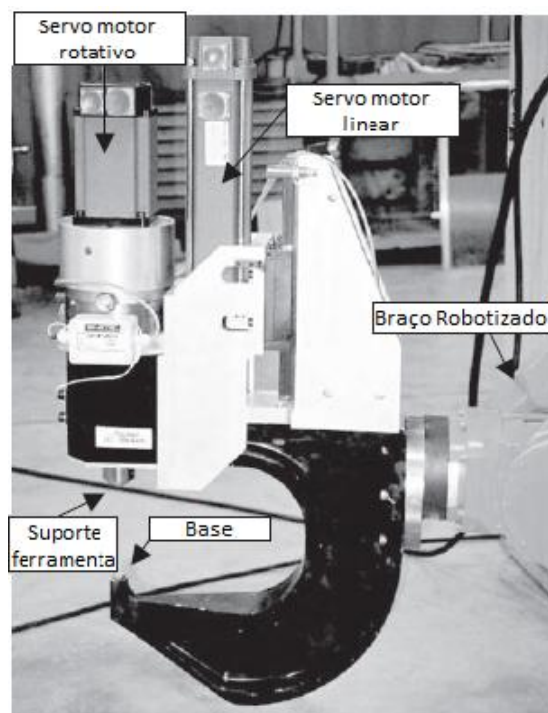


Figura 28 - Dispositivo de soldagem por fricção e mistura mecânica - Tipo C.
Fonte: “adaptado de” GERLICH e NORTH, 201, p. 95

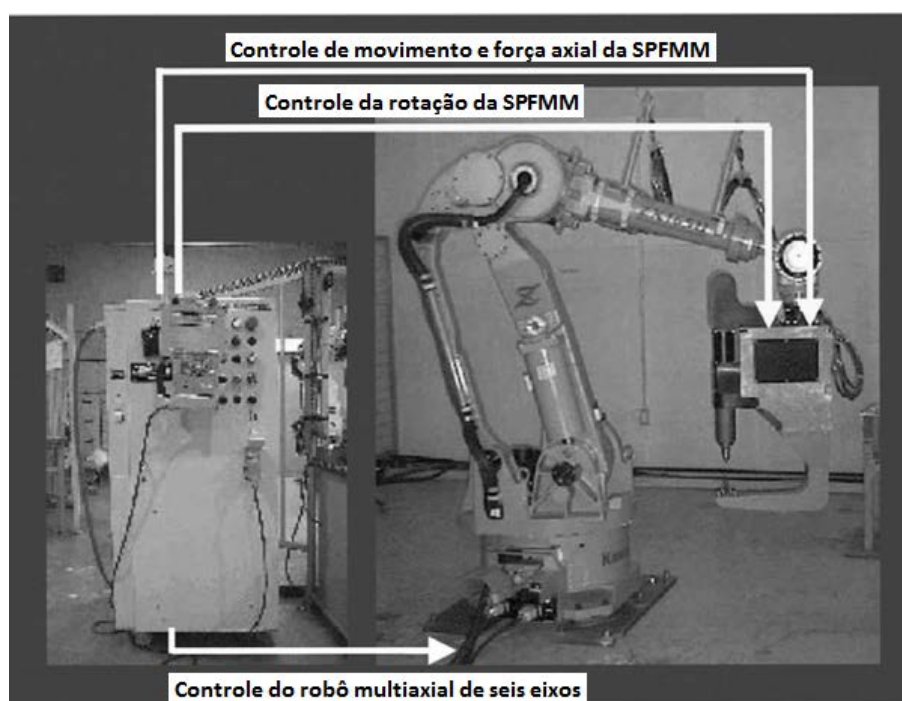


Figura 29 - Sistema robotizado multiaxial de seis eixos para SPFMM
Fonte: “adaptado de” BADARINARAYAN, HUNT e OKAMOTO, 2007, p. 238

4.1.6.3 Ferramenta para SPFMM.

Existem dois diferentes métodos de SPFMM, um deles conhecido em inglês como “poke ou plunge” (perfurar ou penetrar) e o outro como “filled” ou “refill” (preenchimento ou reenenchimento). O método de preenchimento desenvolvido pela GKSS requer uma ferramenta mais complexa, dividida em três partes que são: pino, ombro e uma camisa de retenção.

O processo de cutucar, chamado também de processo SPFMM puro, é o mais utilizado e possui simples controles de processo e implementação. Pode-se utilizar qualquer ferramenta mencionada no processo de soldagem por SFMM, porém alguns estudos demonstram que as ferramentas “MX Trifute”, “Flared-Triflute” ou pino roscado de base cilíndrica apresentam melhores resultados de união (FULLER e COMPANY, 2007, p. 26).

Ambos os processos foram abordados no capítulo 4.1.6.1.

4.1.6.4 Propriedades Mecânicas e critérios de aceitação da SPFMM

As propriedades mecânicas da SPFMM têm sido avaliadas por alguns pesquisadores através dos mesmos critérios de aceitação utilizados na soldagem por SPRE (AWS/SAE JOINT COMMITTEE ON AUTOMOTIVE WELDING, 1997). Essa prática tem sido adotada pela falta de publicações relativas a estes critérios para a SPFMM até o momento, apesar de existirem dificuldades na comparação dos modos de falha e sendo a geometria e tamanho da zona de coalescência notoriamente diferentes entre a SPFMM e a SPRE. O “peel testing”, conhecido em português por teste de arrancamento tem sido bastante utilizado em inspeção visual (qualitativa) para verificar se ocorreu a coesão e a formação da zona de mistura (ver SAE AMSW6858A). Já para as análises quantitativas, relativas à resistência mínima em ensaio de cisalhamento, tem sido utilizada a AWS D8.1M:2007, que define uma resistência mínima recomendada baseada na tensão limite de resistência do metal base e a espessura das chapas utilizadas na união, conforme mostrado no capítulo 4.1.1.7 do presente trabalho.

Os parâmetros de processo e geometria da ferramenta têm grande influência na resistência mínima atingida em ensaio de cisalhamento em soldas de sobreposição, segundo (SU, *et al.*, 2006) as propriedades mecânicas assim como a zona de ligação estão correlacionadas à energia fornecida durante a soldagem. Porém, nem toda a energia fornecida pela ferramenta rotativa é convertida em energia para a formação do ponto de solda, boa parte da energia é dissipada na própria ferramenta rotativa, no metal base, atmosfera, base de

soldagem, e na força resistiva do metal base. Portanto a energia dissipada no sistema pode ser descrita conforme a equação (8).

$$Q_{aplicada} = Q_{zona_mistura} + Q_{ferramenta_rot} + Q_{metal_base} + Q_{atmosfera} + Q_{base} + Q_{força_resistiva} \Rightarrow (8)$$

Fazendo a aquisição de força e torque da ferramenta rotativa em uma série discreta, a energia fornecida durante a soldagem por SPFMM, pode ser expressa conforme a equação (9)

$$Q_{aplicada} = \sum_{n=1}^{n=N} Força(n)(x_n - x_{n-1}) + \sum_{n=1}^{n=N} Torque(n)\omega(n)\Delta t \quad (9)$$

Onde:

x_n = profundidade de penetração da ferramenta no tempo n (m)

ω = velocidade angular (rad/s)

n = instante considerado

N = é o numero total de incrementos de tempo

Δt = intervalo de amostragem (s)

Força = (kN)

Torque = (Nm)

4.1.6.5 Modo de falha em soldagem por SPFMM.

O constante desenvolvimento de processos produtivos que reduzam custo sejam eles relativos a consumo energético e de matéria prima, tempo de processo, equipamentos, etc. têm sido o maior desafio das indústrias metalomecânica dos últimos anos. A implementação de um processo de união como a soldagem por SPFMM, por exemplo, necessita de uma gama de estudos e validações que possam garantir a repetibilidade, confiabilidade, durabilidade, etc., principalmente em indústrias automobilística e aeroespacial, onde a integridade dos usuários deve ser de suma importância. Portanto, o estudo dos modos de falha e fadiga deve ser abordado com bastante critério antes de qualquer aplicação nesta seara.

Os estudos relativos aos modos de falha e fadiga de SPFMM em alumínio e suas ligas tiveram o maior desenvolvimento até o momento, por suas vantagens técnicas e econômicas

ao substituir a SPRE, adesivos estruturais e os rebites em painéis de portas por exemplo. Todos os modos de falha apresentados no presente trabalho faz referência a alumínio 6111-T4, por falta de publicações referente a aços baixo carbono.

A carga de falha, a temperatura atingida na soldagem e a área de coalescência possuem íntima ligação com a energia introduzida na junta, que por sua vez estão ligadas aos parâmetros de processo e geometria da ferramenta que alteram o modo de falha da SPFMM. (LATHABAI, *et al.*, 2005, p. 207). Baseados neste conceito foram desenvolvidos estudos em juntas sobrepostas em alumínio 6111-T4, com ferramentas rotativas de ombro côncavo e plano (figura 30). Foram reconhecidos dois modos de falha em ensaio de tração: (i) corte através da zona de mistura e (ii) falha circunferencial em volta da zona de mistura nucleada na chapa inferior ou superior (LIN, PAN e PAN, 2007, p. 6). A área de fratura pode ser resultante de ambos os modos de falha, onde os mais altos valores em ensaio de tração são atingidos quando a melhor relação entre as duas áreas de fratura são alcançados. Existe uma íntima ligação entre o perfil do ombro da ferramenta rotativa com os valores de cargas obtidas em ensaio de tração com zona de coesão formada (ARUL, LIN, *et al.*, 2005, P. 5). Apesar de existir uma grande influência dos valores das cargas obtidas em ensaio de tração em função da geometria cônica ou plana do ombro, as variações dos parâmetros de processo são mais sensíveis, pois afetam o tamanho e áreas de descontinuidade na zona de ligação e afinamento da chapa superior (SU, *et al.*, 2006, p. 5).

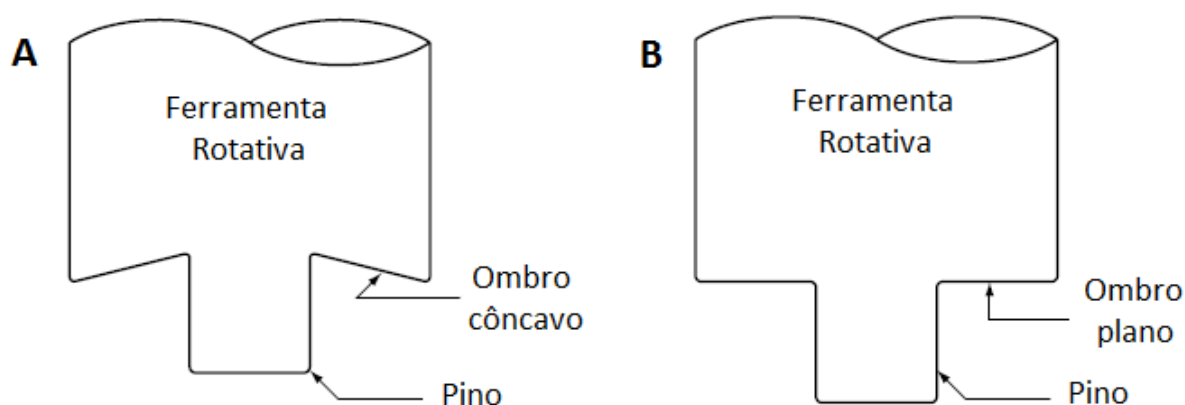


Figura 30 - Figura esquemática da ferramenta rotativa.

(A) Ombro côncavo; (B) Ombro plano.

Fonte: “adaptado de” LIN, PAN e PAN, 2007, p. 75

O modo de falha desenvolvido em SPFMM utilizando uma ferramenta rotativa com ombro côncavo é similar ao modo de falha em SPRE, que se dá pela estricção local da chapa. O esquema mostrado na figura 31 de um espécime submetido a ensaio de tração por cisalhamento, onde ao iniciar a aplicação da força de tração, o ponto de solda sofre uma rotação, alinhando-se a força. O efeito ocorre mesmo com a adição de contra chapas. Este alinhamento de força faz com que um carregamento inicialmente cisalhante, tenha decomposição de forças, as quais submetem o ponto de solda a uma força tensora, trativa e flexora simultaneamente. A falha por estricção ocorre na chapa superior na região A (figura 31), que surge no lado direito na zona de contato do diâmetro externo do ombro da ferramenta rotativa, através da nucleação da trinca originada na linha de ligação na zona de mistura do metal base. A falha propaga-se através da circunferência do botão de solda, onde se destaca finalmente na chapa superior na região B (figura 31).

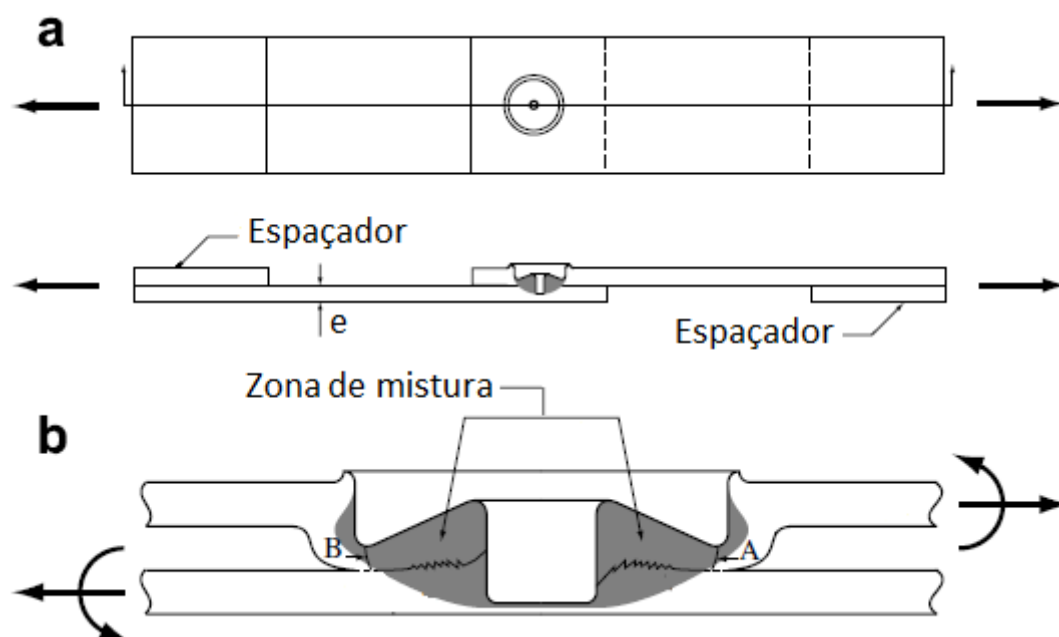


Figura 31 - Modo de falha de um espécime em alumínio 6111-T4 - ferramenta de ombro côncavo.

(a) Figura esquemática de soldagem por SPFMM em uma junta de sobreposição, com espessura e submetido a uma força de tração; (b) Figura esquemática da seção transversal aproximada de uma SPFMM feita com ferramenta rotativa de ombro côncavo.

Fonte: “adaptado de” LIN, PAN e PAN, 2007, p. 79

A micrografia ótica na secção transversal na superfície da falha, vista F2 da região I (figura 32) é marcada por depressões circulares caracterizando uma fratura dúctil do material.

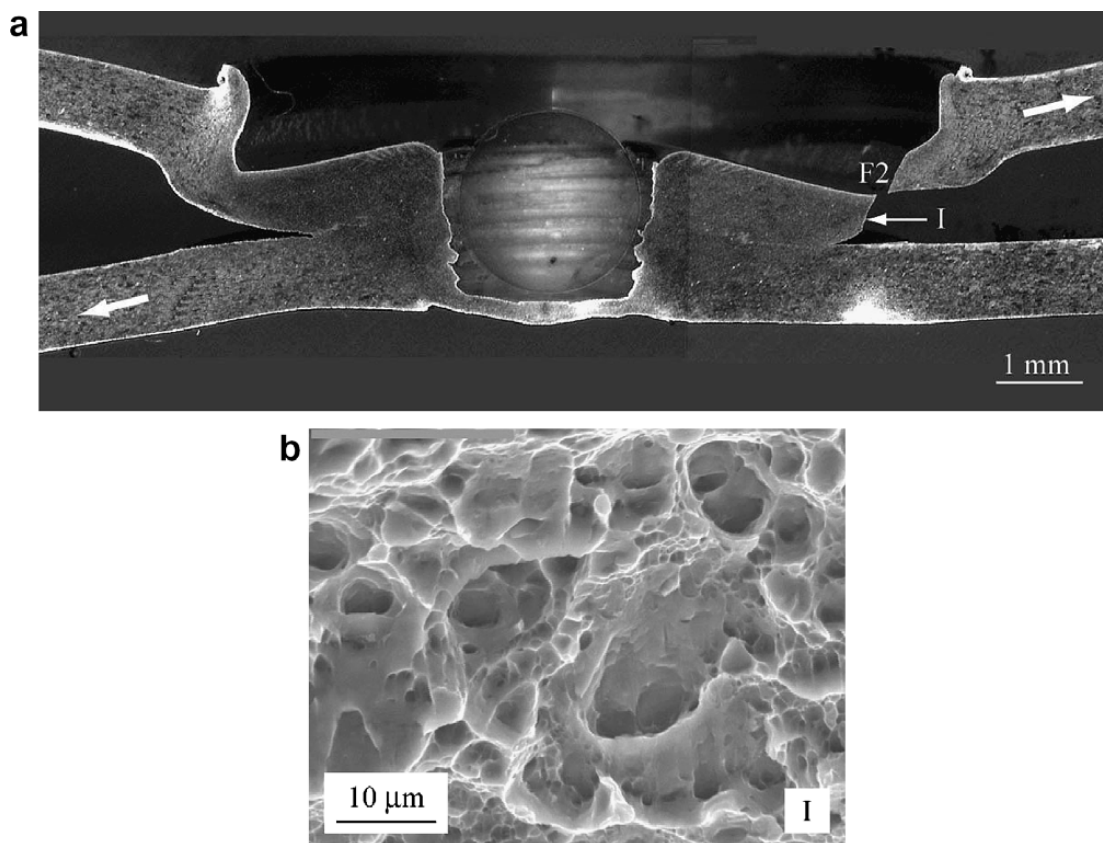


Figura 32 - Micrografia ótica de uma falha em um espécime feito em alumínio 6111-T4 – ferramenta de ombro côncavo.

(a) secção transversal no plano de simetria do espécime com falha parcial em soldagem de SPFMM feito com ferramenta rotativa côncava submetida a esforço de tração. (b) Vista F2, feito por microscopia ótica na superfície da fratura na região I.

Fonte: “adaptado de” LIN, PAN e PAN, 2007, p. 80.

O modo de falha desenvolvido em SPFMM utilizando uma ferramenta rotativa com ombro plano é definida em três localizações A, B e C para melhor descrever as fases da falha até o total colapso. Na maioria dos casos a falha inicia-se na trinca próxima à zona de mistura, perto da superfície superior no interior da zona de mistura. O ponto de solda de um espécime em ensaio de tração é submetido à força tensora trativa e flexora simultaneamente, como mostrado na figura 33. Mesmo efeito já descrito para ferramenta de ombro côncavo.

O modo de falha ocorre com a nucleação de uma trinca na zona de ligação (trinca 2) se propagando através das regiões I e II (figura 34) (localização A e B respectivamente) na figura 33, próximo ao limite do botão de solda surgindo na parte superior direita onde ocorre uma fratura frágil vista S2 (figura 34). A falha então se propaga na circunferência do botão de

solda, onde finalmente a chapa superior se destaca levando parte do botão de solda vista S1 (localização C).

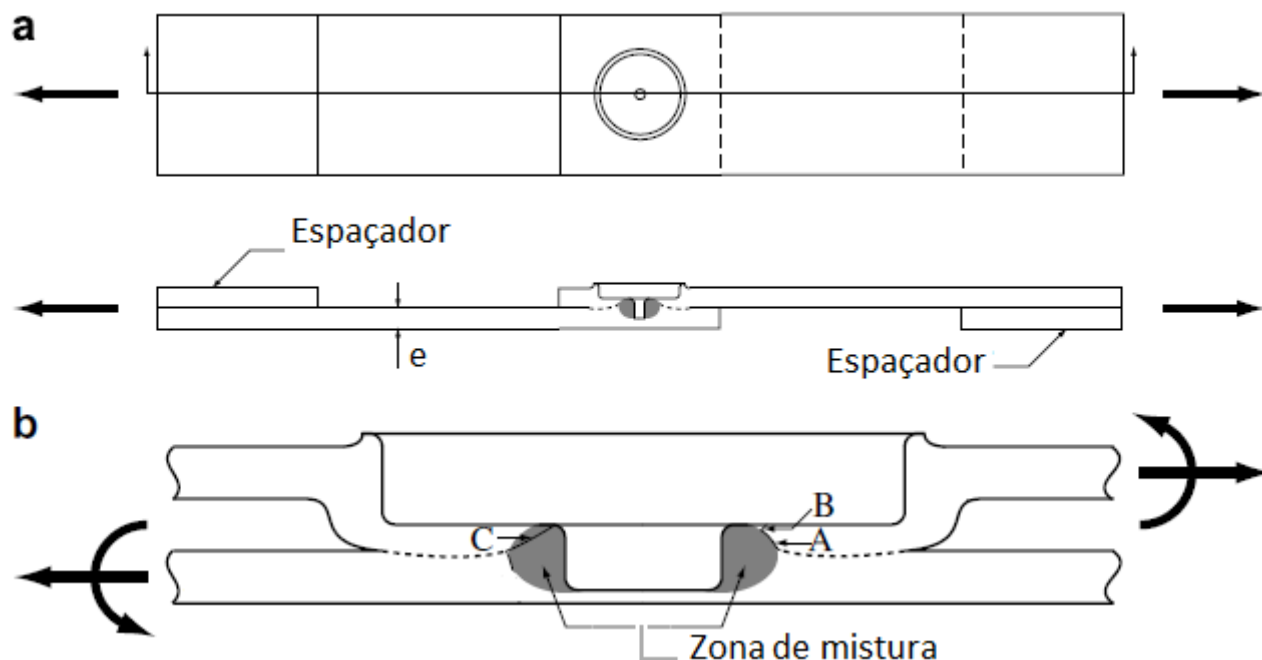


Figura 33 - Modo de falha de um espécime em alumínio 6111-T4 - ferramenta de ombro côncavo.

(a) Figura esquemática de soldagem por SPFMM em uma junta de sobreposição, com espessura e submetido a uma força de tração; (b) Figura esquemática da seção transversal aproximada de uma SPFMM feita com ferramenta rotativa de ombro plano.

Fonte: “adaptado de” LIN, PAN e PAN, 2007, p. 94.

A figura 34a é uma micrografia ótica da seção transversal na superfície da falha. Imagens ampliadas da região I (figura 34b), apresentam pequenas depressões circulares na superfície de fratura da trinca 2, onde uma estrutura ondulada inclinada na direção horizontal pode ser vista. Devido às condições de processamento, a estrutura ondulada pode ser proveniente da microestrutura do material próxima à zona de mistura. Observe que as pequenas ondulações indicam que a superfície curvada da fratura, onde se propaga a trinca 2, apresenta grande coesão antes da falha. Já nas imagens ampliadas da região II (figura 34c), depressões circulares alongadas demonstram uma fratura dúctil.

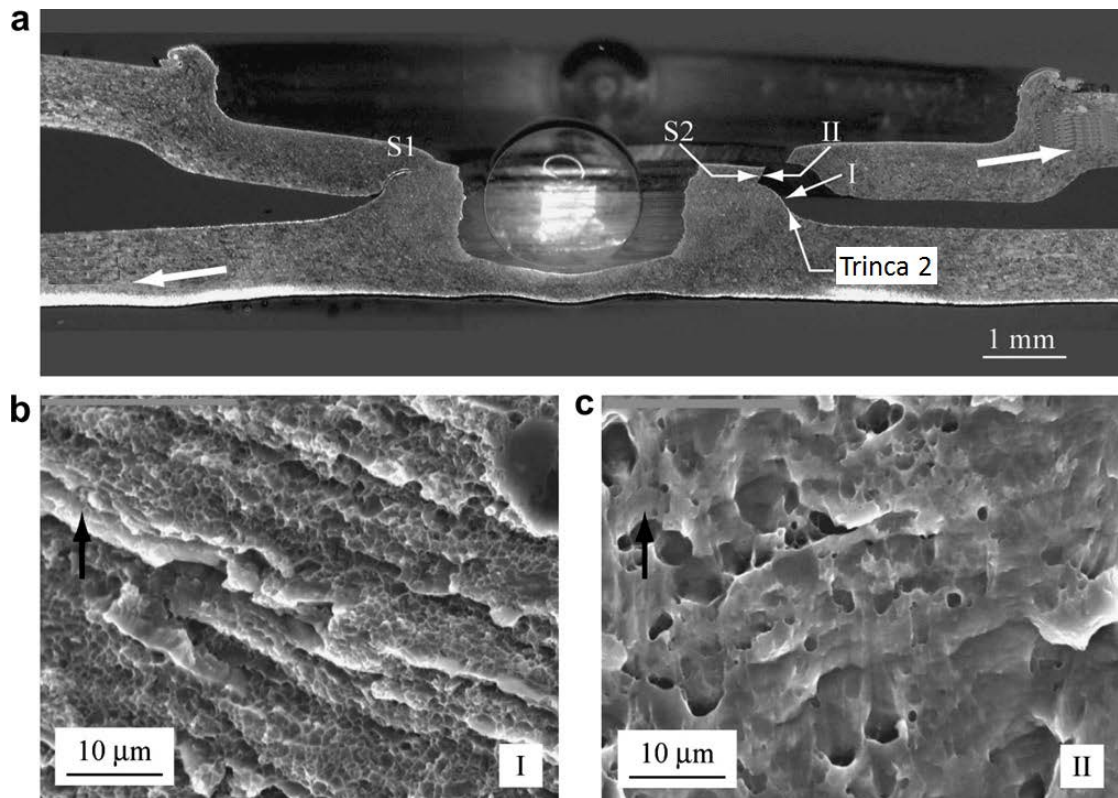


Figura 34 - Micrografia ótica de uma falha em um espécime feito em alumínio 6111-T4 – ferramenta de ombro plano.

(a) secção transversal no plano de simetria do espécime parcialmente falhado em soldagem de SPFMM feito com ferramenta rotativa de ombro plano, submetida a esforço de tração. (b) Microscopia ótica na superfície da fratura na região I. (c) Microscopia ótica na superfície da fratura na região II

Fonte: “adaptado de” LIN, PAN e PAN, 2007, p. 95.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

O material usando neste trabalho é um aço baixo carbono ABNT 1006 laminado a frio, com espessura de 1,0 mm, sem camada superficial tratada. Sua composição química, listada na tabela II foi levantada através de espectrometria de emissão atômica (Plasma Acoplado Indutivamente). Relatório foi emitido pelo IPEI – Instituto de pesquisa e estudos industriais Certificado Nº 59.062/13 FL.: 01/01.

Tabela 5 - Composição química do aço baixo carbono ABNT 1006 laminado a frio. Levantado através de Espectrometria de Emissão Atômica.

Amostra	Elementos (%)							
	C	Si	S	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
Liga Metálica	0,05	<0,001	0,013	0,27	0,003	0,01	<0,001	0,003

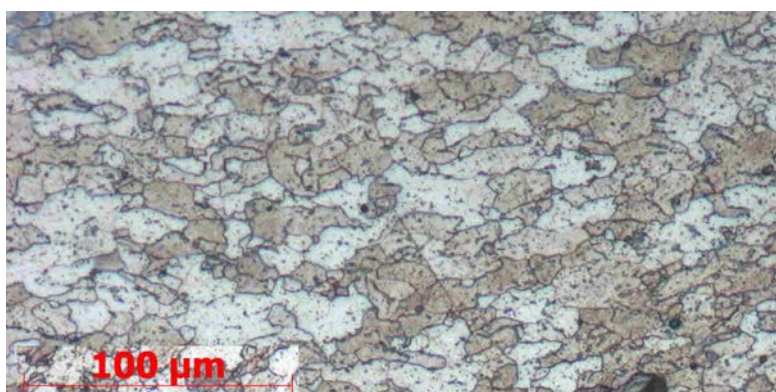


Figura 35 - Microestrutura do metal base ABNT 1006 laminado a frio observada em MO Olympus SC30 (ataque Nital 2%).

As propriedades mecânicas do material foram levantadas através de ensaio de tração realizado no CDMatM-FEI utilizando-se a máquina de ensaios universal MTS 810.25. O extensômetro utilizado foi o MTS de 50 mm modelo 634.25F-51, sendo as velocidades de 5 e 15 mm/min primárias e secundária respectivamente. Três espécimes foram ensaiados, conforme ASTM E8/E8M – 11, com alteração na área de fixação da garra em função do material base possuir apenas 130 mm, portanto ao invés de utilizar um comprimento de contato com a garra de 50 mm, foi utilizado comprimento de 15 mm, o que não afetou os resultados, pois não ocorreu escorregamento da garra. As dimensões finais dos espécimes são apresentadas na figura 36.

Os valores das propriedades mecânicas médias são: limite de resistência ao escoamento de 195 MPa; limite de resistência 324 MPa; alongamento total de 40,2% e módulo de elasticidade 200 GPa.

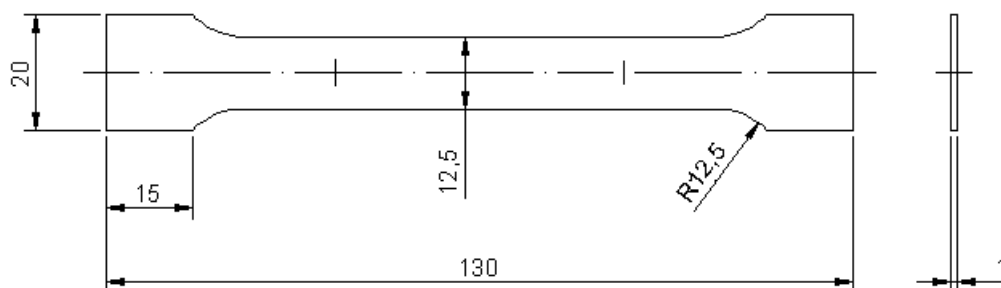


Figura 36 - Corpo de provas conforme ASTM E8/E8M – 11, com modificações na região de fixação das garras.

5.2 Métodos

5.2.1 Ferramenta rotativa

Para a fabricação da ferramenta rotativa foi utilizado o corpo (haste) de uma ferramenta R 215 86-03000-AC05, marca Sandvik, e sua geometria foi obtida através de usinagem por eletroerosão. Pode-se descrever o perfil como sendo de ombro convexo com superfície lisa e pino cônico liso com ponta plana (figura37), baseada no trabalho de (HOVANSKI, et al., 2007).

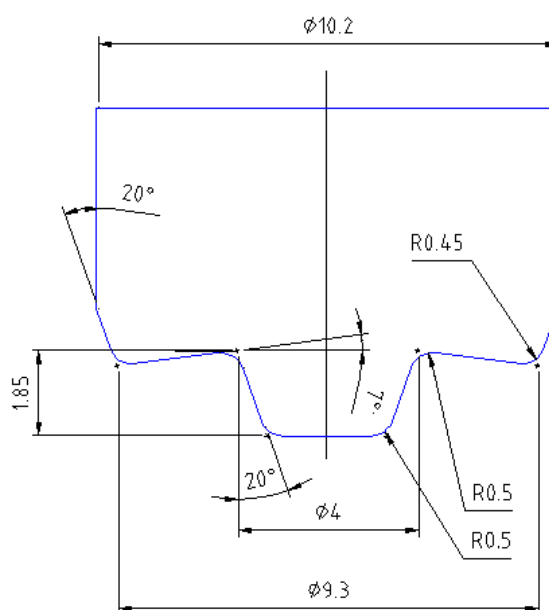


Figura 37 - Perfil da ferramenta rotativa

5.2.2 Base de apoio para espécimes.

A base de apoio (figura 38) foi desenvolvida para posicionar o espécime, reduzir a troca de calor com outros equipamentos e também como meio de fixação com o dinamômetro de mesa durante a soldagem. Dois parafusos M10x20 com cabeça cilíndrica e sextavado interno classe de resistência 12.9 foram utilizados para fixar a base no dinamômetro de mesa, e outros dois parafusos M6x40 com cabeça cilíndrica e sextavado interno e um conjunto de porcas foram utilizados como posicionadores, para garantir a correta sobreposição das chapas.

As dimensões principais da base são:

Diâmetro externo: 175 mm

Altura total da base: 15 mm

Diâmetro do rebaixo: 115 mm

Profundidade do rebaixo: 10 mm

Diâmetro do pino central: 15 mm

Altura do pino: 8 mm

Largura do rebaixo de posicionamento do espécime: 35,4 mm

Profundidade do rebaixo de posicionamento do espécime: 2 mm

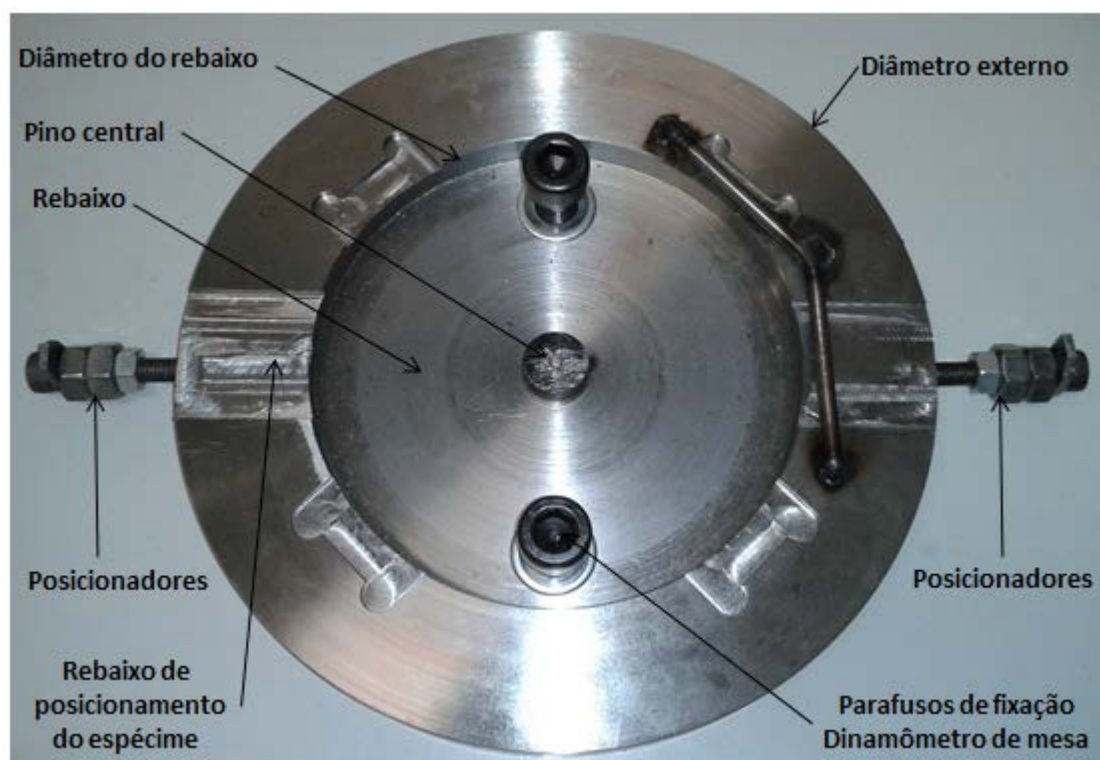


Figura 38 - Base de apoio dos espécimes (interface do dinamômetro de mesa)

5.2.3 Dinamômetro de mesa.

O dinamômetro utilizado para o levantamento dos esforços desenvolvidos durante o processo soldagem por SPFMM foi desenvolvido para fazer medição dos esforços de usinagem em operações de fresamento. O projeto e construção deste dinamômetro foram baseados no trabalho de (SAGLAM e URUVAR, 2001, p. 95-109). De forma simplificada pode-se descrever a mesa dinamométrica como sendo uma base superior e outra inferior interligada por anéis que são instrumentados com extensômetros (*strain gages*) unidirecionais simples formando células de carga. A fixação da células de carga foi feita através de parafusos M10x20 mm, DIN 912 – Classe de resistência 12.9. Tanto a base como os anéis foram construídos com aço ABNT 4340 (figura 39).

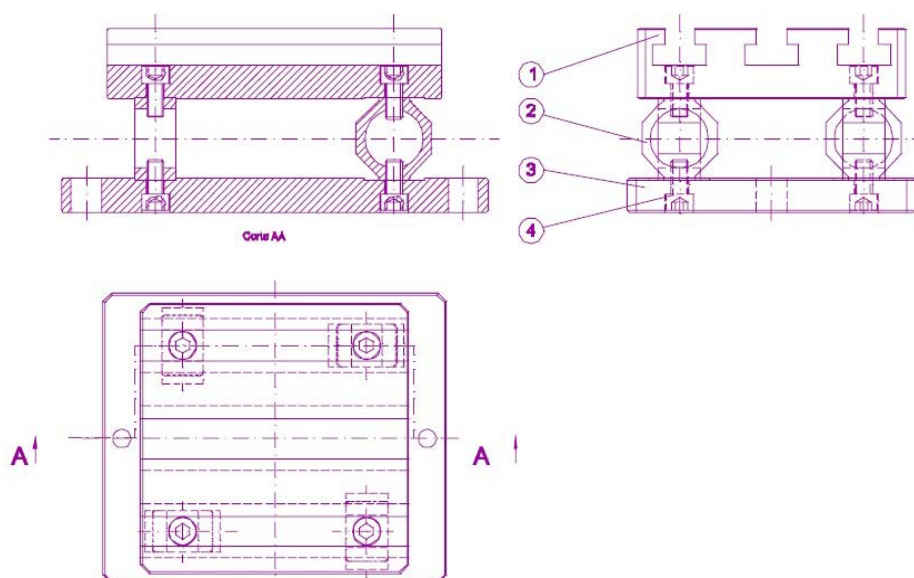


Figura 39 – Dinamômetro de mesa.

Item 1) Base superior; item 2) Anel; item 3) Base inferior; item 4) Parafusos.

Fonte: “adaptado de” ROSSI, 2008, p. 62.

Os anéis foram usinados em formato de octógonos que facilita a sua instalação, mantendo-se os graus de liberdade necessário para a leitura da deformação, sendo possível a colagem de quadro *strain gages* dispostos a 45°. Os anéis foram instalados em pares em posições ortogonais entre eles, sendo que cada uma das células de carga está instrumentada para medir deformações nas direções axial e transversal, permitindo a medição de forças nas três direções ortogonais. As deformações captadas através de *strain gages* são convertidas em sinais elétricos, que são amplificadas em uma ponte de Wheatstone e medidas através de um voltímetro. A figura 40 demonstra disposição das células de carga 1, 2, 3 e 4 e também a

denominação dos sinais de forças em relação aos eixos vertical, horizontal e normal, que são os sinais A, B, C, D, E e F. (ROSSI, 2008, p. 57-62).

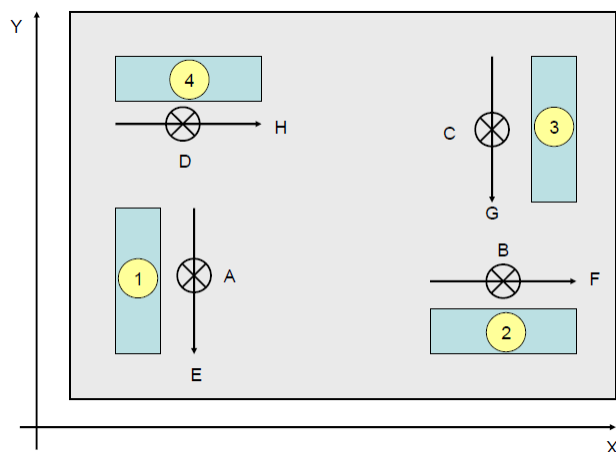


Figura 40 - Esquema de montagem das células de carga no dinamômetro
Fonte: “adaptado de” ROSSI, 2008, p. 61.

A figura 41, em três direções do dinamômetro de mesa.



Figura 41 - Fotos do dinamômetro de mesa

5.2.4 Produção das Juntas com SPFMM

Foram produzidas juntas sobrepostas utilizando-se de um CNC Romi 4022 Série - 016002494-353.

Velocidade de rotação (rpm): 800,1200 e 1600

Tempo de mistura (s): 1, 3 e 5

Profundidade de penetração (mm): 1,8

Velocidade de penetração (mm/s): 0,1

Velocidade de retração da ferramenta (mm/s) 100

A figura 42 mostra o gráfico que representa o tempo total do processo para as três variações de tempo de mistura. O tempo total é compreendido em três fases, tempo de penetração, mistura e retração da ferramenta. O tempo de penetração é sempre de 18 s sendo que velocidade de penetração é constante 0,1 mm/s. O tempo de mistura varia de 1,3 e 5 s, e a retração é sempre de 1,8 s, sendo que velocidade é também constante de 100 mm/s. Portanto o tempo total de cada processo considerando os tempos de mistura 1,3 e 5 s são respectivamente de 19, 21 e 23 s.

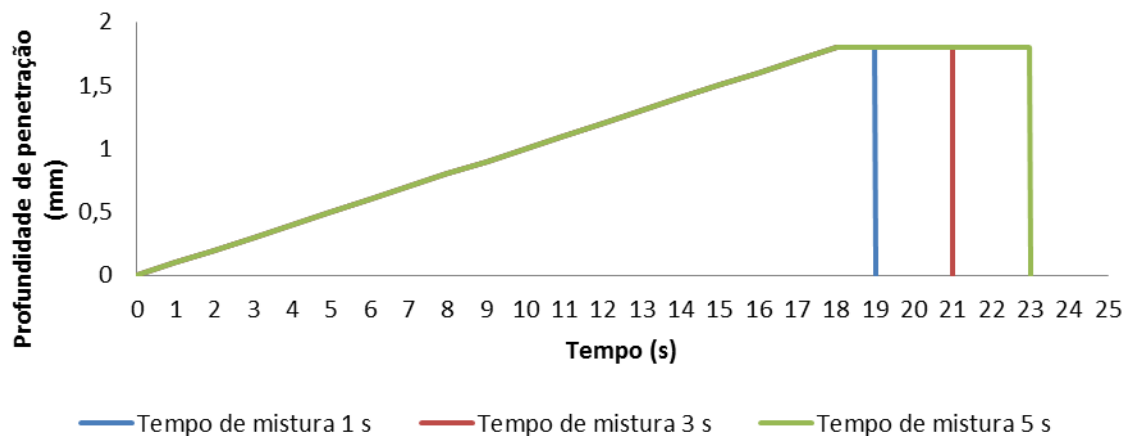


Figura 42- Gráfico esquemático da representação do tempo total de processo.

5.2.5 Produção das Juntas com SPRE

Foram produzidas três juntas sobrepostas com SPRE, a fim de se determinar a força obtida em ensaio de tração. As juntas foram produzidas com os seguintes parâmetros de processo, para a obtenção de um diâmetro teórico de 4,5 mm. O foi construído de cobre eletrolítico.

Parâmetros de processo:

Pressão entre os eletrodos: 100 kgf

Corrente: 5,0 kA $\pm$ 0,1

Frequência de corrente: 60 Hz

Compressão: 20 ciclos

Tempo de passagem de corrente: 20 ciclos (pulso único)

Fase de espera: 20 ciclos

Potencia: 58% da capacidade de transferência (50kVA)

Desenho com as dimensões principais do eletrodo utilizado (figura 43).

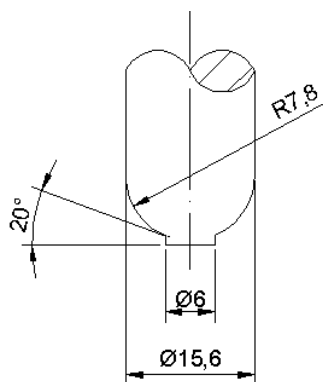


Figura 43 - Dimensões principais do eletro de cobre eletrolítico

5.2.6 Ensaio de tração

Ensaio de tração foram executados a fim de determinar a força atingida nas juntas e assim comparar com os valores mínimos recomendáveis para SPRE conforme AWS D8.1M: 2007 (American Welding Society, 2007). Os espécimes em SPRE e SPFMM forma submetidos a uma taxa de deformação de 10 mm/min conforme a norma ANSI/AWS/SAE/D.8-97 (AWS/SAE Joint Committee on Automotive Welding, 1997). As dimensões dos espécimes estão mostrados na figura 44.

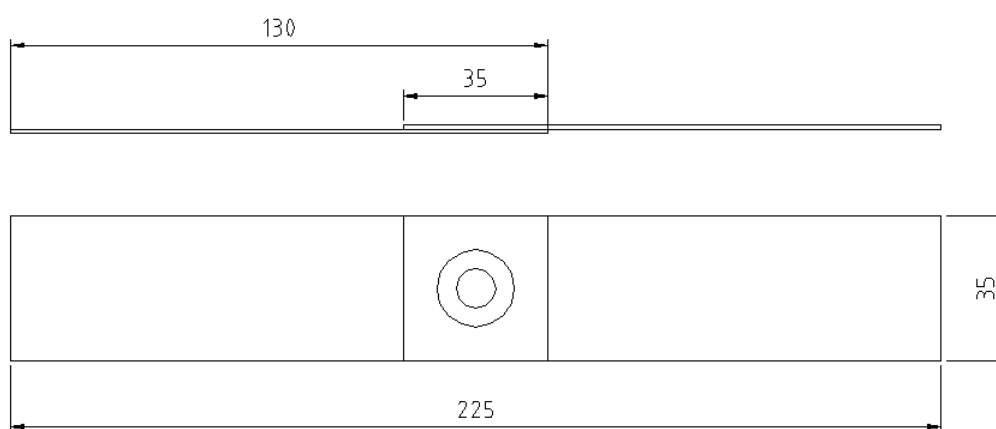


Figura 44- Dimensões do espécime para ensaio de tração.

Foram ensaiados vinte e sete espécimes no total, em ordem aleatória. Todos os ensaios foram no CDMatM-FEI utilizando a MTS (Material Test System-810.25) de 250kN de capacidade, com atuador hidráulico servo-controlado, mostrada na figura 45.



Figura 45 - Máquina universal de ensaios MTS utilizada na realização dos ensaios de tração, com capacidade de carga de 250kN. LabMat-FEI.

5.2.7 Microscopia ótica

Novas juntas foram executadas para análise da macro e microestrutura do material, pois as executadas anteriormente junto as demais utilizadas nos ensaios de tração foram feitas de aleatoriamente de forma que o desgaste da ferramenta não pode ser acompanhado, dificultando assim a análise e conclusões quanto as variações das variáveis de processo. Portanto, foram desenvolvidos seis embutimentos, nomeados como 1,2,3,4,5 e 6, onde o embutimento 1 contém três espécimes onde o processo utilizado foi rotação de 800 rpm e tempos de mistura 1,3 e 5 s, o embutimento 2 contém três espécimes com rotação de 1200 rpm e tempo de mistura 1,3 e 5 s e o embutimento 3 contém três espécimes com rotação de 1600 e tempo de mistura 1, 3 e 5 considerando uma ferramenta totalmente (sem desgaste). Os embutimentos 4,5 e 6 são réplicas dos embutimentos 1,2 e 3, porém utilizando uma ferramenta com desgaste. Os embutimentos foram feitos em um equipamento automático pneumático-hidráulico chamado de Techpress 2 da marca Allied (figura 46) , com resina termofixa de cura a quente sob pressão.

O preparo metalográfico, foi desenvolvido conforme padrão mostrado na tabela xx, em uma máquina de bancada, com microprocessadores para o controle automático do desbaste, lixamento e polimento chamada de Struers da marca Abramin (figura 47)



Figura 46 – Embutidor Techpress 2.



Figura 47 - Politriz automática Struers Abramim

Tabela 6 - Sequencia de preparação das amostras (etapas de lixamento e polimento) para caracterização microestrutural.

Etapa	Abrasivo	Granulação	Força	Lubrificante	Vazão	Tempo	Rotação	W/D
1	lixa	220 cm ²	400 N	água	abundante	3'	150 rpm	W
2	lixa	320 cm ²	400 N	água	abundante	3'	150 rpm	W
3	lixa	400 cm ²	400 N	água	abundante	3'	150 rpm	W
4	lixa	600 cm ²	400 N	água	abundante	3'	150 rpm	W
5	diamante	6 µm	400 N	álcool	~5 gotas/s	3'	150 rpm	D
6	diamante	3 µm	400 N	álcool	~5 gotas/s	3'	150 rpm	D
7	diamante	1 µm	400 N	álcool	~5 gotas/s	3'	300 rpm	D
*	diamante	1 µm	400 N	álcool	~5 gotas/s	2'		D

Após o processo de polimento as amostras foram atacadas com Nital 2% durante 10 s aproximadamente. Com esse preparo foi possível fazer analisar capturar imagens da macroestrutura para análise global do comportamento, como profundidade de penetração da ferramenta e tamanho da zona de mistura e também analisar a microestrutura formada na zona de ligação

6 RESULTADOS

6.1 Forças obtidas em ensaio de tração.

Os parâmetros utilizados na soldagem por SPFMM foram adotados conforme resultado apresentado em uma serie de análises executadas previamente. Os parâmetros utilizados nestas análises prévias foram rotação de 1200, 1600 e 2000 rpm com velocidade de penetração de 1,0 mm/s e tempo de mistura que variaram entre 1 a 3 s. Esta análise prévia demonstrou que os maiores valores de resistência em ensaio de tração foram atingidos com rotações menores e maiores tempos de mistura. O gráfico da figura 49 foi desenvolvido com os resultados destas análises, no eixo das abcissas encontram-se as rotações e no eixo das ordenadas o tempo de mistura e, fazendo o cruzamento de duas retas do eixo x e y, é determinando o valor da força atingida em ensaio de tração. Os pontos brancos que aparecem no gráfico são plotagem da função regressiva.

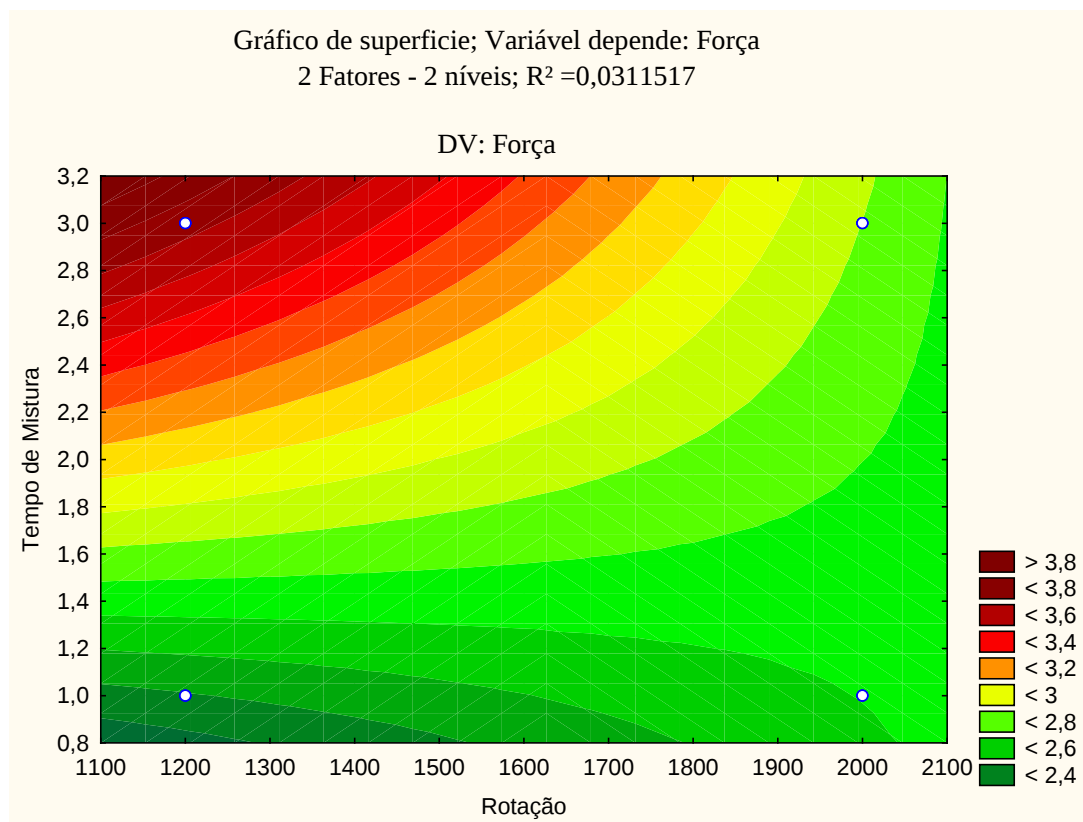


Figura 48 - Gráfico de superfície – Análises prévias para definição do planejamento experimental.

Para um melhor planejamento experimental foi adicionado um novo tempo de mistura para podemos utilizar um planejamento 2^K com ponto central. Outro motivo que levou a

novos ensaios foi à queda na resistência ao ensaio de tração, que podem estar ligado ao desgaste excessivo e prematuro da ferramenta. A ferramenta rotativa teve sua ponta aumentada em 0,2 mm, objetivando um maior fluxo do material nesta nova etapa.

Após definido o planejamento experimental baseando-se nos experimentos prévios, quarenta e cinco espécimes foram produzidas com rotações de 800, 1200 e 1600 rpm e tempos de mistura de 1, 3 e 5 s, destinados a ensaio de tração e embutimento. Devido ao desgaste excessivo observado nos ensaios prévios, as nove primeiras juntas foram executados em uma sequência a qual seria possível obter a resistência em ensaio de tração para cada um dos processos, com o menor desgaste possível da ferramenta rotativa. Portanto os nove primeiros espécimes foram executados em sequência com as seguintes variantes de processo, espécimes 1, 2 e 3 considerou-se rotação constante de 800 rpm, espécimes 4, 5 e 6 executados com rotação constante de 1200 rpm, e os espécimes 7, 8 e 9 executados com rotação constante de 1600 rpm, onde os espécimes 1, 4 e 7 tiveram tempo de mistura 1 s, os espécimes 2, 5 e 8 com tempo de mistura de 3 s e os espécimes 3, 6 e 9 com tempo de mistura 5 s. Demais espécimes foram soldados de forma aleatória.

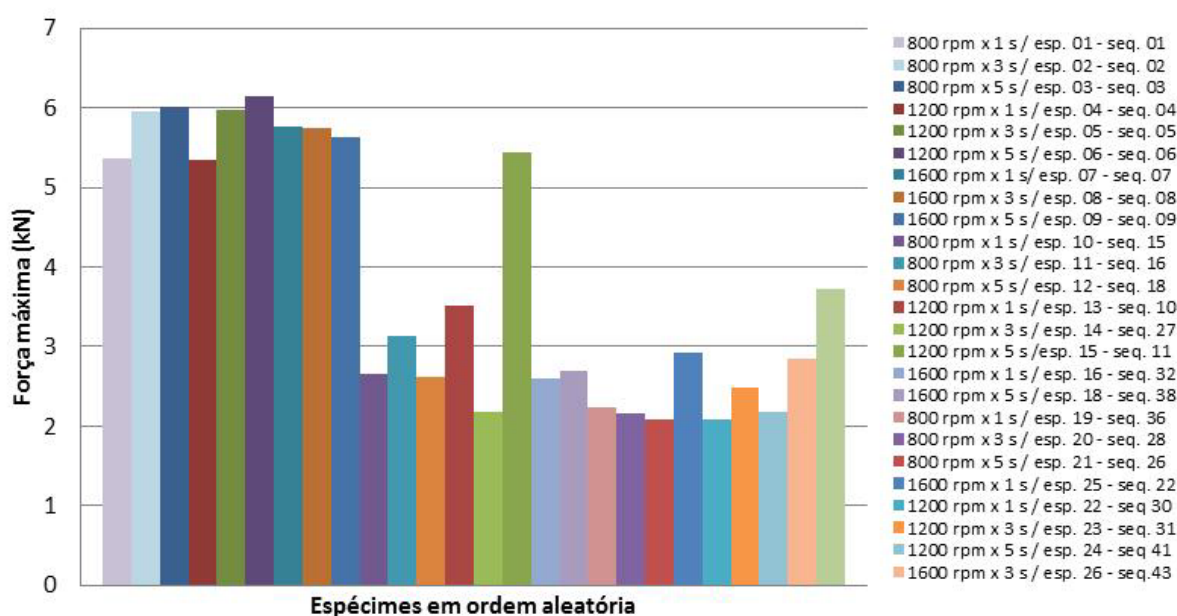


Figura 49 - Forças máximas obtidas em ensaio de tração para cada condição de soldagem em sequência aleatória.

O gráfico da figura 50 foi montado com os valores de forças máximas obtidas em ensaio de tração conforme sequência de execução descrita anteriormente, onde podemos observar uma queda considerável nos valores das forças após a execução do nono espécime.

Com o intuito de melhor observar os valores das forças atingidas em ensaio de tração em relação ao desgaste da ferramenta, o gráfico da figura 51, foi montado com os espécimes em ordem crescente em relação à execução das juntas.

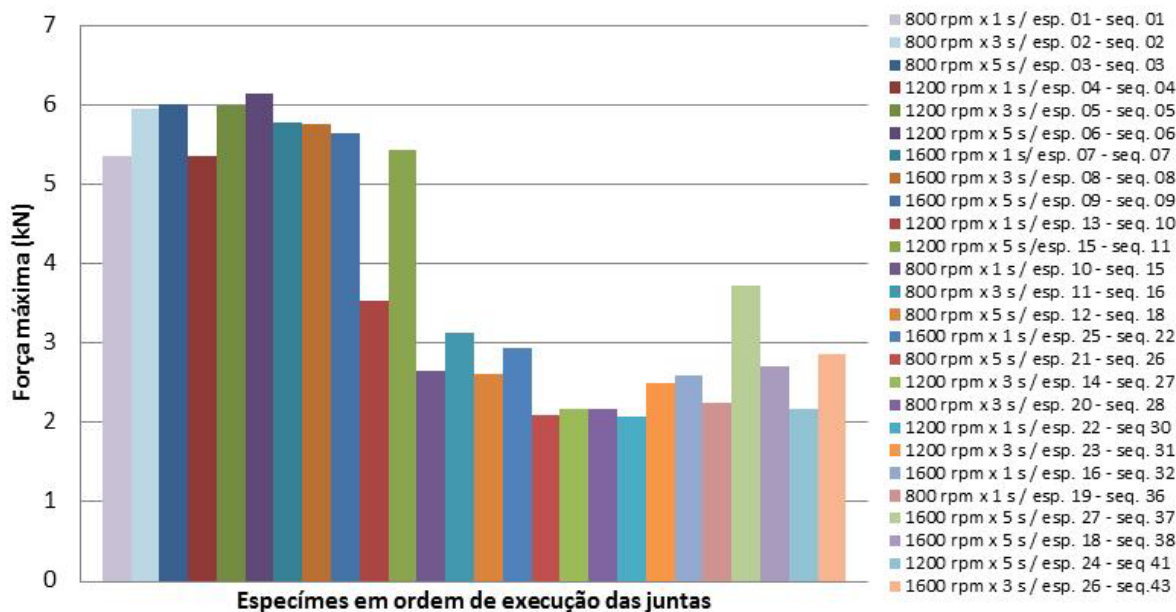


Figura 50 - Forças máximas obtidas em ensaio de tração para cada condição de soldagem em sequência de execução.

Pode-se observar que a queda da força máxima obtida nos ensaio à tração ocorre sensivelmente após a décima primeira execução, podendo concluir que o desgaste da ferramenta este intimamente ligado aos resultados das forças máximas obtidas em ensaio de tração.

A pesar da queda substancial das forças, apenas três dos vinte e sete espécimes tiveram valores de força abaixo da resistência mínima esperada para uma SPRE segundo AWS D8.1M: 2007, onde para um aço baixo carbono com tensão limite de resistência de 324 Mpa e espessura de 1 mm deve-se atingir uma resistência mínima de 2,17 kN, calculado através da equação 7 demonstrada no capítulo 4.1.1.7 como exemplo de aplicação. O gráfico da figura 52, demonstra que os espécimes 21 e 22 (em vermelho), possuem valor percentual abaixo do valor mínimo esperada de 3,6% e 4,17% respectivamente, e o espécime 20 que apresentou apenas 0,4% abaixo do mínimo (em amarelo).

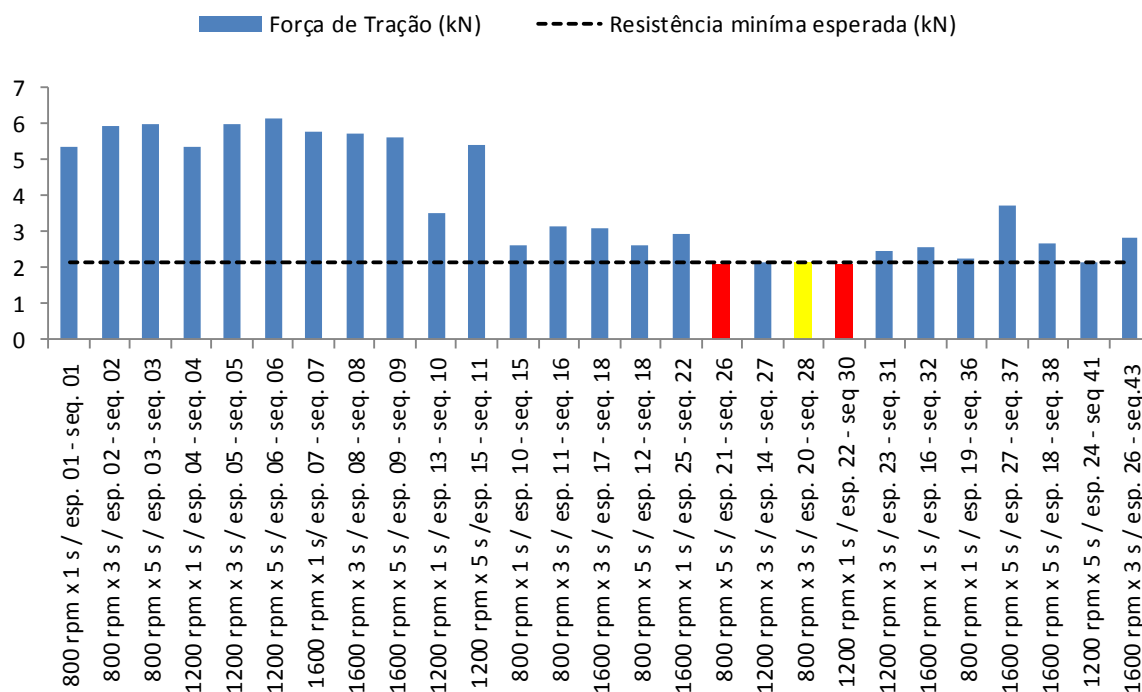


Figura 51 - Força máxima obtidas em ensaio de tração comparada ao valor de resistência mínima esperada conforme AWS D8.1M: 2007

Mesmo sabendo-se que a queda dos valores de força se reduz consideravelmente após a decima primeira execução, o projeto do experimento será dividido em dois blocos o primeiro com os nove primeiros espécimes executados em sequência já descrita e os dezoito espécimes restantes executados de forma aleatória. Este dois blocos serão intitulados como bloco sem desgaste e bloco com desgaste da ferramenta rotativa.

Analizou-se primeiramente o bloco sem desgaste, onde o gráfico de Pareto da figura 53 desenvolvido pelo Statistica 8 utilizou uma função regressiva quadrática, por esse motivo o gráfico demonstra duas barras para cada parâmetro de processo, onde a letra (L) refere-se aos índices lineares e a letra (Q) refere-se aos índices quadráticos da função regressiva. Pode-se afirmar que o tempo de mistura e rotação influenciam no processo de formação SPFMM, sendo que tempo de mistura tem a maior influência, apontando maior significância na parcela linear da função, em contra partida a rotação tem maior significância na parcela quadrática da função.

O gráfico da figura 54 mostra que a maior força é encontrado com a rotação de 1200 rpm e tempo de mistura 5 s.

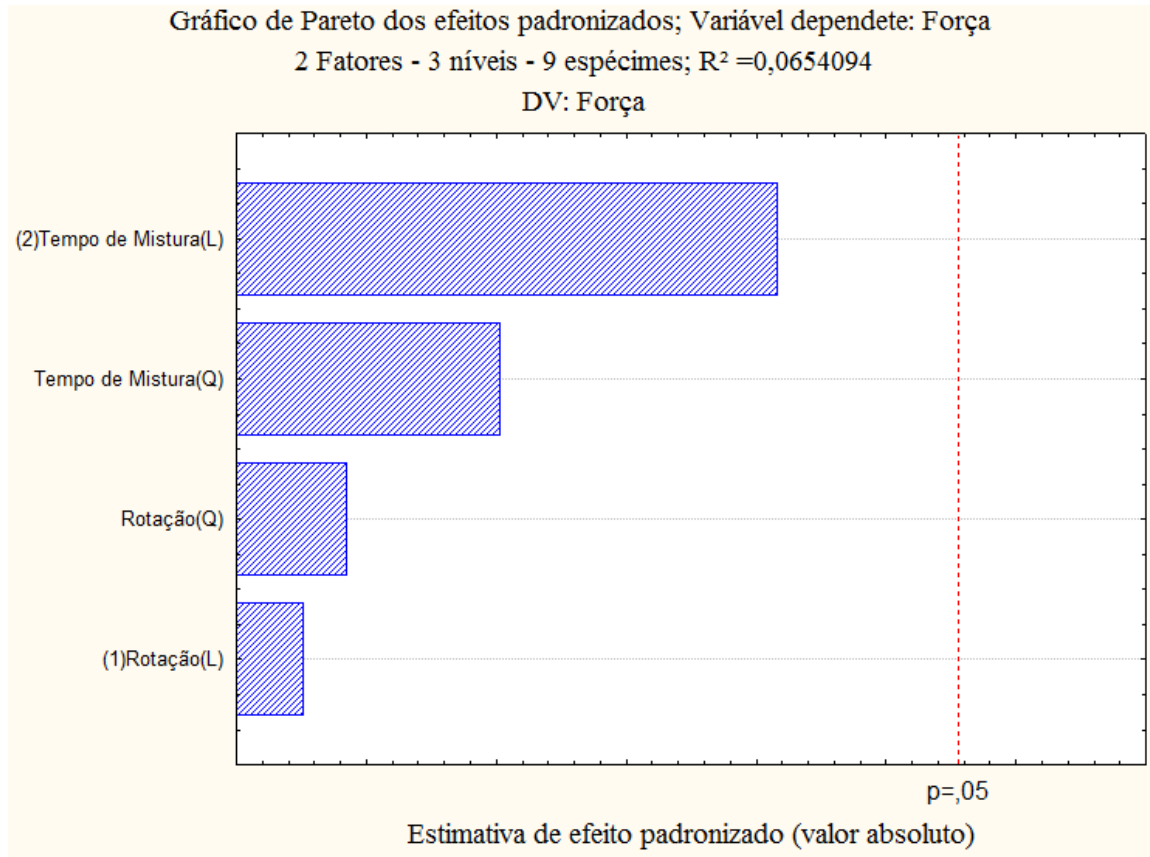


Figura 52 - Projeto de Experimentos sem o desgaste da ferramenta.

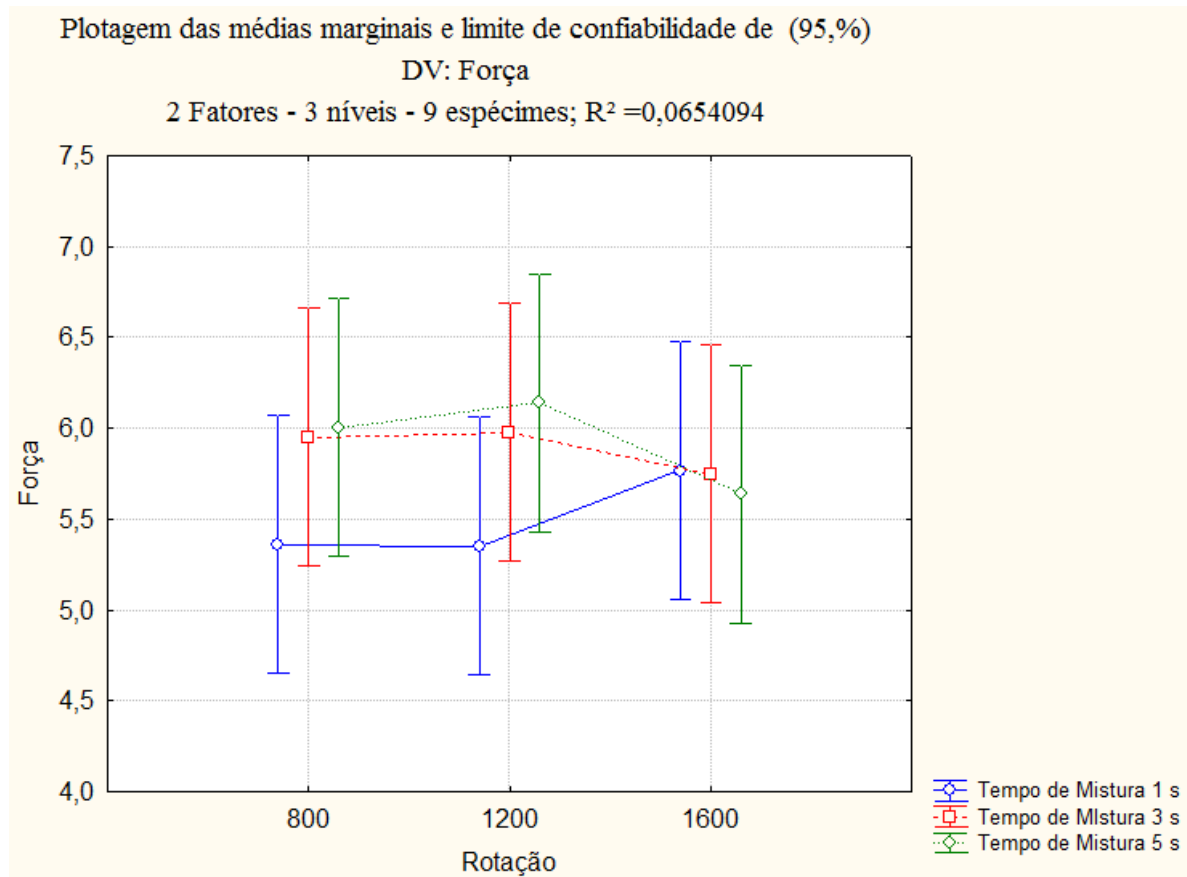


Figura 53 - Gráfico das médias marginais e confiabilidade - Projeto de experimentos sem desgaste da ferramenta.

De forma análoga analisou-se o comportamento dos espécimes do bloco com desgaste da ferramenta. O gráfico de Pareto da figura 55, onde a função regressiva adotada pelo software foi quadrática, mostra que a rotação e tempo de mistura influenciam no processo de formação da SPFMM. A rotação tem a maior influencia, seguido pela rotação sendo que ambos apresentaram a maior significância na parcela linear da função, que diferente do bloco sem desgaste não apresentou grande defasagem entre a significância dos parâmetros de processo. O termo quadrático da função apresenta mesma significância entre os processos.

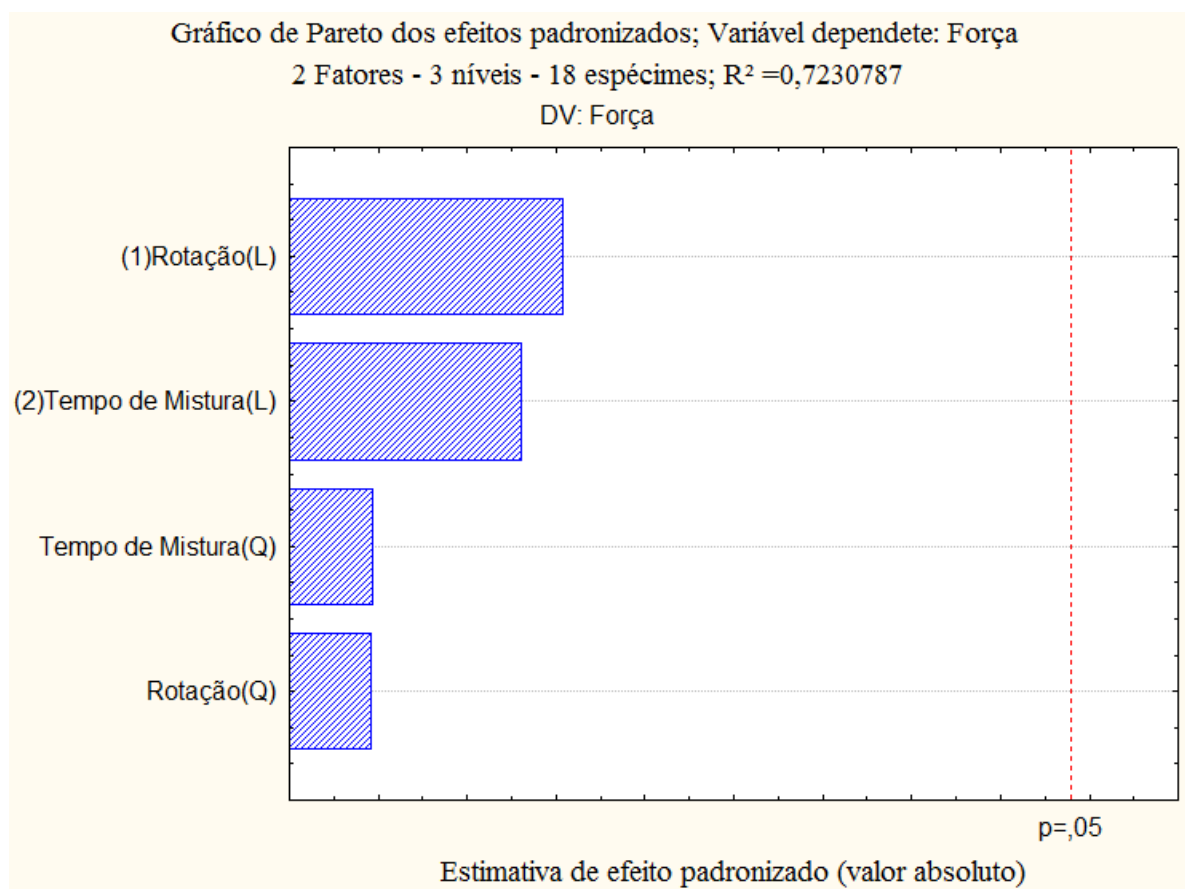


Figura 54 - Gráfico de Pareto - Projeto de Experimentos com o desgaste da ferramenta.

O gráfico da figura 56 assim como no processo sem desgaste, a maior força média é encontrado com a rotação de 1200 rpm e tempo de mistura 5 s.

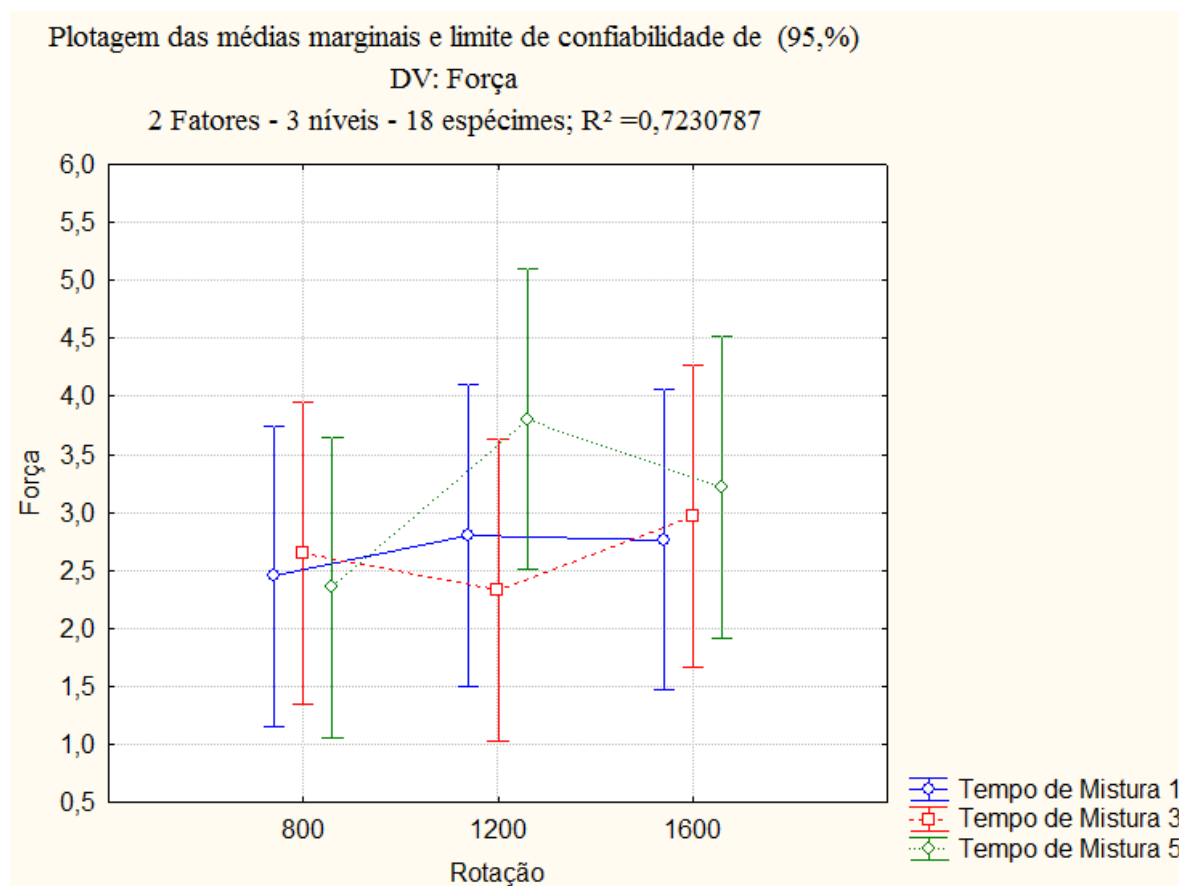


Figura 55 - Gráfico das médias marginais e confiabilidade - Projeto de Experimentos com desgaste da ferramenta.

Apesar de ambos os blocos sem e com desgaste terem apresentado os mais altos valores de força com rotação de 1200 rpm e tempo de mistura de 5 s, a influencia de tempo de mistura e rotação foram diferentes, pois para o bloco sem desgaste o tempo de mistura teve a maior influencia enquanto para o bloco com desgaste a rotação teve a maior influencia.

O gráfico de superfície para o bloco sem desgaste da ferramenta, figura 57 apresenta de forma ilustrativa quais seriam os parâmetros aplicados na produção de uma junta visando atingir maior resistência em ensaio de tração. No eixo das abcissas (eixo x) encontram-se as rotações e no eixo das ordenadas (eixo y) o tempo de mistura e eixo z encontram-se as forças atingidas em ensaio de tração. Percebe-se que existe um campo bastante largo de rotação entre 700 a 1600 rpm que atingem a força máxima se combinados a tempo de misturas acima de 3 s. Os pontos brancos que aparecem no gráficos são plotagem no espaço da função regressiva, observa-se uma baixa aderência com a superfície formada, justificando o baixo R^2 .

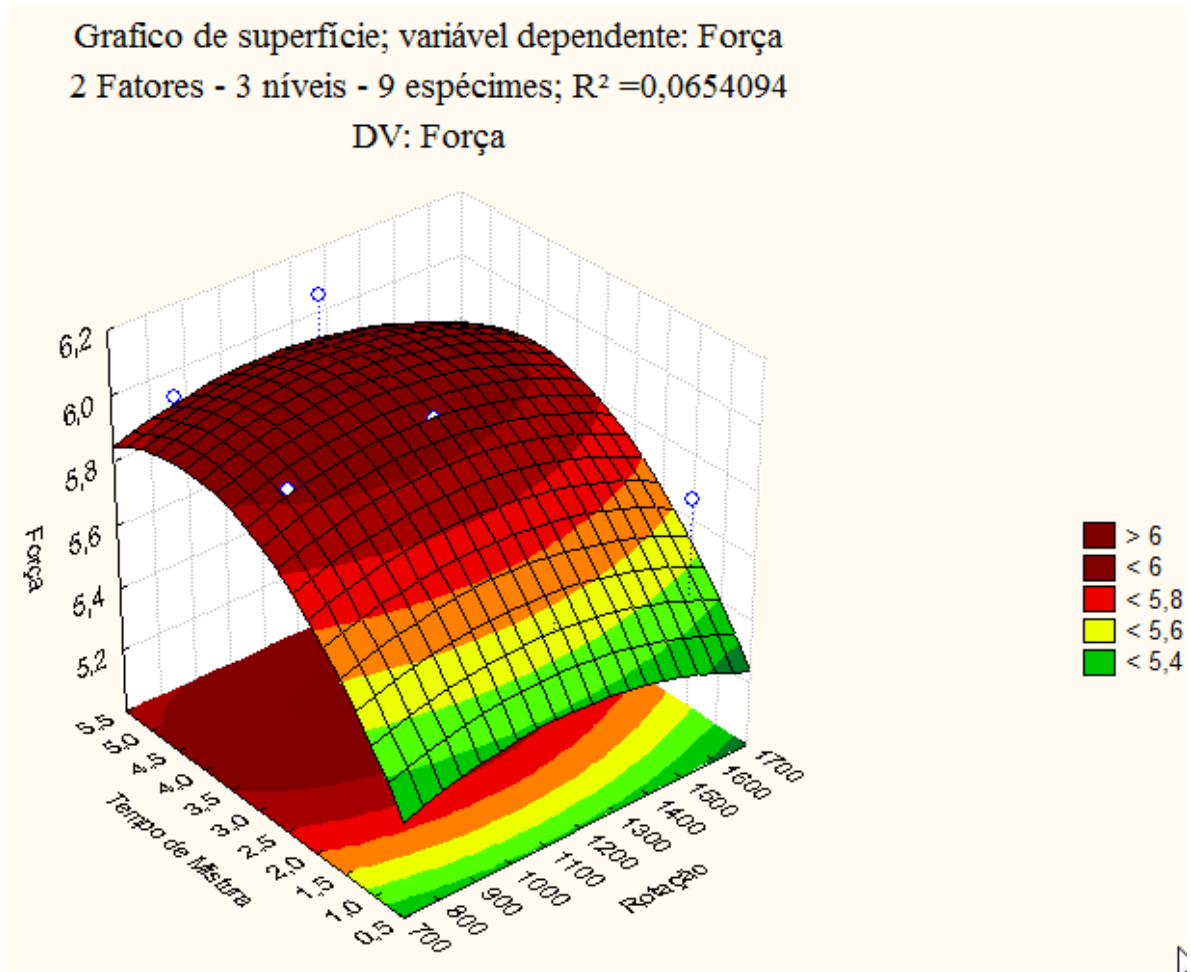


Figura 56 - Gráfico de superfície – Projeto de Experimentos sem desgaste da ferramenta.

O gráfico de superfície para o bloco com desgaste da ferramenta rotativa, demonstrado na figura 58, no eixo das abcissas (eixo x) encontram-se as rotações e no eixo das ordenadas (eixo y) o tempo de mistura e eixo z encontram-se as forças obtidas em ensaio de tração. Neste caso a faixa onde são encontrados os maiores valores de força no ensaio de tração são de rotação acima de 1200 a 1600 rpm com tempo de mistura acima de 5 s. Observa-se também uma baixa aderência porem com amplitudes menores desenvolvendo assim um R^2 melhor se comparado ao bloco sem desgaste.

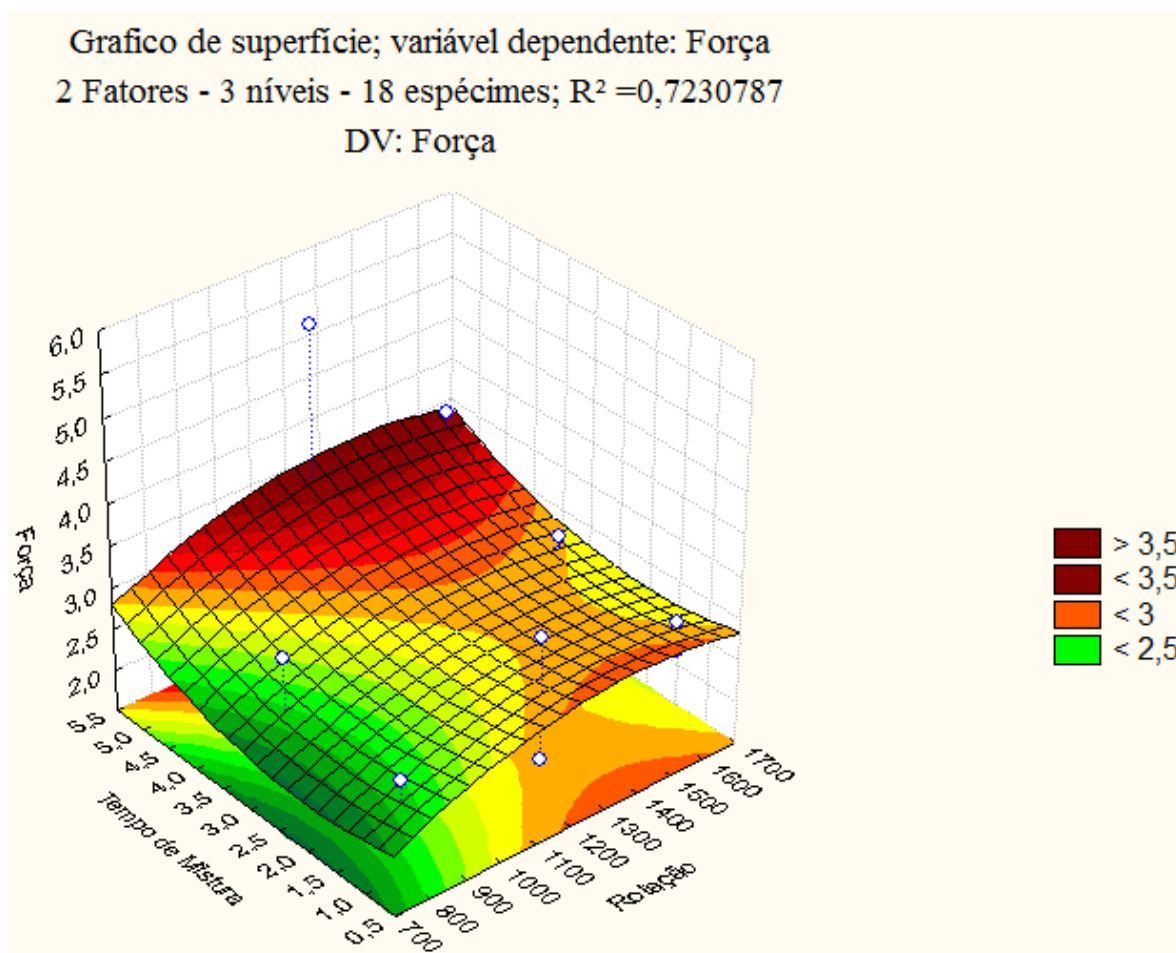


Figura 57 - Gráfico de superfície – Projeto de Experimentos com desgaste da ferramenta.

O bloco sem desgaste mostra maior influencia do tempo de mistura nos valores resistência obtida, indicando que geometria da ferramenta, tem grande importância na mistura do material e consequentemente no aporte térmico fornecido.

6.2 Forças normal, torque e energia aplicados na junta.

Durante a execução das juntas foi possível fazer aquisições de dados com um dinamômetro de mesa com uma frequência de aquisição de 400 Hz, determinando-se os valores de força normal, torque e energia fornecida. O tratamento destes dados permitiu a obtenção de curvas mostrando os parâmetros associados como força normal, torque, posição vertical da ferramenta e tempo do processo de soldagem.

Para a melhor compreensão do comportamento dos gráficos de força normal por tempo, torque por tempo e energia fornecida é necessário descrever as principais fases de penetração da ferramenta.

Sendo a velocidade de penetração da ferramenta constante 0,1 mm/s, podemos fazer uma analogia direta do tempo do processo com profundidade de penetração da ferramenta no metal base. O processo se inicia quando a ferramenta entra em contato com chapa superior, ocorrendo um aumento de força normal e torque entre 0 a 4 s, este aumento de força ocorre devido à resistência do material que se encontra em fase totalmente solida. O processo de plastificação do material é identificado na faixa de 4 a 10 s onde força normal e torque permanecem praticamente constantes até o instante que a ponta da ferramenta encontra uma maior resistência no contato com a chapa inferior no instante de 10 s. Após essa fase por se tratar de um pino cônico a força normal e torque passam a aumentar gradativamente até 15,7 s, onde ombro da ferramenta entra em contato com a chapa superior e devido à geometria convexa do ombro o torque máximo é encontrado antes da força máxima que é alcançado com o assentamento total do ombro da ferramenta até o instante de 18 s iniciando-se o processo de mistura. Neste momento o material é totalmente plastificado nas adjacências do ombro e força normal e torque caem gradativamente, devido à energia fornecida (aporte térmico) até que a ferramenta seja retraída totalmente. A energia fornecida é calculada através da equação 9, esta equação composta de uma parcela da força pelo deslocamento e outra parcela do torque pela velocidade angular, sendo que parcela de torque possui 99,98% do montante da energia gerada durante o processo, fazendo com que o gráfico de energia por tempo tenha um comportamento praticamente idêntico ao gráfico torque por tempo.

O gráfico 59, é um gráfico qualitativo onde é analisada a força obtida em ensaio de tração com a energia aplicada no processo de soldagem. Pode-se observar que os espécimes executados com a ferramenta rotativa sem desgaste demandou menor energia gerando as maiores resistências em ensaio de tração e após o desgaste a energia fornecida é reduzida em 28%, e as forças obtidas em ensaio de tração teve queda de 65%, como por exemplo, no processo com rotação de 1200 rpm e tempo de mistura de 5 s.

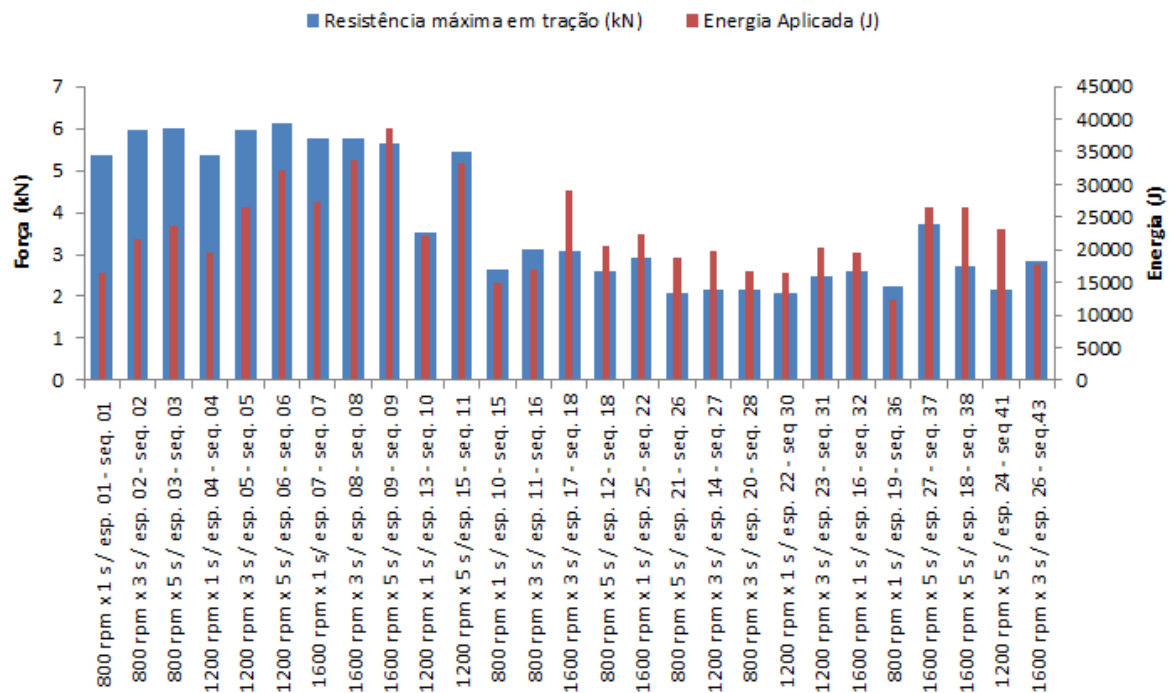


Figura 58 - Gráfico qualitativo da energia fornecida e força máxima obtida em ensaio de tração.

A figura 60 é um gráfico da energia onde os valores estão apresentados em ordem de sequência de execução e divididos em três blocos, considerando todas as condições de processo com três espécimes cada, onde a cor preta é o primeiro bloco, laranja é o bloco intermediário e verde é o ultimo bloco executado. Percebe-se que valores são crescentes com o tempo de mistura, isso demonstra que boa parte da energia fornecida ocorre com a aplicação do tempo de mistura. Este gráfico mais uma vez mostra que a energia tem queda significativa em função do desgaste da ferramenta, sendo possível desta forma entender a importância da geometria e detalhes da superfície do ombro na eficiência da mistura do material.

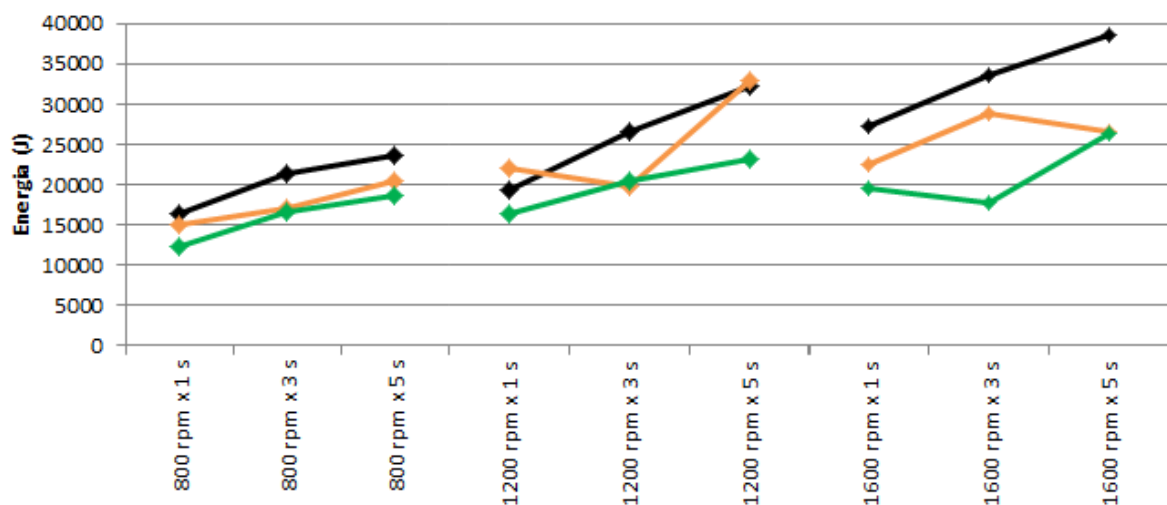


Figura 59 - Gráfico energia aplicada em cada configuração do processo

A figura 61 é uma foto da projeção da ferramenta rotativa em um projetor de perfis, do lado esquerdo com desgaste e no lado direito sem desgaste. O desgaste no eixo axial sofreu uma degradação uniforme, pois a distancia entre a ponta da ferramenta até o ombro permaneceu praticamente constante tendo uma diferença entre de 0,002 mm se comparada à ferramenta sem desgaste. A figura 62 é uma foto de topo e outra em perspectiva da ferramenta rotativa sem e com desgaste direito e esquerdo respectivamente.



Figura 60 - Foto do projetor de perfil aplicação 100x.

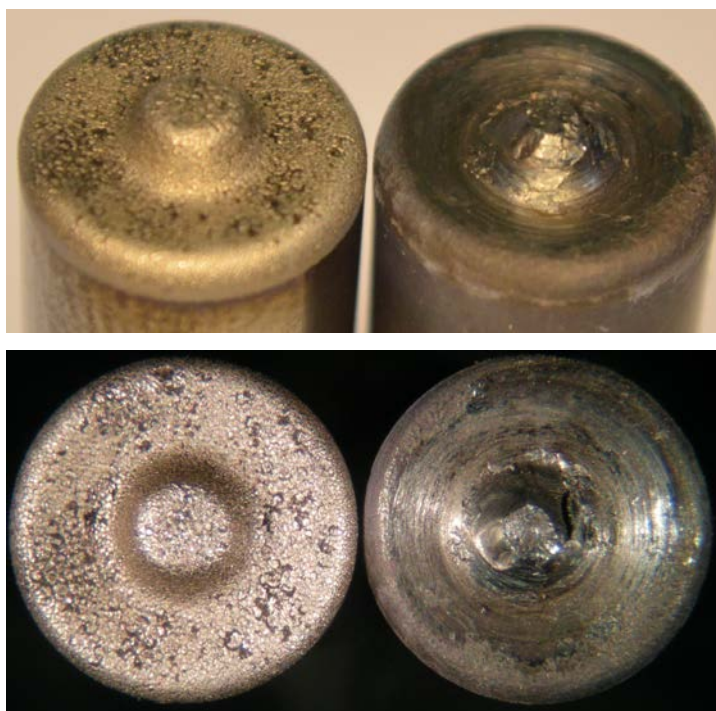


Figura 61 - Fotos da ferramenta rotativa sem e com desgaste.

As ferramentas rotativas sem e com desgaste foram digitalizadas com o equipamento ATOS III de marca GOM e sobrepostas (figura 63), referenciadas pela extremidade do pino. Esperando-se identificar se o desgaste foi uniforme ou se ocorreram áreas de maior desgaste. Utilizando o software 3D ATOS Professional V7.5 de controle dimensional, pode-se identificar as diferenças dimensionais na superfície entre a ferramenta sem e com desgaste que são representadas através de uma escala dimensional e de cores onde os valores mostraram uma variação entre -0,5 a 0,5 mm. Observa-se que as áreas de maior desgaste estão localizadas no pino.

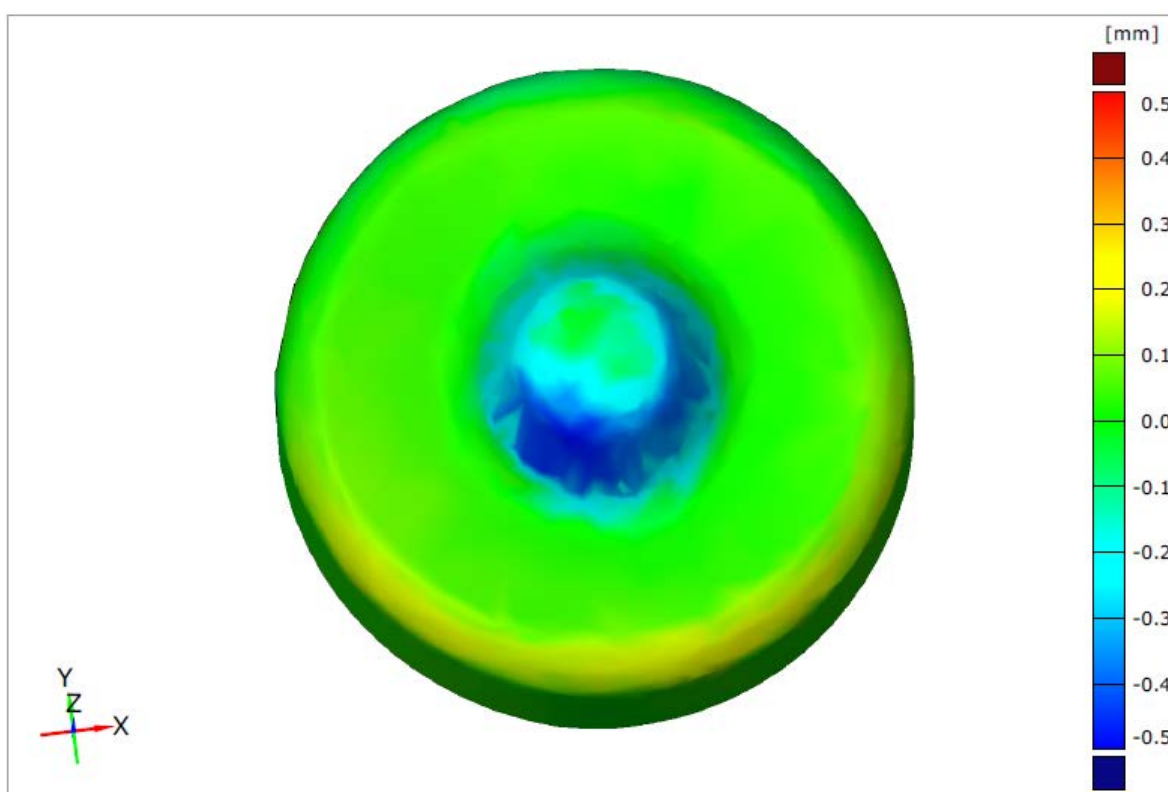


Figura 62 - Imagem sobreposta da ferramenta rotativa sem e com desgaste.

Utilizando-se do mesmo software 3D, foi gerada uma secção transversal da sobreposição entre as ferramentas sem e com desgaste (figura 64). Pode-se observar nesta que o desgaste foi bastante severo na lateral do corpo do pino.

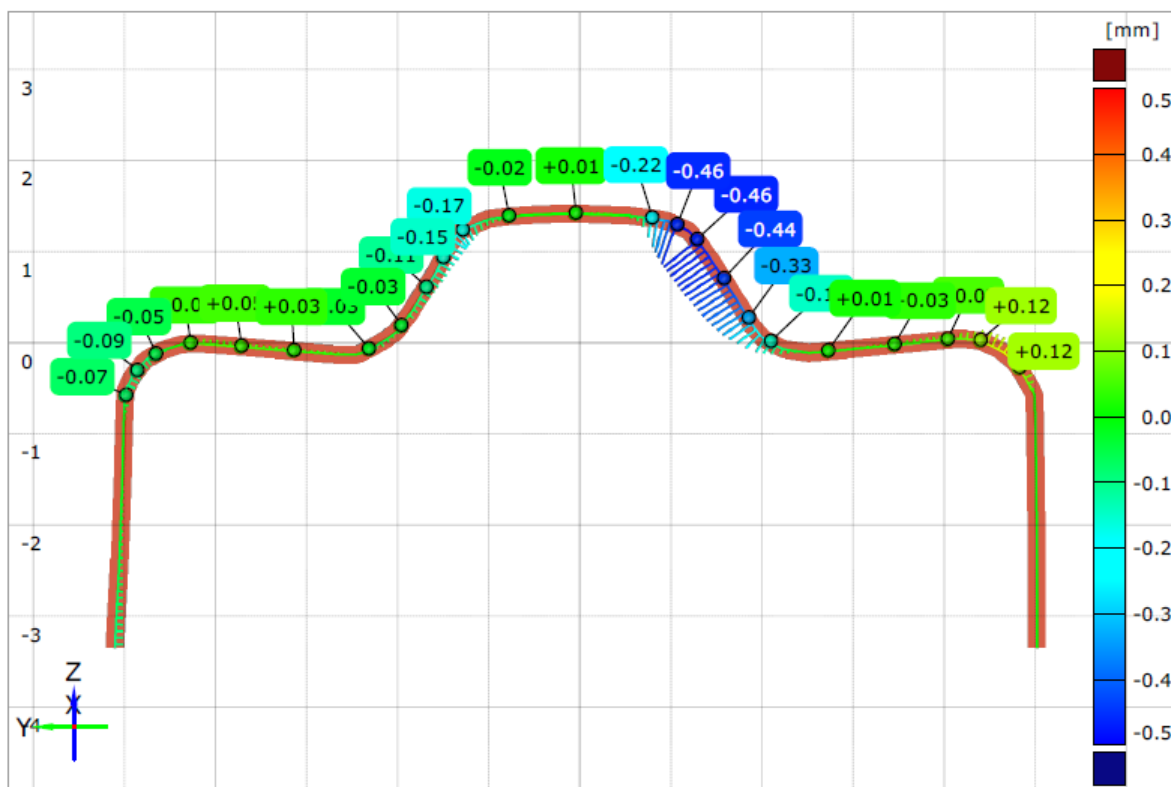


Figura 63 - Secção transversal sobreposta da ferramenta rotativa sem e com desgaste.

Todas as análises indicam que ocorreu um desgaste por lascamento na lateral do pino, pois ocorreu a remoção de grandes partículas de uma só vez, formando depressões irregulares, porém o desgaste no eixo axial que mostrou um desgaste contínuo.

Para melhor compreensão da evolução do desgaste da ferramenta e sua influência na qualidade da junta, tomou-se como exemplo o processo com rotação de 1200 rpm e tempo de mistura de 5 s, por apresentar os maiores valores médios de força nos blocos com e sem desgaste da ferramenta, portanto será analisado três espécimes em condições idênticas de parâmetros de processo.

O gráfico da figura 65 foi gerado através da aquisição de dados do espécime 06 na sequência de execução 06, o torque máximo de 49,1 Nm foi encontrado no instante 17,735 s, e a força normal máxima de 6975,8 N no instante de 7,83 s. O gráfico da figura 66 do espécime 15 na sequência de execução 11, o torque máximo de 42,6 Nm foi encontrado no instante 18,015 s e a força normal máxima de 6245,1 N no instante 18,205 s. O gráfico da figura 67 foi do espécime 24 na sequência 41, o torque máximo foi 30 Nm foi encontrado no instante 17,18 s e a força normal máxima de 3257,4 N no instante de 18,01 s.

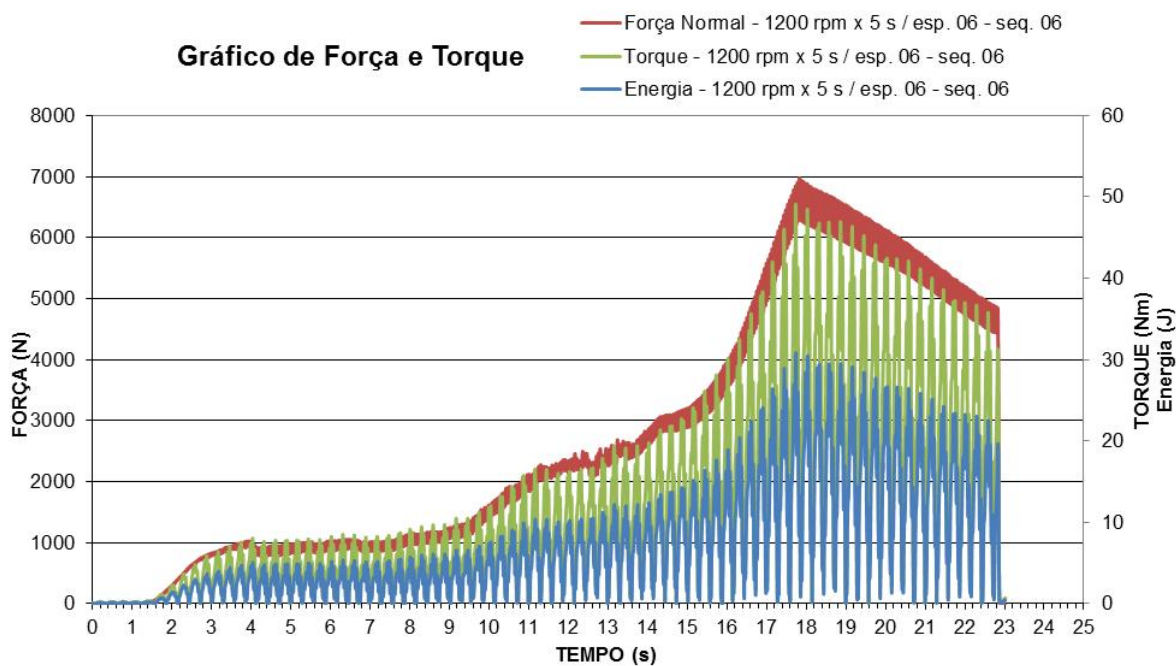


Figura 64 – Aquisição dados do processo - força normal/torque/energia - 1200 rpm x 5 s de tempo de espera esp. 06 - seq. 06

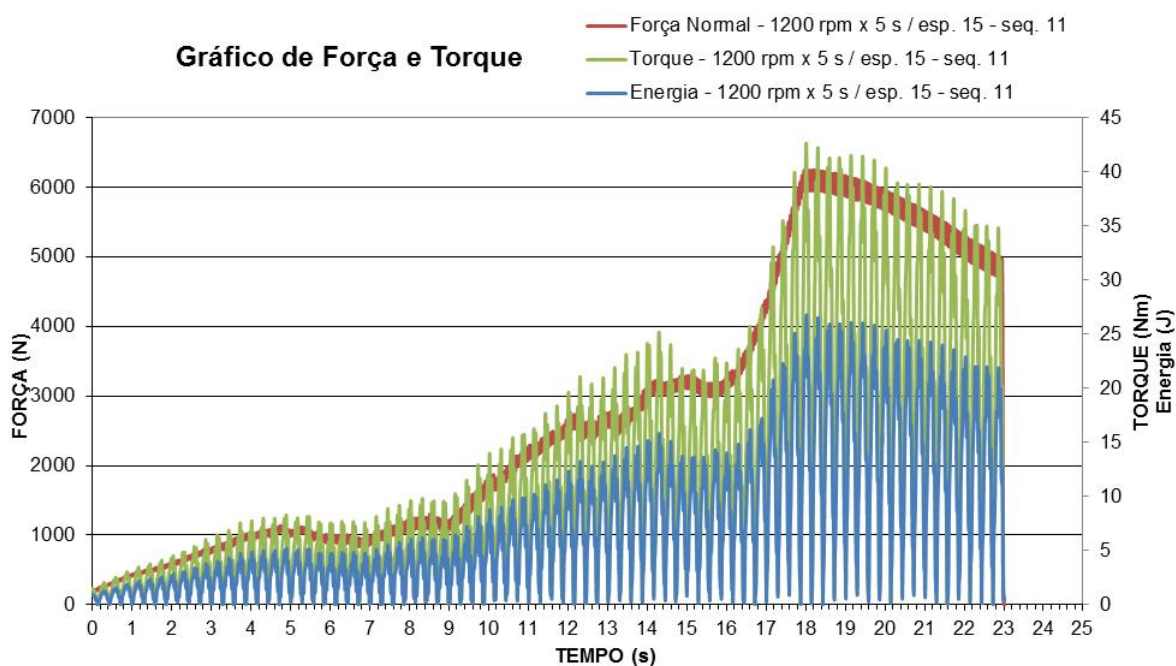


Figura 65 – Aquisição dados do processo - força normal/torque/energia - 1200 rpm x 5 s de tempo de espera esp. 15 - seq. 11

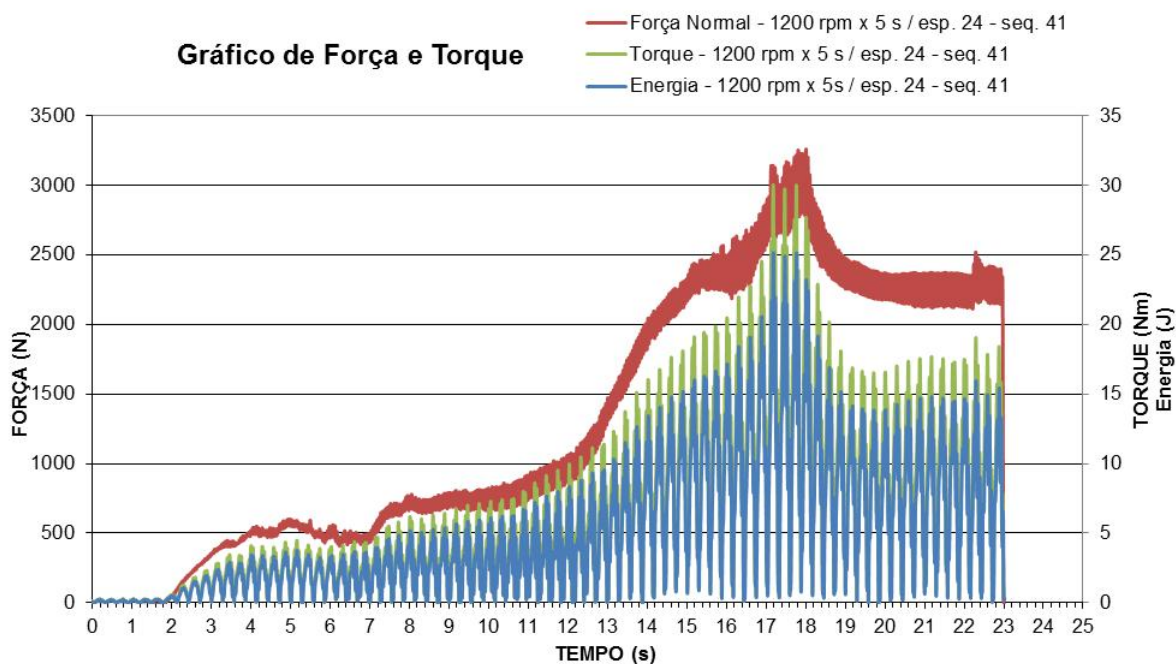


Figura 66 - Aquisição dados do processo - força normal/torque/energia - 1200 rpm x 5 s de tempo de espera esp. 24 - seq. 41

A partir do gráfico da figura 65, pode-se definir com certa clareza toda a fase da penetração da ferramenta e aplicação do tempo de mistura, pois os sinais estão com menos “ruído” devido à simetria da forma da ferramenta. Não fica claro o efeito do desgaste da ferramenta no gráfico da figura 66, pois a ferramenta ainda não apresentava grande desgaste, mas já ocorrem quedas na resistência a tração, força normal e torque do processo. Em contra partida no gráfico da figura 67 fica claro que a geometria da ferramenta não opera de forma adequada perdendo a eficiência na mistura do material e quando o tempo de mistura é aplicado existe uma queda repentina no valor de força, toque e energia, pois a protrusão teve a geometria descaracterizada reduzindo a mistura do material e do aporte termino.

Assumindo que não ocorreu desgaste significativo no sexto espécime dos processos em discussão, o mesmo será base para analisar quais são os efeitos do desgaste do ferramental em relação à resistência em ensaio de tração, força normal, torque e energia fornecida a junta durante o processo. Os espécimes 15 e 24 tiveram uma queda na força máxima em ensaio de tração de 11,5% e 64,6%, as forças normais máximas tiveram queda 10,5% e 53,3%, os toques máximos tiveram uma queda 13,2% e 63,6%, em contra partida a energia fornecida aumentou em 2,6% no espécime 15 e teve uma queda de 28,2% no espécime 24. Isso demonstra novamente a importância da geometria da ferramenta (figura 68)

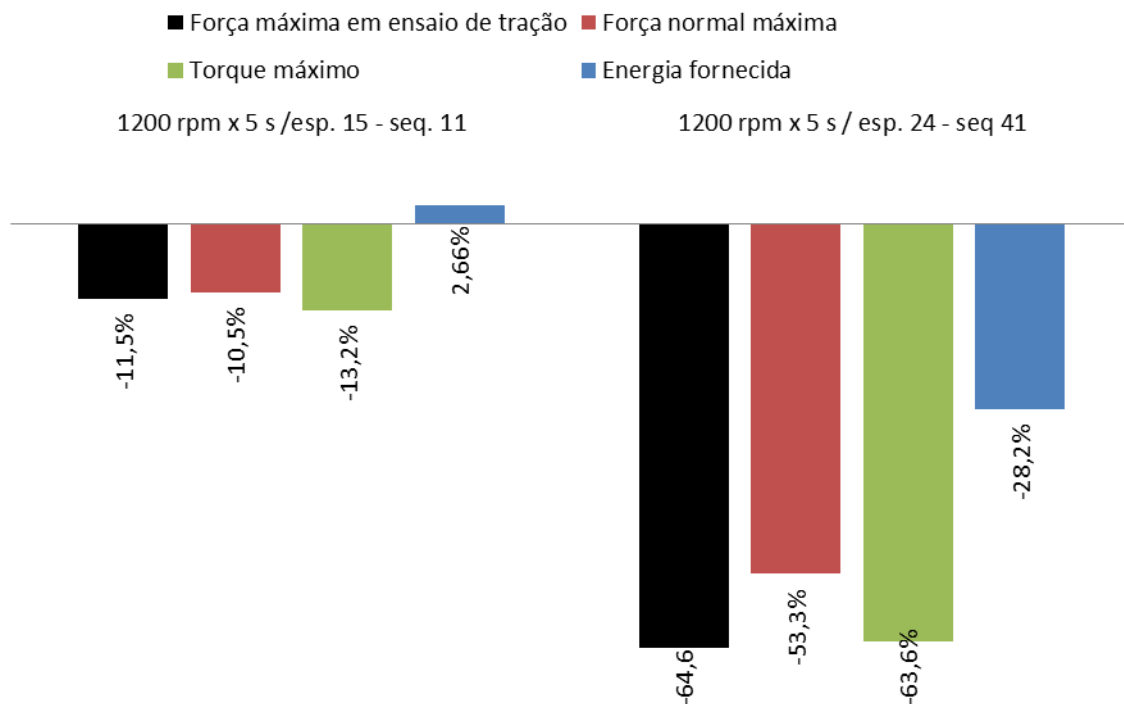


Figura 67 - Gráfico percentual do comportamento da força máxima em ensaio de tração, força normal máxima, torque máximo e energia fornecida em função do desgaste da ferramenta.

Os resultados demonstraram que a SPFMM é viável na união de um aço ABNT 1006, porém devido ao desgaste severo ocorrido na ferramenta rotativa, não foi possível identificar com clareza as influencias das variáveis independentes do processo, rotação e tempo de mistura.

6.3 Macro e microestrutura

A Figura 69 é a macroestrutura de uma junta obtida com parâmetros de processo de 800 rpm e tempo de espera de 1 s. Foi possível identificar que a zona de ligação esta dividida em três zonas como definida por (MAZZAFERRO, 2008, p. 15).

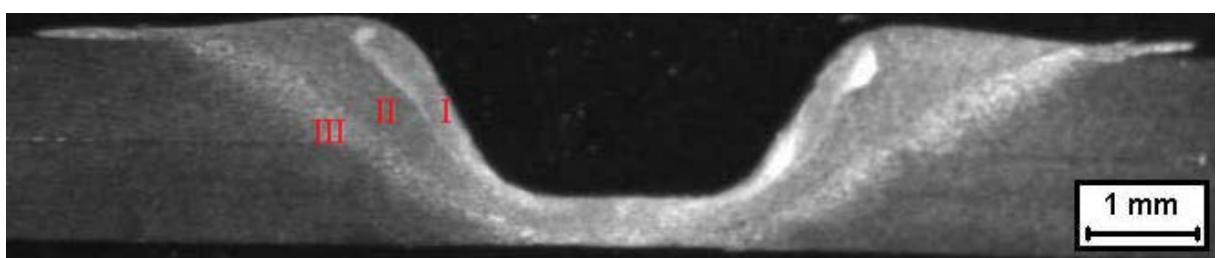


Figura 68 - Macroestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, mostrando as diferentes zonas formadas, ataque com Nital 2%

A microestrutura da figura 70 teve uma linha amarela horizontal adicionada, indicando a região onde a imagem da figura 71 foi extraída.

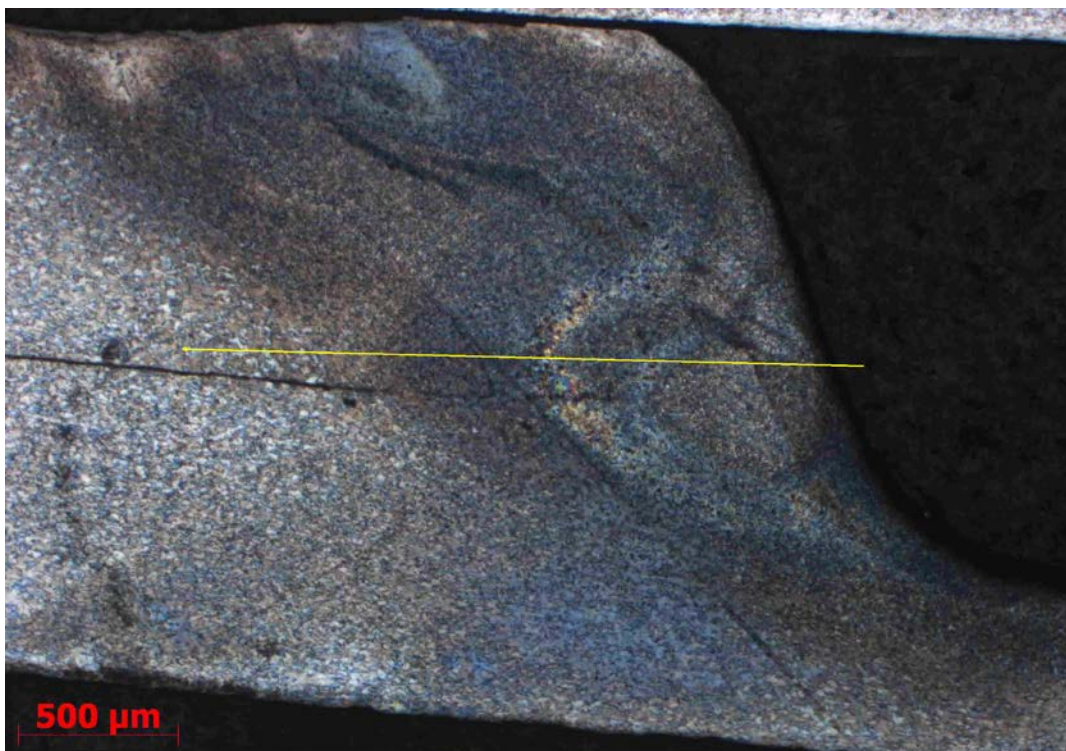


Figura 69 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, ataque com Nital 2%

Na microestrutura da figura 71 é possível identificar que a zona de ligação esta bem definida baseando-se no tamanho dos grãos com dimensões de 3,16, 5,51 e 8,48 μm para zona de mistura (ZM), zona termomecanicamente afetada (ZTMA), zona termicamente afetada (ZTA) respectivamente.



Figura 70 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, mostrando as diferentes zonas formadas em função da granulação encontrada, ataque com Nital 2%

A figura 72, é a possível observar a transição entre a ZTA da zona de ligação (região esquerda) até o metal base, observa-se grãos bem reduzidos à esquerda encontrando grão do metal base medindo 14,34 μm . A linha no centro da imagem semelhante a uma trinca é a zona a região de interface entre a chapa inferior e superior que não ocorreu coalescência.



Figura 71 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, mostrando a transição da zona de ligação com o metal base, ataque com Nital 2%

A figura 73 A e B, são microestruturas das regiões afetadas pelo desgaste da ferramenta rotativa. A figura 73 A, observa-se a inclusão de um fragmento da ferramenta e a formação de uma aresta na região adjacente ao pino da ferramenta. A figura 73 B pode ser visto uma depressão causada por fragmentos da ferramenta durante a execução da junta, também na região adjacente ao pino.



Figura A

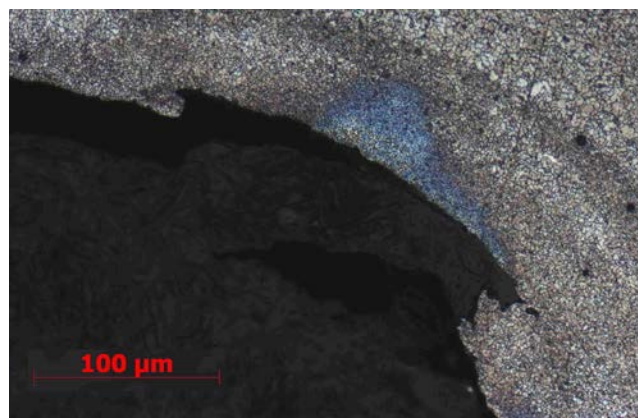


Figura B

Figura 72 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 1 s tempo de mistura, ataque com Nital 2%.

Figura A: fragmento da ferramenta; Figura B: depressão causada por fragmentos da ferramenta.

A figura 74 mostra uma microestrutura apresentando a formação do “hook”, que é o deslocamento da linha de união entre a chapa superior e inferior formando um desenho semelhante ao um “gancho”, que conforme YANG, *et al.*, 2010, 4396, se forma durante a penetração do pino da ferramenta e figura 75 é uma microestrutura que não apresenta a formação do “hook”.

Devido ao severo desgaste da ferramenta não foi possível definir no presente trabalho em quais condições de parametro definem a formação do “hook” assim como identificar a influencia na resistência mecânica da junta quando da existencia do mesmo.

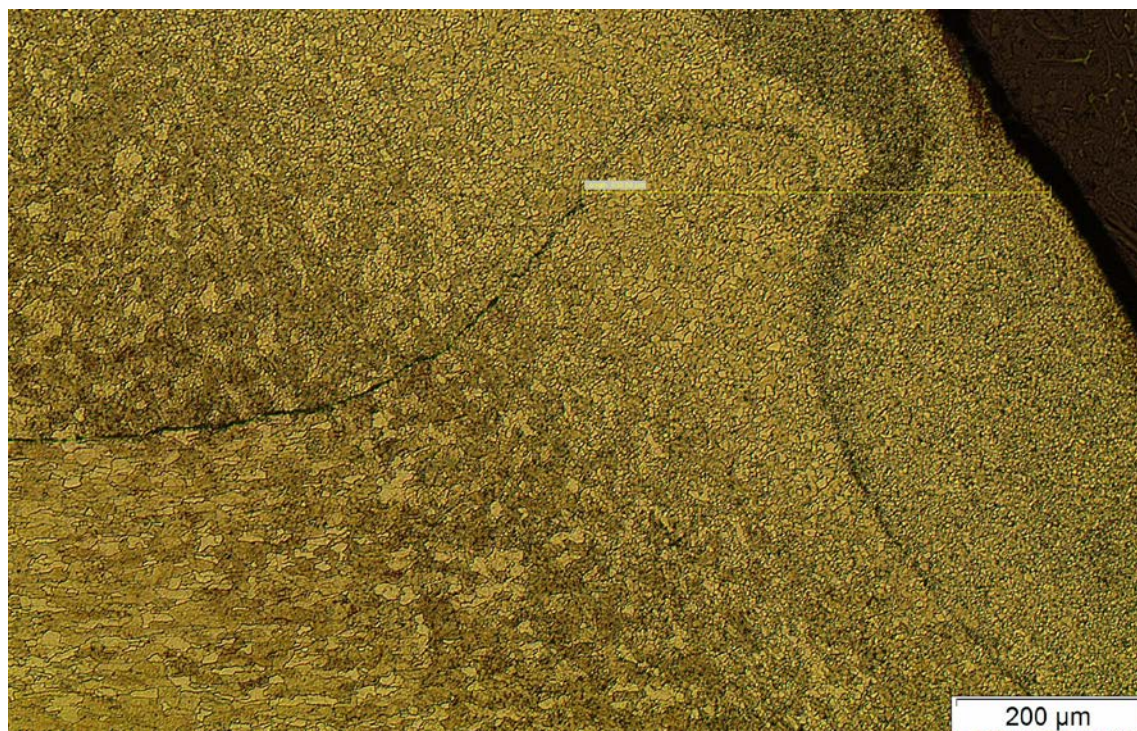


Figura 73 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 1600 rpm e 1 s tempo de mistura, ataque com Nital 2%.

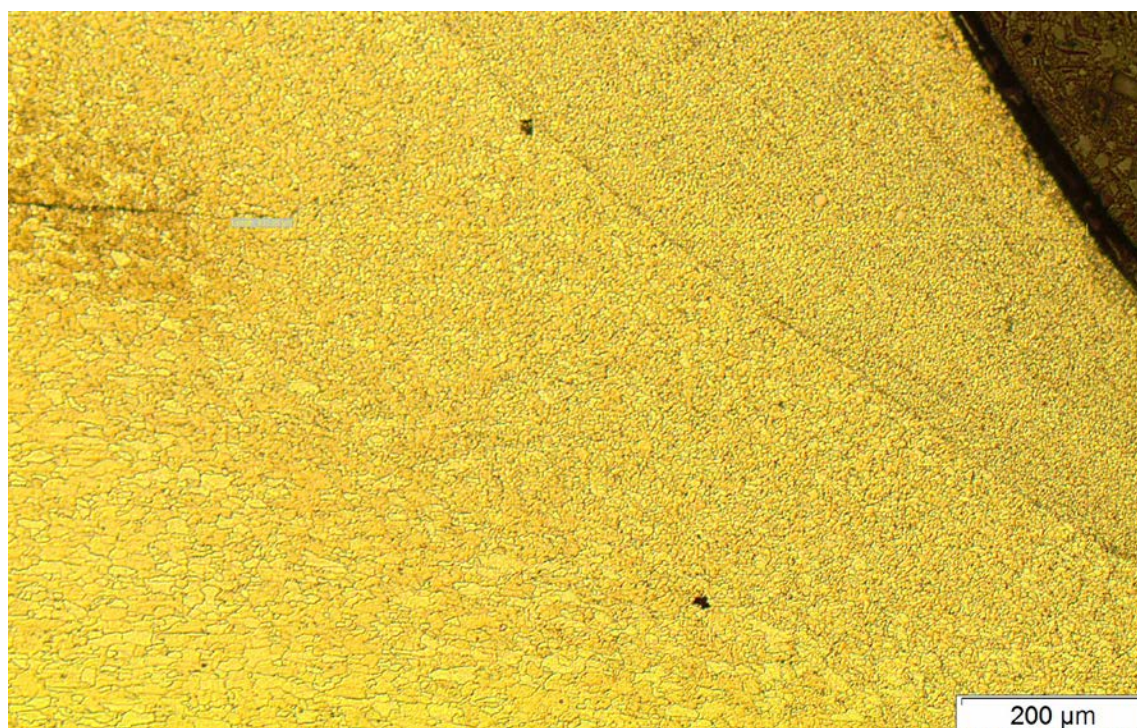


Figura 74 - Microestrutura da junta produzida com parâmetros de 800 rpm e 3 s tempo de mistura, ataque com Nital 2%.

7 CONCLUSÕES

O processo de SPFMM se mostrou viável na obtenção de juntas em aço ABNT 1006 utilizando uma ferramenta de aço rápido.

Em função do desgaste excessivo da ferramenta rotativa, identificado pela queda da resistência em ensaio de tração, o planejamento experimental 2 k com ponto central, foi dividido em dois blocos, intitulados com bloco sem e com desgaste da ferramenta rotativa. O primeiro bloco sem desgaste foi desenvolvido com nove espécimes, e o segundo bloco com desgaste com dezoito espécimes, onde 88% de todos os espécimes testados apresentaram valores acima da resistência mínima esperada para uma SPRE para um aço baixo carbono com tensão limite de resistência de 324 MPa e espessura de 1 mm que deve ser de 2,17 kN, segundo AWS D8.1M: 2007. Os maiores valores médios de força encontrados foram para rotação de 1200 rpm e tempo de espera de 5 s em ambos blocos. O maior valor de força encontrado no bloco sem desgaste foi de 6,14 kN com rotação de 1200 rpm e tempo de mistura de 5 s, força superior ao valor médio de 6,04 kN encontrado em ensaio de tração com três espécimes unidos por SPRE com as mesmas características de junta.

O bloco sem desgaste mostrou que os maiores valores de resistência foram atingidos com o tempo de mistura sendo o parâmetro de maior influência, já o bloco com desgaste foi à rotação. Conclui-se que a geometria da ferramenta tem grande importância na mistura do material e consequentemente no tamanho da zona de ligação o que justifica que os maiores valores de resistência são encontrados no bloco sem desgaste. A rotação mostra maior relevância no bloco com desgaste, pois apesar da ferramenta não desenvolver de forma eficiente a mistura do material, a rotação através do atrito entre a ferramenta e o metal base fornece aporte térmico à junta. Este fato pode ser notado pelo comparativo feito entre os gráficos de superfície, onde para o bloco sem desgaste as maiores forças são atingidas com rotações acima de 700 rpm, já e para o bloco com desgaste as maiores forças são alcançadas com rotações acima de 1200 rpm.

Utilizou-se o processo de controle por deslocamento na execução das juntas, que conforme descrito no capítulo 4.1.6, que não garante a que a ferramenta penetre a profundidade esperada, pois o equipamento utilizado pode não apresentar a rigidez necessária. Porém a utilização deste processo, permitiu identificar que a redução da resistência, está relacionado a queda dos valores de força normal e toque atingidos durante a produção da junta. Pode-se concluir portanto que o controle por força, pode ser utilizado no controle da

qualidade da junta em um processo de produção de alta escala ou até mesmo no desgaste prematuro ou quebra da ferramenta rotativa.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A zona de ligação esta intimamente ligada à geometria da ferramenta e ao aporte térmico desenvolvido no processo de SPFMM, portanto um trabalho de análise microestrutural analisando as influencia das variáveis de processo na recristalização, recuperação, fluxo e tamanho de zona de ligação.

Como mostrado no trabalho a SPFMM os valores de resistência em ensaio de tração atingem os valores das SPRE, porém o modo de falha sob carga estática e dinâmica ainda não foram muito explorados para aço.

Como mostrado neste trabalho o aporte térmico esta ligado diretamente à geometria da ferramenta que é conhecida e a temperatura alcançada no processo, porém não foi possível medir durante este trabalho. Técnica de aquisição de temperaturas ajudaria no entendimento das transformações de fase ocorridas dentro do material

Desenvolver estudos com diferentes perfis da ferramenta rotativa e variáveis de processo afim de reduzir o tempo de processo, vislumbrando a viabilidade de implementar o processo em alta escala, como por exemplo a industria automobilística.

REFERÊNCIAS

AMANCIO, S. T. F. et al. ON THE FEASIBILITY OF FRICTION SPOT JOINING IN AGNESIUM/FIBER-REINFORCED POLYMERCOMPOSITE HYBRID STRUCTURES. **Materials Science and Engineering A**, Max-Planck-Str. 1, D-21502 Geesthacht, Germany; Rodovia Washington Luiz km 235, 13565-905 Sao Carlos, SP, Brazil, 21 Janeiro 2011. 3841-3848.

ARUL, S. G. et al. MICROSTRUCTURES AND FAILURE MECHANISMS OF SPOT FRICTION WELDS IN LAP-SHEAR SPECIMENS OF ALUMINUM 5754 SHEETS. **2005 SAE World Congress**, Detroit, Michigan, 11-14 APRIL 2005. 8.

AWS/SAE JOINT COMMITTEE ON AUTOMOTIVE WELDING. ANSI/AWS/SAE/D8.9-97, Miami, FL 33126, I, 1997.

BADARINARAYAN, H.; HUNT, F.; OKAMOTO, K. Friction Stir Spot Welding. In: MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. **Friction Stir Welding and Processing**. Materials Park, Ohio 44073-0002: ASM International®, v. I, 2007. p. 137-242.

BRANDI, S. D. Soldagem por resistência. In: WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, D. H. D. F. **SOLDAGEM - processos e metalurgia**. São Paulo: [s.n.], 1992. p. 217-226.

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**, University of South Carolina, Columbia., 125, Abril 2003. 126-129.

COOK, G. E. et al. CONTROLLING ROBOTIC FRICTION STIR WELDING. **WELDING JOURNAL**, v. 82, n. 6, p. 28-29, Junho 2003.

CUI, L. et al. FRICTION STIR WELDING OF A HIGH CARBON STEEL. **Acta Materialia**, Mihogaoka, Ibaraki, Osak; Suita, Osaka, 7 Dezembro 2006. 637-640.

ESAB AB - WELDING AUTOMATION. Esab - Welding & Cutting. **ESAB**, 2013. Disponível em: <<http://www.esab.de/de/de/support/upload/FSW-Technical-Handbook.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2013.

FENG, Z. et al. FRICTION STIR SPOT WELDING OF ADVANCED HIGH-STRENGTH STEELS – A FEASIBILITY STUDY. **SAE International**, Metals and Ceramic Division, Oak Ridge National Laboratory; MegaStir Technologies; Ford Research and Advanced Engineering, Ford Motor Company; Ispat Inland Inc, 2005. 1.

FULLER, C. B.; COMPANY, R. S. Friction Stir Tooling: Tool Material and Designs. In: RAJIV, M. S.; MAHONEY, M. W. **Friction Stir Welding and Processing**. [S.l.]: ASM, 2007. p. 13-26.

GERLICH, A. P.; NORTH, T. H. Friction Stir Spot Welding. In: SCHARTZ, M. **Innovations in Materials Manufacturing, Fabrication, and Environmental Safety**. 1a. ed. Boca Raton, FL 33487-2742: Taylor and Francis Group, LLC, v. I, 2011. Cap. 8, p. 194-196.

GHASSEMIEH, E. Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects. In: CHIABERGER, M. **New Trends and Developments in Automotive Industry**. Turin, Italy: InTech, v. I, 2011. p. 368.

GORNI, A. A. Engenharia microestrutural das chapas de aços avançados de alta resistência. **11A. CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, CENTRO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO EM CONFORMAÇÃO MECÂNICA, PORTO ALEGRE, 8 A 10 DE OUTUBRO DE 2008.**, Porto Alegre, 8 a 10 Outubro 2008. 1-2.

HIRANO, S. et al. **Method of Friction Stir-Spot Welding and Welding Apparatus**. 7,635,075 B2, 22 dez. 2009.

HOVANSKI, Y.; SANTELLA, M. L.; GRANT, G. J. FRICTION STIR SPOT WELDING OF HOT-STAMPED BORON STEEL. **Scripta Materialia**, Oak Ridge, v. 57, p. 873, 20 Junho 2007. ISSN 873–876.

INTERNATIONAL IRON & STEEL INSTITUTE. ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL (AHSS). **INTERNATIONAL IRON & STEEL INSTITUTE**, n. Version 3, Setembro 2006. 1-3.

LATHABAI, S. et al. Friction Stir Spot Welding of Automotive Lightweight Alloys. In: DAVID, A. S. **Trends In Welding Research: Proceedings of the 7Th International Conference**. Pine Mountain, Georgia, USA: ASM International, v. I, 2005. p. 207.

LIN, P. -C.; PAN, J.; PAN, T. FAILURE MODES AND FATIGUE LIFE ESTIMATIONS OF SPOT FRICTION WELDS IN LAP-SHEAR SPECIMENS OF ALUMINUM 6111-T4 SHEETS. PART 1: WELDS MADE BY A CONCAVE TOOL. **International Journal of Fatigue**, Chia-Yi 621, Taiwan; Ann Arbor, MI 48109, USA; Dearborn, MI 48121, USA, 25 Fevereiro 2007. 74-89.

LIN, P. -C.; PAN, J.; PAN, T. FAILURE MODES AND FATIGUE LIFE ESTIMATIONS OF SPOT FRICTIONWELDS IN LAP-SHEAR SPECIMENS OF ALUMINUM 6111-T4 SHEETS. PART 2: WELDS MADE BY A FLAT TOOL. **International Journal of Fadigue**, Chia-Yi 621, Taiwan; Ann Arbor, MI 48109, USA; Dearborn, MI 48121, USA, 90–105, 25 Fevereiro 2007.

MAZDA MOTOR CORPORATION. Mazda New Release. **Mazda**, 27 Fevereiro 2003. Disponivel em: <<http://www.mazda.com/publicity/release/2003/200302/0227e.html>>. Acesso em: 20 Março 2013.

MAZZAFERRO, C. C. P. Soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica de Aço Trip 800 - Processo, Microestrutura e propriedades. Monografia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgia e de Materiais PPGEM) Porto Alegre: [s.n.], 2008. p. 14-15. ISBN xxxx.

MORELLO, L. et al. Body Work. In: MORELLO, L., et al. **TheAutomotive Body**. [S.l.]: Springer Science + Business Media B.V. 2011, v. Volume I: Components Design, 2011. p. 91-139.

NAGAO, Y. K.-S. **FRICTIONAL STIR WELDING APPARATUS AND ROBOT WITH SUCH AN APPARATUS**. EP 1 437 193 B1, 24 Abril 2003.

PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BÖLMSJO, G. Welding Technology. In: PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BÖLMSJO, G. **Welding Robots - Technology, System Issues and Application**. Coimbra, PT: Springer, v. XVIII, 2006. Cap. 2, p. 54-67.

REYNOLD, A. P.; HOOD, E.; TANG, W. TEXTURE IN FRICTION STIR WELDS OF TIMETAL 21S. **Scripta Materialia**, Columbia, South Carolina, n. 52, 9 Novembro 2004. ISSN 52 (2005) 491–494.

ROSSI, G. C. Projeto do dinâmetro. In: _____ **Estudo das Forças de Corte no Processo de Fresamento de bordas de Chapas para Fabricação de Tubos de Aço com**. 2008. f. 57-79. Dissertação (Obtenção do Título de mestre em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008: [s.n.], 2008.

SAGLAM, H.; URUVAR, A. THREE-COMPONENT, STRAIN GAGE BASED MILLING. **Journal of Integrated Design and Process Science**, Konya / Turkey, v. V, n. 2, p. 95-109, Junho 2001.

SCHWARTZ, M. Adhesive Bonding. In: SCHWARTZ, M. **Innovations in Materials Manufacturing, Fabrication, and Environmental Safety**. Boca Raton, FL33487-2742, USA Boca Raton: Taylor & Francis Group, v. I, 2011. Cap. 2, p. 13-14.

SU, P. et al. ENERGY GENERATION AND STIR ZONE - DIMENSIONS IN FRICTION STIR SPOT WELDS. **2006 SAE World Congress**, Detroit, Michigan, I, Abril 2006.

THOMAS, W. M. et al. **Friction stir butt welding. International Patent Application No. 5,460,317**, 24 Outubro 1995.

THOMAS, W. M.; JOHNSON, K. L.; WIESNER, C. S. FRICTION STIR WELDING - RECENT DEVELOPMENT IN TOOL AND PROCESS TECHNOLOGIES. **Advanced Engineering Materials**, v. 5, n. 7, p. 485-490, 2003. ISSN 10.1002/adem.200300355.

THOMAS, W. M.; THREADGILL, P. L.; NICHOLAS, E. D. FEASIBILITY OF FRICTION STIR WELDING STEEL. **Science and Technology of Welding and Joining**, Cambridge, 4, 5 Fevereiro 1999. 1362–1718.

THOMAS, W.; VILAÇA, P. Friction Stir Welding Technology. In: MOREIRA, P. M. G. P.; DA SILVA, L. F. M.; DE CASTRO, P. M. S. T. **Structural Connections for Lightweight Metallic Structures**. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, v. 1, 2011. p. 1-19.

WAYNE, T. et al. Re-stirTM - reversal stir welding. **TWI - Manufacturing, engineering, materials and joining specialists**, March/April 2003. Disponível em: <<http://www.twi.co.uk/news-events/connect/archive/2003/march-april-2003/re-stirtm-reversal-stir-welding/>>. Acesso em: 22 jun. 2013.

YANG, Q. et al. MATERIAL FLOW DURING FRICTION STIR SPOT WELDING. **Materials Science and Engineering A**, Automotive Products Research Laboratory, Hitachi America, Ltd., Farmington Hills, MI 48335, USA, p. 4390, Março 2010. ISSN 527 (2010) 4389–4398.