

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

EFEITO DOS MATERIAIS DO *BACKING BAR* NA GEOMETRIA E DUREZA
DE JUNTAS SOLDADAS POR FSW EM LIGAS DE ALUMÍNIO 6013 E 2024

Marcio José Cuccolo Rosales

São Carlos

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

EFEITO DOS MATERIAIS DO *BACKING BAR* NA GEOMETRIA E DUREZA
DE JUNTAS SOLDADAS POR FSW EM LIGAS DE ALUMÍNIO 6013 E 2024

Marcio José Cuccolo Rosales

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE
EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Nelson Guedes de Alcântara
Agência Financiadora: FAPESP

São Carlos
2009

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar

R788em

Rosales, Marcio José Cuccolo.

Efeito dos materiais do *backing bar* na geometria e dureza de juntas soldadas por FSW em ligas de alumínio 6013 e 2024 / Marcio José Cuccolo Rosales. – São Carlos : UFSCar, 2009.
52 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Soldagem. 2. Ligas de alumínio. 3. Soldagem de estado sólido. 4. FSW - (Friction Stir Welding). I. Título.

CDD: 671.52 (20^a)

Para meu pai.

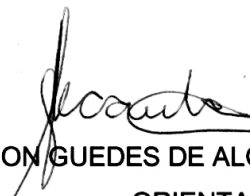
VITAE DO CANDIDATO

Engenheiro de Materiais pela UFSCar (2007), com ênfase em materiais metálicos.

BANCA EXAMINADORA

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DE
MARCIO JOSÉ CUCCOLO ROSALES
APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO
CARLOS, EM DOZE DE AGOSTO DE DOIS MIL E NOVE

BANCA EXAMINADORA:



NELSON GUEDES DE ALCÂNTARA
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS



CLAUDEMIRO BOLFARINI

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS



CELSO ROBERTO RIBEIRO
SYNTHESES

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de Mestrado é resultado de dois anos de pesquisa, com início durante o curso de graduação em Engenharia de Materiais da UFSCar (Universidade Federal de São Carlos). Por esse motivo, agradeço a todos que participaram efetivamente da minha formação como engenheiro, em especial aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade.

Quero agradecer a meu orientador, Prof. Dr. Nelson Guedes de Alcântara, professor e educador, pelo apoio. Agradeço também ao instituto de pesquisa GKSS, da Alemanha, em nome do Dr. Jorge Fernandez dos Santos, pelo suporte técnico e financeiro.

Por fim, agradeço a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo incentivo e fomento oferecidos. Agradeço também aos colegas de trabalho e amigos por terem me apoiado de forma integral e também por abrirem suas portas com tanta confiança e convicção no valor desta pesquisa.

RESUMO

O processo de soldagem FSW promove a formação de juntas de alta qualidade. As soldas produzidas no estado sólido geram menor aporte térmico e, como consequência, reduzem alterações microestruturais e degradações das propriedades mecânicas associadas aos ciclos térmicos durante a soldagem. Entre os principais parâmetros de processo, as velocidades de rotação e avanço da ferramenta e a força axial são fundamentais para o controle da transferência de calor para o material. Assim, para o melhor entendimento das variáveis que governam o processo, foi realizado estudo acerca das condições térmicas – de geração, fluxo e extração de calor – e de deformação plástica em chapas das ligas do sistema Al-Mg-Si 6013-T6 e Al-Cu-Mg 2024-T351 soldadas por FSW. Foram utilizados três diferentes materiais que compõem o *backing bar*, de condutividade térmica distinta: aço, cobre e cerâmica. A principal função do *backing* é influenciar a transferência de calor e restringir a perda de material na raiz da junta, contribuindo para alterações microestruturais e a consolidação da solda. Foram discutidas a relação e a influência do *backing* na formação das zonas termomecanicamente deformadas pelo processo FSW, uma vez que o tema é pouco referido na literatura. Foi evidenciado que a extração e a direção do fluxo de calor variam em função da condutividade térmica do material do *backing*. O comportamento mecânico da junta soldada também foi influenciado pela transferência de calor durante o processo. Para a soldagem da liga 2024-T351, a formação da lente de soldagem, sem a presença de defeitos, esta associada a baixas velocidades de rotação da ferramenta. O escoamento viscoplástico durante o processamento termomecânico difere em função da resistência a deformação plástica do material: para ligas com elevada resistência – ligas da série 2xxx – é formada uma interface de escorregamento entre o material e a ferramenta. Enquanto que para ligas que se deformam facilmente – ligas da série 6xxx – a interação material/ferramenta se dá por adesão.

EFFECT OF BACKING BAR MATERIAL ON GEOMETRY AND HARDNESS OF ALUMINIUM ALLOYS 6013 AND 2024 FRICTION STIR WELDED

ABSTRACT

Solid-state joining techniques such as Friction Stir Welding (FSW) are a natural choice to produce weld low heat input, limited slight distortion and low microstructural and mechanical degradation. Great effort has currently been devoted to the joining of Al-Cu-Mg and the Al-Mg-Si alloys because of their high strength, improved formability, and application in airframe structures. FSW is a continuous, hot shear, autogenous process involving a non-consumable and rotating tool plunged between two abutting workpieces. Classical or single sided friction stir welds utilize a steel backing bar, to support the workpieces but also to prevent material loss from the joint. The backing bar plays an important role in heat transfer from the joint or stir zone, which can influence the weld microstructure as well as the consolidation of material in the root of the joint. The influence of backing bar material on stir zone formation has been poorly investigated in the literature. This study aims at investigating issues concerning heat transfer and plastic deformation within the stir zone of friction stir welded aircraft aluminum alloys. This study has provided clear evidence that heat transfer conditions differ in accordance to alloy type (composition), process parameters during FSW and backing bar material. The influence of heat flow on mechanical properties and microstructural characteristics of the friction stir welded joints is primarily in response to the alloys resistance to plastic deformation. Thus this is the main cause why slip or stick occurs during contact of the tool with material in viscoplastic flow. For the FSW of the 2024-T351 alloy a slip condition dominates, while in the case of friction stir welds produced in the 6013-T6 alloy stick occurs in the interface of tool.

PUBLICAÇÕES

- ROSALES, M. J. C.; ALCÂNTARA, N. G.; SANTOS, J. F. Variações do *backing bar* no estudo do processo *Friction Stir Welding* (FSW) em ligas de alumínio. In.: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 63^o, 28 jul. – 1^o ago. 2008, Santos. **Anais do Congresso Anual da ABM**. Santos: [s.e.], 2008, p. 3357-65. 1CD;
- ROSALES, M. J. C.; ALCÂNTARA, N. G.; SANTOS, J. F. Influência do material do *backing* no fluxo de calor e na formação de zonas deformadas pelo processo FSW em ligas de alumínio. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 5, n.º 3, p. 167-72, jan./mar. 2009;
- ROSALES, M. J. C.; ALCÂNTARA, N. G.; SANTOS, J. F.; ZETTLER, R. Heat transfer as influenced by changes to backing bar material when FSW aluminum alloys. In: INTERNATIONAL MATERIALS SYMPOSIUM – MATERIAIS, 5th, 5-8 abr. 2009, Lisboa (POR). **Anais do 5th International Materials Symposium – Materiais**. Lisboa (POR): [s.e.], 2009, p. 6. 1CD.

SUMÁRIO

	Pag.
BANCA EXAMINADORA	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES.....	ix
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
SÍMBOLOS E ABREVIACÕES	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. Ligas de alumínio	5
2.2. <i>Friction Stir Welding</i> (FSW)	6
2.2.1. Parâmetros de processo.....	8
2.2.2. Microestrutura das soldas por FSW.....	10
2.2.3. Energia e aporte térmico.....	12
2.2.4. Estabilidade térmica do processo FSW	14
2.2.5 Escoamento do material e trabalho redundante	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1. Materiais e equipamentos.....	19
3.2. Temperatura e forças do processo	21
3.3. Geometria da ferramenta FSW.....	23
3.4. Análise microestrutural	24
3.5. Fluxograma das atividades.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1. FSW da liga 2024-T351	27
4.2. FSW da liga 6013-T6.....	35
5. CONCLUSÕES	47
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

ÍNDICE DE TABELAS

	Pag.
Tabela 1. Combinação dos parâmetros de soldagem para as três condições de <i>backing</i> – cobre, aço e cerâmico – a uma força axial constante e mesma geometria da ferramenta.....	19

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1. Nomenclatura das ligas de alumínio e tratamentos mecânicos e térmicos [3]	6
Figura 2.2. Ilustração do processo FSW: (a) representação esquemática do movimento da ferramenta promovendo a consolidação do cordão de solda e (b) detalhe da ação do pino com roscas [5].....	7
Figura 2.3. Representação do processo FSW e do parâmetro <i>weld pitch</i> [7] ..	10
Figura 2.4. Representação das regiões microestruturais do processo FSW [1]11	
Figura 2.5. Análise térmica: aporte e condução de calor durante o processo FSW (fonte: GKSS).....	15
Figura 3.1. FSW Robô Tricept 805 – controlador Siemens Sinumeric 840D – e a ferramenta utilizada no processo de soldagem – pino facetado com rosca (fonte: GKSS)	20
Figura 3.2. <i>Backing</i> de diferentes materiais utilizados no processo FSW sob a mesa com sistema de fixação mecânica e a vácuo das chapas soldadas.....	21
Figura 3.3. Representação esquemática do posicionamento dos termopares: (A) nas chapas soldadas por FSW e (B) nos <i>backing</i> de diferentes materiais (fonte: GKSS)	22
Figura 3.4. Aquisição de temperatura por meio do uso de termopares Tipo-K. Os termopares foram posicionados tanto na chapa soldada como no <i>backing</i> (fonte: GKSS)	22
Figura 3.5. Sistema de controle da força aplicada durante a soldagem FSW, que utiliza uma mesa do tipo Kistler 9366A, posicionada embaixo da mesa de soldagem (fonte: GKSS)	23
Figura 3.6. Perfil geométrico e design da ferramenta <i>shoulder</i> e pino (fonte: GKSS).....	24
Figura 3.7 Fluxograma das atividades experimentais propostas no programa	25

- Figura 4.1. Macrografias da secção transversal das soldas BOP na liga 2024-T351, utilizando *backing* de aço, cobre e cerâmico e as áreas das lentes de soldagem formadas 27
- Figura 4.2. Macrografias da secção transversal das soldas FSW na liga 2024-T351, utilizando *backing* de aço, cobre e cerâmico e as áreas das lentes de soldagem formadas 29
- Figura 4.3. Macrografias da secção transversal das soldas FSW na liga 2024-T351, utilizando *backing* de aço, cobre e cerâmico e as áreas das lentes de soldagem formadas 31
- Figura 4.4. Temperaturas de pico registradas nas soldas da liga 2024-T351 no material e no *backing*, utilizando termopares do tipo K, para as três condições de *backing*: cobre, aço e cerâmico 32
- Figura 4.5. Perfis de microdureza da liga 2024-T351 em relação ao centro da lente de soldagem e as respectivas microestruturas das regiões 1) ZTA (de avanço) – e 2) raiz (de retrocesso) para as três condições de extração de calor do *backing*: A) cobre, B) aço e C) cerâmico 34
- Figura 4.6. Macrografias transversais das soldas BOP na liga 6013-T6, utilizando *backing* de aço para duas condições de processamento 36
- Figura 4.7. Macrografias das soldas FSW na liga 6013-T6, utilizando os três tipos de *backing* – aço, cobre e cerâmico – para duas condições de processamento 37
- Figura 4.8. Temperaturas de pico registradas nas chapas soldadas com a liga 6013-T6 em duas combinações de parâmetros e três condições de *backing* 38
- Figura 4.9. Temperaturas de pico registradas na ferramenta das soldas na liga 6013-T6 em função do tamanho da lente de soldagem formada 39
- Figura 4.10. Perfis de microdureza da liga 6013-T6 em relação ao centro da lente de soldagem e as respectivas microestruturas das regiões 1) ZTA (de avanço) – e 2) raiz (de retrocesso) para as três condições

- de extração de calor do *backing*: A) aço, B) cobre – detalhe do defeito volumétrico – e C) cerâmico..... 41
- Figura 4.11. Perfis de microdureza da liga 6013-T6 em relação ao centro da lente de soldagem e as respectivas microestruturas das regiões 1) ZTA (de avanço) – e 2) raiz –(de retrocesso) para as três condições de extração de calor do *backing*: A) aço, B) cobre e C) cerâmico 42
- Figura 4.12. Macrografias das soldas FSW na liga 6013-T6 no início e final do cordão utilizando *backing* cerâmico, parâmetros de soldagem: velocidade de rotação de 2700 RPM, velocidade de avanço de 900 mm/min e força axial de 10 kN..... 43
- Figura 4.13. Macrografias das soldas FSW na liga 6013-T6 no início e final do cordão utilizando *backing* cerâmico, parâmetros de soldagem: velocidade de rotação de 3600 RPM, velocidade de avanço de 900 mm/min e força axial de 10 kN..... 44

SÍMBOLOS E ABREVIACIONES

2024-T351 – Liga de alumínio da série 2xxx, envelhecida naturalmente;
6013-T6 – Liga de alumínio da série 6xxx, envelhecida artificialmente;
Al – Símbolo químico do alumínio;
ASTM – *American Society for Testing and Materials*;
ANSI – *American National Standards System*;
BOP – *Bead on plate* (solda produzida com pino cônico modificado);
CCDM – Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais;
CNC – Controle numérico computadorizado;
Cu – Símbolo químico do cobre;
DEMa – Departamento de Engenharia de Materiais;
 F_z – Força axial aplicada
FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo;
FSW – *Friction Stir Welding* (processo de soldagem no estado sólido);
GKSS – Gesellschaft zur Förderung der Kernenergie in Schiffbau und Schiffstechnik;
 H_2O – Símbolo químico da água;
HCl – Símbolo químico do ácido clorídrico;
HF – Símbolo químico do ácido fluorídrico;
 HNO_3 – Símbolo químico do ácido nítrico;
MB – Metal base;
Mg – Símbolo químico do magnésio;
Mn – Símbolo químico do manganês;
 O_2 – Símbolo químico do oxigênio;
 R_s ou Ω – Velocidade de rotação da ferramenta;
RPM – Rotações por minuto;
Si – Símbolo químico do silício;
SiC – Carbetto de silício;
 T_s ou v – Velocidade de avanço da ferramenta;
TWI – *The Welding Institute*;

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos;

W_p – *Weld pitch*;

ZAT – Zona afetada termicamente;

ZATM – Zona afetada termomecanicamente;

δ - Comprimento do pino;

1. INTRODUÇÃO

A utilização de ligas de alumínio nas indústrias automobilística e aeronáutica vem sendo amplamente explorada, principalmente por reduzir o peso de veículos e aeronaves – a densidade do alumínio é cerca de 1/3 da densidade do aço – sem que propriedades mecânicas e estruturais sejam comprometidas. Também questões ambientais podem ser consideradas na produção de ligas mais leves e econômicas, já que a produção dessas ligas pode gerar menor quantidade de poluentes para a atmosfera e diminuir o consumo energético. No entanto, por diversas vezes, o uso dessas ligas torna-se inviável em função da dificuldade de soldarem-se tais materiais pelos processos convencionais de soldagem.

Dado seu potencial de aplicação, novas alternativas de processamento e fabricação vêm se desenvolvendo nas últimas décadas. No início dos anos 1990, foi patenteado, no TWI (*The Welding Institute*), o processo de soldagem no estado sólido, derivado do processo de soldagem por fricção, conhecido por FSW (*Friction Stir Welding*), que usa uma ferramenta cilíndrica não consumível, com pino e *shoulder* de perfis geométricos definidos. A solda é concretizada por esforços termomecânicos aplicados pela ação rotacional da ferramenta em contato direto com a peça, em temperaturas abaixo do ponto de fusão do material [1].

A rotação da ferramenta e o contato do *shoulder* com a peça geram o calor necessário para diminuir a resistência do material e movimentá-lo ao redor do pino. A solda é consolidada na parte de trás da ferramenta. O *shoulder*, cuja direção é tipicamente normal em relação ao eixo de rotação, está conectado ao pino de menor diâmetro. A ação do *shoulder* gera grande parte do calor e promove a concentração de material na superfície da junta, evitando que este seja expelido durante a soldagem [2].

A combinação de forças exerce a extrusão e a deformação plástica do material durante a soldagem. Entre as vantagens, quando o processo de soldagem FSW é comparado a processos convencionais de soldagem por fusão, estão o menor consumo de energia e a não utilização de insumos como

gases de proteção e fluxo, que geram problemas ambientais. Além disso, problemas relacionados a trincas devido à solidificação e compatibilidade de composição química são eliminados, principalmente em ligas de alumínio e juntas dissimilares, uma vez que as soldas são produzidas no estado sólido – até 80% da temperatura de fusão do material.

Limitações inerentes ao processo o tornam, no entanto, inviável em algumas aplicações, entre as quais se destacam a formação de um defeito pontual no final de cada cordão e a dificuldade de fixação das chapas na mesa de trabalho para peças de geometria complexa.

Por isso, estudos são realizados para aprimorar as condições de processamento durante a soldagem FSW.

Diante dessa abordagem, o presente estudo visou ao melhor entendimento de soldas realizadas por FSW no tocante à transferência de calor para o material e para as demais partes envolvidas no processo de soldagem: a ferramenta e o *backing bar*. Além de relacionar os ciclos térmicos com alterações metalúrgicas, avaliaram-se as propriedades mecânicas, em termos de microdureza ao longo da secção transversal da junta, de soldas realizadas em três condições diferentes de extração de calor no *backing*, confeccionado em materiais de condutividade térmica distinta – cobre, aço e cerâmico. Utilizou-se, em um extremo, cobre como bom condutor, e, em outro, cerâmico como isolante térmico.

Usualmente confeccionado em aço, o *backing* tem como principal função consolidar a solda na raiz, de modo a influenciar as zonas afetadas termomecanicamente, tanto no seu formato, perfil e tamanho como na formação de defeitos volumétricos [2]. Essa influência se dá por diferenças na geração e fluxo de calor extraído.

Desde modo, este trabalho teve por objetivo determinar a influência do material do *backing bar* na transferência de calor em ligas de alumínio 6013-T6 e 2024-T351 soldadas por FSW, analisando-se:

- As condições de extração de calor do *backing bar* em relação às microestruturas das soldas;

- As propriedades físicas da solda, como: perfil, tamanho, geometria e comportamento mecânico da junta.

A caracterização microestrutural foi realizada em chapas das ligas 6013-T6 e 2024-T351 soldadas por FSW. Foram elaborados mapas das áreas deformadas plasticamente e analisados os dados de temperatura e forças do processo em várias condições e combinações de parâmetros. A investigação das propriedades mecânicas realizou-se por perfis de microdureza ao longo da secção transversal do cordão de solda.

As soldas foram realizadas no instituto de pesquisas alemão GKSS Forschungszentrum, em Geesthacht, na Alemanha, um dos centros de referência em soldagem robotizada. A etapa de caracterização microestrutural e mecânica foi realizada no laboratório de soldagem do DEMa (Departamento de Engenharia de Materiais), em conjunto com o CCDM (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais), ambos da UFSCar (Universidade Federal de São Carlos).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Ligas de alumínio

O alumínio é um dos elementos mais abundantes na terra e ocorre principalmente no estado combinado com dois outros elementos – O₂ e Si –, sendo extraído a partir do minério da bauxita. As ligas de alumínio constituem o grupo de ligas leves não ferrosas de versatilidade econômica e atrativa para uma vasta série de aplicações, tanto em partes estruturais como em elementos e componentes de máquinas. A baixa densidade do alumínio (2,7 g/cm³) e a elevada resistência mecânica o tornam visado na construção de estruturas móveis, como veículos automotivos e aeronaves espaciais.

O alumínio não é ferromagnético e possui boa condutividade térmica e elétrica. A elevada resistência à oxidação é notória, uma vez que a combinação dos átomos da superfície com o oxigênio da atmosfera forma uma camada protetora – neste sentido, a oxidação do material impede ataques corrosivos. As ligas tratadas e/ou combinadas com outros elementos se tornam resistentes à corrosão em meios agressivos – fenômeno conhecido como passivação.

O sistema de designação adotado pelo ANSI (*The American National Standards Institute*) inclui a forma dos produtos e sua classificação quanto à presença de elementos de liga – Al-Cu-Mg e Al-Mg-Si –, i.e.: série 2xxx e 6xxx respectivamente, e a condição de tratamento térmico (cf. Figura 2.1).

As alterações microestruturais promovidas durante o processamento dessas ligas são refletidas nas propriedades mecânicas do material, como, por exemplo, o mecanismo de endurecimento por precipitação, responsável pelo aumento do limite de resistência à tração e dureza, que consiste na solubilização e precipitação de partículas endurecedoras, finamente dispersas na matriz de alumínio.



Figura 2.1. Nomenclatura das ligas de alumínio e tratamentos mecânicos e térmicos [3]

2.2. Friction Stir Welding (FSW)

FSW é um processo de soldagem no estado sólido, patenteado e desenvolvido pelo TWI em 1991, na Inglaterra. O processo consiste em uma ferramenta cilíndrica não consumível, composta por duas partes distintas: 1) *shoulder* e 2) pino, que está conectado ao *shoulder*. A ferramenta é rotacionada para formar uma região no material termomecanicamente deformada, que resulta na união da junta [4]. A ação combinada de rotação e força axial promove o aquecimento e a diminuição da resistência à deformação plástica do material. A principal função da ferramenta é, portanto, movimentar o material nas regiões adjacentes ao centro da junta.

O *shoulder* promove grande parte do calor gerado e impede que o material seja expelido através da superfície da junta. A geometria do *shoulder* – com perfil de roscas, espirais, anéis concêntricos ou côncavos – facilita o escoamento do material. Com perfil de roscas, facetado ou cônico, o pino é usualmente projetado para promover maior área de fricção e conseqüentemente transportar maior volume de material.

O aporte de energia é resultante do atrito, ocasionado pela rotação da ferramenta, e principalmente da força axial aplicada, pelo contato direto entre o

shoulder e a superfície do material. As regiões limitantes que restringem o transporte de material incluem as partes: 1) inferior com o *backing*, 2) superior com o *shoulder* e 3) laterais com o próprio material. Desse modo, a transferência do calor gerado é direcionada para essas três regiões de contato, além da dissipação (desprezível) para o ambiente.

Além da ação de fricção, o calor é gerado a partir da deformação plástica do material (cf. Figura 2.2). Supõe-se que o fluxo de calor seja alterado em função de variações nos parâmetros de processo. Essa relação depende diretamente das condições de deformação plástica impostas ao material. Sendo assim, os parâmetros devem ser ajustados para garantir o balanço de massa/volume durante o escoamento do material e para evitar a formação de defeitos volumétricos na lente de soldagem:

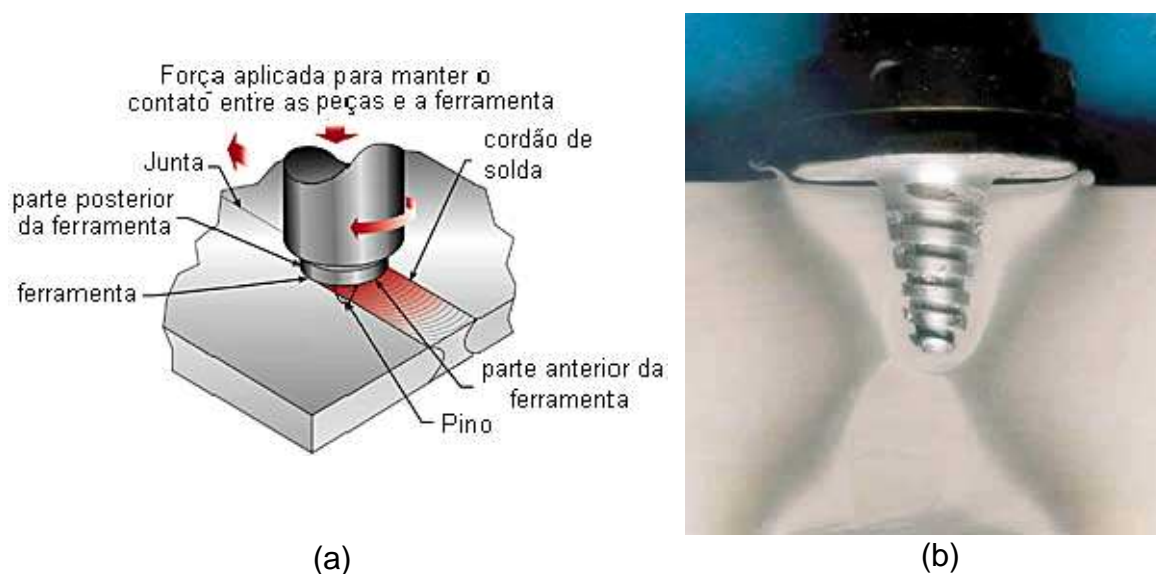


Figura 2.2. Ilustração do processo FSW: (a) representação esquemática do movimento da ferramenta promovendo a consolidação do cordão de solda e (b) detalhe da ação do pino com roscas [5]

A ação da ferramenta produz uma combinação de conformação por extrusão ao redor do pino e forjamento nas regiões adjacentes ao *shoulder*. Com relação à geometria das soldas produzidas, são definidos os seguintes termos em FSW:

- **Eixo de forjamento:** linha longitudinal da ferramenta;
- **Eixo de extrusão:** direção de translação do cabeçote de soldagem;
- **Lado de retrocesso:** local de partida do material misturado mecanicamente;
- **Lado de avanço:** ponto de destino do material misturado na interface, devido às solicitações de cisalhamento produzidas pelo *shoulder*.

O mecanismo de soldagem ocorre com a geração de calor localizado. Isso induz a passagem de material da parte anterior da ferramenta para o lado de retrocesso do pino, em que ocorre a ação de extrusão. A translação da ferramenta ao longo do centro da junta garante o escoamento do material para a parte posterior do pino, em que o material se resfria e a solda é consolidada.

2.2.1. Parâmetros de processo

Os parâmetros de processo, incluindo principalmente as velocidades de rotação e de avanço da ferramenta e a força axial aplicada, são essenciais para produzir uma solda de qualidade, sem a formação de defeitos. A relação de escoamento e deformação plástica do material está associada a pequenas variações – i.e.: condutividade do *backing* –, que podem alterar as condições de transferência de calor. A condutividade térmica do *backing* promove alterações metalúrgicas importantes no processamento de ligas de alumínio e nas condições de extração de calor na junta [1].

O desenho e a geometria da ferramenta auxiliam no escoamento do material e na distribuição de temperatura nas regiões envolvidas no processo de soldagem. O diâmetro do *shoulder* afeta diretamente as características da solda produzida, uma vez que quanto maior o seu valor, maior é o calor gerado pelo atrito com a superfície do material, e conseqüentemente maior é a degradação das propriedades mecânicas da liga [6].

Entre os parâmetros que influenciam tanto na característica da zona recristalizada dinamicamente, lente de soldagem, como na formação de defeitos e na qualidade final da junta soldada, destacam-se [4]:

- **Força axial (F_z):** afeta a distribuição e o fluxo de material ao longo do plano vertical da solda. O controle da força axial é monitorado por sensores eletrônicos;

- **Velocidade de rotação da ferramenta (Ω):** parâmetro relacionado à força de atrito e fricção na interface entre a ferramenta e o material e que determina a transferência de calor durante o processo;

- **Velocidade de avanço (v):** influencia as condições dinâmicas do fluxo de material ao redor do pino e a geração do calor resultante do processo;

- **Geometria da ferramenta:** a geometria do *shoulder* – plana, lisa, côncava lisa, plana com estrias concêntricas ou com estrias em espiral – influencia diretamente as dimensões do cordão de solda. Já a geometria do pino – facetado com roscas, cônico – melhora as condições de fluxo do material, diminuindo a formação de defeitos;

- **Comprimento do pino (δ):** relaciona-se com a espessura da chapa soldada e influencia a profundidade e escoamento vertical de material.

A agitação e a mistura do material termicamente plastificado são uma resposta direta da variação da rotação da ferramenta. Deve ser notado, no entanto, que a fricção entre a ferramenta/material e o contato direto com o *backing bar* são responsáveis por governar o escoamento do calor na lente de soldagem.

Outra relação que influencia a mistura e o deslocamento vertical do material é a razão entre a rotação da ferramenta R_s (RPM) e a velocidade de translação (avanço) da solda T_s (mm/min). Essa relação define o parâmetro chamado *weld pitch* W_p (rev/mm), que determina a quantidade do giro da ferramenta em função da distância deslocada, como demonstra a Equação 1 (cf. Figura 2.3):

$$W_p = \frac{R_s}{T_s}$$

Equação 1

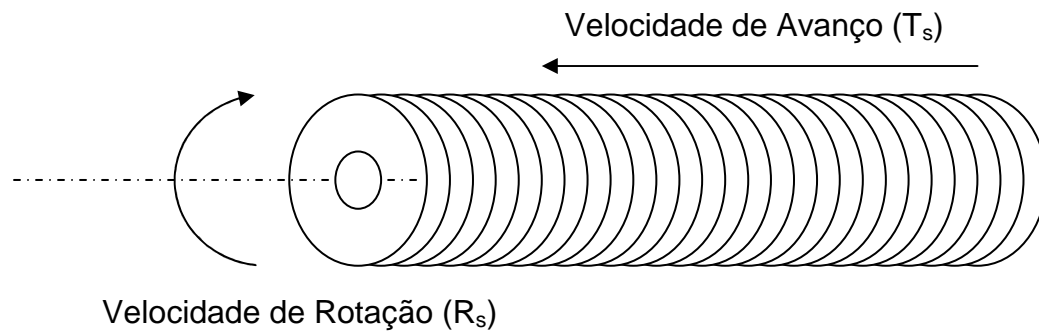


Figura 2.2. Representação do processo FSW e do parâmetro *weld pitch* [4]

A força axial aplicada (F_z) é essencial para o processo de soldagem, uma vez que, sem o contato direto do *shoulder* com o material, não há o forjamento que garante a consolidação da junta. Perdas na aplicação da força axial implicam perdas de massa do material na junta e formação de defeitos volumétricos.

2.2.2. Microestrutura das soldas por FSW

A microestrutura das ligas de alumínio soldadas por FSW pode ser dividida em quatro zonas. De acordo com as características microestruturais, o aporte de energia e a deformação imposta pelo processo, essas regiões são: MB (Metal Base), ZAT (Zona Afetada Termicamente), ZATM (Zona Afetada Termomecanicamente) e Zona Dinamicamente Recristalizada ou lente de soldagem (cf. Figura 2.4).

Cada uma das regiões microestruturais apresenta diferentes características físicas e mecânicas devido à influência dos ciclos térmicos e da deformação plástica. Por se tratar de um processo termicamente ativado, as reações no estado sólido – i.e.: dissolução e/ou coalescimento de precipitados – são ativadas em função das condições de transferência de calor para o material. A seguir, são discutidas as características de cada uma das regiões:



- | | |
|---|--|
| A Metal Base (MB) | C Zona Afetada Termomecanicamente (ZATM) |
| B Zona Afetada Termicamente (ZAT) | D Lente de Soldagem |

Figura 2.3. Representação das regiões microestruturais do processo FSW [1]

A) Metal Base: região distante do cordão de solda que não é afetada pelo calor e pela taxa de deformação produzida durante o processo FSW. Nessa região, os grãos se deformam de acordo com o processamento e o tratamento térmico da liga;

B) Zona Afetada Termicamente: na ZAT, os ciclos térmicos modificam a microestrutura e as propriedades mecânicas sem que ocorra deformação plástica. Ainda, a ZAT experimenta temperaturas acima de 250°C no caso de ligas de alumínio. A exposição à elevada temperatura exerce efeito significativo na dissolução ou coalescimento dos precipitados, bem como em propriedades mecânicas da junta [5];

C) Zona Afetada Termomecanicamente: região de transição entre a lente de soldagem e a zona termicamente afetada, exposta às temperaturas e condições de deformação, condições a partir das quais ocorre a recristalização parcial dos grãos. O calor é transferido diretamente da ZATM para a ZAT, o que influencia a microestrutura do material. A localização da ZATM em relação ao centro da junta é determinada pelo aporte de energia e principalmente pelo mecanismo de deformação que ocorre entre o material/ferramenta e a direção de escoamento do material, uma vez que a deformação plástica transporta parte do calor gerado.

Os ciclos térmicos envolvidos no processo são responsáveis, no caso de ligas endurecidas por precipitação, pelo envelhecimento – ou superenvelhecimento –, que reflete usualmente em baixas propriedades mecânicas. Em outros materiais, como em ligas de titânio, cobre e aços inoxidáveis, a lente de soldagem recristalizada é ausente, e a ZATM parece totalmente recristalizada [7].

D) Lente de Soldagem: o material transportado ao redor do pino sofre intensa deformação plástica em alta temperatura, o que leva à formação de uma estrutura de grãos equiaxiais dispersos e separados por contornos de alto ângulo – o tamanho de grão pode variar de 0,1 a 10 μm , dependendo do material e dos parâmetros de processo [8]. Essa estrutura refinada é atribuída ao fenômeno de recristalização dinâmica e ocorre como resultado das condições térmicas e do elevado grau de deformação plástica entre a ferramenta e o material.

A região de interface da ferramenta/material é relativamente difusa no lado de retrocesso, mas bem definida no lado de avanço. O formato, a morfologia e o tamanho da lente de soldagem dependem dos parâmetros de processamento, da geometria da ferramenta, da condutividade térmica do material e do *backing*. As alterações provocadas pelos ciclos de temperatura promovem a solubilização e a precipitação das partículas endurecedoras [5]. Em temperaturas próximas da linha *solidus*, os precipitados podem coalescer ou se dissolver, dependendo da liga e dos elementos presentes na matriz de alumínio [9].

2.2.3. Energia e aporte térmico

O cálculo do aporte térmico gerado durante a soldagem por FSW está associado usualmente ao uso de equações empíricas que visam a descrever a geração e a extração de calor. A simulação e a modelagem matemática estão intimamente ligadas com as condições experimentais de contorno, muito embora se tenha verificado que os resultados divulgados são poucos e insuficientes para assegurar a estabilidade térmica do processo.

Tipicamente, é assumido que os efeitos combinados da força axial e da ação de fricção dão origem à quase totalidade do calor gerado durante o processo de soldagem [10]. Além disso, deve ser considerada a elevada taxa de deformação imposta na lente de soldagem, que contribui para geração de calor. Assim, a correlação entre os parâmetros do processo e o aporte de calor depende das propriedades do material na região termomecanicamente deformada.

Os principais parâmetros relacionados à geração de calor são a velocidade de rotação da ferramenta, a força axial e a velocidade de translação da solda. Tais variáveis, juntamente com a condutividade térmica do material, do *backing bar* e a geometria da ferramenta promovem o aporte de diferentes níveis de energia, que são transferidos da lente de soldagem para as regiões da solda, incluindo a própria ferramenta.

A geração de calor tem possivelmente duas origens: (A) proveniente da fricção na interface do *shoulder* com o material e (B) a deformação plástica causada pela movimentação de material plastificado ao redor do pino. Desse modo, o calor pode ser transferido radialmente para o próprio material, para a ferramenta –*shoulder* e pino – e/ou para o *backing* em função da condição interfacial de escoamento do material.

A relação entre a deformação plástica e os parâmetros de processo é baseada na formação de uma camada plastificada imediatamente à frente do movimento da ferramenta. As forças que atuam sobre o pino são respostas do contato direto entre o material e a ferramenta. De modo análogo, o torque atinge um valor de pico e diminui quando essa camada de material totalmente plastificado se forma na interface. Isso resulta a geração de calor por dissipação da energia termomecânica da ação da ferramenta [11].

A maioria dos modelos matemáticos considera que a geração de calor ocorre somente na interface entre o *shoulder* e o material. Isso implica que o calor gerado pelo contato pino/material tem pouco ou nenhum efeito sobre o aporte de energia para tais modelos. As análises térmicas recentes indicam que a transferência de calor convectivo na zona deformada plasticamente afeta a distribuição de temperatura nas proximidades da interface

ferramenta/material [12]. De fato, o calor de fricção do pino tem pouca contribuição na geração de calor – mas não pode ser desprezível – devido ao fato de que seu tamanho é muito inferior quando comparado ao diâmetro do *shoulder*.

No entanto, o escoamento do material e a qualidade final da solda são evidências contrárias a esse fenômeno, uma vez que a formação da junta está relacionada diretamente com a geometria do pino. A geração e a transferência de calor são aspectos importantes a serem considerados durante a soldagem, pois contribuem para alterações microestruturais e conseqüentemente para mudanças das propriedades mecânicas da solda, que estão relacionadas às distorções e tensões residuais durante e após o processamento [11].

2.2.4. Estabilidade térmica do processo FSW

O efeito dos ciclos térmicos na microestrutura ao redor da ferramenta – na região termomecanicamente deformada, incluindo a lente de soldagem – é fator crítico para prever o histórico de temperatura da junta soldada. As características importantes que governam a transferência de calor durante o processo FSW estão esquematicamente representadas na Figura 2.5. As áreas de interesse deste estudo foram as de geração e conseqüente condução de calor para o *backing*.

O modelamento térmico é referenciado na literatura essencialmente pelo uso de ferramentas numéricas como elementos finitos e/ou equações analíticas, que tentam aproximar os valores experimentais dos obtidos na teoria [10-14]. No entanto, esses estudos não se atentam para a descrição do processo de forma a relacionar a deformação plástica com a transferência de calor devido à interação ferramenta/material.

As soluções analíticas e a modelagem do processo FSW são baseadas nas equações de Rosenthal. Russel et al. (1999) [8] supõem que o aporte de energia pode ser aproximado pelo calor de fricção gerado na superfície de contato entre a ferramenta em rotação e o material. Essa solução analítica não explica, no entanto, por que haverá a formação de uma superfície de

deformação na interface de contato e para onde o calor gerado será dissipado se uma condição de escorregamento ocorrer entre a ferramenta e o material no estado viscoplástico.

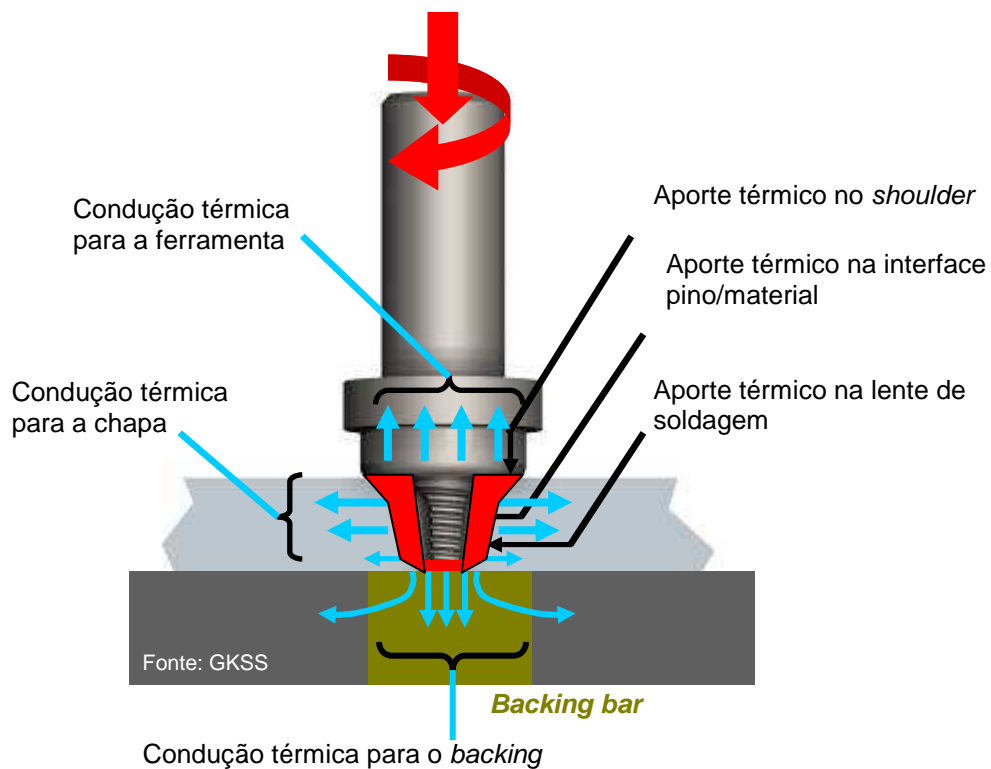


Figura 2.4. Análise térmica: aporte e condução de calor durante o processo FSW (fonte: GKSS)

Colegrove et al. (2000) [10] sugerem um modelo térmico com a presença de um pino com rosca, no qual o *backing* e a ferramenta influenciam a extração e a geração de calor. O modelo é baseado em duas condições: (A) assume que a resistência ao escorregamento se dá em função da fricção e (B) o cisalhamento interfacial predomina sobre a resistência do material. O modelo não determina quando e onde tais condições são ativadas durante o processo. Por isso, supõe que ambas as condições influenciam o escoamento do material. O modelo determina, ainda, que a velocidade de escoamento do material seja limitada pela resistência ao cisalhamento até o ponto em que uma

condição de equilíbrio for estabelecida entre as forças aplicadas no processo – tipicamente, forças de cisalhamento e fricção.

Muitos modelos são baseados no coeficiente de fricção do material, muito embora a complexidade para obter equações para adequar as condições de processamento FSW em um modelo que prevê a estabilidade térmica durante a soldagem não seja somente em resposta ao coeficiente de fricção – isto porque o coeficiente de fricção varia em função da temperatura. A dificuldade incide sobre a descrição de qualquer modelo matemático que reúne um grande número de variáveis, tais como a elevada taxa de deformação, as condições de carregamento, os parâmetros de processo, a geometria da ferramenta e, o mais importante, a composição química do material.

O fluxo do calor difere entre as soldas produzidas, podendo ser quentes ou frias, de acordo com o aporte de energia e as condições de processamento. Para soldas frias, o calor é derivado da dissipação por fricção interna em função do escoamento viscoplástico de material que é transportado ao redor do pino. O calor é dissipado no lado de retrocesso – lado de escoamento do material. Para soldas quentes, o escoamento viscoplástico do material é localizado, no entanto, perto do pino, e o calor por fricção entre a ferramenta e o material é maior. Isso significa que o calor gerado é igualmente distribuído entre os lados de avanço e retrocesso [15].

A deformação plástica influencia o fluxo de calor durante o escoamento viscoplástico do material. O tamanho e formato da lente de soldagem são dependentes das variáveis do processo e da distribuição de energia térmica no material. Correlatamente a esse fenômeno está a influência do *backing* na extração de calor da região deformada plasticamente ao redor da ferramenta. Embora sejam observadas diferenças microestruturais como resultado do processamento FSW em ligas de alumínio, poucas referências são encontradas acerca da influência do *backing bar* e seus efeitos na formação da junta soldada. Sabe-se que o *backing* controla o fluxo e a extração de calor principalmente na raiz da junta. Analogamente, a ferramenta FSW também influencia a dissipação do calor gerado durante o processo. A ação combinada de ambas as partes ao remover o calor do sistema determina a microestrutura

e a qualidade da junta, inclusive na formação de defeitos nas regiões deformadas termomecanicamente [16].

2.2.5 Escoamento do material e trabalho redundante

A extrusão pode ser definida como um processo que ocorre em elevadas tensões, no qual o material escoava dentro de uma matriz, produzindo-se uma seção transversal constante [17]. No caso específico da soldagem por FSW, as paredes da chapa, o *backing* e a própria ferramenta restringem o escoamento do material. A ação da ferramenta ocorre em função das forças aplicadas e promove o escoamento na interface com o pino. O *shoulder* promove o atrito e a maior parte do calor gerado para plastificar o material.

A força necessária para extrusão depende da temperatura de trabalho, da velocidade (taxa) de deformação e das condições de atrito nas paredes. A temperatura de trabalho – cerca de 80% da temperatura de fusão do material – é uma resposta direta da ação da ferramenta (atrito com o material) e do calor interno do metal gerado em função da elevada deformação produzida. A relação entre a velocidade de extrusão e a tensão aplicada para produzir a junta soldada é fortemente influenciada pelas condições de lubrificação entre o metal e as paredes que o restringem.

Conforme o atrito aumenta nas paredes, o fluxo de metal é destorcido, criando uma zona neutra de metal estagnado. A lente de soldagem sofre intensa deformação, enquanto a ZTA e a ZTMA sofrem deformação cisalhante. Essa distorção cisalhante requer um gasto de energia que não está relacionado à mudança no formato da lente de soldagem, o que define o fenômeno de trabalho redundante [18]. Quando o atrito é alto, o escoamento se concentra no centro e então se desenvolve um plano cisalhante interno longe da ação da ferramenta (pino).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais e equipamentos

Foram utilizadas as ligas de alumínio da série 2xxx e 6xxx, sendo dos sistemas Al-Cu-Mg 2024-T351 e Al-Mg-Si 6013-T6, respectivamente. A escolha dos parâmetros de soldagem foi determinada por meio de estudos previamente realizados no instituto GKSS, de acordo com o histórico de trabalhos publicados nos últimos anos de pesquisa.

Foram produzidas soldas em juntas de topo e BOP (*bead on plate*), que utiliza uma ferramenta definida por um pino cônico modificado sem roscas – comprimento de 1,5 mm – conectado a um *shoulder* com roscas. Na primeira etapa, chapas de 4 mm da liga 6013-T6 foram soldadas sob quatro combinações de parâmetros e três condições do *backing* – aço, cobre e cerâmico. Posteriormente, chapas de 3,2 mm da liga 2024-T351 foram soldadas em três combinações de parâmetros, também para as mesmas três condições de *backing*. As combinações dos parâmetros de soldagem (cf. Tabela 3.1) variaram quanto à velocidade de rotação e de avanço, mantendo-se constantes a força axial e a geometria da ferramenta (cf. Figura 3.1).

Tabela 3.1. Combinação dos parâmetros de soldagem para as três condições de *backing* – cobre, aço e cerâmico – a uma força axial constante e mesma geometria da ferramenta

Parâmetros de soldagem	Velocidade de rotação (RPM)	Velocidade de avanço (mm/min)	Liga de alumínio
1	900	600	6013-T6
2	1200	900	
3	2700	600	
4	3600	900	
5	1600	800	2024-T351
6	800	400	
7	400	200	

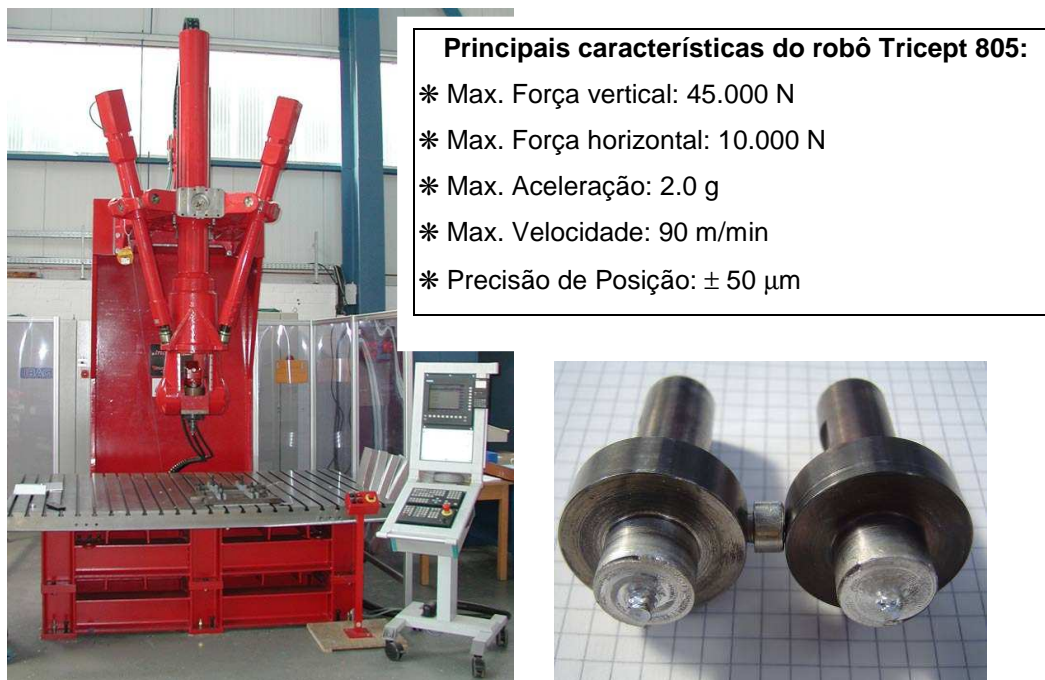


Figura 3.1. FSW Robô Tricept 805 – controlador Siemens Sinumeric 840D – e a ferramenta utilizada no processo de soldagem – pino facetado com rosca (fonte: GKSS)

As soldas por *Friction Stir Welding* foram produzidas no instituto alemão GKSS em juntas de topo e *bead on plate* – somente *shoulder* – em um robô Neos Tricept TR 805 (cf. Figura 3.1), controlado por um sistema CNC de comando Siemens Sinumeric 840D e capaz de mover-se em cinco eixos centrais.

O equipamento foi projetado para aplicações de alta flexibilidade e elevado grau de rigidez, características desejáveis para o desenvolvimento de soldagem por FSW. Ainda, a força axial e a velocidade de rotação da ferramenta foram controladas por um sistema integrado, desenvolvido no próprio instituto.

Os *backing* utilizados na soldagem das ligas em estudo estão identificados na Figura 3.2 confeccionados em três diferentes materiais: cobre, aço e cerâmico. Não foi utilizado nenhum sistema de arrefecimento nos *backing*. As setas no topo da figura indicam a direção e a rotação da ferramenta de soldagem. Uma mesa *Horst Witte* foi utilizada para gerar vácuo a

fim de fixar as chapas soldadas na superfície e os *backing*, parafusados mecanicamente, no centro da linha de solda:

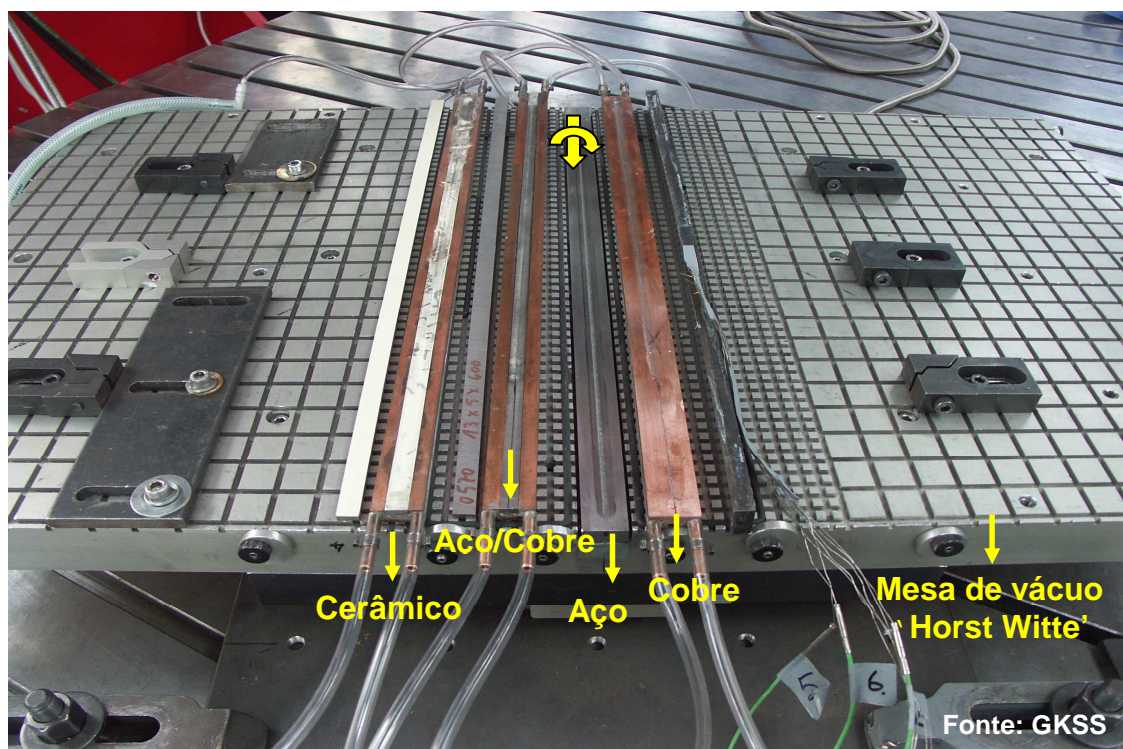


Figura 3.2. *Backing* de diferentes materiais utilizados no processo FSW sob a mesa com sistema de fixação mecânica e a vácuo das chapas soldadas.

3.2. Temperatura e forças do processo

Os dados de temperatura foram medidos em todas as soldas produzidas por meio de termopares do Tipo-K posicionados estratégica e simetricamente em ambos os lados nas chapas e, ao longo do eixo central nos *backing*, a uma profundidade de 0,5 mm da interface entre a chapa e a superfície do *backing* (cf. Figura 3.3). Os dados de temperatura foram avaliados por meio de um microcomputador integrado ao sistema de aquisição de dados *National Instrument SCXI-1000* (cf. Figura 3.4):

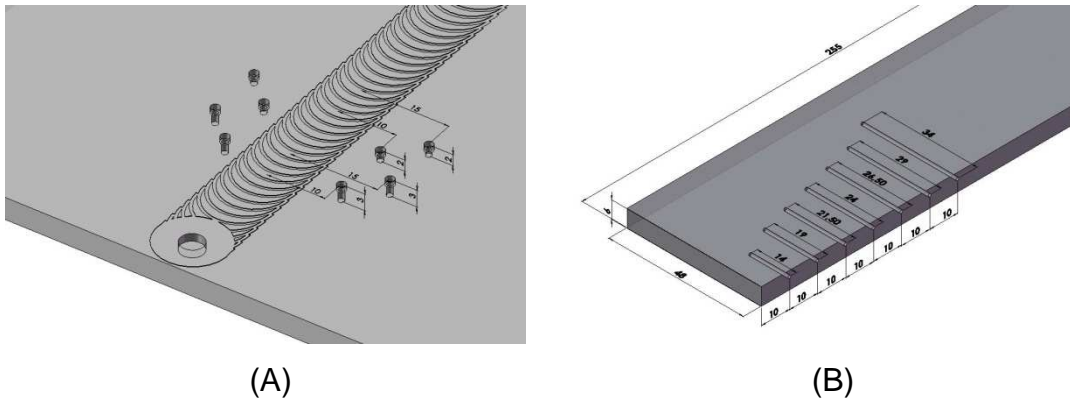


Figura 3.3. Representação esquemática do posicionamento dos termopares: (A) nas chapas soldadas por FSW e (B) nos *backing* de diferentes materiais (fonte: GKSS)



Figura 3.4. Aquisição de temperatura por meio do uso de termopares Tipo-K. Os termopares foram posicionados tanto na chapa soldada como no *backing* (fonte: GKSS)

A aquisição dos dados de força e torque, envolvidos no processo, foi realizada por meio da fixação mecânica das chapas de alumínio na mesa de vácuo, que, por sua vez, foi acoplada a um sistema de medição composta por células de carga posicionadas abaixo de uma mesa do tipo Kistler 9366BB. Para garantir a reprodutibilidade e consistência das soldas, foi utilizado o sistema de medição de força, como evidência a Figura 3.5:

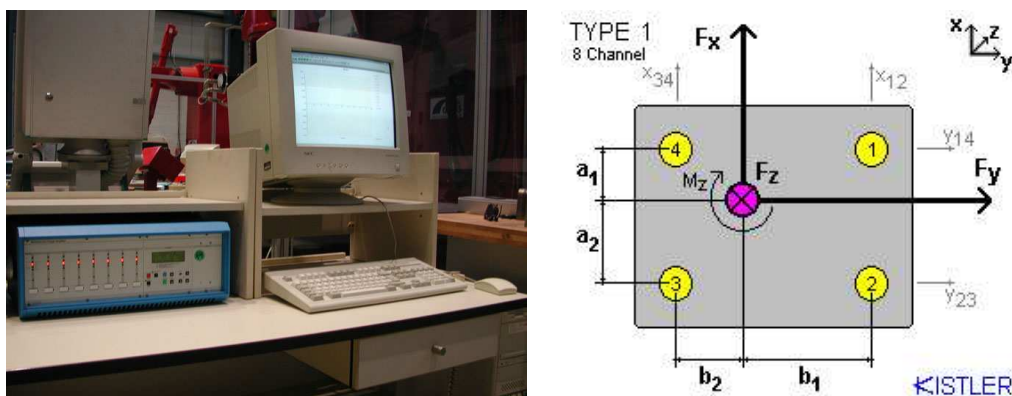


Figura 3.5. Sistema de controle da força aplicada durante a soldagem FSW, que utiliza uma mesa do tipo Kistler 9366A, posicionada embaixo da mesa de soldagem (fonte: GKSS)

3.3. Geometria da ferramenta FSW

A ferramenta utilizada para todas as soldas produzidas – topo e penetração na raiz – é composta por pino (tipo C) cônico com roscas conectado ao *shoulder* (tipo 2) com perfil de roscas, como mostra a Figura 3.6. O diâmetro do *shoulder* mede 15 mm, e a geometria do pino ajuda a maximizar o deslocamento do material enquanto a ferramenta gira e translada na junta soldada. A geometria e o *design* da ferramenta aumentam o volume de material deformado, o que diminui as forças de soldagem na direção da velocidade de avanço da ferramenta.

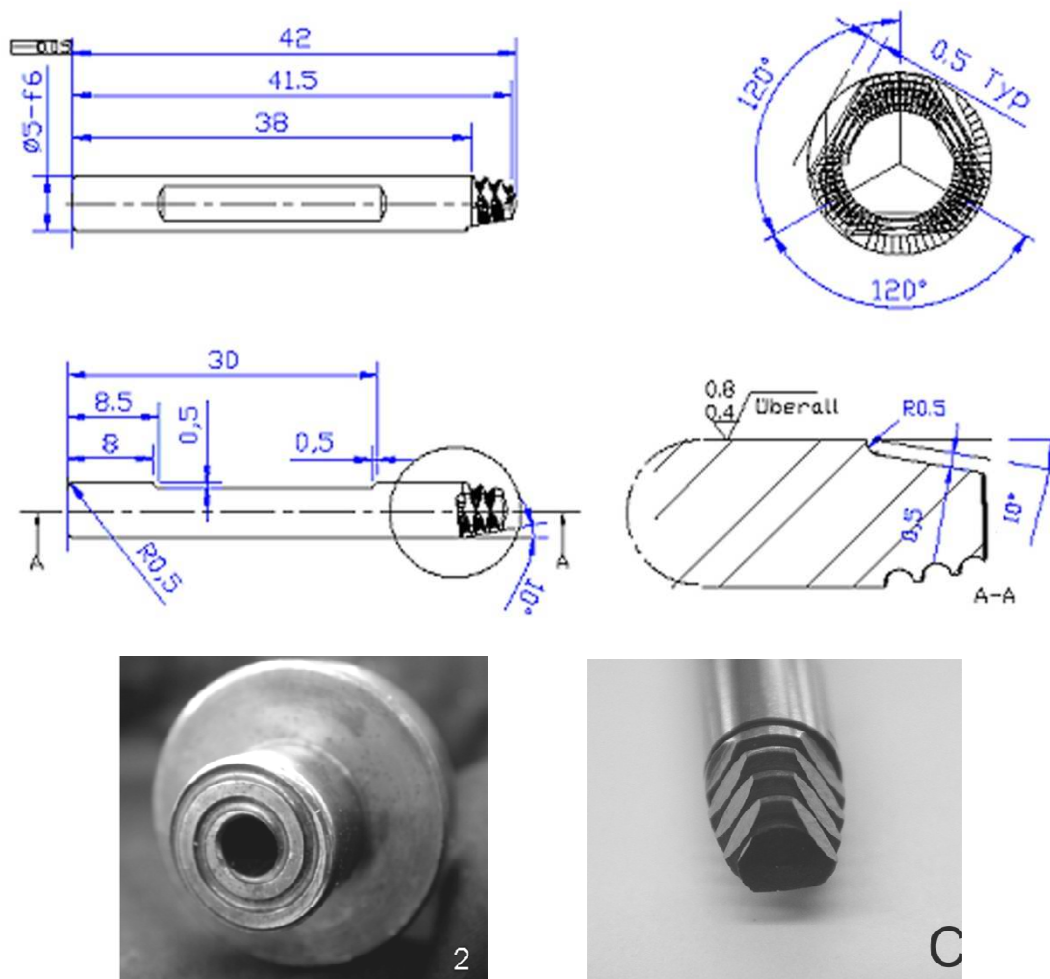


Figura 3.6. Perfil geométrico e design da ferramenta *shoulder* e pino (fonte: GKSS)

3.4. Análise microestrutural

A caracterização microestrutural das regiões soldadas foi realizada de acordo com os procedimentos usuais de preparação metalográfica, descritos na norma ASTM E3-95. Para avaliação das macroestruturas das soldas, foram cortadas secções transversais no final do cordão com aproximadamente 50 mm de comprimento – i.e.: 20 mm para cada lado do centro da junta. Todas as amostras foram cortadas com abrasivo de SiC, refrigerado a água, embutidas a frio – resina Demotec 30® – e polidas em equipamento Phoenix™ 4000.

Após o polimento, as amostras da liga 2024-T351 foram atacadas com reagente Koll Zosek (2 mL HF – 40%, 6 mL HNO₃ – 65%, 96 mL H₂O) e da liga

6013-T6 com reagente Keller (190 mL H₂O – 5 mL HNO₃ – 65%, 2 mL HF – 40%, HCl 32%). Foram avaliados o perfil, tamanho e geometria das zonas deformadas plasticamente impostas durante a solda FSW. A investigação macro/microestrutural foi realizada com microscópio Leica Q550MW.

Medições de microdureza foram determinadas para traçar os perfis das amostras soldadas em cada condição de *backing* a fim de avaliar a influência dos três materiais na extração de calor durante o processo.

3.5. Fluxograma das atividades

O fluxograma das atividades desenvolvidas neste estudo está representado esquematicamente na Figura 3.7:

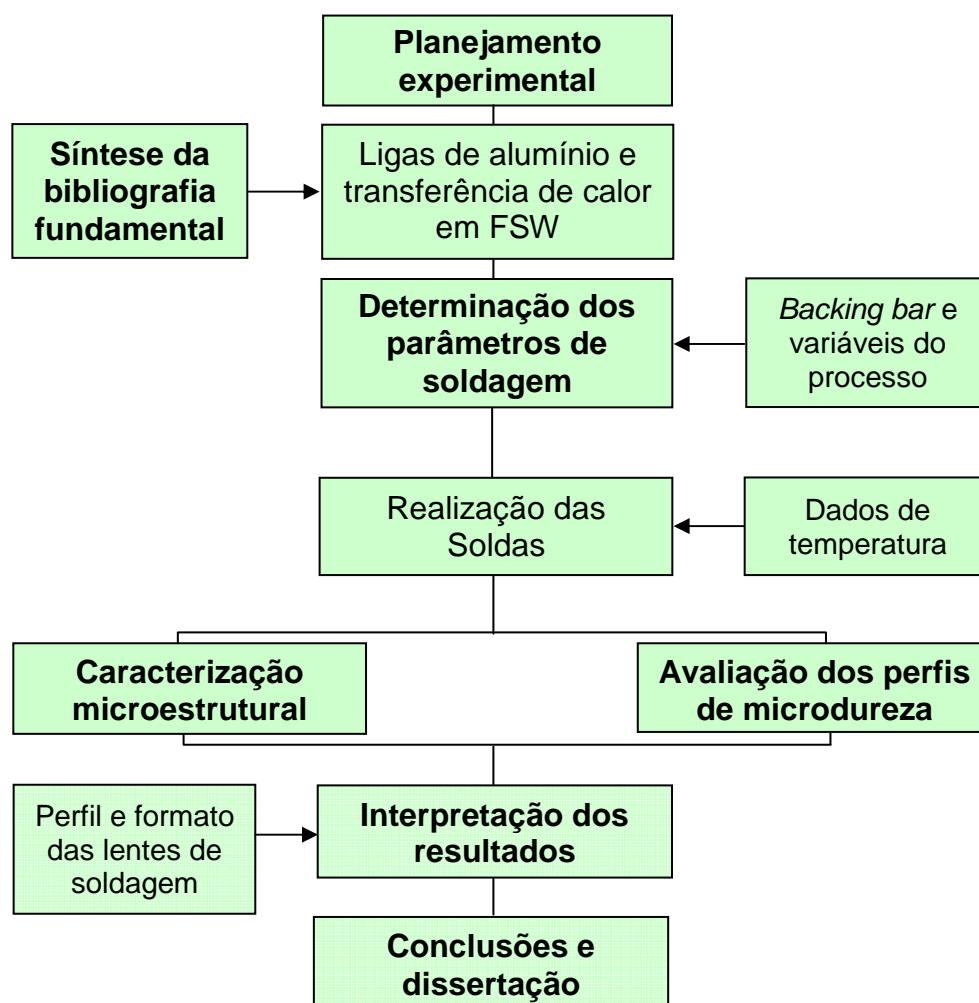


Figura 3.7 Fluxograma das atividades experimentais propostas no programa

O desenvolvimento experimental foi dividido em dois grupos de investigação: o primeiro envolveu o estudo da influência de diferentes parâmetros de soldagem no fluxo de calor para cada liga estudada separadamente; o segundo consistiu na análise da correlação em termos de geração, transferência de calor e deformação plástica das ligas de alumínio quando soldadas por FSW sob as condições características de *backing bar* confeccionado em três diferentes materiais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. FSW da liga 2024-T351

As macrografias das soldas BOP na liga de alumínio 2024-T351 ($W_p=2,0$) utilizando os *backing* de aço, cobre e cerâmico estão apresentadas na Figura 4.1. A marcação em amarelo evidencia a formação de um defeito volumétrico – na condição do *backing* de cobre –, e as setas em branco indicam a área de contato do *shoulder*, mostrando o escoamento vertical do material na lente de soldagem.

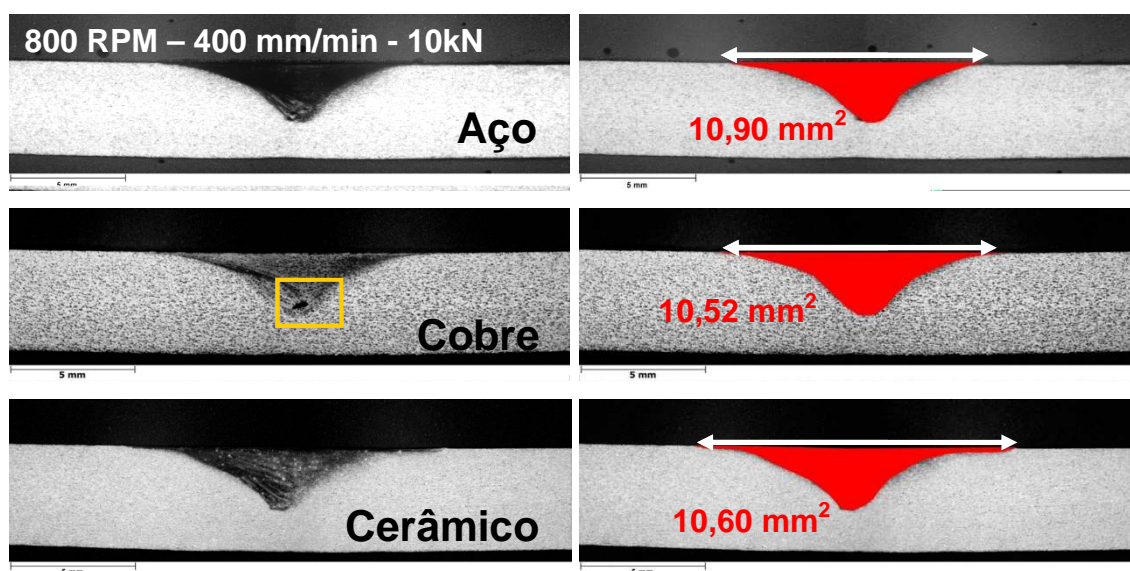


Figura 4.1. Macrografias da secção transversal das soldas BOP na liga 2024-T351, utilizando *backing* de aço, cobre e cerâmico e as áreas das lentes de soldagem formadas

Apesar das áreas das lentes de soldagem serem virtualmente as mesmas, é possível observar que a sua geometria variou em função da extração de calor na raiz. É evidente a formação de um defeito ocasionado pelo uso do *backing* de cobre, pois a elevada condutividade térmica do cobre faz com que o fluxo de calor seja transmitido para a parte inferior de solda (raiz). Como não há calor e tempo suficientes para plastificar o material, há a formação do defeito volumétrico.

Além disso, a zona de contato do *shoulder* é consideravelmente influenciada pela condutividade do *backing*. Quando comparado ao *backing* de aço, o uso do *backing* cerâmico promove uma maior deformação localizada no material na superfície da solda, uma vez que o calor gerado é impedido de ser extraído verticalmente para baixo. Isso demonstra que as condições térmicas de processamento, principalmente relacionadas às propriedades intrínsecas do material e à extração de calor na raiz da solda, dominam as relações de interação entre a ferramenta – essencialmente *shoulder* nesse caso – e o escoamento de material durante o processo de soldagem.

As ligas da série 2xxx têm elevada resistência à deformação plástica, e, por isso, a ação da ferramenta promove pouca deformação no material. Desse modo, é possível deduzir que uma interação na interface entre a ferramenta e o material somente poderá ocorrer se, durante o escoamento viscoplástico do material, uma condição de deslizamento for satisfeita – como se durante a extrusão fosse controlada pela lubrificidade das regiões que restringem o escoamento do material. Ainda, a formação de um defeito volumétrico no caso do *backing* de cobre corrobora a evidência dessa condição, uma vez que a formação desse defeito está associada somente a condições térmicas insuficientes que retardam o escoamento do material.

Embora a variação da área na lente de soldagem seja mínima para diferentes condições de *backing* nas soldas BOP (cf. Figura 4.1), é possível observar, na Figura 4.2, que a área de contato do *shoulder* aumenta com a diminuição da velocidade de rotação da ferramenta. Apesar do aumento da velocidade de avanço, isso ocorre porque o contato entre o *shoulder* e o material é influenciado pelo fluxo de calor, que se dá verticalmente da superfície da junta para a raiz da solda.

A Figura 4.2 mostra que o tamanho do defeito volumétrico aumenta com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta – observa-se que com o uso do *backing* de aço, a 1600 RPM, há a formação de um defeito na lente de soldagem. Os parâmetros de soldagem variaram quanto à velocidade de rotação e avanço, mantendo-se constante o W_p . A marcação em amarelo evidencia a formação de defeitos volumétricos e as setas em branco indicam a

área de contato da ferramenta *shoulder*. Observa-se que a lente de soldagem é bem definida no lado de avanço – há uma linha que marca o início da ZTMA –, enquanto que no lado de retrocesso, a transição é difusa.

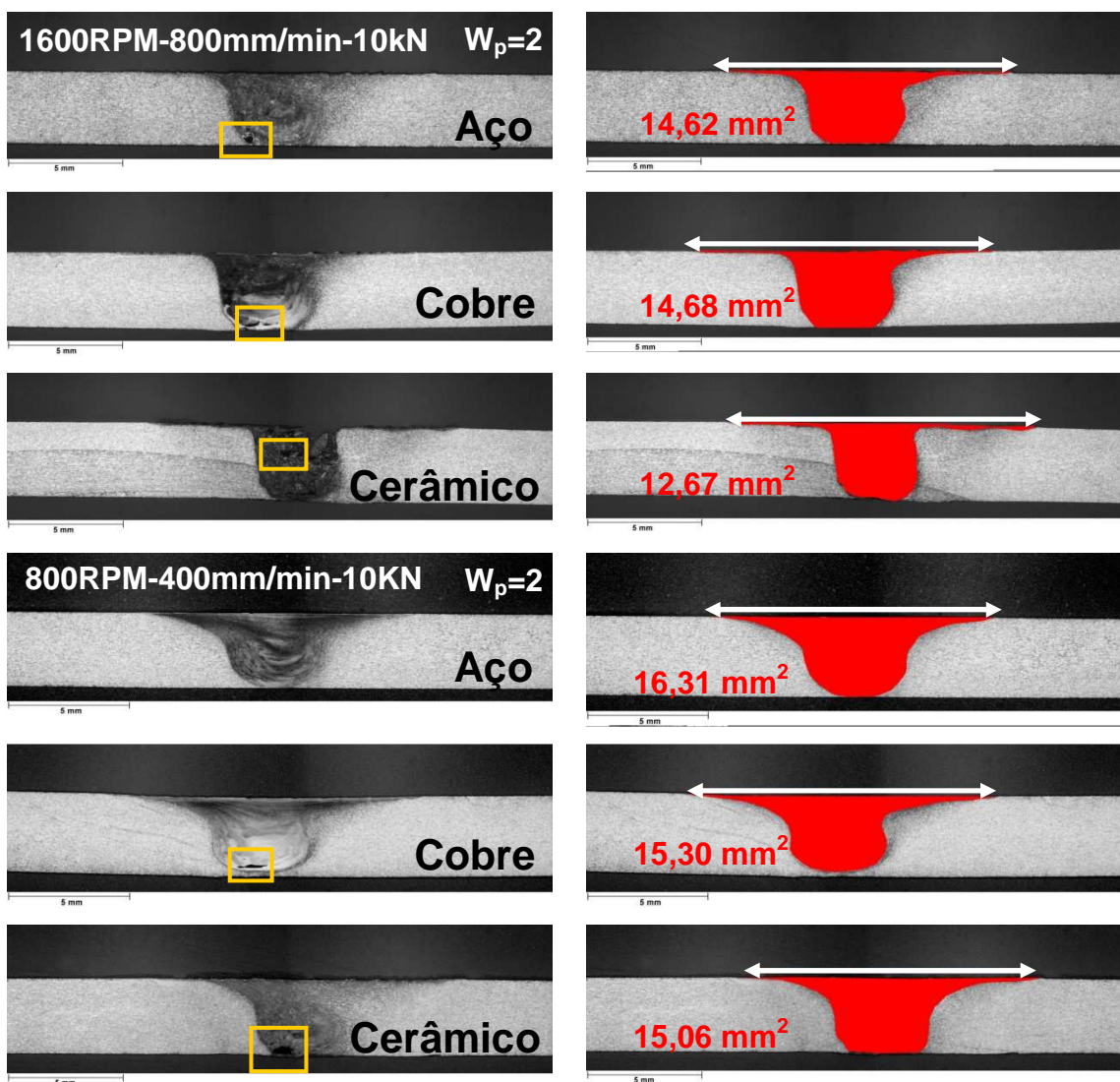


Figura 4.2. Macrografias da secção transversal das soldas FSW na liga 2024-T351, utilizando *backing* de aço, cobre e cerâmico e as áreas das lentes de soldagem formadas

Embora fosse esperado que uma maior velocidade de rotação pudesse causar maior aporte de temperatura, em função do aumento da fricção entre a ferramenta e o material, há uma redução do transporte vertical de material em comparação às soldas produzidas em baixas velocidades de rotação. A

contribuição dessa redução é em parte associada à menor velocidade de avanço da ferramenta (para o mesmo valor de W_p). Essa observação é confirmada quando se considera a influência do *backing* cerâmico, utilizando os mesmos parâmetros de processo.

Como notado, o aumento da velocidade de rotação da ferramenta resulta numa diminuição da área da lente de soldagem, porém se observa a formação de defeitos volumétricos. Isto porque o material na vizinhança da ferramenta se torna quente a ponto de inibir o contato íntimo do pino com o material em escoamento. Além disso, como há uma limitação no transporte vertical do material plastificado, a maior parte da energia é transferida para a ferramenta e não radialmente para as chapas soldadas.

A Figura 4.3 corrobora a influência da velocidade de rotação da ferramenta no tamanho da lente de soldagem formada: diminuindo a velocidade de rotação ($W_p=2$) para 400 RPM, sob as mesmas condições de *backing*, há aumento da área da lente de soldagem e das zonas termomecanicamente afetadas, que são deslocadas para longe do centro da junta (o fluxo de calor se dá radialmente para as chapas). Ainda, observa-se o pino quebrado para a condição do *backing* de cobre e a falta de penetração na raiz no caso do *backing* cerâmico.

Quando o calor é impedido de ser transferido para a raiz da solda, no caso do *backing* cerâmico, também pode ser observado que o aumento da área da lente de soldagem indica que uma condição de adesão entre a ferramenta e o material no estado plastificado é resultante do calor transferido para as chapas (cf. Figura 4.3).

A Figura 4.3 mostra que, durante a soldagem com *backing* de cobre, houve a fratura do pino, o que produziu a menor lente de soldagem formada para a menor velocidade de rotação investigada – velocidade de rotação de 400 RPM. Pode ser notado, no entanto, que o pino fraturou na base do *shoulder*. Isto ocorreu por conta da temperatura, que foi insuficiente para plastificar o material – a extração de calor verticalmente para raiz da solda no *backing* foi extrema –, e principalmente porque, sob essa condição, as forças

de torção (cisalhamento) foram intensas no pino a ponto de impedir o movimento de material.

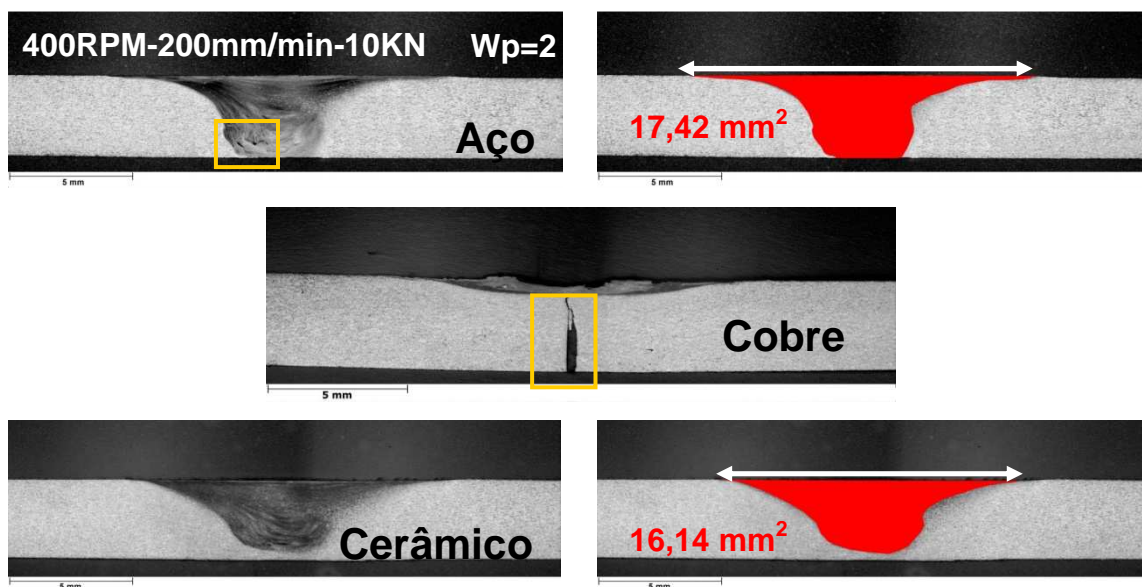


Figura 4.3. Macrografias da secção transversal das soldas FSW na liga 2024-T351, utilizando *backing* de aço, cobre e cerâmico e as áreas das lentes de soldagem formadas

A análise dos resultados das soldas FSW na liga 2024-T351 indica que a interação mecânica entre a ferramenta e o material influencia significativamente o tamanho e o formato da lente de soldagem formada. Aumentando a velocidade de rotação da ferramenta – para $W_p=2$ constante –, a área da lente de soldagem diminui, porque a deformação ocorre mais perto da ferramenta FSW – pino e *shoulder*. Além disso, quando a velocidade de rotação aumenta na condição do *backing* cerâmico, não há aumento da lente de soldagem (cf. Figura 4.3).

Isto não é por conta das baixas temperaturas, como mostra a Figura 4.4, mas sim porque a maior parte do calor gerado é transferida verticalmente para ferramenta FSW em vez de ser dissipada radialmente para o material nas regiões adjacentes à lente de soldagem. Para o menor parâmetro de soldagem investigado e na condição do *backing* de cobre não foram registrados dados de temperatura, pois ocorreu a quebra da ferramenta (pino).

Os perfis de microdureza mostram que os valores analisados são menores na lente de soldagem quando comparados ao material base para o caso do *backing* cerâmico e de aço. Os ciclos térmicos do processo de soldagem alteram a estrutura da liga. O tratamento da liga 2024-T351, endurecida por precipitação e envelhecida naturalmente, é modificado em decorrência do processamento termomecânico imposto pelo processo (envelhecimento).

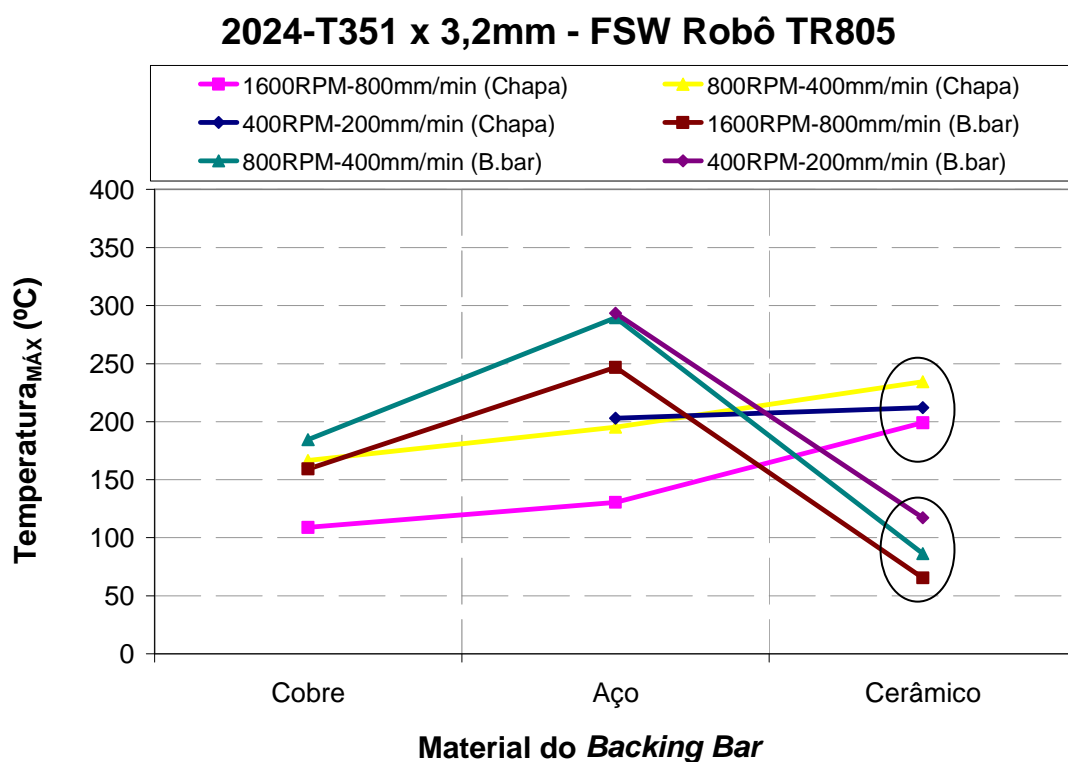
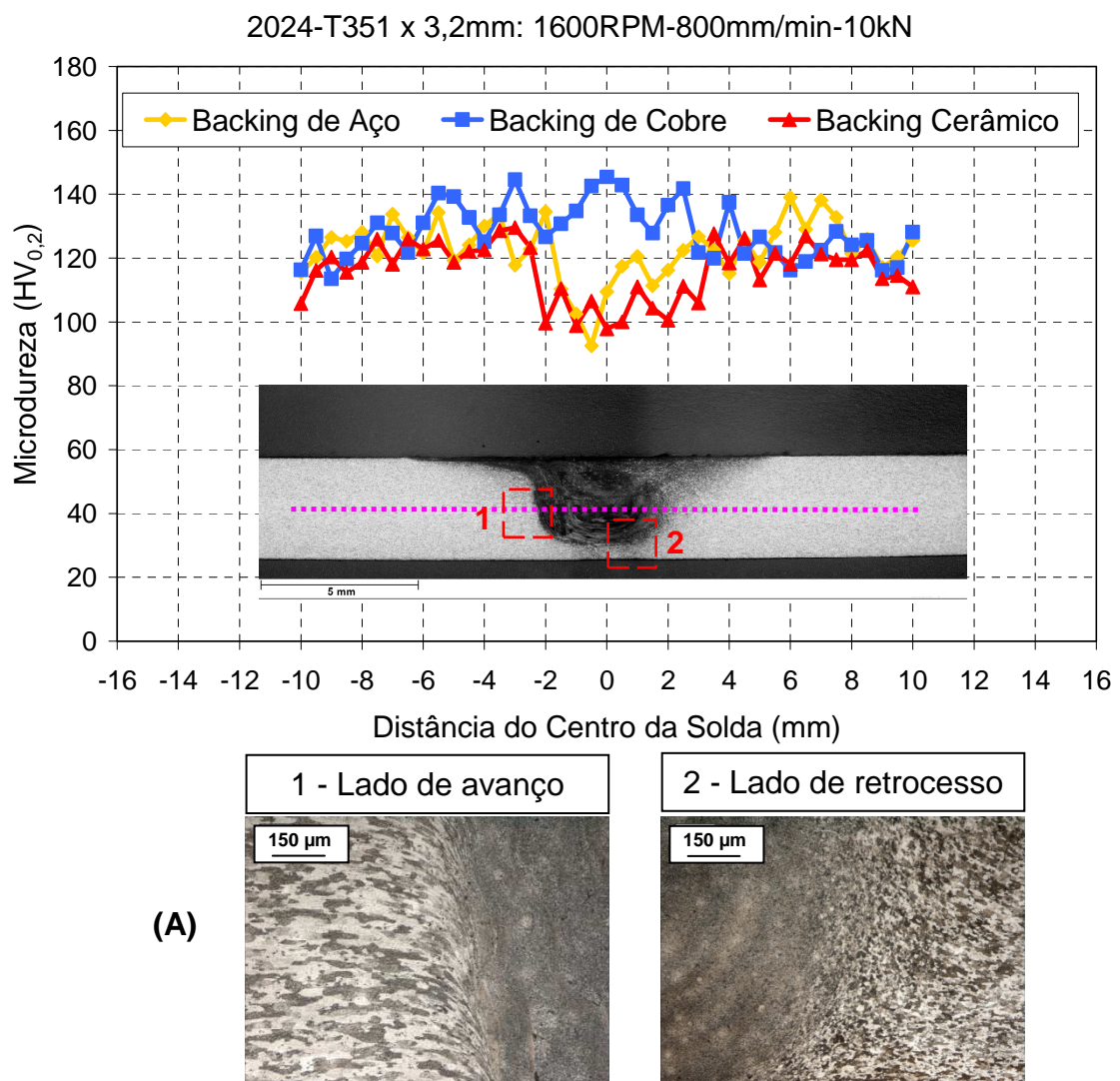


Figura 4.4. Temperaturas de pico registradas nas soldas da liga 2024-T351 no material e no *backing*, utilizando termopares do tipo K, para as três condições de *backing*: cobre, aço e cerâmico

Os valores de microdureza aumentam na lente de soldagem com o uso do *backing* de cobre, pois as baixas temperaturas de processamento medidas no material (cf. Figura 4.4) decorrem do fluxo de calor que é direcionado verticalmente para raiz da solda, uma vez que a condutividade térmica do cobre é quase seis vezes maior quando comparada à do aço. Como

consequência direta, a energia e o tempo gerados são insuficientes para ativar a degradação da microestrutura nas regiões da solda, como ocorre no caso do *backing* de aço e cerâmico.

É interessante notar que, no caso das medidas de microdureza nas três condições de *backing* (cf. Figura 4.5), o comprimento da região termicamente afetada (ZTA) mantém-se constante. O valor do comprimento aproxima-se do diâmetro do pino, o que indica que uma condição de escorregamento ocorre entre a ferramenta e o material em todos os parâmetros de soldagem. Similarmente, a microestrutura confirma essa condição de escorregamento, pois é observada a formação de defeitos volumétricos na lente de soldagem (cf. Figura 4.5 A-C).



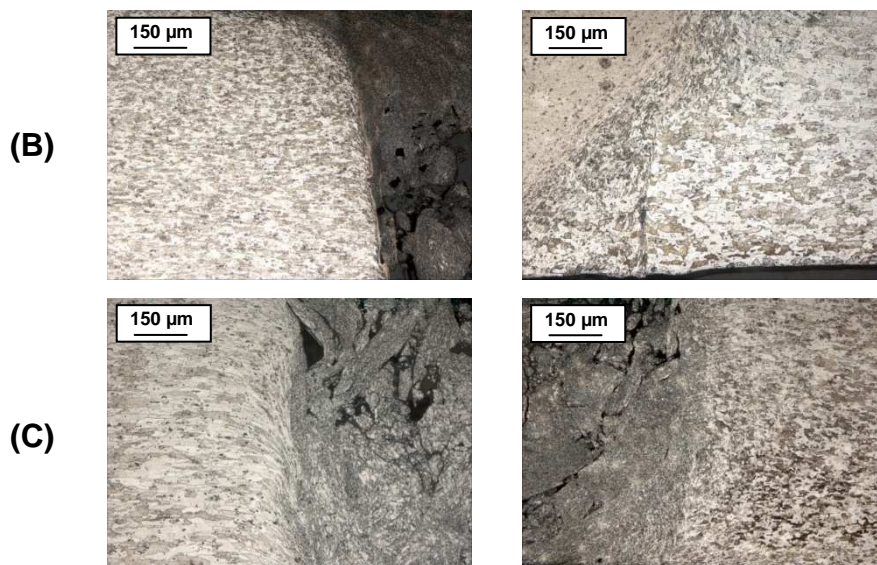


Figura 4.5. Perfis de microdureza da liga 2024-T351 em relação ao centro da lente de soldagem e as respectivas microestruturas das regiões 1) ZTA (de avanço) – e 2) raiz (de retrocesso) para as três condições de extração de calor do *backing*: A) cobre, B) aço e C) cerâmico

Durante a soldagem da liga 2024-T351, uma condição de escorregamento predomina entre a ferramenta e o material. Isto porque, em baixa velocidade de rotação da ferramenta (400 RPM), a área da lente de soldagem aumenta. A velocidade de movimentação do material – relacionada à rotação da ferramenta – e a deformação plástica do material na interface ferramenta/material estão perto da unidade, ou seja, ocorrem em um campo perto da ferramenta. Isso significa que o aquecimento gerado por esse contato predomina sob a indução de calor gerado por fricção a uma distância significativa da ferramenta. Como o fluxo de calor é transferido sempre das regiões mais quentes para as mais frias, a fonte de energia é dissipada radialmente para as regiões mais frias do material.

Apesar do aumento da velocidade de avanço da solda, quando a velocidade de rotação da ferramenta é superior a 800 RPM, uma condição de escorregamento ocorre primeiramente na interface entre o *shoulder* e a superfície do material. Isso resulta na diminuição da área da lente de soldagem formada. A rotação de 1600 RPM demonstra claramente que uma condição de

escorregamento ocorre entre o pino e o material. Nessa situação, não há mais o contato íntimo do material na interface com a ferramenta. As elevadas temperaturas geradas que não são transferidas para o material impossibilitam o aumento da área da lente de soldagem.

No caso do uso do *backing* cerâmico, quando o calor é impedido de ser transferido verticalmente para raiz da junta, o calor radialmente dissipado para o material é ainda mais acentuado. As soldas produzidas para rotação de 1600 RPM demonstram a formação de uma estrutura quase “lunar” na lente de soldagem, caracterizando uma região com muitas cavidades e falta de consolidação do material em uma zona que supostamente seria dinamicamente recristalizada. Como não há direção de influência – movimento vertical para o material – e como todo calor ocorre na interface material/ferramenta, as temperaturas elevadas produzidas são transferidas para a própria ferramenta e sua estrutura de suporte.

4.2. FSW da liga 6013-T6

As macrografias das lentes de soldagem formadas por soldas do tipo BOP na liga 6013-T6, utilizando *backing* de aço, são apresentadas na Figura 4.6. As soldas confirmam que a liga é facilmente deformada pelo processo FSW e que a maior parte da região deformada ocorre devido ao contato do *shoulder*, particularmente sob a condição de parâmetro a 900 RPM de rotação da ferramenta (cf. Figura 4.6). Observa-se que, aumentado a velocidade de rotação, a área da lente de soldagem diminui e sua geometria é alterada, especialmente na área de contato do *shoulder*

Observa-se que variações na velocidade de rotação da ferramenta influenciam o tamanho e formato da lente de soldagem. Essa evidência física corrobora a relação de deformação apresentada para liga 2024-T351.

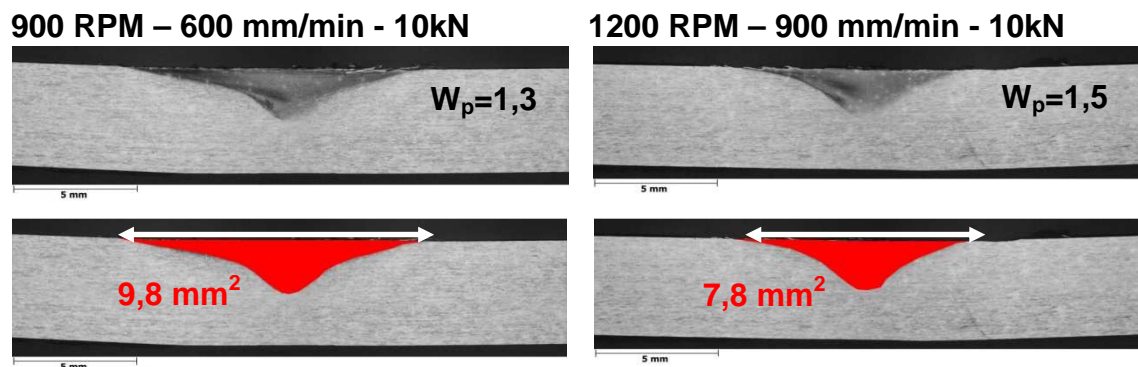


Figura 4.6. Macrografias transversais das soldas BOP na liga 6013-T6, utilizando *backing* de aço para duas condições de processamento

As áreas medidas para soldas de topo (cf. Figura 4.7) variaram significativamente em termos da geometria da lente de soldagem e da formação de defeitos volumétricos em resposta à extração de calor do *backing*. A Figura 4.7 demonstra que as áreas das lentes de soldagem diminuem em função do aumento da velocidade de rotação da ferramenta para todas as condições investigadas. Há uma grande área de deformação induzida pelo contato do *shoulder* – *backing* de aço – com a presença de um defeito volumétrico. O volume desse defeito formado diminui com o aumento da velocidade de rotação.

A variação dos parâmetros de soldagem claramente afeta a transferência de calor durante a soldagem FSW da liga 6013-T6, que é endurecida e envelhecida artificialmente. Diferentemente do comportamento da liga 2024-T351, o efeito mais significativo ocorre para o uso do *backing* cerâmico: há um aumento excessivo da área da lente de soldagem, como pode ser comprovado visualmente na Figura 4.7. Observa-se uma perda de material na superfície do cordão. As marcas em amarelo indicam a formação de um defeito volumétrico – *backing* de cobre –, e as setas em branco demonstram a área de contato do *shoulder*. Nota-se o aumento da lente de soldagem de 900 RPM ($W_p = 1,5$) a 1200 RPM ($W_p = 1,3$).

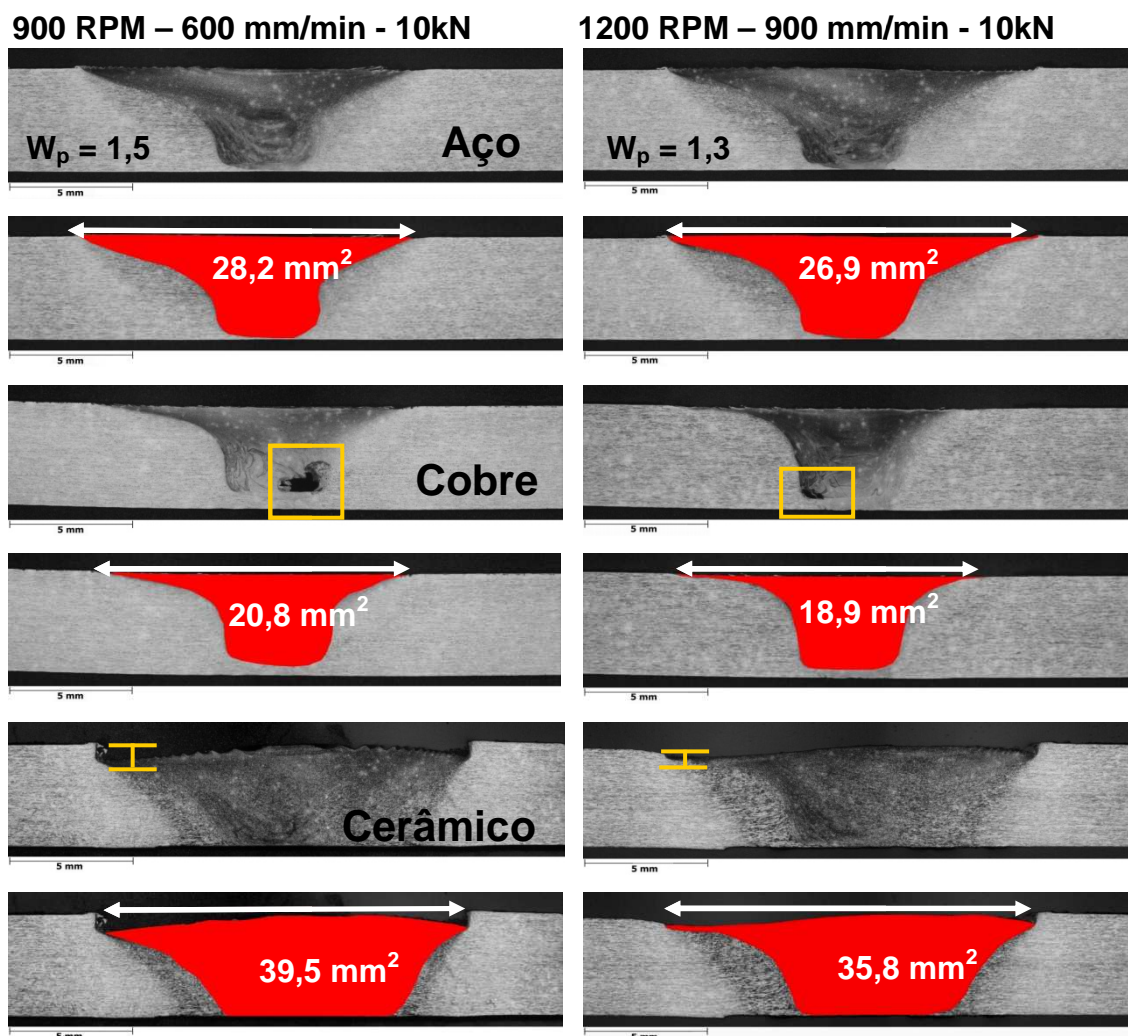


Figura 4.7. Macrografias das soldas FSW na liga 6013-T6, utilizando os três tipos de *backing* – aço, cobre e cerâmico – para duas condições de processamento

O aumento da área da lente de soldagem está associado diretamente à interação mecânica na interface ferramenta/material, que, nesse caso, se dá por uma condição de adesão entre o material plastificado em movimento ao redor da ferramenta. O *backing* cerâmico impede que o calor seja transferido verticalmente para a raiz da solda e o força para ser dissipado radialmente para as chapas.

Como discutido anteriormente, existem três direções para dissipação do calor gerado durante a soldagem FSW – material, ferramenta FSW e/ou

backing bar. As investigações das soldas produzidas com a liga 6013-T6 indicam que a transferência de calor, dadas as condições de processamento, não ocorre na interface de contato direto do material com a ferramenta, mas por cisalhamento longe do centro da junta. A condutividade térmica do *backing* influencia a extração de calor em todas as três direções. No entanto, no caso da liga 6013, o calor transferido permanece radialmente distribuído na direção do material.

A Figura 4.8 mostra as temperaturas de pico registradas no material em relação ao uso do *backing* de diferentes materiais. O calor que é dissipado para a chapa aumenta do *backing* de cobre para o cerâmico, uma vez que a extração de calor é diretamente proporcional à condutividade térmica do *backing*. Observa-se a influência da extração de calor em relação aos parâmetros de soldagem investigados. Como há menor temperatura no material (cf. Figura 4.8), o defeito volumétrico observado com o uso do *backing* de cobre aumenta quando a velocidade de rotação diminui (cf. Figura 4.7).

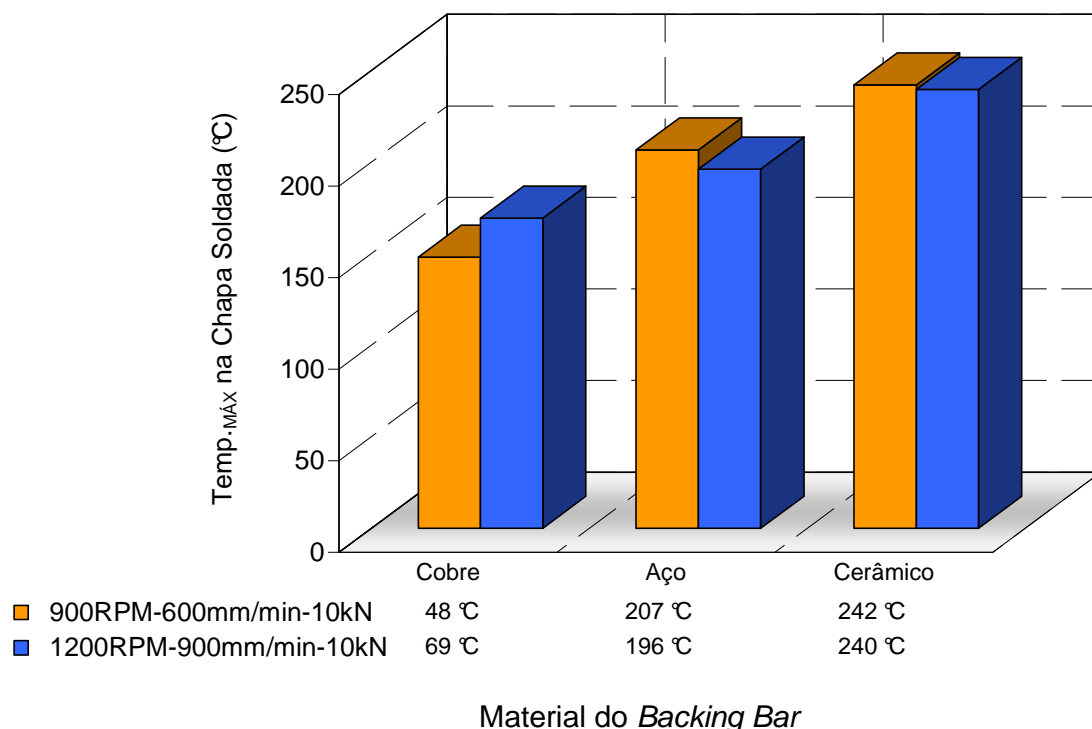


Figura 4.8. Temperaturas de pico registradas nas chapas soldadas com a liga 6013-T6 em duas combinações de parâmetros e três condições de *backing*

A relação entre as temperaturas medidas no material e a geometria da lente de soldagem é bastante marcante durante a soldagem FSW da liga 6013-T6. Quando a transferência de calor é reduzida para o *backing* – reduzindo a condutividade térmica do material que o compõe –, pode ser observado que temperaturas elevadas de processo levam à formação de grandes áreas da lente de soldagem.

Essa correlação está graficamente apresentada na Figura 4.9, na qual a temperatura é dada em função do tamanho da lente de soldagem formada. As temperaturas mais elevadas foram registradas na ferramenta e nas chapas para o caso do uso do *backing* cerâmico, quando o calor é impedido (isolado) de ser escoado pela raiz da solda. Neste caso, o gradiente de temperatura entre a ferramenta e o material é menor, uma vez que o calor gerado está concentrado na região da junta, o que indica instabilidade térmica nessas condições de processamento.

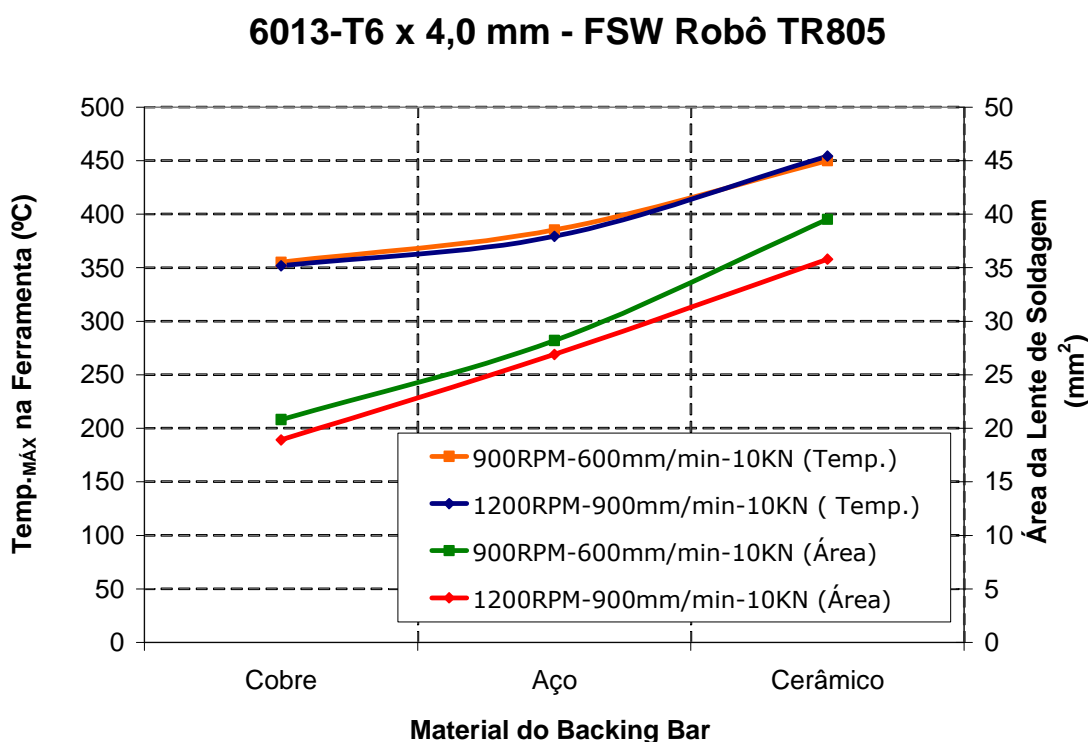
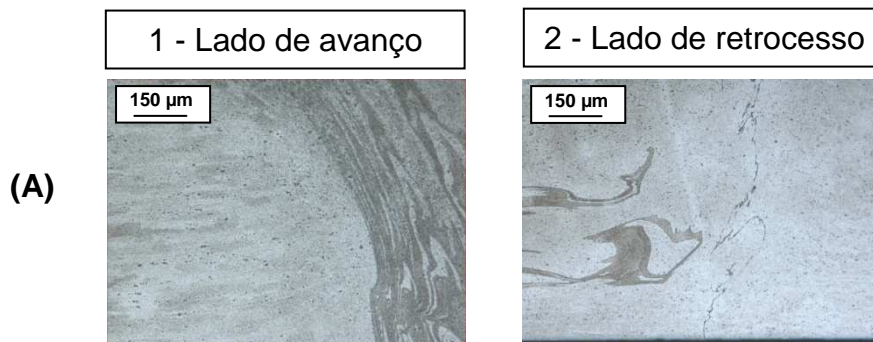
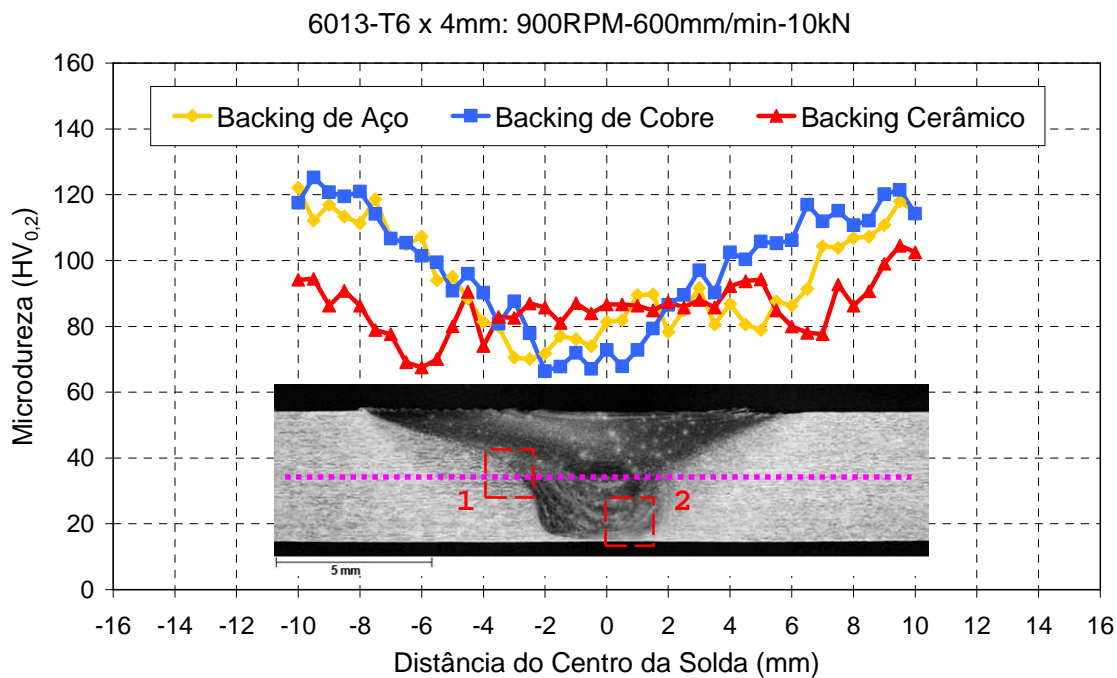


Figura 4.9. Temperaturas de pico registradas na ferramenta das soldas na liga 6013-T6 em função do tamanho da lente de soldagem formada

Os perfis de microdureza na soldagem da liga 6013-T6 estão apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11, para 900 e 1200 RPM, respectivamente. É evidente que, no caso do *backing* cerâmico, os perfis de microdureza correspondem à intensa plasticidade do material nas zonas deformadas, uma vez que quase todo o calor gerado é dissipado radialmente para o material. Além disso, é possível notar que a ZTA e a ZTMA apresentam menores valores de dureza devido à degradação térmica imposta pelo processamento termomecânico (cf. Figuras 4.8 e 4.9). Essa relação é mais evidente a 1200 RPM: quando a velocidade de rotação aumenta, a área de influência do *shoulder* aumenta em função da condição de deformação e atrito, o que gera maior degradação da microestrutura e, conseqüentemente, menores valores de microdureza.



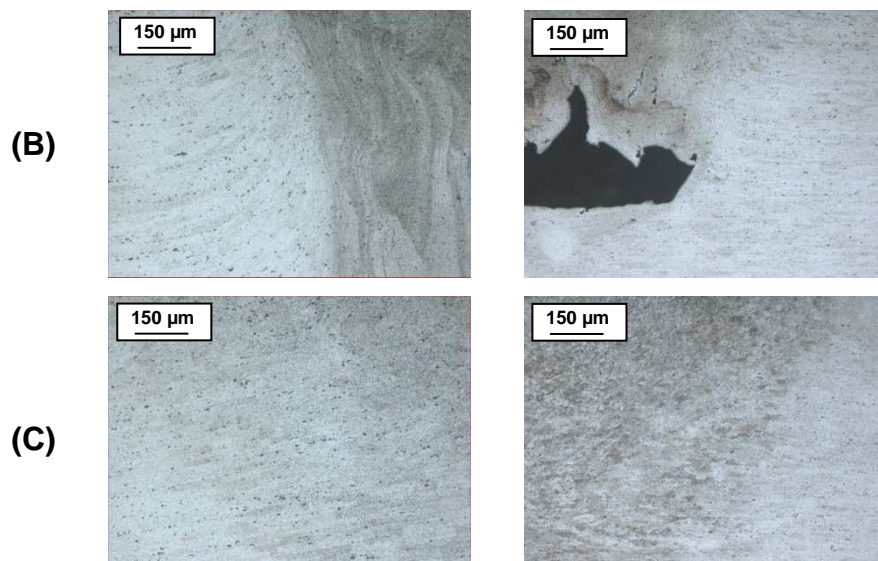
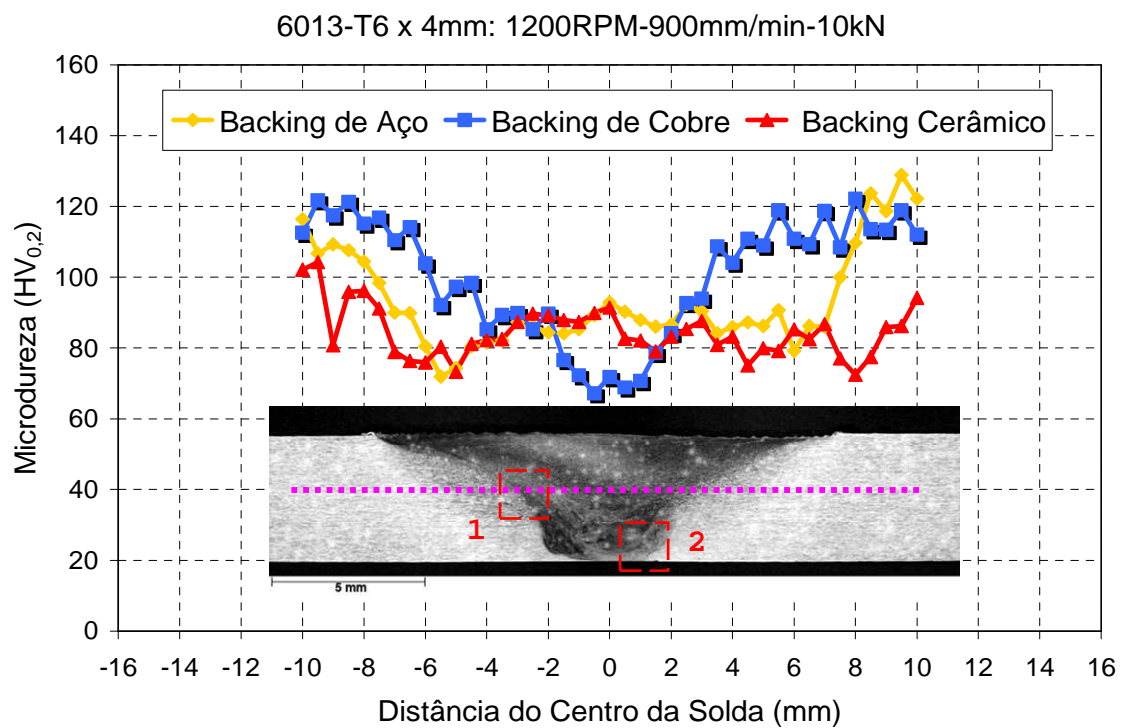


Figura 4.10. Perfis de microdureza da liga 6013-T6 em relação ao centro da lente de soldagem e as respectivas microestruturas das regiões 1) ZTA (de avanço) – e 2) raiz (de retrocesso) para as três condições de extração de calor do *backing*: A) aço, B) cobre – detalhe do defeito volumétrico – e C) cerâmico



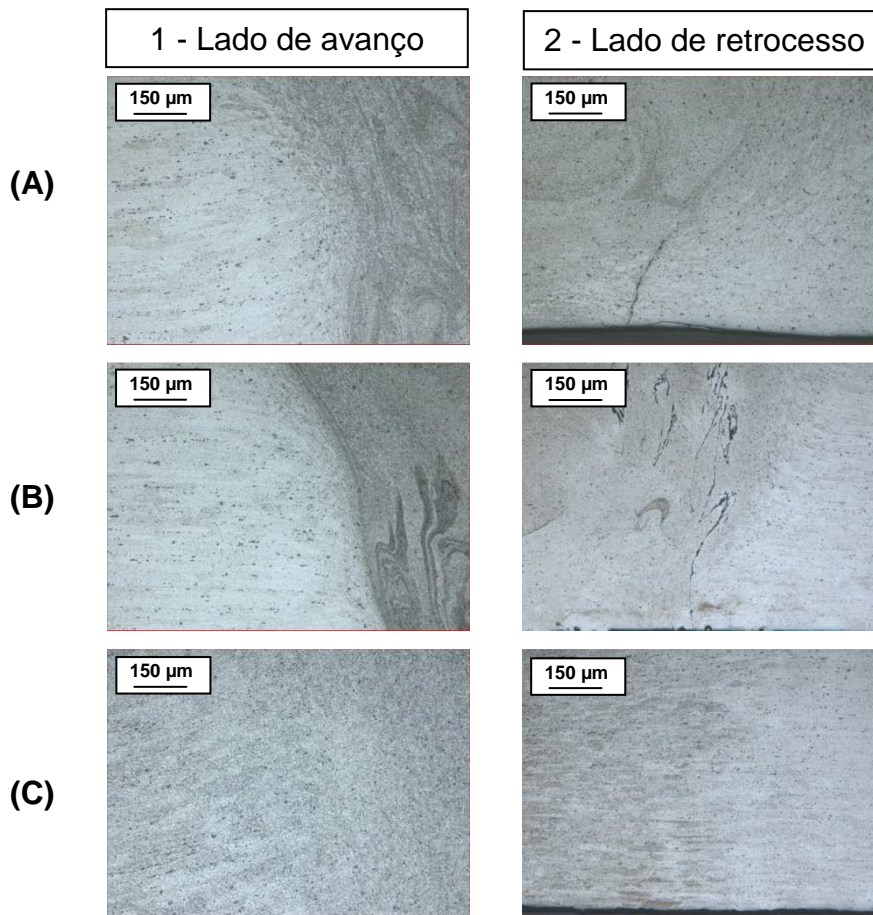


Figura 4.11. Perfis de microdureza da liga 6013-T6 em relação ao centro da lente de soldagem e as respectivas microestruturas das regiões 1) ZTA (de avanço) – e 2) raiz –(de retrocesso) para as três condições de extração de calor do *backing*: A) aço, B) cobre e C) cerâmico

É interessante ressaltar que a 1200 RPM de rotação, a influência da extração de calor no *backing* de aço é dominada pelas condições de deformação do material durante o escoamento. Observa-se que o perfil de microdureza nessa condição se aproxima do perfil traçado para as soldas produzidas com *backing* cerâmico. O comprimento da zona degradada se estende pela ZTA e ZTMA a uma distância de 5 mm do centro da solda para ambos os lados de avanço e retrocesso.

No uso do *backing* de cobre, apesar dos baixos ciclos térmicos associados à elevada extração de calor na raiz, os baixos valores de

microdureza na lente de soldagem estão relacionados com a dissolução dos precipitados em função do fenômeno de recristalização dinâmica. Nota-se, nesse caso, que a extensão da lente de soldagem é igual ao diâmetro do pino.

A relação entre a deformação e os mecanismos de geração e transferência de calor para as soldas FSW produzidas na liga 6013-T6 é confirmada nas macrografias das Figuras 4.12 e 4.13. Nessa condição crítica, foi utilizado *backing* cerâmico para impedir a transferência de calor na direção vertical. Para ambos os parâmetros investigados, a velocidade de rotação da ferramenta foi de 2700 RPM e 3600 RPM respectivamente.

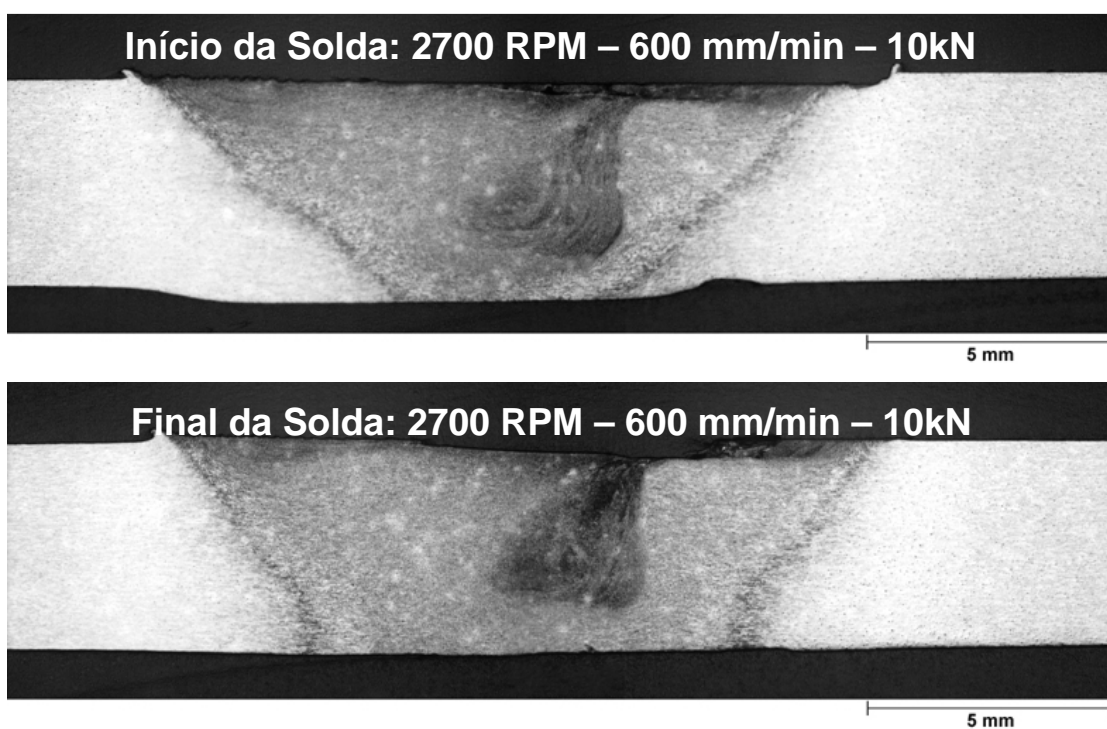


Figura 4.12. Macrografias das soldas FSW na liga 6013-T6 no início e final do cordão utilizando *backing* cerâmico, parâmetros de soldagem: velocidade de rotação de 2700 RPM, velocidade de avanço de 900 mm/min e força axial de 10 kN

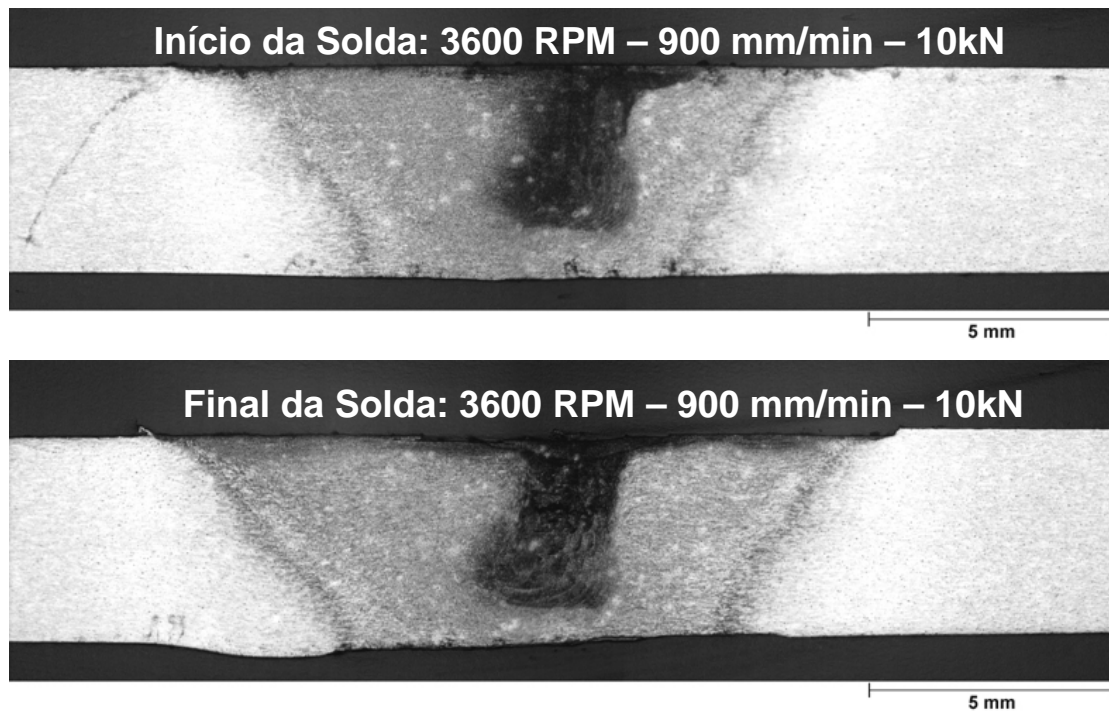


Figura 4.13. Macrografias das soldas FSW na liga 6013-T6 no início e final do cordão utilizando *backing* cerâmico, parâmetros de soldagem: velocidade de rotação de 3600 RPM, velocidade de avanço de 900 mm/min e força axial de 10 kN

As macrografias – registradas a uma distância de 500 mm do início e do final de cada solda – demonstram que a lente de soldagem aumenta de tamanho em função da posição ao longo do comprimento do cordão. O aumento observado entre o início e o final da solda não pode ser atribuído ao calor refletido para o fim do cordão. Por essa razão, o contato íntimo entre a ferramenta e o material durante a soldagem FSW da liga 6013-T6 predomina sob uma condição de adesão na interface do material.

A liga 6013-T6 tem baixa resistência à deformação quando comparada à liga 2024-T351 – apesar das propriedades mecânicas serem parecidas. Essa diferença pode ser atribuída à composição química da liga, que contém aproximadamente 96% de alumínio, comparada aos 94% da liga 2024-T351. Assim, se inicialmente o aporte de energia ocorresse somente devido à fricção, o fato da ferramenta estar em constante movimento na junta ao longo da direção de soldagem, induziria a deformação superficial para uma extensão

muito maior que no caso da liga 2024-T351, como se essa deformação gerasse calor em um campo distante da ferramenta. Isto, somado à elevada condutividade térmica da liga 6013 (35% superior) quando comparada à liga 2024, significa que, independentemente do calor que é gerado, a direção da transferência é para o próprio material.

Esse modo de transferência de calor é mais evidente no caso do uso do *backing* cerâmico. Quando o calor é impedido (isolado) de ser transferido verticalmente para baixo da junta, a lente de soldagem se torna ainda maior e mais extensa, sem a formação de um núcleo bem definido. A região que compreende a lente de soldagem fica totalmente dominada pela área de contato do *shoulder*, em que a plasticidade do material, devido à exposição à elevada temperatura, é induzida na região como um todo.

Assim, para controlar a degradação microestrutural do metal base, durante a soldagem FSW de ligas de alumínio da série 6xxx, é necessário não impedir a transferência de calor da ferramenta – aumentar o gradiente térmica entre a ferramenta e o material – e não aumentar a transferência de calor verticalmente para o *backing*, a tal ponto em que defeitos volumétricos são formados, como no caso do uso do *backing* de cobre.

Este estudo produziu evidências de que as condições de transferência de calor durante a soldagem FSW diferem em função do tipo de liga – composição química –, dos parâmetros de processo e da condutividade térmica do *backing bar* – propriedade intrínseca de cada material analisado: cobre – bom condutor –, aço e cerâmico – isolante térmico. As soldas produzidas em chapas de alumínio de 4 mm de espessura da liga 6013-T6 e em chapas de 3,2 mm de espessura da liga 2024-T351 indicaram que a interação na interface entre a ferramenta e o material, em estado plastificado, induz o modo da transferência de calor e o escoamento do material na junta soldada.

A influência do fluxo de calor nas propriedades mecânicas e nas características microestruturais das soldas FSW se dá primeiramente em resposta à resistência à deformação plástica, que é característica intrínseca do próprio material. Pode-se afirmar essa característica é fator condicional que determina o escoamento viscoplástico durante o processamento

termomecânico: para ligas com elevada resistência à deformação – ligas da série 2xxx – é formada uma interface de escorregamento entre o material e a ferramenta; para ligas que se deformam facilmente – ligas da série 6xxx – a interação material/ferramenta se dá por adesão.

5. CONCLUSÕES

Concluiu-se que a formação de juntas sem a presença de defeitos está associada a baixas velocidades de rotação durante a soldagem FSW de ligas da série 2xxx, como a liga 2024-T351. Embora não foram registrados benefícios de escoamento do material com o uso dos *backing* de cobre ou cerâmico ou com o aumento da velocidade de rotação – é evidente a formação de defeitos volumétricos para ambas as condições –, observou-se que os valores de microdureza aumentam na lente de soldagem com o uso do *backing* de cobre, em função

Para a soldagem FSW da liga 6013-T6, foi demonstrado que a geração e a transferência de calor são dominadas por cisalhamento, em um campo muito longe da ação da ferramenta – do centro da junta. Assim, além de trabalhar com uma janela de parâmetros restrita, faz-se necessário o uso de ferramentas que estabilizam a transferência de calor durante o processamento.

Deste modo, para as ligas que têm elevada resistência à deformação a estabilidade térmica e o controle da transferência do calor gerado desempenham um papel de menor relevância na soldagem FSW, uma vez que a seleção dos parâmetros – velocidades de rotação da ferramenta e avanço da solda – pode ser ajustada para suprir as dificuldades de fluxo de calor e escoamento do material. Este, no entanto, não é o caso das ligas que apresentam baixa resistência à deformação e são artificialmente envelhecidas por tratamento térmico, como a liga 6013-T6.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A variação de materiais que compõe o *backing bar* não teve como principal objetivo oferecer melhores condições de processamento, mas sim proporcionar um melhor entendimento das relações da geração de energia (térmica) e dissipação do calor durante a soldagem FSW.

Por um lado, o uso do *backing* de cobre pode favorecer o gerenciamento térmico do processo FSW na soldagem de juntas dissimilares. Por outro, a construção de um sistema de arrefecimento que facilita a extração de calor na ferramenta – aumentando o gradiente térmico entre o metal e a ferramenta –, essencialmente nas partes que estão em contato direto com o material – pino e *shoulder* – como comprovado nas soldas produzidas com o *backing* cerâmico – pode garantir a estabilidade térmica do processo durante a soldagem de ligas que são facilmente deformadas. Isto porque parte do calor gerado é transmitida de volta para a ferramenta e não dissipada radialmente para o material ou para o *backing bar*.

O gerenciamento das condições térmicas do processamento FSW é tema pouco discutido na literatura. As análises existentes concentram-se em simulações que não representam com fidelidade a realidade do processo principalmente por considerarem constantes as propriedades físicas do material em função da temperatura. Por esse motivo, estudos empíricos são fundamentais para o melhor entendimento do processo FSW acerca do fluxo de calor e do escoamento do material nas zonas deformadas. A proposta é analisar as soldas FSW em ligas dissimilares com uso de *backing* fabricado em diferentes materiais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ZETTLER, R. et al. A study on material flow in FSW of AA 2024-T351 and AA 6056-T4 alloys. In: INTERNATIONAL FSW SYMPOSIUM, 5th, set. 2004, Metz (FRA). **Anais do 5th International FSW Symposium**. Metz (FRA): [s.e.], 2004. [s.p.].
- [2] MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. Friction stir welding and processing. **Materials Science and Engineering**, [s.l.], [s.v.], [s.n.], p. 1-78, 2005.
- [3] DAVIS, J. R. (ed.). **Aluminum and aluminum alloys**. 3 ed. Ohio (EUA): ASM, 1996 (ASM Specialty Handbook).
- [4] ANDRADE, L. V. **Weld defect formation in FSW using different downward forces and the influence of weld pitch using different rotational and travel speeds in similar FSW of 4-mm thick 6013-T6 aluminium alloys**. Geesthacht (ALE): GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 2005.
- [5] THE WELDING INSTITUTE (TWI). **Materials Joining Technology Home Page**. Disponível em: <www.twi.co.uk>. Acesso em: 14 mar. 2007.
- [6] MARCONATO, E. A. **Mechanical and microstructural investigation on root flaws in 3mm thick 6013-T6 FSW joints**. Geesthacht (ALE): GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 2006.
- [7] SCHMIDT, H.; HATTEL, J. Modeling heat flow around tool probe in friction stir welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, [s.l.] v. 10, n.º 2, [s.p.], 2005.
- [8] RUSSELL, M. J.; SCHERCLIFF, H. R. Analytical modelling of microstructure development in friction stir welding. In: INTERNATIONAL FSW SYMPOSIUM, 1st, jun. 1999, Thousand Oaks (EUA). **Anais do 1st International FSW Symposium. Thousand Oaks (EUA)**: [s.e.], 1999. [s.p.].
- [9] POLMEAR, I. J. Aluminium alloys: a century of age hardening. **Materials forum**, [s.l.], v. 28, [s.n.], [s.p.], 2004.
- [10] COLEGROVE, P. 3 Dimensional flow and thermal modeling of the friction stir welding process. In: INTERNATIONAL FSW SYMPOSIUM, 2nd, 2000,

- Stockholm (SUE). **Anais do 2nd International FSW Symposium. Estocolmo (SUE)**: [s.e.], 2000. [s.p.].
- [11] LIENERT, T.; J. STELLWAG, W.; L. LEHMAN, L. R. Heat inputs, peak temperatures and process efficiencies for FSW. In: INTERNATIONAL FSW SYMPOSIUM, 4th, mai. 2003, Utah. (EUA). **Anais do 4th International FSW Symposium. Utah (EUA)**: [s.e.], 2003. [s.p.].
- [12] ULYSSE, P. Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **42**, [s.l.], p.1549-1557, 2002.
- [13] NADAN, R. ROY, G. G. LIENERT, T. J. DEBROY, T. Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel, **Acta Materialia** **55**, [s.l.], p.883-985, 2000.
- [14] Frigaard, Ø. Grong, Ø. Bjørneklett, B. Midling, O. T. Modelling of thermal and microstructure fields during friction stir welding of aluminium alloys, **Anais do 1st International FSW Symposium. Thousand Oaks (EUA)**: [s.e.], 1999.
- [15] VILAÇA, P. et al. Quality assessment of friction stir welding joints via an analytical thermal model, *i*STIR. **Materials Science and Engineering A**, [s.l.], v. 445-6, [s.n.], p. 501-8, 2007.
- [16] NORTH, T. H. BENDZSAK, G. J. SMITH, C. Material properties relevant to 3-D FSW modeling, **Anais do 2nd International FSW Symposium. Stockholm, Sweden**: [s.e.], 2000 [s.p.].
- [17] DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 2. ed. NY: McGraw Hill, 1961.
- [18] Reed-Hill, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1982.

São Carlos, 24 de setembro de 2009

Ilmo. Sr. Prof. Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa
Coordenador do PPG-CEM
UFSCar
Campus de São Carlos-SP

Senhor Coordenador,

Encaminho a V.S^a os originais da dissertação de mestrado de MARCIO JOSÉ CUCCOLO ROSALES intitulada EFEITO DOS MATERIAIS DO *BACKING BAR* NA GEOMETRIA E DUREZA DE JUNTAS SOLDADAS POR FSW EM LIGAS DE ALUMÍNIO 6013 E 2024, defendida perante banca examinadora em 12 / 08 / 2009, originais esses que sofreram revisão de nossa parte incorporando as sugestões feitas pelos examinadores, sendo considerada a versão definitiva dessa dissertação de mestrado.

Solicito nesta oportunidade a gentileza de tomar as providências cabíveis para seu encaminhamento aos órgãos competentes.

Ao ensejo, subscrevo-me,

Cordialmente,

Prof. Dr. Nelson Guedes de Alcantara