

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

Gerson Shiguekazu Shimada

**Caracterização de junta soldada de liga de alumínio 5052
por FSW (Friction Stir Welding)**

São Paulo

2007

Gerson Shiguekazu Shimada

Caracterização de junta soldada de liga de alumínio 5052 por FSW (Friction Stir Welding)

**Trabalho Apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de
engenheiro metalúrgico.**

Área de estudo: Soldagem

**Orientador: Prof. Dr. Sergio Duarte
Brandi**

São Paulo

2007

Agradecimentos

Agradeço principalmente aos meus pais que me deram todo o apoio possível durante toda minha vida.

Agradeço ao Professor Doutor Sergio Duarte Brandi pela confiança, conselhos e principalmente pela amizade. Agradeço também ao Engenheiro Fredy Poestcher pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A CBA Companhia Brasileira de Alumino e seus funcionários em especial ao técnico Miguel que me ajudou com as metalografias apresentadas neste trabalho.

Aos técnicos do LFS (Laboratório de fenômenos de superfície), em especial a técnica Fernanda pela ajuda com o equipamento de microdureza.

Aos meus amigos de graduação pelo apoio e amizade durante todo o período de graduação.

Resumo

Atualmente o uso do alumínio como matéria prima nos mais diversos setores da indústria, devido as suas características como: baixa densidade, boa maleabilidade, ótima condução térmica, resistência mecânica e a corrosão. Na indústria aeroespacial em específico o alumínio é largamente utilizado. O incremento na aplicação da soldagem por fricção linear possibilitou um grande avanço na soldagem de alumínio, pois este processo é totalmente automatizado e trás grandes vantagens como baixa porosidade e excelente resistência mecânica.

Este trabalho consiste do estudo da solda por fricção linear ou FSW (Friction Stir Welding) em alumínio da série 5052. O Processo de soldagem por fricção linear ou simplesmente FSW foi desenvolvido e patenteado pelo TWI (The Welding Institute), em Cambridge, na Inglaterra, em dezembro de 1991 [1].

Sumário

Lista de figuras

Lista de tabelas

1 objetivos	1
2 Revisão Bibliográfica	1
2.1 Alumínio	1
2.1.1 Sistema de classificação das ligas de Alumínio	3
3 Soldagem por fricção linear – FSW	6
3.1 Vantagens e Desvantagens do processo FSW	8
3.2 Possíveis defeitos no processo FSW	13
3.3 Parâmetros do processo	14
3.4 Regiões Da Solda	16
4- Materiais e métodos	16
5- Resultados	17
5.1 Caracterização microestrutural	17
5.2 Ensaio de Tração	28
5.3 Microdureza	31
6 Discussão	33
7 Conclusão	34
8 Referências bibliográfica	35

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplos de aplicação do processo FSW	7
Figura - 2 Esquema do processo	7
Figura 3 - Exemplos de geometrias possíveis pelo processo FSW	10
Figura 4 - Furo resultante após o processo de soldagem	12
Figura 5 - Exemplo de defeito “vazio”	13
Figura-6 - Esquema do ferramental para FSW	14
Figura 7 – Esquema de posições das micrografias da secção transversal	18
Figura 8 – Micrografia da secção transversal na região 1. Aumento: 200X	18
Figura 9 – Micrografia da secção transversal na região 2. Aumento: 200X.	19
Figura 10 - Micrografia da secção transversal na região 3. Aumento: 200X	19
Figura 11 – Micrografia da secção transversal na região 4. Aumento:50X	20
Figura 12 – Micrografia da secção transversal na região 5. Aumento: 50X	20
Figura 13 - Micrografia da secção transversal na região 6. Aumento: 50X	21
Figura 14 – esquema de localização das micrografias da parte superior e inferior da chapa	21
Figura 15 - Micrografia da parte superior na região 1. Aumento: 50X	22
Figura 16 - Micrografia da parte superior na região 2. Aumento: 50X	22
Figura 17 - Micrografia da parte superior na região 3. Aumento: 50X	23
Figura 18 - Micrografia da parte superior na região 1. Aumento: 200X	23
Figura 19 - Micrografia da parte superior na região 4. Aumento: 50X	24
Figura 20 - Micrografia da parte superior na região 5. Aumento: 50X	24

<u>Figura 21</u> - Micrografia da parte inferior na região 1. Aumento: 50X _____	25
<u>Figura 22</u> - Micrografia da parte inferior na região 2. Aumento: 50X _____	25
<u>Figura 23</u> - Micrografia da parte inferior na região 3. Aumento: 50X _____	26
<u>Figura 24</u> - Micrografia da parte inferior na região 3. Aumento: 50X _____	26
<u>Figura 25</u> - Micrografia da parte inferior na região 4. Aumento: 50X _____	27
<u>Figura 26</u> - Micrografia da parte inferior na região 5. Aumento: 50X _____	27
<u>Figura 27</u> – Curva tensão x deformação para o metal de base _____	28
<u>Figura 28</u> – Curva tensão x deformação para a junta soldada _____	28
<u>Figura 29</u> – Esquema de localização das medidas de alongamento _____	30
<u>Figura 30</u> - ilustração das posições em que foram medidas as microdurezas ____	31
<u>Figura 31</u> - perfil de microdureza, com 50g, da vista de topo do cordão _____	31
<u>Figura 32</u> - perfil de microdureza, com 50g, da vista frontal do cordão _____	32
<u>Figura 33</u> - perfil de microdureza, com 50g, da parte inferior do cordão _____	32

Lista de Tabelas

<u>Tabela 1</u> – Características do alumínio e suas ligas _____	2
<u>Tabela 2</u> – Classificação Das ligas de Alumino Fundidas _____	3
<u>Tabela 3</u> – Classificação Das ligas de Alumino trabalhadas mecanicamente _____	4
<u>Tabela 4</u> – Tipos de têmpera _____	5
<u>Tabela 5</u> – Vantagens e limitações do processo FSW _____	9
<u>Tabela 6</u> – Tensões residuais em alumínio 7050Al-T7451 _____	12
<u>Tabela 7</u> – Possíveis defeitos es suas localizações _____	13
<u>Tabela 8</u> – Composição de liga 5052 _____	16
<u>Tabela 9</u> – Limite de resistência dos corpos de prova _____	29
<u>Tabela 10</u> – Alongamentos total e parciais _____	30

1-OBJETIVOS:

Os objetivos deste trabalho são:

- caracterizar microestruturalmente as diferentes zonas de uma solda realizada por FSW em liga de alumínio 5052.
- realizar ensaios mecânicos de tração e microdureza para avaliar as propriedades da junta soldada.

2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

Atualmente o uso do alumínio como matéria prima nos mais diversos setores da indústria, devido as suas características como: baixa densidade, boa maleabilidade, ótima condução térmica, resistência mecânica e a corrosão. Na indústria aeroespacial em específico o alumínio é largamente utilizado. O incremento na aplicação da soldagem por fricção linear possibilitou um grande avanço na soldagem de alumínio, pois este processo é totalmente automatizado e traz grandes vantagens como baixa porosidade e excelente resistência mecânica.

Este trabalho consiste do estudo da solda por fricção linear ou FSW (Friction Stir Welding) em alumínio da série 5052. O Processo de soldagem por fricção linear ou simplesmente FSW foi desenvolvido e patenteado pelo TWI (The Welding Institute), em Cambridge, na Inglaterra, em dezembro de 1991 [1].

2.1 Alumínio

O Alumínio é o metal mais abundante da crosta terrestre na forma de seu minério a bauxita. A estrutura cristalina do elemento alumínio é cúbica de faces centradas (quatro átomos por célula unitária e numero de coordenação doze). Apresenta ponto de fusão de 660°C e tem massa específica de 2,6978g/cm³ [2].

Atualmente o alumínio é amplamente utilizado nas mais diversas áreas de engenharia e outros ramos e os principais atributos do Alumínio estão descritos na tabela a seguir.

Tabela 1 – Características do alumínio e suas ligas [Adaptada da ref. 3.]

Atributos	Exemplos
Leveza	Nos transportes representa menor consumo de combustível e menor desgaste, mais eficiência e capacidade de carga. Nas embalagens dá praticidade e portabilidade, por seu peso reduzido em relação a outros materiais.
Condutibilidade	Associada à leveza, a condutividade elétrica é um atributo fundamental para a aplicação do alumínio na transmissão de energia em fios e cabos. Nas embalagens, nenhum outro material é tão bom condutor térmico quanto o alumínio.
Impermeabilidade e opacidade	Especialmente importante no uso de embalagens pois com estas características o alumínio evita a deterioração dos produtos, não permitindo a passagem de umidade, oxigênio e luz.
Alta relação resistência/peso	Nos transportes, confere desempenho excepcional a qualquer parte de equipamento de transporte que consuma energia para se movimentar. Aos utensílios confere durabilidade e manuseio seguro, com facilidade de conservação.
Beleza	Aparência agradável e moderna em qualquer aplicação, por ser um material nobre, limpo, que não se deteriora com o passar do tempo, mantendo sempre o aspecto original e permitindo soluções criativas de design.
Resistência à corrosão	Facilita a conservação e a manutenção das obras, em produtos como portas, janelas, forros, telhas e revestimentos usados na construção civil, bem como em equipamentos, partes e estruturas de veículos de qualquer porte. Nas embalagens é fator decisivo quanto à higienização e barreira à contaminação.
Moldabilidade e soldabilidade	Facilidade de conformação, devido à alta maleabilidade e ductilidade, possibilitando formas adequadas aos mais variados projetos.
Resistência e dureza	A robustez do alumínio se traduz em qualidades estruturais, com excelente comportamento mecânico, aprovado em aplicações como aviões e trens.
Possibilidade de muitos acabamentos	Anodização e pintura, assumindo a aparência adequada para aplicações em construção civil, pro exemplo, com acabamentos que reforçam ainda mais a resistência natural do material à corrosão.
Reciclabilidade	Depois de muitos anos de vida útil, segura e eficiente, o alumínio pode ser reciclado, com recuperação de parte significativa do investimento e poupança de energia, como já acontece largamente no caso da lata de alumínio. Além disso, o meio ambiente é beneficiado pela redução de resíduos e economia de matérias primas propiciadas pela reciclagem.

2.1.1 Sistema de classificação das ligas de alumínio

As ligas de alumínio são classificadas de acordo com seus principais elementos de liga presentes e pelo método de processamento final utilizado, isto é, se a matéria-prima é fundida (cast alloy) ou se a peça ou componente assume a sua forma final por deformação plástica (wrought alloy). O sistema de classificação aqui utilizado é registrado pela The Aluminium Association[4].

Ligas Fundidas(cast alloys)

Para a classificação destas ligas é utilizado um sistema numérico de 4 dígitos (Tabela 2), o primeiro dígito indica o principal elemento de liga, ou o que esta presente em maior quantidade, o segundo e o terceiro dígitos apresentam uma importância secundária na classificação das ligas, porém, servem para uma diferenciação entre as ligas de mesma classificação. Contudo se uma liga é classificada ba seria 1XX.X, estes dígitos também servirão para identificação da sua pureza. O ultimo digito após o ponto decimal identifica o modo de produção da liga, isto é se é obtida por solidificação em moldes (digito 0), por lingotamento (digito 1 ou 2).

Tabela 2 – Classificação Das ligas de Alumino Fundidas [4].

Alumínio com pureza mínima de 99,00%	1XXX
Ligas de alumínio – Elementos de liga presentes	
Cobre	2XXX
Silício, com adições de cobre e/ou magnésio	3XXX
Silício	4XXX
Magnésio	5XXX
Série não utilizada	6XXX
Zinco	7XXX
Estanho	8XXX
Outros elementos	9XXX

Ligas trabalhadas mecanicamente (wrought alloys)

São classificadas de modo similar às ligas fundidas, também empregam 4 dígitos para classificação, conforme mostrado na tabela 3.

O primeiro dígito indica o elemento de liga presente em maior quantidade.

O segundo dígito relaciona-se a uma modificação da liga original ou os seus limites de pureza. Se este é zero, então se trata de uma liga originalmente desenvolvida. Quando ocorrem alterações nas suas composições, os números de 1 a 9 são consecutivamente adicionados.

Os dois últimos dígitos servem para discriminar as diferentes ligas dentro e cada grupo ou indica os seus graus de pureza.

Tabela 3 - Classificação das ligas de alumínio trabalhadas mecanicamente [4].

Alumínio com pureza mínima de 99,00%	1XXX
Ligas de alumínio – Elementos de liga presentes	
Cobre	2XXX
Manganês	3XXX
Silício	4XXX
Magnésio	5XXX
Magnésio e silício	6XXX
Zinco	7XXX
Outros elementos	8XXX
Série não utilizada	9XXX

Observações[5]:

- 1- Um elemento de liga é considerado qualquer elemento químico intencionalmente adicionado para qualquer propósito, exceto como refinador de grãos.
- 2- As ligas das séries 2XXX a 8XXX, são rotuladas de acordo com o elemento de liga presente em maior quantidade. A exceção ocorre quando a liga anteriormente registrada numa série, é posteriormente modificada.
- 3- Se o elemento de liga for igual para duas ou mais ligas, deve-se observar a quantidade do segundo elemento químico presente em maior quantidade para efetuar a classificação, de acordo com a seguinte sequência: Cu, Mn, Mg₂Si, Zn e outros.
- 4- As ligas experimentais também são classificadas por intermédio deste sistema, porém utiliza-se o prefixo X. Este prefixo não é mais empregado no momento em que esta liga já é disponível comercialmente.

As ligas de alumínio também são comumente diferenciadas em ligas termicamente tratáveis (séries 2XXX, 6XXX, 7XXX e a maioria da série 8XXX), as que podem endurecer por meio de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, daquelas cujo aumento de dureza só pode ser obtido mediante

trabalho mecânico e conseqüentemente encruamento são as ligas não tratáveis termicamente (séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX).

Pelo sistema de classificação da Aluminum Association (AA), a série 1XXX identifica o alumínio comercialmente puro em diferentes graus de pureza, desde 99,00 % (denominado 1000) até 99,99 % (denominado 1099). Nesse sistema, os dois últimos algarismos referem-se ao grau de pureza da liga, ou seja, até à casa centesimal acima de 99,00 %. Assim sendo, o alumínio comercialmente puro com 99,50 % de alumínio é conhecido como 1050, já o alumínio com 99,70 % de pureza é denominado 1070 e assim por diante.

Temperas

Tempera nas ligas de alumínio é o estado que o material adquire pela ação das deformações plásticas a frio ou a quente, tratamentos térmicos ou pela combinação de ambos, dando ao produto, estruturas e propriedades específicas.

Os tipos de tempera e suas principais características estão a tabela 4 abaixo.

Têmpera	Tipo e uso
F	Aplica-se aos produtos obtidos através de processos de conformação nos quais não se emprega nenhum controle especial sobre as condições térmicas ou encruamento. Não se especificam limites para propriedades mecânicas.
O	Recozido- Aplica-se aos produtos acabados, no estados em que apresentam o menor valor de resistência mecânica.
H	Encruando- Aplica-se aos produtos nos quais aumentou-se a resistência mecânica por deformação plástica a frio.
W	Solubilizado - Aplica-se somente a algumas ligas, as quais envelhecem naturalmente a tempera ambiente, após o tratamento de solubilização.
T	Tratado termicamente- Aplica-se aos produtos que sofrem tratamento térmico com ou sem deformação plástica complementar que produz propriedades físicas estáveis e diferentes das obtidas com as outras temperas.

Tabela 4- Tipos de tempera.

As têmpera do tipo H têm a seguinte classificação: H1 produto somente encruado, H2 deformado plasticamente a frio e parcialmente recozido, H3 deformado plasticamente a frio e estabilizado. O segundo dígito indica o grau de encruamento em ordem crescente.

3 - SOLDAGEM POR FRICÇÃO LINEAR – FSW

O processo de soldagem, pela sua característica básica de unir permanentemente as peças é amplamente usado na indústria. Existem basicamente dois grandes grupos de processos de soldagem. O primeiro se baseia no uso de calor, aquecimento e fusão parcial das partes a serem unidas, denominado "processos de soldagem por fusão". O segundo se baseia na deformação localizada das partes a serem unidas, que pode ser auxiliada pelo aquecimento dessas até uma temperatura inferior à temperatura de fusão, conhecido como "processos de soldagem por pressão" ou "processos de soldagem no estado sólido"[6].

O processo de soldagem por fricção linear FSW(friction Stir Welding) se enquadra na segunda categoria, desenvolvido em TWI, Cambridge[1], envolve a junção de metais, no estado sólido, sem fusão do metal base ou utilização de metal de adição. O processo resulta em juntas fortes e dúcteis, tem boa eficiência energética, é amigável ao meio ambiente e é relativamente versátil. A técnica é mais adequada para componentes que sejam longos e planos (placas e chapas), porém pode também ser adaptada para tubos e seções ocas.

A aplicação original do FSW era a soldagem de longas distâncias de material nas indústrias naval, aeroespacial e ferroviária fig [1. Exemplos são grandes tanques de combustível e outros containeres para foguetes espaciais, plataformas de carga para trens de alta velocidade e tetos de vagões de trem. A qualidade da junta é excelente, não apresentando a porosidade que é tão comum em soldagem por fusão, e propriedades mecânicas razoavelmente superiores. O processo é amigável ao meio ambiente já que nenhum tipo de fumaça ou respingos é gerado, não há nenhuma emissão de luz intensa ou radiação devido a arco ou laser[6].



Figura 1 - Exemplos de aplicação do processo FSW. Fotos de trem bala japonês serie 500 e do jato eclipse 500 [ref.15].

O FSW não difere muito da soldagem por atrito convencional, já que o processo também produz uma região que é plastificada. Uma ferramenta, não consumível é empurrada contra os materiais e então um pino central seguido pelos ombros, faz contato com as duas partes a serem juntadas. Assim as juntas são criadas por uma combinação de aquecimento, devido ao atrito, e deformação mecânica, devido à ferramenta rotativa fig[2] . A temperatura máxima atingida no processo fica em torno de 80% da temperatura de fusão do material[7].

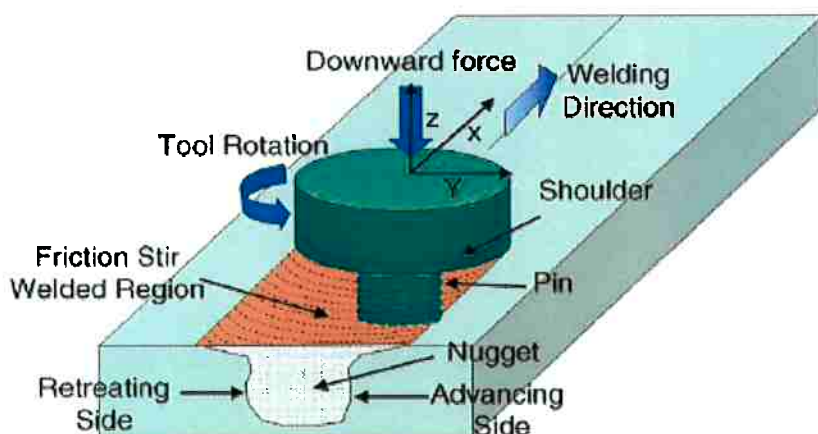


Figura - 2 Esquema do processo FSW [7].

A rotação da ferramenta aquece e plastifica os materiais, em que ela esta em contato. Conforme a ferramenta se move ao longo da linha de junção, material é retirado da peça na frente da ferramenta, misturado e levado ao longo do anel plastificado, eliminando a interface. Assim durante o processo o material é submetido a fortes deformações plásticas a elevadas temperaturas, o que resulta na geração de grãos pequenos e recristalizados. Essa microestrutura leva a excelentes propriedades mecânicas da junta[8].

O fato de não existir poça de fusão neste processo é uma grande vantagem, já que não existem os efeitos da resolidificação, onde há uma significativa retração em volume, garantindo baixas distorções e pequenas tensões residuais. Outra vantagem é a velocidade. Para materiais de até 2mm de espessura pode-se atingir velocidades de até 2m.min⁻¹, enquanto para espessuras de 5mm atinge-se 0.75m.min⁻¹ [7].

3.1 Vantagens e Desvantagens do processo FSW

A soldagem por atrito FSW proporciona grandes vantagens em relação aos métodos convencionais por fusão, tais com TIG, MIG e MAG como principais vantagens podemos ver na tabela 5 a seguir assim como algumas desvantagens inerentes as características do processo. Como pode se ver o processo FSW tem muito mais vantagens do que limitações sendo que estas na maioria das vezes estas são contornáveis.

Tabela 5 – Vantagens e limitações do processo FSW.

Vantagens	Desvantagens
A união das peças ocorre sem que o material atinja o ponto de fusão isto é o material é soldado no estado sólido. Deste modo, não há a formação de imperfeições e defeitos microestruturais associados aos processos de fusão e solidificação tais como: trincas a quente porosidade, dendritas e segregações [9].	Não unem com qualidade adequada materiais que possuem uma camada protetora anticorrosiva na superfície externa do cordão de solda, tais como materiais que sofrerão anodização e pintura [7].
Baixos índices de empenamento e distorção, devido à baixa energia de soldagem transferida à junta[10].	Presença de um furo após a retirada da ferramenta.
Une qualquer tipo de alumínio, em juntas similares e dissimilares[7].	Necessidade de significativos valores de força axial e transversal, obrigando o emprego de um grande número de resistentes grampos de contra apoio [7].
Dispensa o uso de atmosfera gasosa protetora[7].	
Elevado limite de espessura soldável até 100 mm em duplo passe[7].	
Processo totalmente automatizável.	
Não necessita de metal de adição para a consolidação da junta (não acrescenta peso à estrutura ou componente)[7].	
Não gera resíduos, fumaça e radiação ultravioleta[7].	
Processo de elevada repetibilidade [7].	
Pode se soldar em várias posições, vertical, plana e sobre-cabeça [7].	
Processo de alta produtividade devido sua velocidade [7].	
Produz juntas de extrema qualidade [7].	

O processo de soldagem por atrito FSW é capaz de unir praticamente todos os tipos de materiais ferros e não ferrosos, tais como ligas de magnésio, cobre, titânio, chumbo, além de alguns tipos de aço [11]. Também é utilizado nas junções de polímeros termoplásticos, mais o processo FSW é mais utilizado e pesquisado no desenvolvimento de cordões de solda em alumínio das series 2xxx, 6xxx e 7xxx de uso na indústria aeroespacial [15].

O processo de soldagem por atrito FSW tem como uma grande vantagem já citada a capacidade de unir peças em uma grande variedade de geométricas e configurações e posições e algumas destas estão descritas na figura 3, com as seguintes identificações: (I) Topo (butt joint), lineares e circunferenciais em materiais e espessuras similares e dissimilares; (II) Superpostas (lap joint), lineares e circunferenciais em materiais e espessuras similares e dissimilares; (III) Flanges em tubos; (IV) Em "T"; (V) Canto ou de borda; (VI) Duplo cordão de canto ou borda.

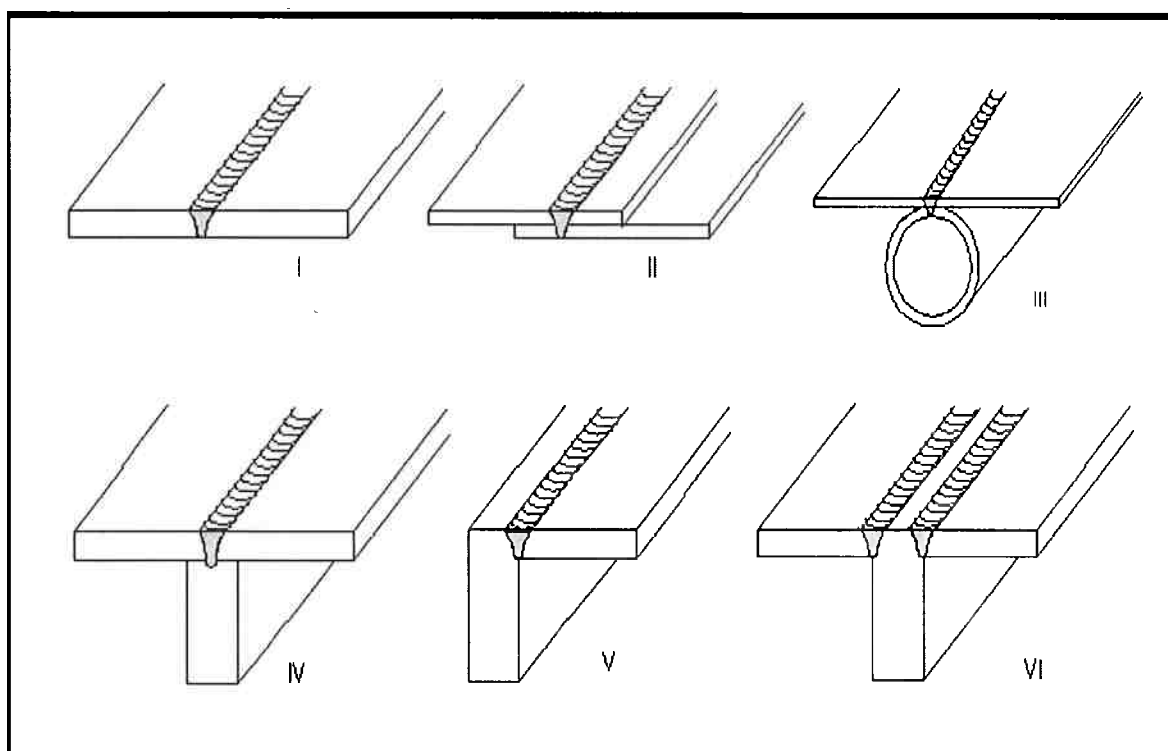


Figura 3- Exemplos de geometrias possíveis pelo processo FSW [7].

Outra grande vantagem já citada, mas de grande importância são tensões residuais menores, pois durante a fusão na soldagem tradicional desenvolvem-se tensões residuais mecânicas e térmicas complexas, devido à retração que acompanha o processo de resfriamento e ao caráter localizado da aplicação de calor. Por vezes, essas tensões atingem valores próximos ao limite de escoamento do metal de base, resultando em detrimento das propriedades mecânicas à tração do material e conseqüentemente reduzindo a vida útil da peça em serviço [7]. É comum a crença de que a magnitude dessas tensões residuais é reduzida com a técnica de soldagem FSW [7]; entretanto, a fixação deste processo em comparação com aquela utilizada na soldagem tradicional, é excessivamente rígida, impedindo a contração tanto da zona afetada pelo calor quanto da “nugget” nas direções transversais e longitudinais, resultando em tensões residuais nessas mesmas direções. É de suma importância investigar a distribuição deste tipo de tensão residual nas soldas FSW, uma vez que sua existência pode comprometer as propriedades mecânicas do produto final, o qual fica sujeito a falhar por fadiga.

Avaliações por difração de raios-X das tensões residuais da solda por FSW na liga 7050Al-T7451 produziram os dados apresentados na tabela 6. Esta liga de alumínio é comumente empregada na fabricação da estrutura das naves na Indústria Aeronáutica; assim sendo, possui altos valores de limite de escoamento e limite de ruptura (505 MPa e 570 MPa respectivamente)[7].

Tabela 6- Tensões residuais em alumínio 7050Al-T7451. [7]

Location	Distance from weld centreline (mm)	Longitudinal		Transverse	
		Retreating side	Advancing side	Retreating side	Advancing side
Top surface	2	22	19	-33	-41
	4	39	35	-14	-27
	6	55	72	-21	-24
	7	64	48	-40	-47
	8	101	76	-99	-43
Root surface	1	13	42	28 ± 52	-12
	3	36 ± 52	48 ± 54	-71	-19
	5	61 ± 30	55	-55 ± 103	-48

As informações contidas na tabela 6 possibilitam as seguintes observações:

- i. As tensões residuais na solda FSW são consideravelmente menores do que aquelas mensuradas em soldas com fusão.
- ii. Observou-se que na transição entre as regiões parcialmente recristalizada e totalmente recristalizada as tensões residuais eram maiores do que em outras regiões da solda.
- iii. Em geral, as tensões residuais longitudinais (ou seja, paralelas à direção de soldagem) eram de tração, enquanto que as transversais (normais à direção de soldagem) eram de compressão.

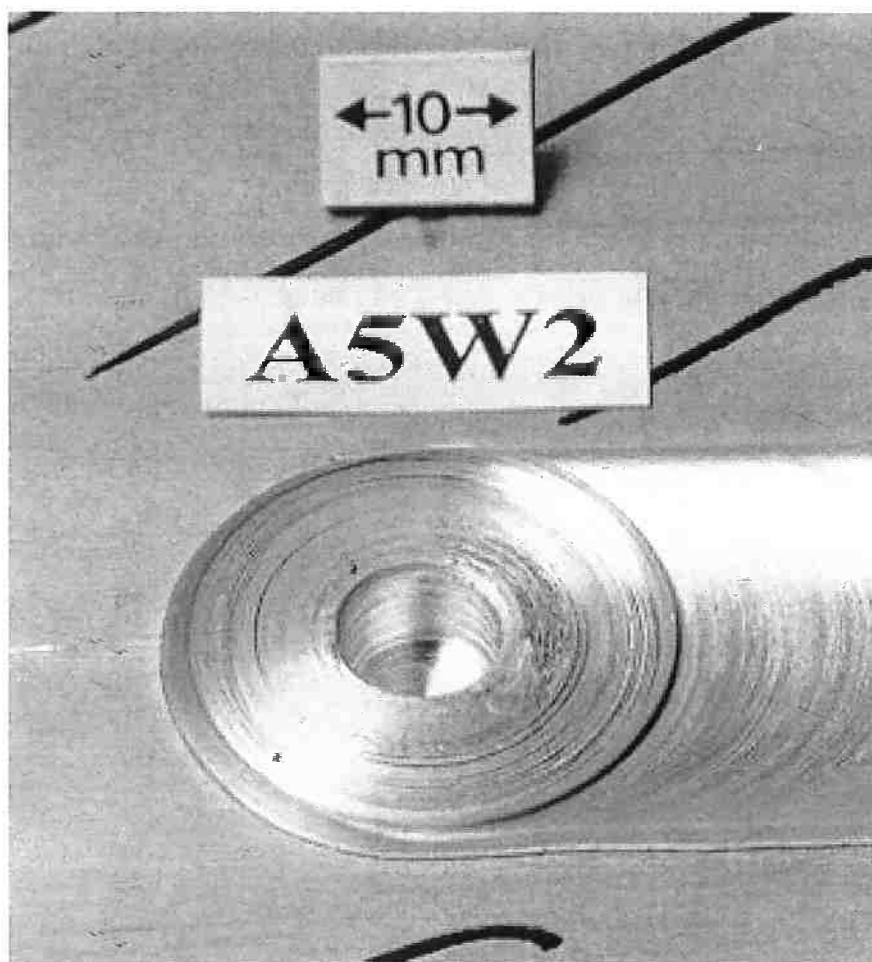


Figura 4 - Furo resultante após o processo de soldagem[15]

3.2 Possíveis defeitos no processo FSW

A tabela 7 descreve os possíveis defeitos que podem ocorrer durante o processo de soldagem por fricção linear FSW[12].

Tabela 7 – Possíveis defeitos e suas localizações.

Tipo do defeito	Localização microestrutural	Possíveis causas
Vazios ("Voids")	- Entre o metal de solda ("nugget") e a ZTMA, no lado de avanço ("advancing side") da junta, - Abaixo da superfície superior da junta.	1 – Reduzida força axial 2 – Altas velocidades de avanço longitudinal. 3 – Junta não fixada corretamente 4 – Elevada distância entre as interfaces da junta.
Falha na raiz ("Root flaw" – "Kissing bond")	- Metal de solda ("nugget"), estendendo-se da raiz até a interface original na região superior da junta.	1 – Remoção inadequada das camadas de óxido ou proteção superficial na superfície superior da junta. 2 – Ruptura imprópria e dispersão da camada de óxido ou proteção superficial da superfície pela ferramenta 3 – Pequena profundidade do pino da ferramenta na junta. 4 – Posicionamento incorreto do pino na junta (alinhamento e comprimento)

A figura 5 apresenta um defeito denominado de vazio.

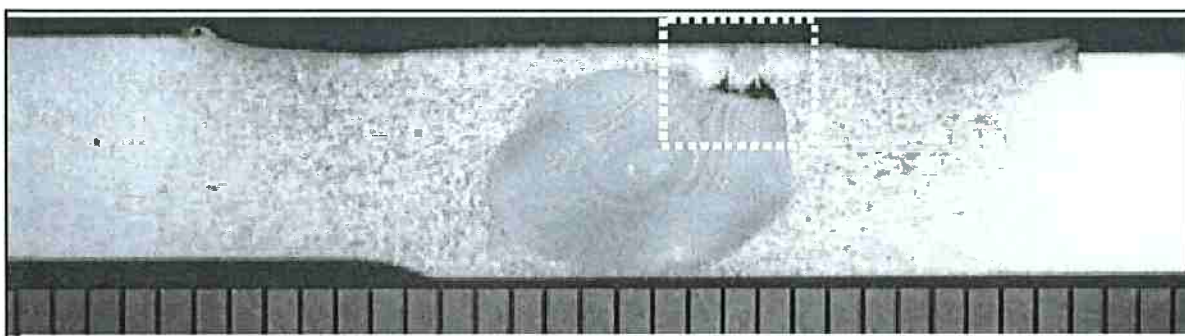


Figura 5 - Exemplo de defeito "vazio" [12].

3.3 - Parâmetros do processo

No FSW, dois parâmetros de soldagem são de alta importância, a velocidade de rotação da ferramenta (ω , medida em rpm) seja está horária ou anti-horária, e a velocidade de avanço da ferramenta (v , em mm/min) ao longo da linha da junta[13]. A rotação da ferramenta resulta na mistura e movimentação do material ao redor do pino e o avanço da ferramenta movimenta o material a frente do pino para a parte de trás terminando o processo de soldagem.

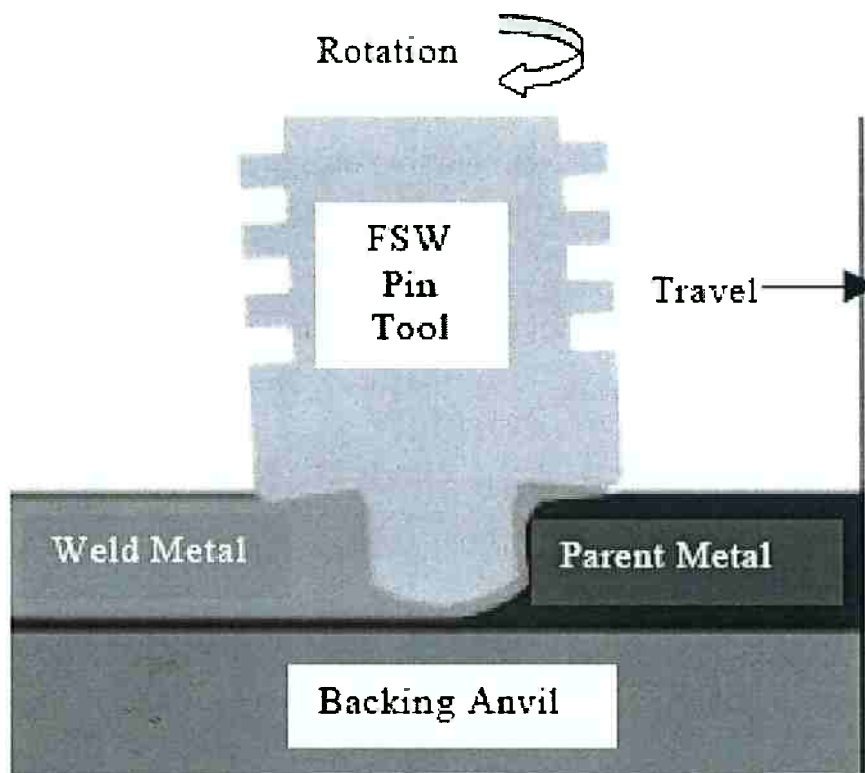


Figura-6 - Esquema do ferramental para FSW [7].

O aumento da rotação aumenta o atrito gerado, aumentando assim a temperatura de soldagem resultando em uma mistura e movimentação de material

mais intensa. Porém, a fricção entre a peça e o pino é dependente do acoplamento entre os dois [7]. Assim a partir de certo ponto não há mais ganho expressivo na intensidade de calor e mistura, devido à queda do coeficiente de atrito entre a peça e o pino.

Além das velocidades de rotação e avanço, outro parâmetro importante é o ângulo de rotação ou inclinação da ferramenta em relação à superfície da peça[7]. Uma inclinação adequada oposta à direção de avanço assegura que o ombro da ferramenta segure parte do material deformado pelo pino, e mova este material de maneira eficiente, da frente para a parte de trás do pino. Além da inclinação, a profundidade de inserção da ferramenta na peça é importante para produzir boas soldas utilizando-se ferramentas com a superfície de ombro lisa. Esta profundidade está relacionada com a altura do pino. Se a inserção não for suficiente o ombro não entrará devidamente em contato com a peça e não poderá auxiliar na movimentação de material, dando origem a soldas com canais internos ou depressões superficiais. Quando a inserção é muito profunda o ombro da ferramenta mergulha na peça gerando muito cavaco, neste caso uma solda côncava é produzida, causando um afinamento local na placa. Deve-se notar que os avanços na configuração da superfície dos ombros permitem que o FSW seja realizado eficientemente sem qualquer inclinação, sendo assim muito úteis na soldagem de peças curvas.

Pré-aquecimento e resfriamento da peça também são importantes para alguns processos específicos do FSW [7]. Materiais com alto ponto de fusão como aço ou titânio ou de alta condutividade térmica como o cobre, o calor produzido pelo atrito e a deformação do material podem não ser suficientes para amolecer e deformar o material ao redor da ferramenta. Assim é difícil a produção de solda livre de defeitos nestes casos. O pré-aquecimento ou uma fonte externa de calor podem ajudar o fluxo de material e aumentar leque de materiais que podem ser soldados por FSW. Por outro lado em materiais de baixo ponto de fusão como o alumínio e magnésio, o resfriamento pode restringir o crescimento de grãos recristalizados e a dissolução de precipitados fortalecedores da estrutura dentro e ao redor da região da solda.

3.4 Regiões Da Solda

A microestrutura produzida pelo processo de solda por atrito FSW é composta de três regiões: zona Nugget, zona termicamente afetada (ZTA) e zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA)[7].

A zona Nugget corresponde à região mais próxima a linha de soldagem e, portanto, é a região que sofreu os maiores picos de temperaturas e de maior gradiente de deformação. Nessa região ocorre intensa recristalização e os grãos têm formato equiaxial. Aparentemente, os grãos tomam essa forma por causa de recristalização dinâmica.

A região termo-mecanicamente afetada que, a princípio, é a extensão da zona Nugget, porém esta não teve potencial para completa recristalização, havendo, então, mistura de grãos recristalizados com grãos grosseiros deformados sobre a zona Nugget.

A região termicamente afetada que se entende como sendo a região, que foi afetada somente pelo calor e não pela deformação mecânica, fica situada entre a ZTMA e o metal de base. Nesta região ocorre dissolução e precipitação de elementos de liga quando se tratar de ligas de Alumínio susceptíveis a tais reações[7].

4- Materiais e métodos.

Foram utilizadas duas chapas de alumínio da série 5052 tempera H11, cuja composição química está mostrada na tabela 8 . As chapas possuíam 2 mm de espessura, 100 mm de largura e 250 mm. Foram soldadas pelo processo FSW.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga
5052	0,16	0,4	0,03	0	2,4	0,15	0	0,01	0,01	0,01

Tabela 8- Composição de liga 5052.

O cordão foi cortado em três posições: vista de topo; frontal e inferior. As partes selecionadas foram embutidas em baquelite.

Após o embutimento os corpos de provas foram lixados em lixas de granulométrica 600 e 1200. Depois do lixamento as amostras foram polidas manualmente em uma solução para polir prataria, chamada comercialmente de Brasso, com pano de 3 μm . O polimento final foi feito com diamante de granulométrica de 1 μm em pano de 3 μm . Posteriormente o polimento foi terminado com sílica coloidal, de forma automatizada.

Para atacar o material utilizou-se ataque eletrolítico com solução de 1,8% HBF_4 em H_2O (Reativo Barker), durante 4 minutos a 20 mV. Para visualizar as micrografias foi utilizado um microscópio óptico com uma lente polarizadora acoplada junto a uma câmera digital.

Para o ensaio de tração as peças foram cortadas em uma máquina de corte a jato água, seguindo a geometria da norma ASTM-B 557M. Foram feitos seis corpos de prova, sendo três contendo o cordão de solda e três contendo somente do metal base.

O equipamento para o ensaio de tração utilizado foi uma máquina Kratos 1200 com uma célula de carga de 2 toneladas, com uma taxa de deformação de 1mm por minuto. Foram medidos o alongamento total e o alongamento parcial, dividindo-se o comprimento total em 24 mm.

Os ensaios de microdureza foram realizados no laboratório de fenômenos de superfície (LFS), com uma carga de 50g durante 10 s., segundo a norma ASTM E 384 . As medidas foram feitas nas posições de topo, inferior e frontal.

5- Resultados

5.1 Caracterização microestrutural.

As micrografias foram efetuadas na Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), foram feitas micrografias na região superior, inferior e transversal.

As micrografias da seção transversal seguem o esquema mostrado na fig-7

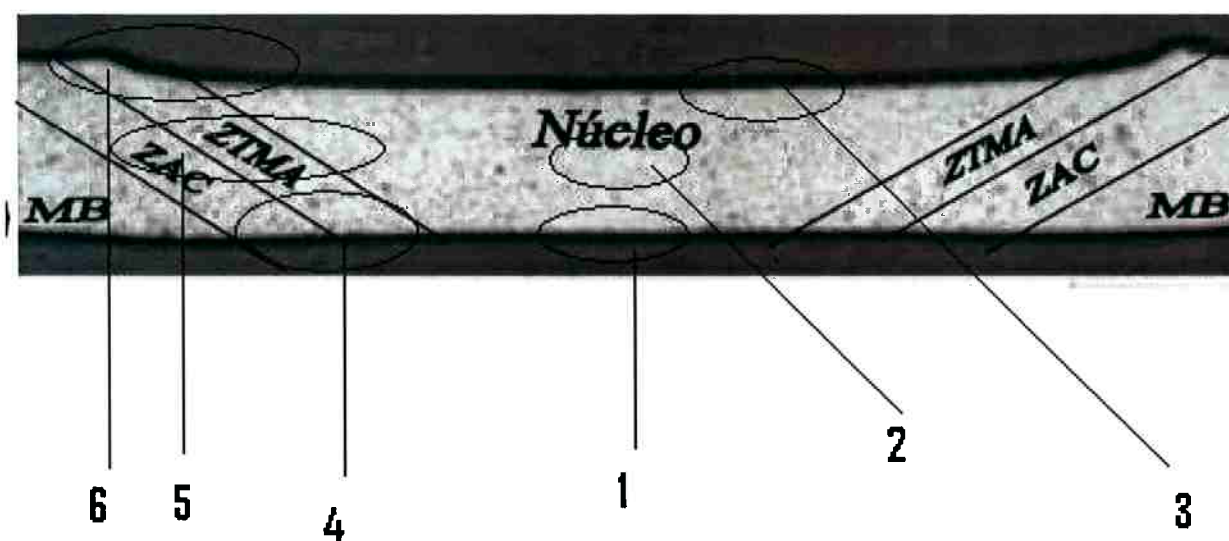


Figura 7– Esquema de posições das micrografias da seção transversal.



Figura 8 – Micrografia da secção transversal na região 1. Aumento: 200X. Ataque: Barker.

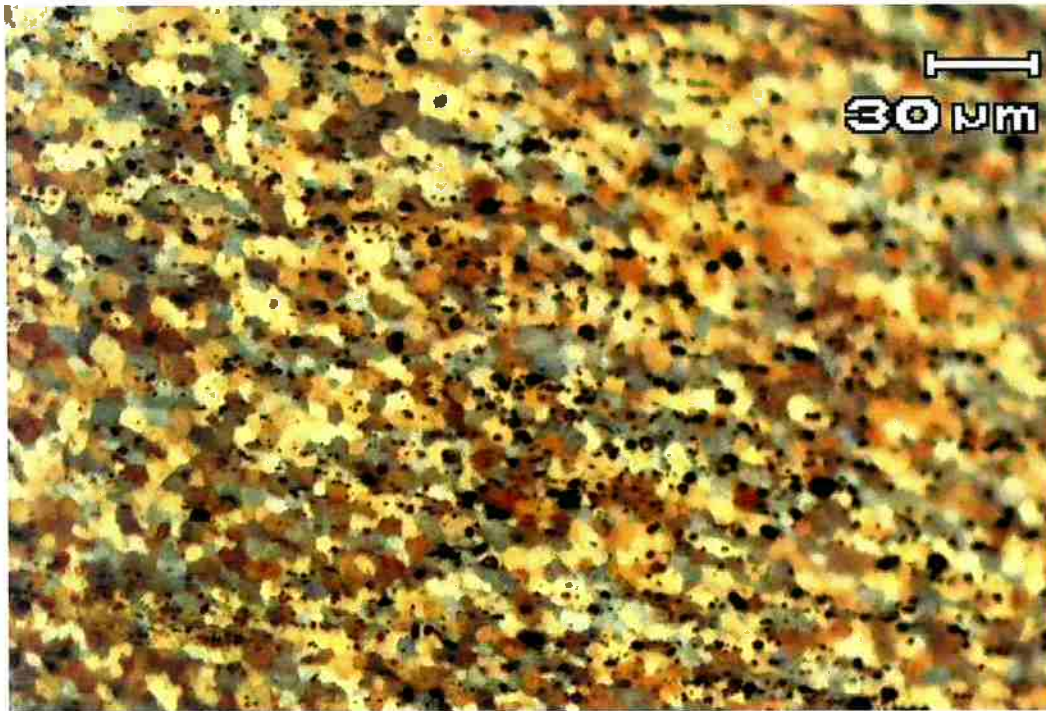


Figura 9– Micrografia da secção transversal na região 2. Aumento: 200X. Ataque: Barker

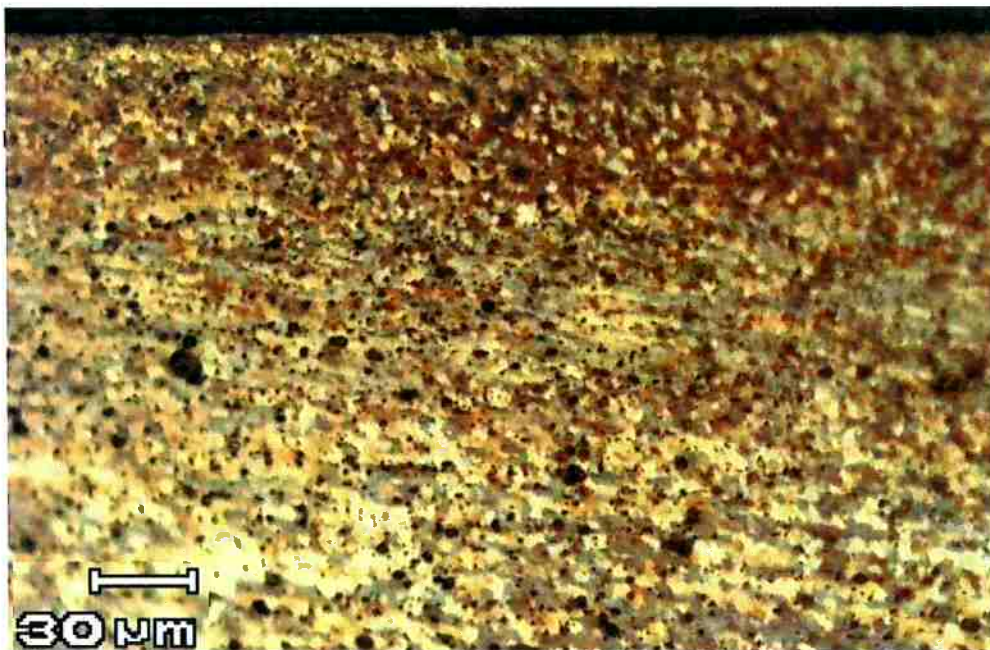


Figura 10 - Micrografia da secção transversal na região 3. Aumento: 200X. Ataque: Barker.



Figura 11 – Micrografia da secção transversal na região 4. Aumento:50X. Ataque: Barker.



Figura 12 – Micrografia da secção transversal na região 5. Aumento: 50X. Ataque: Barker.



Figura 13 - Micrografia da secção transversal na região 6. Aumento: 50X. Ataque: Barker.

Micrografias da secção superior e inferior seguem o esquema da figura 14

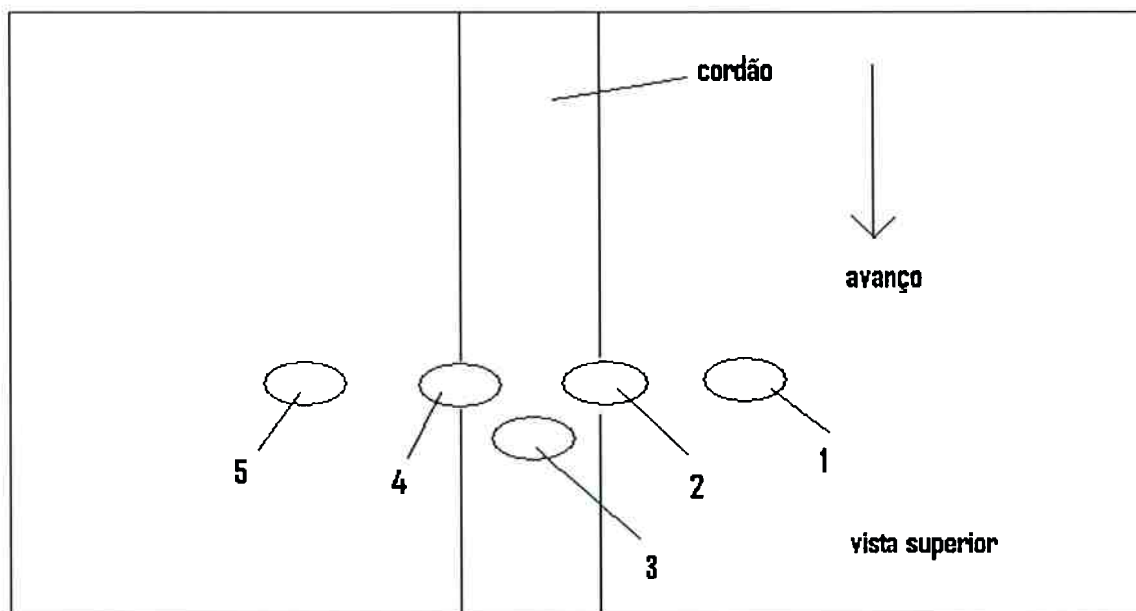


Figura 14 – esquema de localização das micrografias da parte superior e inferior da chapa.

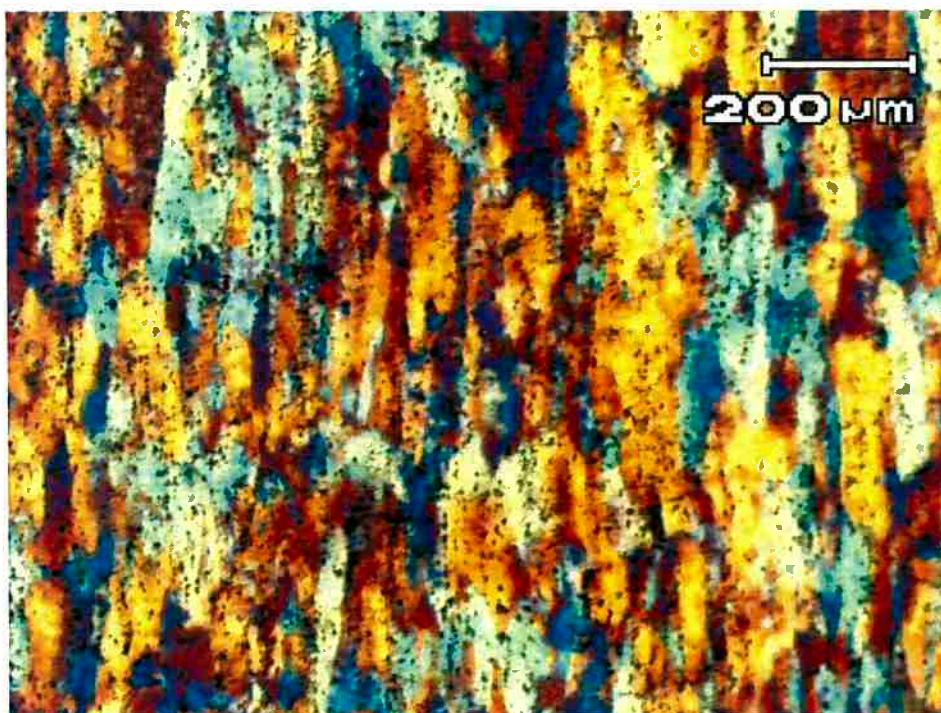


Figura 15- Micrografia da parte superior na região 1. Aumento: 50X. Ataque: Barker.

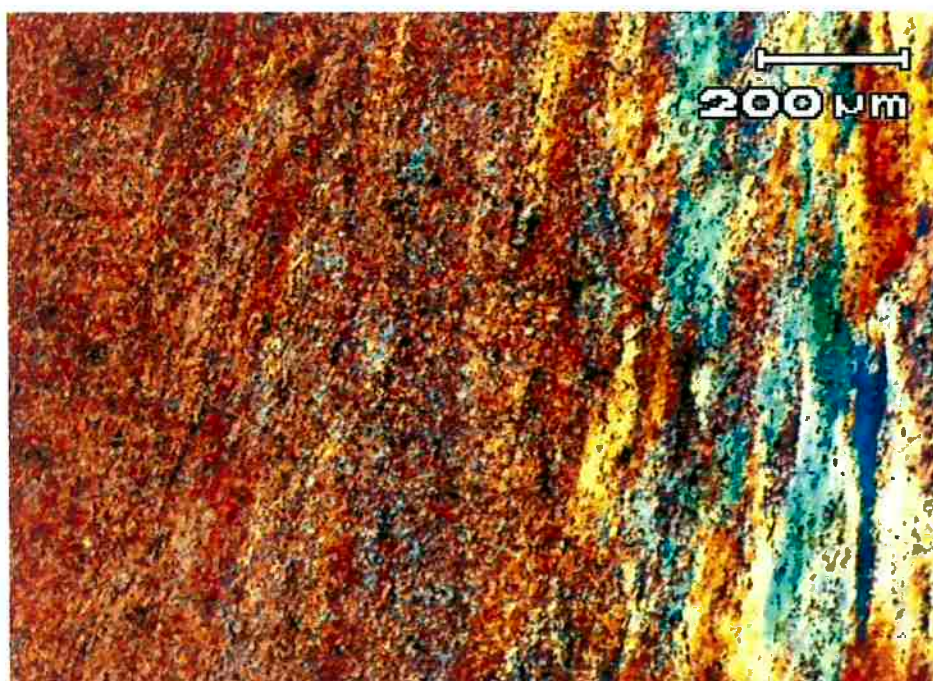


Figura 16 - Micrografia da parte superior na região 2. Aumento: 50X. Ataque: Barker.



Figura 17 - Micrografia da parte superior na região 3. Aumento: 50X. Ataque: Barker.

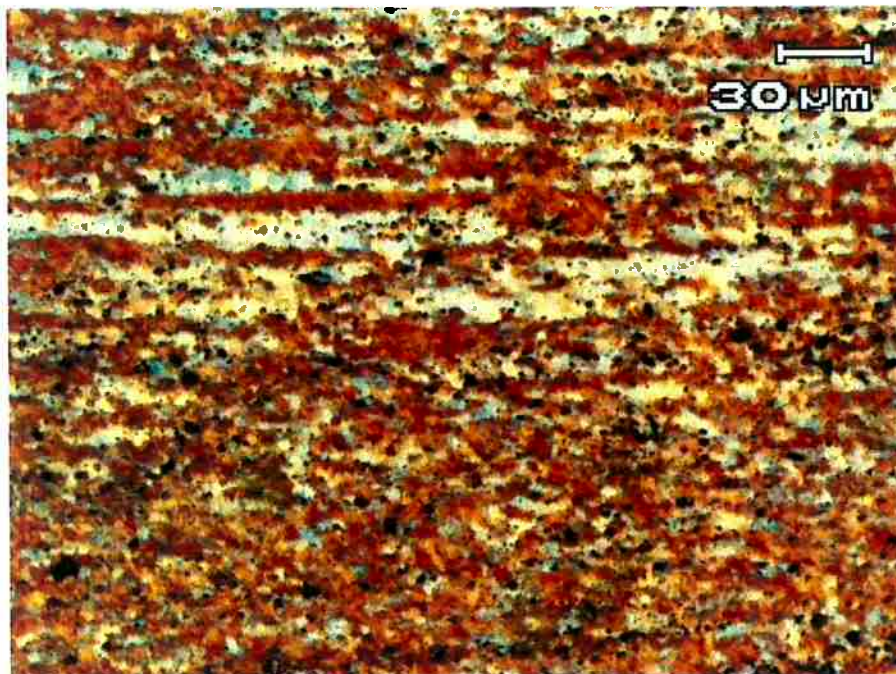


Figura 18- Micrografia da parte superior na região 1. Aumento: 200X. Ataque: Barker.

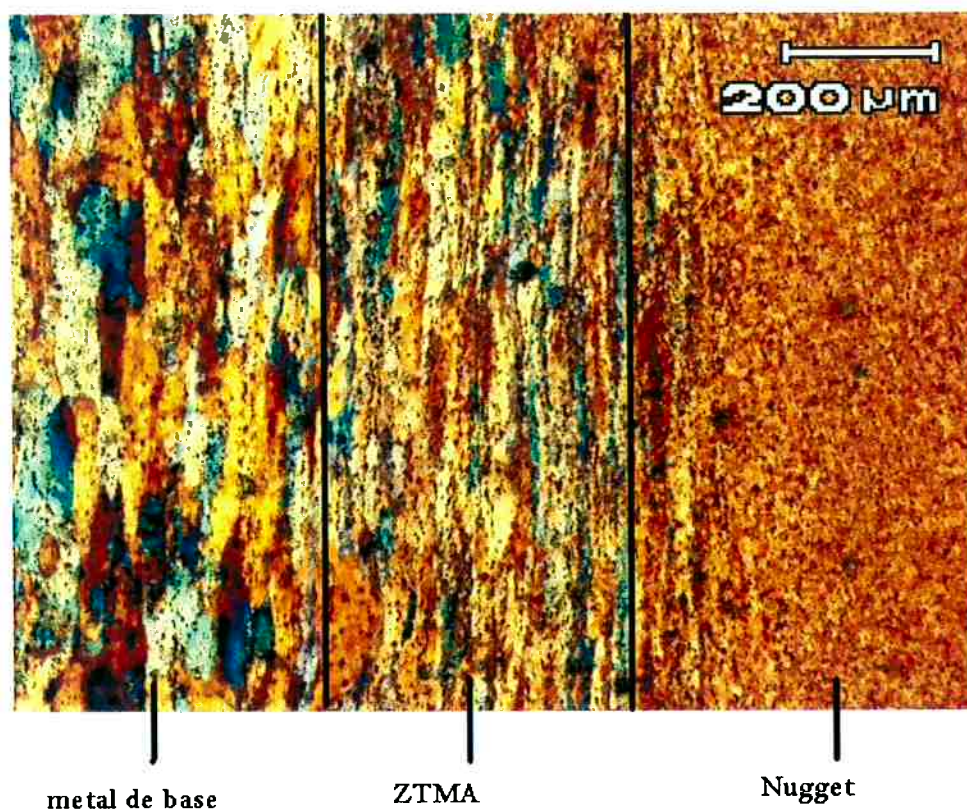


Figura 19 - Micrografia da parte superior na região 4. Aumento: 50X. Ataque: Barker.



Figura 20 - Micrografia da parte superior na região 5. Aumento: 50X. Ataque: Barker.



Figura 21 - Micrografia da parte inferior na região 1. Aumento: 50X. Ataque: Barker.

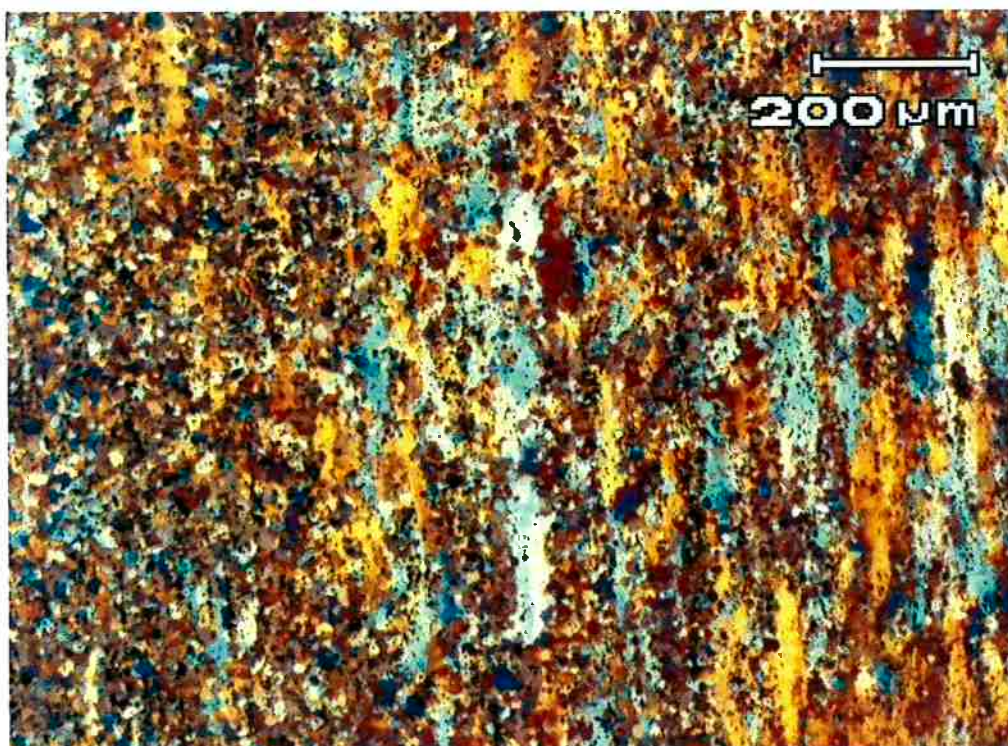


Figura 22 - Micrografia da parte inferior na região 2. Aumento: 50X. Ataque: Barker.



Figura 23- Micrografia da parte inferior na região 3. Aumento: 50X. Ataque: Barker.

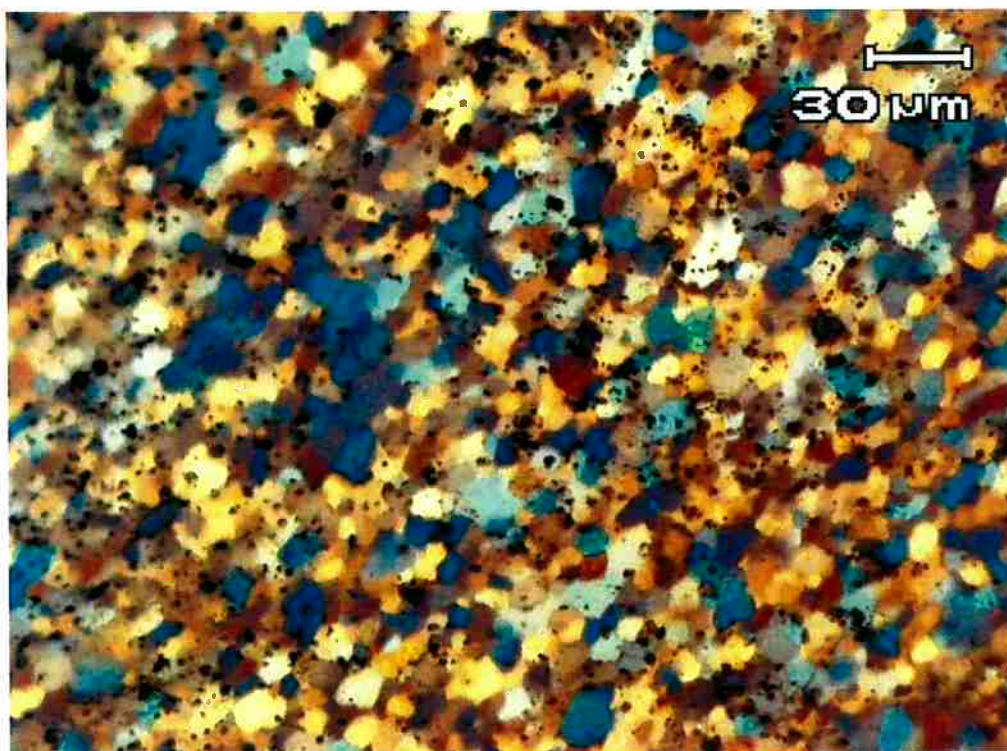


Figura 24 - Micrografia da parte inferior na região 3. Aumento: 50X. Ataque: Barker.



Figura 25- Micrografia da parte inferior na região 4. Aumento: 50X. Ataque: Barker.



Figura 26 - Micrografia da parte inferior na região 5. Aumento: 50X. Ataque: Barker.

5.2 Ensaio de Tração

Através dos dados obtidos pela máquina de tração foram obtidos os seguintes gráficos. A figura 27 mostra os resultados para o corpo de prova sem o cordão de solda.

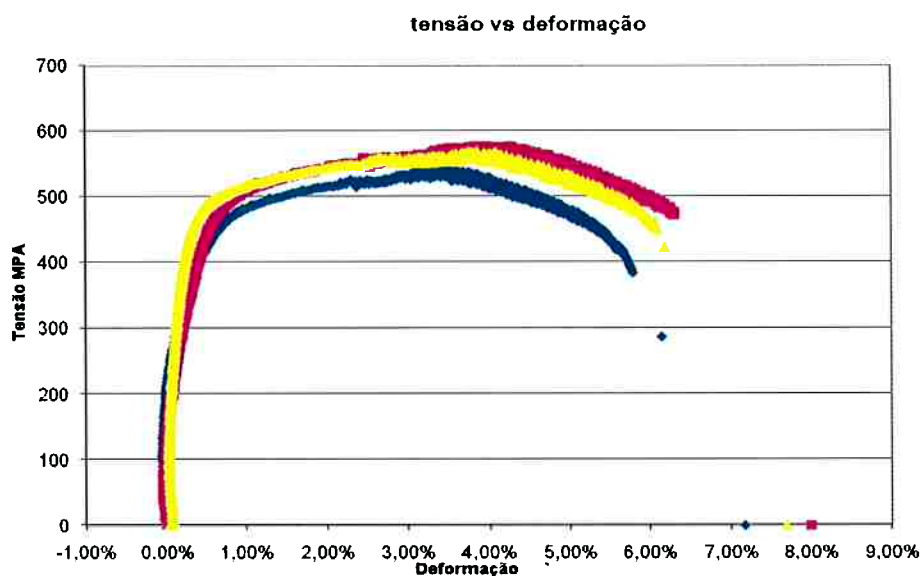


Figura 27 – Curva tensão x deformação para o metal de base.

A figura 28 mostra os resultados para os corpos de prova com o cordão de solda.

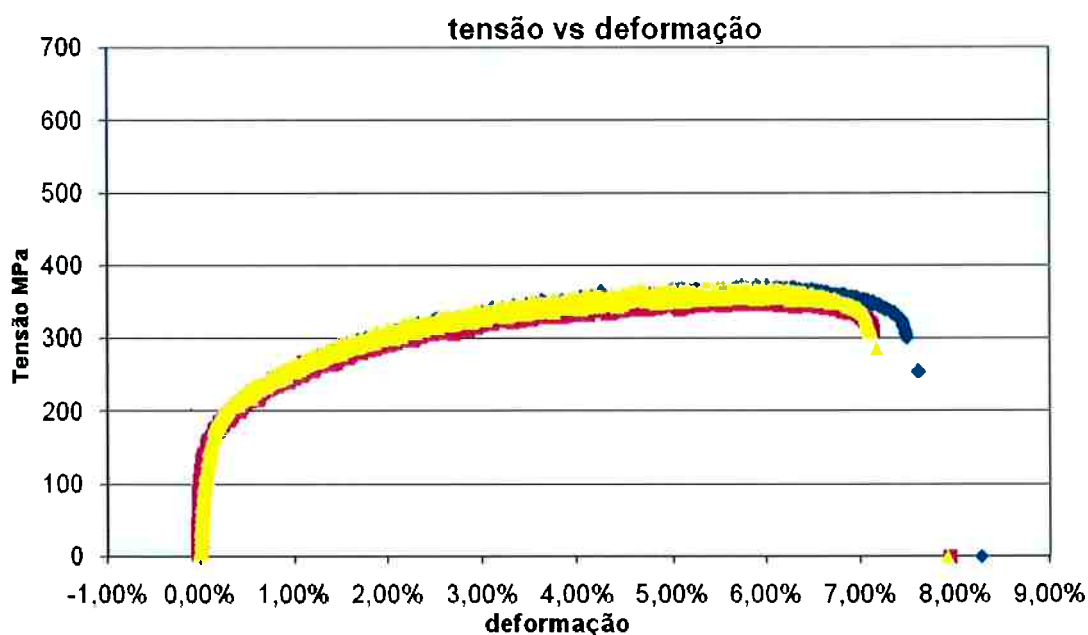


Figura 28 – Curva tensão/deformação para a junta soldada.

Os limites de resistências obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9- Limite de resistência dos corpos de prova (MPa)

	Metal de Base	Junta Soldada
Amostra-1	575,1	371,2
Amostra-2	568,9	368,1
Amostra-3	542,2	370,1
Média	562,1	369,8

Comparando com os dados da literatura das propriedades mecânicas do alumínio serie 5052 tempera H0, que é de 195 MPa, ou com o 5052 tempera H32, que é de 230 MPa [16], os valores obtidos para a junta soldada são inferiores aos do metal base, porém superiores ao das têmperas citadas na literatura.

Com base na tabela 9 foi calculada a eficiência da junta, que é dada pela razão entre o limite de resistência da junta soldada pelo limite de resistência do metal de base. O valor da eficiência foi de 65,8%, ou seja, a junta soldada tem uma resistência 34,2% menor, se comparada com o material de base.

Antes da realização dos ensaios de tração dos corpos-de-prova com a junta soldada foram feitas marcações nos corpos de prova para medida do alongamento em diferentes regiões, a partir do centro do cordão de solda. As medidas dos alongamentos parciais foram feitas seguindo o esquema da figura 29. A tabela 10 mostra os alongamentos medidos.

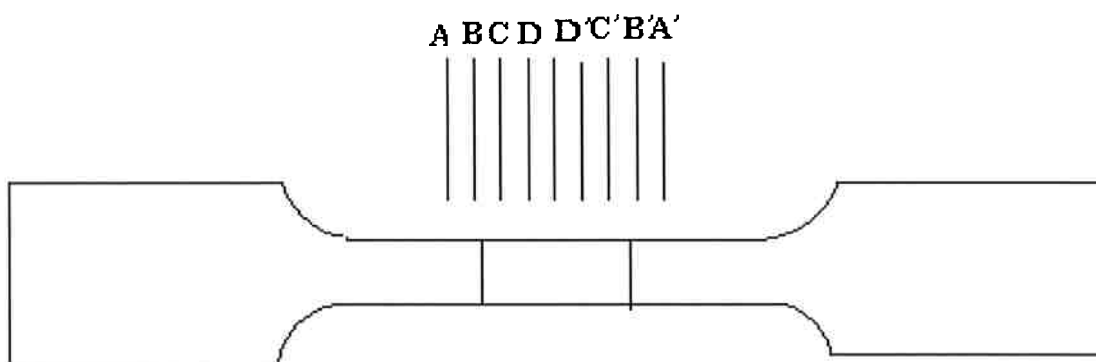


Figura 29 – Esquema de localização das medidas de alongamento.

Tabela 10- Alongamentos total e parciais (em %).

Corpo-de-prova	Total	Parcial B e B'	Parcial C e C'	Parcial D e D'
Metal de base	7,6	-	-	-
Junta soldada	11,2	15,4	20	33

A título de comparação, o alongamento da liga 5052 com tempera H16 é de 8%[15], que está próximo do valor obtido para o metal base. A junta soldada apresentou um alongamento total menor que o metal de base. Os resultados dos alongamentos parciais da junta soldada mostraram que grande parte da deformação plástica aconteceu na região central do cordão de solda.

5.3 Microdureza

A microdureza foi realizada conforme o esquema apresentado na figura 30.

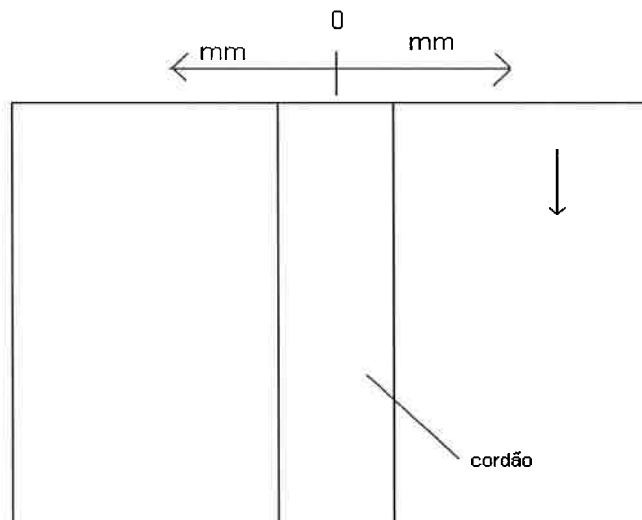


Figura 30- Ilustração das posições em que foram medidas as microdurezas.

A figura 31 representa o perfil de microdureza da parte superior conforme o esquema da fig 30.

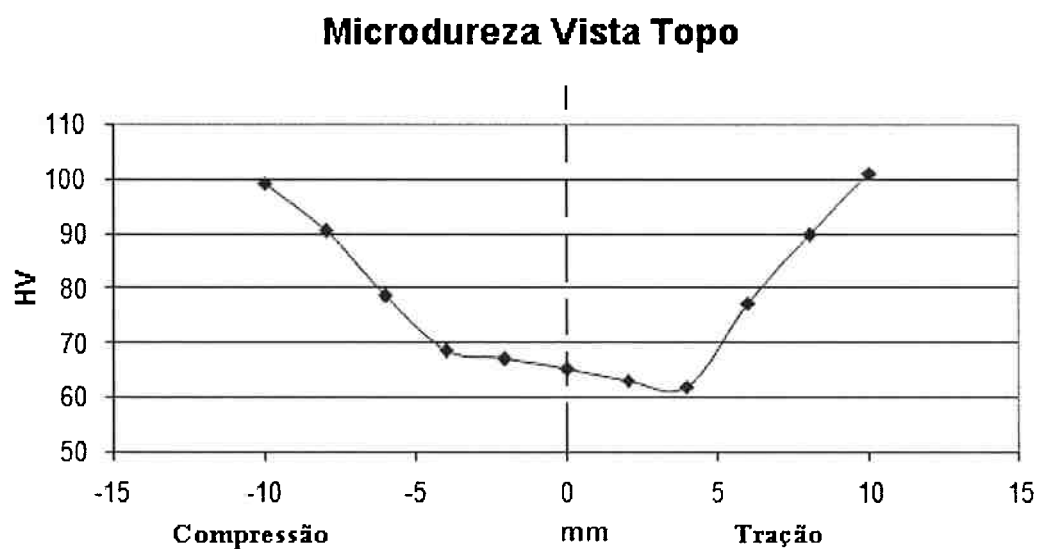


Figura 31: Perfil de microdureza Vickers com 50g da vista de topo do cordão.

A figura 32 representa o perfil de microdureza da vista frontal conforme o esquema da figura 30.

Mircro dureza Vista Frontal

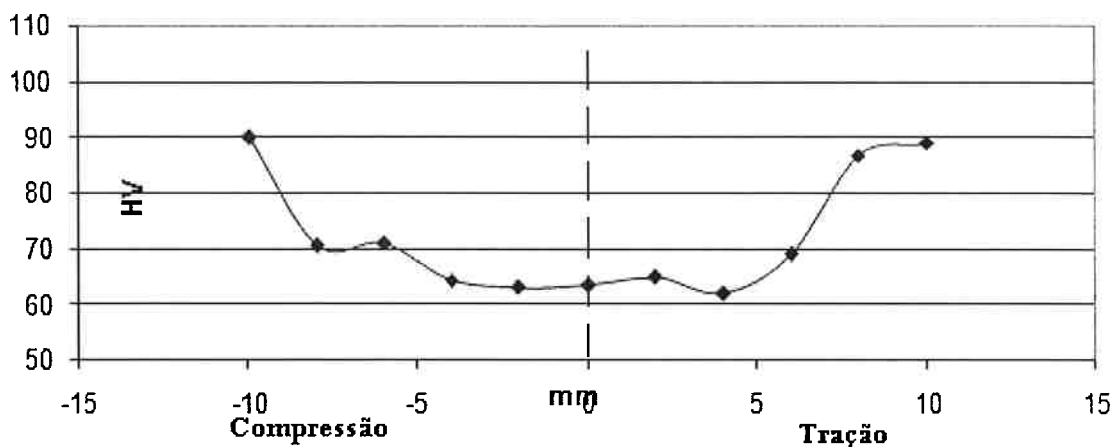


Figura 32- Perfil de microdureza Vickers com 50g da vista frontal do cordão.

A figura 33 representa o perfil de microdureza da parte inferior conforme o esquema da figura 30.

Microdureza Vista Inferior

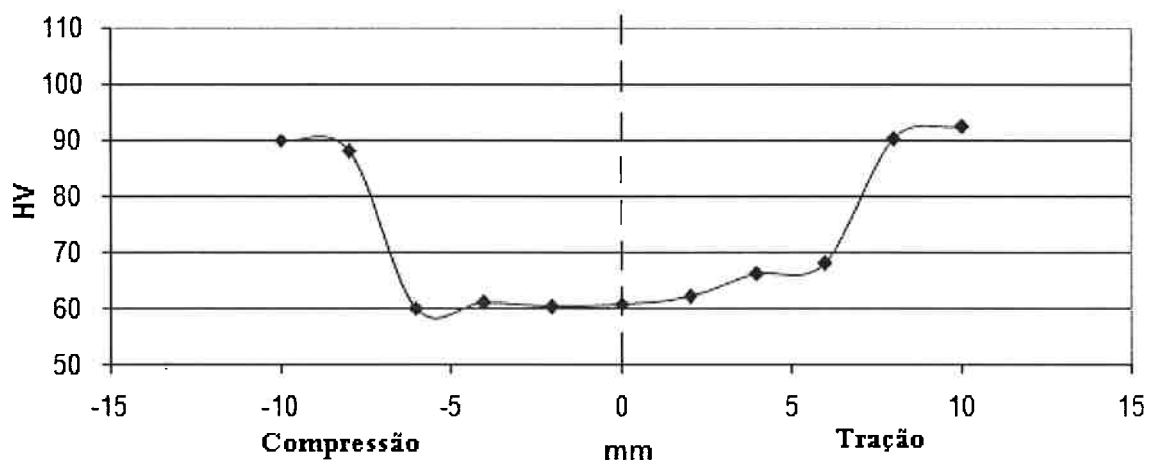


Figura 33 - Perfil de microdureza Vickers com 50g da parte inferior do cordão.

6 -DISCUSSÃO

Como já mencionado a soldagem similar pelo processo FSW resulta na formação de três regiões a zona nugget (núcleo), zona termicamente afetada (ZTA) e zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA). A zona nugget é a região central da solda na qual é caracterizada por uma microestrutura refinada de grãos de aproximadamente 12,5µm no meio e na parte inferior da placa e em torno de 2 µm na parte superior, oriundas do fenômeno de recristalização Dinâmica[7], veja as Figuras 8 a 10 e 23 e 24 . Este fenômeno metalúrgico acontece devido a deformação e temperatura imposto pelo pino em rotação durante o processo de soldagem.

Na zona nugget vemos claramente uma diferença no tamanho de grão entre a parte superior e a inferior conforme podemos observar comparando as figuras 8 a com 10 e a 18 com 24, a parte superior tem grãos muitos mais finos que a inferior, isto provavelmente se deve a maior deformação mecânica ocasionada não só pelo pino mas também pelo atrito do ombro da ferramenta na parte superior que gera uma deformação . Vemos claramente a influência do ombro da ferramenta no formato do grão pelas figuras 17 e 18.

A zona termo-mecanicamente afetada ZTMA pode ser vista claramente pois possui grãos alongados devido a deformação mecânica gerada pelo ombro da ferramenta [14], a figura 19 mostra em detalhes as três zonas, Nugget, ZTMA e Metal de base, a zona termicamente afetada ZTA e de difícil identificação pois sua micro estrutura é muito parecida com a do metal de base[14] .

Nos gráficos resultantes do ensaio de tração verifica-se claramente que o limite de escoamento do corpo de prova com cordão de solda caiu para cerca da metade (450 MPa para 190MPa) em relação ao metal de base. Tal fato se deve aos fenômenos metalúrgicos de recristalização e recuperação, no corpo de prova com cordão de solda.

Através dos ensaios de microdureza pode-se observar um declínio no limite de resistência do corpo de prova com cordão de solda em relação a chapa inicial. (redução de 550MPa para 350MPa) redução de aproximadamente 36%.

A partir das figuras 31, 32 e 33 pode-se observar que não há variação de microdureza ao longo da espessura na região do cordão, verifica-se também uma queda acentuada na dureza no cordão, possivelmente devido aos fenômenos de recristalização e recuperação.

7- CONCLUSÃO

Através deste trabalho pode-se observar que durante o processo FSW o Grão é extremamente refinado na zona nugget , sendo que na parte superior os grãos têm tamanho na ordem de μm . Através dos ensaios de tração e microdureza notu-se que na região do cordão de solda houve os fenômenos de recristalização e recuperação devido a redução dos limites de escoamento (estimado) e queda de dureza.

8 - Referencias bibliográficas:

- [1]- Mechanical and thermal modelling of Friction Stir Welding
P. Heurtier , M.J. Jones , C. Desrayaud , J.H. Driver , F. Montheillet , D. Allehaux Journal of Materials Processing Technology 171 (2006)
- [2]- “Aluminium- Properties, physical Metallurgy and Phase Diagrams”: American Society for Metals, Metals Park –Ohio 1967.
- [3]- [www.infomet.com.br /al_atributos.php](http://www.infomet.com.br/al_atributos.php)
- [4]- “Alloy and Temper Designation System for Aluminum”. Aluminium Association, EUA 2000.
- [5]- M.F Ashby, “Overview Number 80 on the Engineering Methods for Deformation , Fracture and Fatigue”, Prentice Hall, EUA 1993
- [6]- <http://www.demet.ufmg.br/grad/exemplos/soldagem/soldagem.html>
acessado dezembro de 2007
- [7]- R.S. Mishra,* , Z.Y. Ma Friction stir welding and processing- Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1–78
- [8]- Fatigue performance of Friction Stir Welded 2024-T351 aluminium joints- G.Bussu and P.E.Irving- Damage tolerance group , Cranfield University, England
- [9]- M.Hansen, “A Cold Welding” Mechanical Engineering Design Magazine EUA Março 2003
- [10]- K.Aota, K. Okamura, E. Mazakuni e H.Takai, “Heats Inputs and Mechanical Engineering Design Magazine EUA Março -2003
- [11]- “DanStir Aps - Danish Stir Weilding Technology” janeiro -2002
- [12]- A.J.Leonard, “Flaws in Aluminum Alloy Friction Stir Welding” TWI members report 74000.01/01/1087.03 England Abril 2001.
- [13]- P.L. Treadgill e M.E.Nunn, “ A review of Friction Stir Welding: Part1, Process overview” Relatório TWI No. 13963.2/02.1150.2 England -2002.

[14]- Caracterização microestrutural e resistência à corrosão de juntas soldas de liga de alumínio 17^º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil-T. P. Busquim, S.E. Kuri.

[15]- Abel Rosário Junior – “Estrutura Integral por Soldagem por Atrito “Friction Stir Welding- FSW” Requisitos Básicos para Projeto Estrutural - São Jose dos Campos -2003.

[16]- ASM Hand Book Vol-2