

**DANIEL FERRAZ PRADO**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA, COMPRIMENTO DE  
QUEIMA E MODO DE APLICAÇÃO DA FORÇA NO  
REPARO POR ATRITO COM FURO PASSANTE EM  
AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2018**

**DANIEL FERRAZ PRADO**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA, COMPRIMENTO DE QUEIMA E  
MODO DE APLICAÇÃO DA FORÇA NO REPARO POR ATRITO COM  
FURO PASSANTE EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX**

**Trabalho de Conclusão de Curso** apresentado ao Curso de graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL em ENGENHARIA MECATRÔNICA**.

Orientador: Prof. M.Sc. Rafael Ariza Gonçalves

Co-Orientador: Eng. M.Sc. Raphael Rezende Pires

**UBERLÂNDIA - MG  
2018**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao engenheiro Raphael Rezende Pires, que me auxiliou durante todo o desenvolvimento do trabalho, desde a concepção das geometrias à execução dos ensaios, sempre bastante prestativo e disposto a sanar qualquer tipo de dúvida que surgisse ao longo do caminho.

Ao professor M.Sc. Rafael Ariza Gonçalves pela orientação do projeto, ajuda na interpretação dos resultados que fomos encontrando no decorrer da pesquisa e pelo trabalho de revisão da redação.

Ao professor Dr. Ing. Sinésio Franco pela colaboração e auxílio nas tomadas de decisão sobre qual caminho tomar após cada rodada de testes.

Ao técnico Flávio Alves dos Santos e estagiários Lucas Franco Signorelli Queiroz e Fábio Machado Alves da Fonseca pelo auxílio na preparação das amostras e obtenção das micrografias.

Agradeço também à minha família, noiva e amigos, que estiverem do meu lado ao longo desta caminhada e a tornaram bem mais prazerosa.

À UFU e ao LTAD por toda estrutura e corpo técnico disponibilizados, indispensáveis para o desenvolvimento de um trabalho de qualidade.

À Petrobras pelo apoio financeiro que vem dando ao laboratório, possibilitando que ele continue a ser referência nacional na pesquisa de reparo por atrito.

PRADO, D. F. **Influência da geometria, comprimento de queima e modo de aplicação da força no reparo por atrito com furo passante em aço inoxidável duplex**. 2018. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

O reparo de estruturas utilizando soldagem a arco elétrico na indústria petroquímica apresenta, além de riscos ao operador, uma quantidade considerável de falhas inerente ao processo. Viu-se necessário, então, o desenvolvimento de uma técnica que melhor se adequasse às condições de operação encontradas neste ramo, sendo o reparo por atrito ideal para tal aplicação. Com este trabalho, então, buscou melhor entender como este processo se dá para casos em que a cavidade feita no material base se trata de um furo passante. Limitou-se também o material utilizado, no caso, o aço inoxidável duplex UNS S32205, outra demanda decorrente da indústria. Foram realizados uma série de ensaios em que se buscou entender como cada um dos parâmetros analisados interferem no resultado da solda. Três geometrias foram inicialmente propostas, variando-se o ângulo de tronco de cone do pino para cada uma delas. Além disso, variou-se também o comprimento de queima e o número de estágios utilizados para aplicação da força. Após realizados os ensaios, as amostras foram preparadas para que macrografias e micrografias pudessem ser obtidas e a qualidade da solda fosse examinada para os diversos casos. Ao fim, mapeou-se ainda o perfil de microdureza das amostras que apresentaram os melhores resultados. O que se observou ao longo deste trabalho foi que a geometria que apresentou melhores resultados foi a de pino e furo com ângulo do tronco de cone de 26° e 30°, respectivamente. Sua utilização aliada com um maior comprimento de queima e aplicação da força em dois estágios possibilitaram um maior tempo de processamento, que por sua vez, resultou em uma união de melhor qualidade, apresentando nenhum tipo de defeito aparente ou falha de preenchimento.

PRADO, D. F., **Influence of geometry, burn-off length and mode of force application on friction welding repair with through hole in duplex stainless steel**. 2018. 80 f. Completion Coursework, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Abstract

The repair of structures using electric arc welding for the oil industry presents safety risks to the operator and a considerable number of defects inherent to the process. A new technique more suitable to the operating conditions of this field needed to be developed then, and the friction welding perfectly fits such application. The objective of this study was to better understand this process when using through holes on the base material. The study was also limited in terms of the material to be used, which was the duplex stainless steel UNS S32205, another requirement from the oil industry. Several tests were performed to help understand how each of the parameters analyzed interfere on the welding quality. Three different geometries were initially proposed, with different taper angles for the consumable rods on each one of them. The burn-off length and number of stages used to apply the force also differed from one test to the other. Once the testings were finalized the welding joints went through a preparation process so that macro and micrographs could be obtained and the welding quality could be evaluated. Lastly, a microhardness profile was obtained for the joints that presented the most satisfying results. Throughout this work it was observed that the geometry that presented the best results was the one with a taper angle of  $26^\circ$  for the rod and  $30^\circ$  for the hole on the base material. The use of this geometry along with higher values for the burn-off length and the two-stage pressure process led to higher processing times, which resulted in better quality welding joints, with no apparent defects or unfilled areas.

---

Keywords: Friction welding repair. Through holes. Rod and hole geometries. Burn-off length. Duplex stainless steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sequência do processo de Soldagem por Atrito Convencional .....	16
Figura 2.2 - Etapas da soldagem por atrito: I) Atrito; II) Aquecimento; III) Frenagem; IV) União .....	17
Figura 2.3 - Representação do alongamento da região de material plastificado nas superfícies de contato.....	18
Figura 2.4 - Relação entre os parâmetros de soldagem por atrito.....	19
Figura 2.5 - Ilustração do método de reparo por atrito FHPP .....	23
Figura 2.6 - Ilustração do método de reparo por atrito FTPW: a) por compressão; b) por tração .....	24
Figura 2.7 - Processamento por atrito com geometrias do pino e do furo cônicas .....	25
Figura 2.8 - Geometria adotada por Paes (2013) no processamento com furos passantes .	26
Figura 2.9 - Geometria utilizada por Carneiro (2009) .....	27
Figura 2.10 - Fases ferrítica e austenítica em aço duplex .....	29
Figura 3.1 - Unidade hidráulica da UPPA X .....	32
Figura 3.2 - Cilindro de reparo da UPPA X .....	32
Figura 3.3 - Geometria utilizada por Paes (2013) adaptada para a UPPA X .....	36
Figura 3.4 - Folga radial existente entre pino e bloco (f) .....	37
Figura 3.5 - Parâmetros modificados para sugestão de novas geometrias: $\varnothing_p$ (diâmetro da extremidade do pino) e $\alpha$ (ângulo do pino).....	37
Figura 3.6 - Geometria proposta para o bloco.....	38
Figura 3.7 - Geometria proposta para os pinos .....	38
Figura 3.8 - Especificações da peça de suporte para os blocos de soldagem .....	41
Figura 3.9 - Parafusos de fixação do bloco no suporte .....	41
Figura 3.10 - Representação do posicionamento do bloco sobre o suporte .....	42
Figura 3.11 - Representação dos pontos analisados através de microscopia ótica (aços carbono A36).....	44
Figura 3.12 - Pontos analisados através de microscopia ótica (AID).....	44
Figura 3.13 - Representação do mapa de indentações.....	45
Figura 3.14 - Microdurômetro Micro-Combi Tester – CSM Instruments .....	45
Figura 4.1 - Sinais medidos/calculados durante o processo (amostra 411001).....	46

Figura 4.2 - Gráfico comparativo do torque resistivo: ensaios 411001 (28°), 411002 (26°) e 411003 (24°).....	47
Figura 4.3 - Gráfico comparativo da posição do pino: ensaios 411001 (ângulo do pino de 28°), 411002 (26°) e 411003 (24°) .....	48
Figura 4.4 - Macrografias dos ensaios 411001 (ângulo do pino de 28°), 411002 (26°) e 411003 (24°).....	49
Figura 4.5 - Micrografias amostra 411001 (ângulo do pino de 28°): pontos P1 (a), P2 (b), P3 (c) e P4 (d).....	50
Figura 4.6 - Micrografias amostra 411002 (ângulo do pino de 26°): pontos P1 (a), P2 (b), P3 (c) e P4 (d).....	50
Figura 4.7 - Micrografias amostra 411003 (ângulo do pino de 24°): pontos P1 (a), P2 (b), P3 (c) e P4 (d).....	51
Figura 4.8 - Amostra 411001 (ângulo do pino de 28°): microtrinca formada na parte inferior da junta soldada .....	51
Figura 4.9 - Gráfico comparativo para o tempo de processamento dos ensaios 411001 (ângulo do pino de 28° e comprimento de queima de 6 mm), 411002 (26° - 6 mm), 411003 (24° - 6 mm), 411004 (26° - 7 mm) e 411005 (24° - 7 mm).....	52
Figura 4.10 - Macrografias dos ensaios 411004 (ângulo do pino de 26°) e 411005 (24°) ....	53
Figura 4.11 - Macrografias amostras 411006 (ângulo do pino de 26° e comprimento de queima de 7 mm), 411007 (24° - 7 mm), 411008 (26° - 8 mm), 411009 (24° - 8 mm), 411010 (26° - 9 mm) e 411011 (24° - 9 mm).....	54
Figura 4.12 - Gráfico comparativo para o tempo de processamento dos ensaios 411006 (ângulo do pino de 26° e comprimento de queima de 7 mm), 411007 (24° - 7 mm), 411008 (26° - 8 mm), 411009 (24° - 8 mm), 411010 (26° - 9 mm) e 411011 (24° - 9 mm).....	55
Figura 4.13 - Macrografias amostras 411012 (ângulo do pino de 26°) e 411013 (24°), ambos com aplicação da força em dois estágios.....	56
Figura 4.14 - Gráfico comparativo para o tempo de processamento dos ensaios 411010 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em um estágio), 411011 (24° - um estágio), 411012 (26° - dois estágios) e 411013 (24° - dois estágios).....	57
Figura 4.15 - Micrografias interface pino/bloco amostra 411010 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em um estágio): pontos P1 a P3 (esquerda p/ direita) .....	57
Figura 4.16 - Micrografias região interna do pino amostra 411010 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em um estágio): pontos P4 a P6 (esquerda p/ direita) .....	58
Figura 4.17 - Micrografias interface pino/bloco amostra 411012 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em dois estágios): pontos P1 a P3 (esquerda p/ direita).....	58

Figura 4.18 - Micrografias região interna do pino amostra 411012 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em dois estágios): pontos P4 a P6 (esquerda p/ direita) .....	58
Figura 4.19 - Mapa de microdureza: amostra 411010 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em um estágio).....	59
Figura 4.20 - Mapa de microdureza: amostra 411012 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em dois estágios).....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Capacidade máxima operacional da unidade UPPA X.....	33
Tabela 3.2 - Especificação técnica para composição química dos materiais (% em peso) (ASTM A36/A36M, 2016; ASTM A276/276M, 2016) .....	34
Tabela 3.3 - Composição química dos materiais utilizados (% em peso) .....	35
Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados na fase de ensaios preliminares.....	39
Tabela 3.5 - Parâmetros utilizados nos ensaios de preenchimento com aço inoxidável duplex .....	40

## LISTA DE SÍMBOLOS

### SÍMBOLOS

$\alpha$	Ângulo do pino
C	Carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
$\varnothing_p$	Diâmetro da extremidade do pino
S	Enxofre
Fe	Ferro
f	Folga radial
P	Fósforo
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
N	Nitrogênio
Si	Silício
W	Tungstênio

### ABREVIATURAS

kgf	Quilograma-força
kgf/min	Quilograma-força por minuto
kN	Quilo Newton
m	Metros
$\mu\text{m}$	Micrômetros
mm	Milímetros
mm/s	Milímetros por segundo
N.m	Newton-metro
HV	Número Vickers
rpm	Rotações por minuto

V Volt

### **SIGLAS**

AID	Aços Inoxidáveis Duplex
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
FHPP	Friction Hydro Pillar Processing
FTPW	Friction Tapered Plug Welding
PRE	Pitting Resistance Equivalent
TWI	The Welding Institute
UPPA X	Unidade de Processamento de Pinos por Atrito X
ZTA	Zonas Termicamente Afetadas

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Soldagem por atrito.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 <i>Etapas do Processo.....</i>	16
2.1.2 <i>Parâmetros de Soldagem .....</i>	19
2.1.2.1 <i>Velocidade de Rotação .....</i>	20
2.1.2.2 <i>Força axial.....</i>	20
2.1.2.3 <i>Taxa de Queima.....</i>	21
2.1.2.4 <i>Tempo de Aquecimento .....</i>	21
<b>2.2 Processamento de Pinos por Atrito (FHPP/FTPW) .....</b>	<b>22</b>
2.2.1 <i>Influência das Geometrias do Pino e do Furo .....</i>	24
2.2.2 <i>Ensaio em Furos Passantes.....</i>	26
<b>2.3 Aços Inoxidáveis .....</b>	<b>27</b>
2.3.1 <i>Conceito e Classificação.....</i>	27
2.3.2 <i>Aço Inoxidável Duplex.....</i>	28
2.3.3 <i>Propriedades Mecânicas do Aço Inoxidável Duplex.....</i>	30
<b>CAPÍTULO III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Equipamento de Soldagem.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Materiais Utilizados .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3 Ensaio de Preenchimento.....</b>	<b>35</b>
3.3.1 <i>Determinação da Geometria para os Ensaio Preliminares .....</i>	35
3.3.2 <i>Ensaio Preliminares para Validação da Geometria .....</i>	38
3.3.3 <i>Ensaio de Preenchimento em Aço Inoxidável Duplex.....</i>	39
<b>3.4 Peça Suporte para o Bloco .....</b>	<b>40</b>
<b>3.5 Preparação Metalográfica .....</b>	<b>42</b>
3.5.1 <i>Macrografia.....</i>	42
3.5.2 <i>Micrografia.....</i>	43

3.6 Ensaio de Microdureza Vickers .....	44
<b>CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
4.1 Sinais de Processamento .....	46
4.2 Ensaio Preliminares: Aço Carbono ASTM A36 .....	47
4.2.1 <i>Variação na Geometria do Pino</i> .....	47
4.2.2 <i>Variação no Comprimento de Queima</i> .....	51
4.3 Reparo por Atrito Utilizando Aços Inoxidáveis Duplex .....	53
4.3.1 <i>Variação na Geometria e Comprimento de Queima</i> .....	53
4.3.2 <i>Variação na Aplicação da Força (Número de Ciclos)</i> .....	55
4.4 Micrografias .....	57
4.5 Ensaio de Microdureza Vickers .....	59
<b>CAPÍTULO V - CONCLUSÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>CAPÍTULO VI - TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE A - GRÁFICOS DE PROCESSAMENTO .....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE B - MICROGRAFIAS .....</b>	<b>73</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A utilização da soldagem convencional, a arco elétrico, para reparo e manutenção de estruturas possui algumas desvantagens que limitam sua aplicação na indústria petroquímica. Isso pode ser evidenciado principalmente em equipamentos de elevada espessura e difícil soldabilidade, como por exemplo tanques de armazenamento de água e óleo em navios de produção de petróleo, onde é comum encontrar trincas decorrentes da flutuação das tenções ou cargas de fadiga que podem levar inclusive à ruptura dos componentes. Um dos principais pontos é a questão da segurança, onde a utilização de um operador em tais ambientes requer cuidados extremos para se reduzir os riscos de acidentes, já que a presença de hidrocarbonetos nessas estruturas aumenta o risco de explosões. Além disso, a qualidade da solda também é comprometida, havendo a possibilidade da nucleação de trincas induzidas pelo hidrogênio ou durante solidificação, formação de fases frágeis, inclusão de escória e porosidade no cordão de solda (RODRIGUES, 2016).

Como alternativa a esta questão, então, tem-se estudado a soldagem por atrito. Sua principal vantagem, quando comparada à soldagem a arco elétrico reside no fato do processamento ocorrer totalmente no estado sólido, não havendo a presença de fase líquida. Isso faz com que se reduza os problemas gerados pela absorção de gases, porosidade e trincas assistidas pelo hidrogênio. Outro ponto positivo da soldagem por atrito é que a pressão hidrostática não se torna mais um fator limitante, possibilitando assim sua utilização em áreas submersas de qualquer profundidade (PAES, 2013).

Dentre as técnicas decorrentes deste tipo de soldagem pode-se destacar o processamento por atrito de pinos cônicos, conhecida como FTPW (*Friction Tapered Plug Welding*). O processo consiste, basicamente, na abertura de uma cavidade na região do substrato que se deseja reparar, que é então preenchida através da introdução de um pino consumível, estando este submetido a uma determinada rotação e à aplicação de uma força

axial contra a superfície do furo feito no bloco. O calor gerado pelo atrito entre as superfícies, então, possibilita uma redução no limite de escoamento dos materiais e um consequente comportamento viscoplástico, permitindo o preenchimento por completo da cavidade (RODRIGUES, 2017).

Considerando a relevância deste assunto, portanto, e buscando contribuir com o desenvolvimento desta técnica, este trabalho tem por objetivo analisar como o comprimento de queima, modo de aplicação da força e, principalmente, a geometria influenciam no processo de reparo por atrito para furos passantes em aços inoxidáveis duplex. A utilização deste material em específico, por sua vez, é decorrente da demanda da própria indústria petroquímica, que vê nas propriedades deste material, capaz de unir boas propriedades mecânicas e uma excelente resistência a corrosão, uma solução promissora à aplicação do reparo por atrito em ambientes mais agressivos.

Para facilitar o entendimento e desenvolvimento deste estudo, ele foi organizado e dividido da seguinte forma:

No Capítulo II é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema, abordando os principais aspectos da soldagem por atrito como um todo, bem como o processamento de pinos por atrito especificamente. É detalhado também as principais características referentes aos aços inoxidáveis duplex que justificam sua utilização neste tipo de processo.

No Capítulo III é descrito os procedimentos experimentais utilizados no decorrer do trabalho. A composição dos materiais usados para fabricação dos pinos e blocos, assim como descrição dos equipamentos utilizados, tanto para a execução dos ensaios de preenchimento quanto para análises das amostras, também foram expostos nesta seção. O desenvolvimento da geometria utilizada também é abordado, indicando uma etapa preliminar de ensaios para validação dos parâmetros. Esses primeiros ensaios utilizando aço carbono visaram minimizar os custos relacionados ao projeto, possibilitando um maior conhecimento sobre o processo antes de se utilizar corpos de prova em aço inoxidável duplex (material de maior custo).

No Capítulo IV são demonstrados os resultados obtidos para cada teste e uma discussão sobre os comportamentos observados é realizada.

Por fim, no Capítulo V são expostas as conclusões que puderam ser tiradas deste estudo e no Capítulo VI sugestões de possíveis trabalhos futuros para dar prosseguimento a esta linha de pesquisa.

# CAPÍTULO II

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Soldagem por atrito

Os primeiros documentos relacionados à soldagem por atrito datam do fim do século XIX. Apesar da ideia de se soldar dois tubos através da extrusão e fricção simultânea dos corpos já ser conhecida até então, apenas durante a Segunda Guerra Mundial ela teve sua primeira aplicação industrial, na Alemanha. Em 1956, na então União Soviética, Chudikov patenteou o processo geral de soldagem por atrito, que passou a ser utilizada mais amplamente tanto pela indústria quanto pela academia (MEYER, 2003).

A soldagem por atrito é definida pela AWS (American Welding Society) como sendo um processo de soldagem em estado sólido que mantém dois corpos em contato sob a ação de uma força de compressão, enquanto há um movimento relativo entre eles (normalmente de rotação). Essa configuração faz com que calor seja gerado e que parte do material nas superfícies de contato seja deslocado plasticamente. Ao final do processo, idealmente, se observaria uma junta soldada sem indícios de que se houve fusão do material (AWS, 1991).

Esse tipo de soldagem, por sua vez, pode ser dividido em duas subcategorias: soldagem por atrito convencional e soldagem por atrito inercial. No primeiro caso (Fig. 2.1), uma das peças (de formato cilíndrico) é fixada em uma unidade motora e então rotacionada a uma velocidade constante pré-determinada. A outra peça (também de formato cilíndrico) é fixada de maneira que sua rotação é impedida. Esses corpos então são colocados um contra o outro através de uma força de compressão axial, e o atrito entre suas faces leva à geração de calor. Esse processo se mantém por um determinado período, e após a rotação do corpo ser cessada, a força axial aplicada é mantida (ou elevada) por mais alguns instantes. Essa última etapa é conhecida como forjamento (AWS, 1991; PAES, 2013).

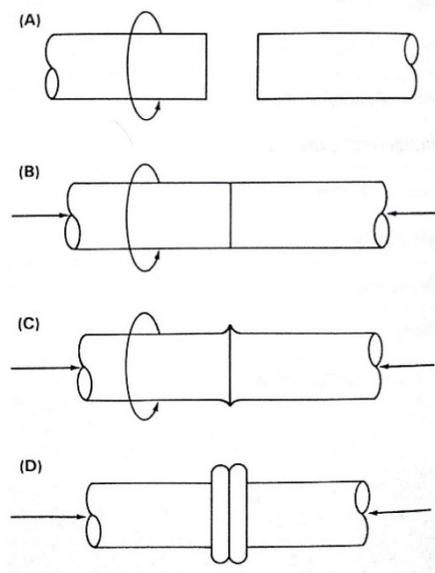


Figura 2.1 - Sequência do processo de Soldagem por Atrito Convencional (AWS, 1991)

Já a soldagem por atrito inercial se diferencia pelo fato de armazenar a energia que será consumida durante a soldagem antes de se iniciar o processo. O corpo cilíndrico é acelerado pela unidade motora a uma velocidade determinada, em seguida é desacoplado e então colocado contra o outro corpo com uma força também pré-estabelecida. Dessa maneira, a energia cinética é dissipada na forma de calor, possibilitando a soldagem das faces em contato. Após a velocidade de rotação chegar a zero, assim como para a soldagem por atrito convencional, uma força de forjamento é aplicada, podendo ela também ser igual ou superior à inicial (AWS, 1991; PAES, 2013).

### 2.1.1 Etapas do Processo

Esse processo de soldagem pode ser dividido em diferentes etapas que possibilitam indicar de maneira mais detalhada a sua cronologia e o que se espera que aconteça em cada momento, relacionando a variação dos parâmetros com a modificação do material ou da junta. Essa divisão, porém, varia de autor para autor. De acordo com a AWS (1991), por exemplo, a soldagem por atrito pode ser dividida em duas etapas, enquanto que outros preferem dividi-la em quatro sub-etapas (MATTOS, 2012) ou até mesmo seis (PIRES, 2007). A seguir será considerada a divisão em quatro etapas (Fig. 2.2).

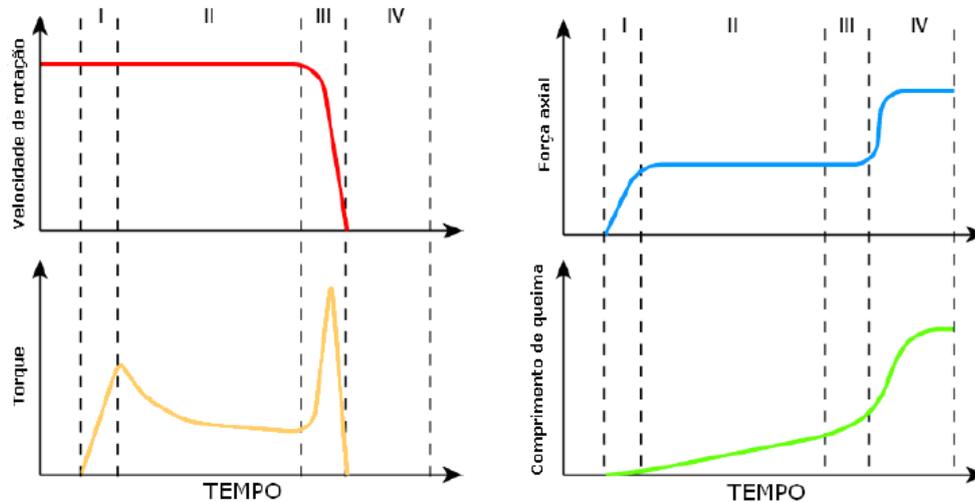


Figura 2.2 - Etapas da soldagem por atrito: I) Atrito; II) Aquecimento; III) Frenagem; IV) União (MATTOS, 2012)

A primeira fase, chamada de atrito, se inicia com um contato bastante limitado entre pequenas regiões das superfícies, fazendo com que a pressão aplicada nesses locais apresente valores elevados, que por sua vez promove alto grau de deformação nesses pontos e um conseqüente nivelamento da superfície. No ponto de vista de energia, microligações são criadas em pontos isolados das superfícies e rapidamente rompidas, o que leva a um acréscimo de temperatura naquela região. Essa energia, porém, é quase que instantaneamente dissipada devido ao caráter pontual desse fenômeno, e mesmo que a temperatura de fusão seja atingida, portanto, ela não seria mantida. Esse processo também faz com que óxidos presentes nas superfícies, bem como uma camada de impurezas adsorvidas a eles, sejam rompidos. Livre desses contaminantes, então, o contato direto entre os materiais que leva a um aumento no coeficiente de atrito, juntamente com a redução da aspereza que possibilita um aumento na área efetiva de contato, fazem com que o torque atinja seu valor máximo inicial, o que caracteriza o fim da primeira fase (MEYER, 2003; PAES, 2013).

É importante ressaltar que ainda na primeira fase, devido ao aumento excessivo e instantâneo da temperatura nas pequenas regiões iniciais de contato e por reações químicas estimuladas pelo atrito entre as faces, novos óxidos são formados. Essas partículas, porém, acabam sendo expelidas para as extremidades das superfícies através de um fenômeno conhecido como hidro-extração, relacionado com o fato de a velocidade rotacional relativa, e conseqüentemente, as forças radiais, serem maiores próximas a essas regiões. Por outro lado, justamente devido ao comportamento oposto nas áreas mais próximas ao centro (que apresentam menores forças radiais), os contaminantes ali já presentes encontram dificuldades de deixarem aquela área. Com isso se forma uma região com o formato de um

anel, ao redor do centro das superfícies de contato, em que o processo de fricção é favorecido (MEYER, 2003; PIRES, 2007).

Na segunda etapa (aquecimento) então, ocorre um alongamento dessa região formada, com o anel de material plastificado se expandindo para as áreas de menor temperatura. Inicialmente para o centro da superfície, formando um círculo que, por sua vez, cresce em direção aos pontos mais externos (Fig. 2.3) (MATTEI, 2011).

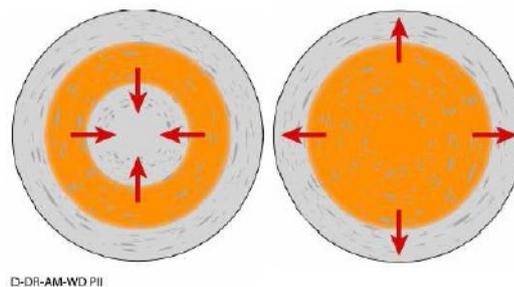


Figura 2.3 - Representação do alongamento da região de material plastificado nas superfícies de contato (MEYER, 2005)

Ao fim desse processo, quando essa região de material plastificado já corresponde à superfície de contato por completo, um estado de equilíbrio da temperatura é atingido, que passa a ser mantido através de um fenômeno de auto ajuste. Nas zonas mais quentes o material apresenta um comportamento mais plástico, e conseqüentemente o torque é diminuído, que por sua vez reduz a geração de calor, ou seja, favorece a redução da temperatura. Esse material na camada de contato mais externa que acaba tendo, então, uma característica mais macia e, portanto, menos resistente à força de compressão aplicada, é expelido para fora da superfície de atrito, formando a chamada rebarba (*flash*). Há então uma redução no comprimento (axial) dos corpos, ou seja, a altura da região plastificada é reduzida, possibilitando que regiões mais internas, e mais frias, agora passem a entrar em contato. Essas novas superfícies, por sua vez, também vão se aquecendo e se tornando mais plásticas a medida que vão sendo friccionadas uma contra a outra. Esse processo é mantido enquanto a altura do material plastificado e a temperatura consigam manter um determinado equilíbrio, fazendo com que mais material seja expelido para a extremidade da junta, a rebarba. E assim é mantido até que algum parâmetro em específico (temperatura, comprimento de queima, etc.) atinja um valor pré-determinado, o que indicaria o fim desta etapa (MATTOS, 2012).

A terceira fase, frenagem, é iniciada com a redução da velocidade rotacional. Isso faz com que haja um aumento no número de microligações criadas ao longo da superfície, que ao serem rompidas liberam energia e possibilitam que a temperatura ainda seja mantida. Isso até que se atinja um ponto crítico em que a redução drástica na velocidade impossibilite que

esse fenômeno seja mantido, ocasionando uma redução na temperatura das superfícies de atrito. É também nessa fase que o torque atinge o seu segundo pico, já que há uma redução na taxa de deformação que leva a um aumento na resistência ao cisalhamento. Quando a velocidade do corpo chega a zero, a etapa de frenagem é concluída (MATTEI, 2011).

A etapa final (união) corresponde ao processo de ligação das superfícies. Apesar desse processo já ser iniciado ao longo da segunda fase, só a partir desse momento que ele se dará de maneira homogênea. Ao ser aplicada uma força de forjamento logo após a frenagem, normalmente maior do que a força aplicada até então, camadas de óxidos que foram criadas devido a um atrito insuficiente são expelidas para fora da junta. Isso faz com que haja um contato mais direto entre as superfícies, facilitando a sua união. Nessa fase há um aumento considerável na taxa do comprimento de queima. E a medida que a junta vai se esfriando o material começa a se recrystalizar e tensões internas são eliminadas. Isso é essencial para que uma soldagem com boas propriedades mecânicas seja formada (MEYER, 2003).

### 2.1.2 Parâmetros de Soldagem

Dentre os diversos parâmetros que podem interferir no processo de soldagem por atrito, alguns em específico serão detalhados a seguir. São eles: velocidade de rotação, força axial, taxa de queima e tempo de aquecimento (Fig. 2.4).

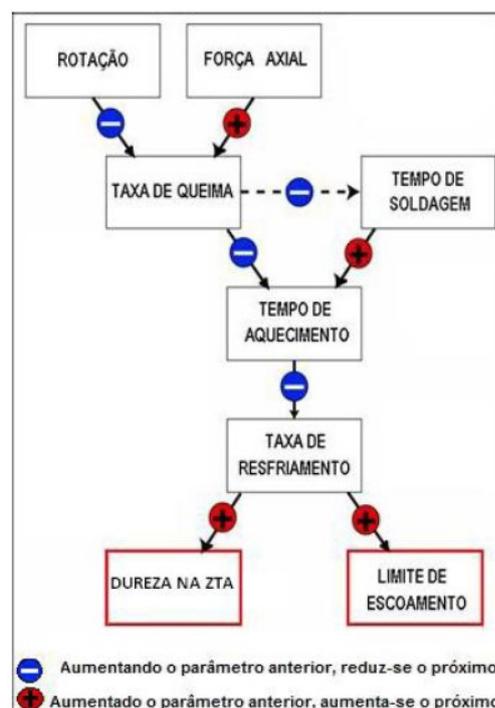


Figura 2.4 - Relação entre os parâmetros de soldagem por atrito (GONTIJO, 2012)

### 2.1.2.1 Velocidade de Rotação

A velocidade relativa entre os corpos, normalmente, não é um fator determinante para a qualidade final da soldagem, ou seja, ela pode variar dentro de um intervalo considerável e ainda assim é possível se obter uma boa solda (AWS, 1991).

Quando se é utilizado valores mais elevados para este parâmetro, observa-se que o contato entre as superfícies é acompanhado por uma espécie de polimento de suas asperezas, que por sua vez, faz com que seja necessário um maior tempo para que as condições plásticas ideais para o processo sejam atingidas, já que haverá uma menor geração de calor decorrente de atrito. Como consequência desse aumento no tempo de processamento, o calor se propagará a uma porção maior do material, aumentando assim as chamadas zonas termicamente afetadas (ZTA), além de reduzir também a taxa de resfriamento dos corpos. Esse comportamento também resultará em uma queda nas propriedades mecânicas do material, como o limite de resistência e a dureza, e a estrutura metalográfica será mais grosseira (ex. ferrita de Widmanstätten). Por outro lado, ao se considerar baixas velocidades rotacionais relativas, como era de se esperar, haverá uma redução no calor gerado nas superfícies em contato. Nesses casos, também deve-se considerar que unidades com uma maior potência deverão ser utilizadas, já que os esforços a serem superados serão também consideravelmente maiores. Outro ponto que deve ser ressaltado é que em rotações mais baixas, em que as ZTA são menores, a taxa de resfriamento será maior, principalmente dependendo do meio em que o corpo estiver sendo resfriado, elevando-se assim o nível de dureza do material a níveis indesejados (MATTOS, 2012).

### 2.1.2.2 Força axial

Ao contrário da velocidade de rotação, a força axial aplicada interferirá drasticamente no resultado do processo. Sua principal função é fazer com que as superfícies mantenham um contato íntimo o tempo todo, garantindo assim que nenhuma camada de óxido ou qualquer outro tipo de impureza se aloque naquela região. Deve-se atentar para o fato, porém, de que elevadas forças implicam em uma maior dificuldade de se controlar as condições do processo, já que se obteriam altas temperaturas em regiões específicas e altas taxas de queima. A força também implicará diretamente no tempo total da soldagem, bem como na ZTA: forças elevadas (e, conseqüentemente, menores tempo de processamento e aquecimento das superfícies) originarão zonas que vão se estreitando na direção axial, adquirindo um perfil

cônico que se origina no centro da solda e estende para seu exterior; forças mais baixas gerarão ZTA com um aspecto mais abrangente com uma propagação mais paralela à superfície. Visando uma melhora nas propriedades mecânicas finais da junta, como tração, dureza e tenacidade, deve-se evitar a formação de ferrita de Widmanstätten, ou seja, priorizar a formação de uma microestrutura mais refinada, e para isso uma força maior deve ser aplicada (PIRES, 2007; GONTIJO, 2012).

### 2.1.2.3 Taxa de Queima

Taxa de queima pode ser definida como sendo a velocidade com que se desloca a superfície de atrito de uma peça sobre a outra, e normalmente é expressa em mm/s. Este é um parâmetro que exerce forte influência sobre a qualidade da solda, além de controlar o início e fim do processo. Ela está diretamente relacionada com a velocidade de rotação e a força axial aplicada: maiores taxas de queima podem ser atingidas, normalmente, através da redução da velocidade rotacional ou do aumento na força utilizada. Isso porque para se atingir maiores taxas é necessário que se tenha uma maior interação entre as superfícies que estão sendo atritadas, cenário que é atingido em condições de maior torque (PAES, 2013).

Do ponto de vista das propriedades do material, taxas de queima mais elevadas influenciam de maneira diretamente proporcional aos valores dos limites de resistência, já que resultam em processos mais rápidos e, conseqüentemente, com maiores taxas de resfriamento. Uma das desvantagens em se utilizar esse parâmetro para controle do processo é que se torna necessário um bom alinhamento entre as faces das peças a serem soldadas e remoção das rebarbas criadas através de usinagem. Há um comprimento de queima mínimo, porém, que garante uma boa união da junta, bem como um *flash* uniforme. Avançar além deste ponto, por muitas das vezes, ocasionará em um prolongamento desnecessário no tempo do processo, consumindo material e tornando a microestrutura cada vez menos refinada (PAES, 2013).

### 2.1.2.4 Tempo de Aquecimento

O tempo de aquecimento, parâmetro fortemente influenciado pela velocidade rotacional e força aplicadas no processo, é dado como sendo o período que se inicia pelo contato inicial entre as superfícies e que é finalizado ao final da etapa de frenagem. Principalmente em casos em que se há menores taxas de queima, o tempo de aquecimento se mostra bastante

importante, pois determinará a microestrutura criada na interface da solda e a profundidade com que o calor poderá ser conduzido para o restante da peça, ou seja, definirá a largura da ZTA formada. A interferência do tempo na microestrutura se dá devido às diversas possibilidades de transformação da austenita em seus produtos (ferrita, perlita, bainita ou martensita). Ao final do forjamento a proporção dessas estruturas vai depender principalmente do valor máximo da temperatura que foi atingido no decorrer do processo, bem como da taxa de resfriamento do material, e é justamente a caracterização dessa microestrutura que irá determinar as propriedades mecânicas de resistência da junta. Do ponto de vista de qualidade de solda é preferível menores tempos de aquecimento. Isso porque a taxa de resfriamento seria maior já que a rebarba criada seria menor, não havendo assim armazenamento de calor nessa região que pudesse voltar em direção à junta ao fim do processo e retardar o resfriamento, resultando em melhores propriedades mecânicas. A não ser que o objetivo seja obter um material com maior tenacidade; nesse caso maiores tempos de aquecimento, e consequentemente menores taxas de resfriamento, seriam indicadas (MEYER, 2003).

## **2.2 Processamento de Pinos por Atrito (FHPP/FTPW)**

O processamento de pinos por atrito é um dos processos decorrentes da soldagem por atrito. Esse processo em específico, também conhecido como FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*), foi desenvolvido na década de 90 pelo The Welding Institute (TWI). Ele consiste, basicamente, em se abrir um furo cego de geometria cilíndrica na região do material que está danificada e que se deseja reparar e então utilizar um pino também cilíndrico a ser consumido para ocupar este espaço. Para isso uma força axial é aplicada ao material através do pino enquanto este é rotacionado, e o calor gerado pelo atrito entre a superfície do pino e o fundo do furo então, possibilita que o metal seja plastificado (Fig. 2.5). É o fato desse material apresentar um estado plástico que o permite preencher por completo a cavidade inicialmente produzida. A presença deste pino consumível, portanto, se torna a principal característica que diferencia o reparo por atrito da solda por atrito (MEYER, 2003; GONTIJO, 2012).



Figura 2.5 - Ilustração do método de reparo por atrito FHPP (MEYER, 2003)

Um outro processo, semelhante ao FHPP e que também deriva da soldagem por atrito, é o FTPW (*Friction Tapered Plug Welding*). Ao contrário do método FHPP, porém, no processo de reparo FTPW o furo feito na peça com o objetivo de remover o defeito ou trinca do material tem um formato cônico, além possibilitar a utilização de um furo cego ou passante. Dessa maneira, o aquecimento a ser gerado para possibilitar a diminuição do valor do limite de escoamento do metal e a consequente geração do fluxo de material viscoplástico para o preenchimento do furo será decorrente também do atrito entre as faces laterais dos corpos, e não mais apenas com o fundo do furo. Outra diferença é que nesse tipo de processo a força axial aplicada pelo pino sob o material pode tanto ser de compressão quanto de tração, dependendo da geometria do furo (Fig. 2.6); já o método de reparo FHPP poderá ser executado apenas se uma força compressiva for utilizada (PAES, 2013; SANTOS, 2013).

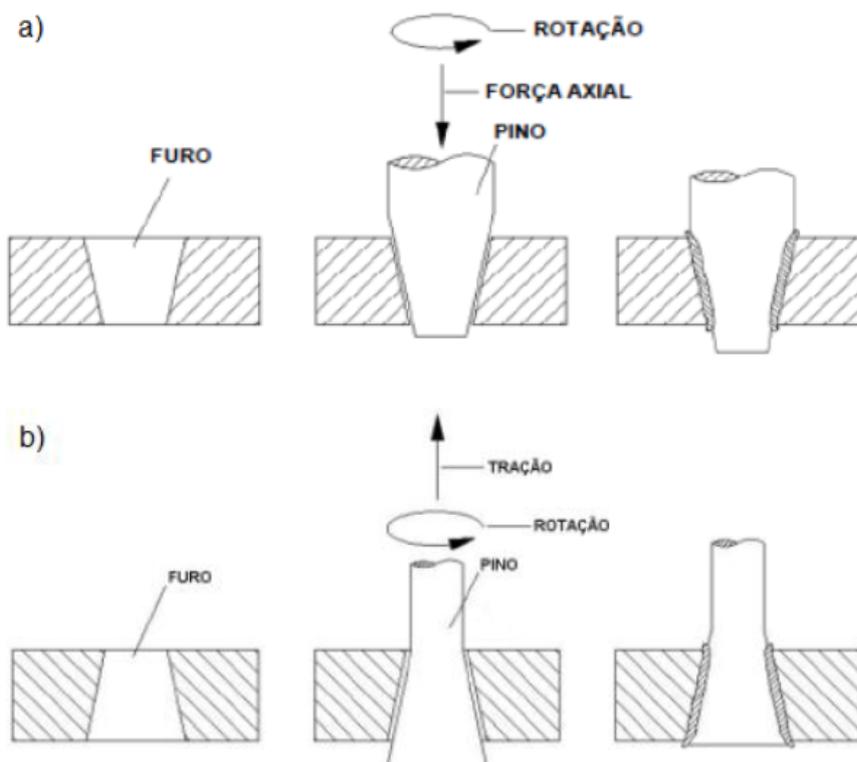


Figura 2.6 - Ilustração do método de reparo por atrito FTPW: a) por compressão; b) por tração (HWANG, 2010)

Esses métodos possuem como principal aplicação o reparo de defeitos em chapas e dutos de aço, bem como trincas de fadiga em cordões de solda, de estruturas offshore em condições subaquáticas, normalmente localizadas a mais de 100 m de profundidade. Isso se dá devido sua característica de o material não ser efetivamente fundido durante o reparo, ou seja, o processo ocorre com o material em fase sólida. Desta maneira a pressão externa sobre a junta não irá interferir na solda, o que torna esse tipo de reparo ideal para condições ambientes mais extremas, como aquelas anteriormente citadas (HWANG, 2010; SANTOS, 2013).

### 2.2.1 Influência das Geometrias do Pino e do Furo

Para os processos de reparo por atrito, o pino e o furo a serem utilizados podem possuir uma geometria cilíndrica ou cônica. Quando se trata de reparos com cavidades de maior profundidade, recomenda-se que sejam utilizadas geometrias cilíndricas, já para furos menos profundos, geometrias cônicas são mais empregadas. O principal motivo para tal diferenciação se encontra no fato de caso seja optado por utilizar um furo cônico em uma cavidade muito profunda, o diâmetro do pino a ser consumido para preencher o furo precisaria

ser consideravelmente grande. Isso, por sua vez, exigiria que os equipamentos necessários para efetuar o reparo fossem bem mais robustos, com motores de maior capacidade de potência, o que, em termos práticos, significaria a inviabilização do processo. Desta maneira, caso se utilize uma geometria cônica, recomenda-se que a profundidade do furo não ultrapasse os 20 mm (Fig. 2.7) (GONTIJO, 2012).

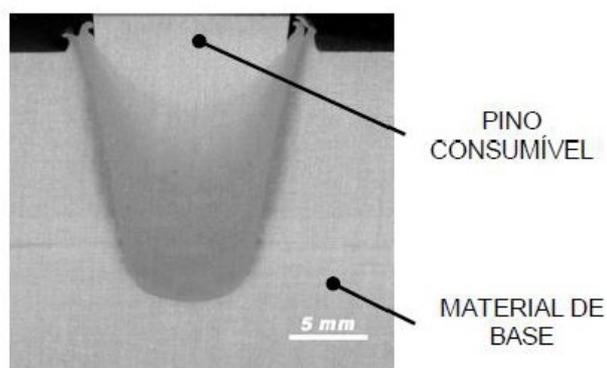


Figura 2.7 - Processamento por atrito com geometrias do pino e do furo cônicas (PIRES, 2007)

A princípio acreditava-se que a geometria também poderia interferir na distribuição da força axial aplicada no fundo do furo para as paredes laterais através de um comportamento hidrostático, porém não foi isso que foi evidenciado em estudos posteriores. Meyer (2003) verificou que essa distribuição não está relacionada com o ângulo da seção cônica, e sim com a forma do plano de contato entre os corpos. Dessa forma, descartando a influência desse parâmetro, seus estudos puderam determinar que as diferenças encontradas nas microestruturas e nas propriedades mecânicas dentre as geometrias testadas na verdade eram um reflexo, basicamente, dos diferentes tempos de soldagem e ciclos térmicos desenvolvidos. Meyer (2003) destacou ainda, porém, que com uma geometria cônica é possível atingir melhores níveis de qualidade na solda da junta sem que se precise aumentar consideravelmente a taxa de queima, já que poderiam ser aplicadas forças axiais mais elevadas. Isso porque um diâmetro maior implicaria em um processo mais longo, com maior geração de calor, fazendo com as superfícies a serem unidas fiquem expostas a elevadas temperaturas por mais tempo, bem como com forças normais sendo aplicadas sob elas também por períodos mais longos.

A geometria do pino e do furo se mostram ainda essenciais para que se possa produzir juntas sem descontinuidades, ou seja, que preencham por completo o orifício criado, principalmente em regiões onde é comum se encontrar pontos de falta de adesão, como é o caso nas extremidades do fundo da cavidade. Até mesmo questões mais específicas da geometria dos corpos podem influenciar diretamente na qualidade da soldagem, como por

exemplo ao se determinar o adocçamento a ser utilizado nas extremidades dos corpos. Ao se utilizar blocos chanfrados ou pinos de pontas planas ou chanfradas é esperada uma maior presença de defeitos, enquanto que extremidades arredondadas favorecem o preenchimento completo da região (PIRES, 2007; PAES 2013).

### 2.2.2 Ensaios em Furos Passantes

Ainda há poucos estudos envolvendo reparo por atrito em furos passantes, havendo, portanto, uma certa carência quanto aos detalhes que envolvem este processo. Paes (2013) desenvolveu um trabalho em que discorre sobre diversos aspectos e parâmetros gerais do processamento de pinos por atrito, e dentre os ensaios realizados se encontravam amostras com furos de geometria passante (Fig. 2.8). Este, por sua vez, baseou-se nas informações de Andrews e Mitchell (1990): “no caso das juntas FTPW com cavidade passante, decidiu-se por não se avaliar o efeito de mudanças de parâmetros ou geometrias, adotando-se os parâmetros de soldagem e geometria recomendado por ANDREWS e MITCHELL” (PAES, 2013, p. 97).

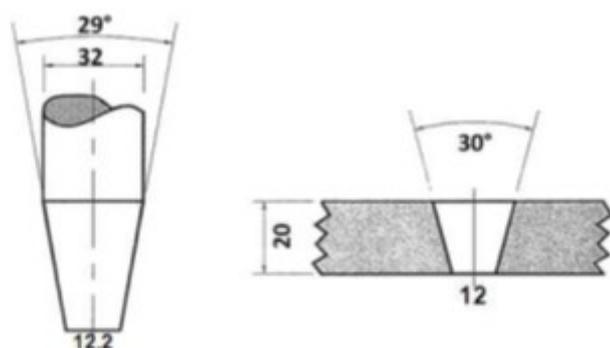


Figura 2.8 - Geometria adotada por Paes (2013) no processamento com furos passantes

Os resultados encontrados por Paes (2013) indicaram soldas de boa qualidade. As respectivas macrografias indicaram uma união uniforme, sem a presença aparente de falhas de preenchimento. Algumas ressalvas, porém, foram levantadas: o tempo de processamento foi bastante curto, variando entre 3 e 5 segundos, dependendo do material. Foi observada uma falta de consolidação no final da soldagem (saída da rebarba), indicada pela presença de uma microtrinca na região mais inferior da interface pino/bloco. Foi sugerido por Paes (2013), então, um aumento no comprimento de queima como possível solução a este problema.

Dentre os testes já realizados pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), Carneiro (2009) desenvolveu um projeto para analisar, justamente, a qualidade da solda em juntas geradas pelo reparo por atrito em furos passantes. Esse estudo analisava quatro geometrias diferentes. Três delas, porém, foram descartadas logo após os primeiros ensaios por apresentarem o travamento do motor hidráulico da unidade de processamento. Da geometria que foi possível finalizar o reparo (Fig. 2.9), porém, o resultado obtido não foi muito satisfatório, apresentando uma quantidade considerável de falhas.

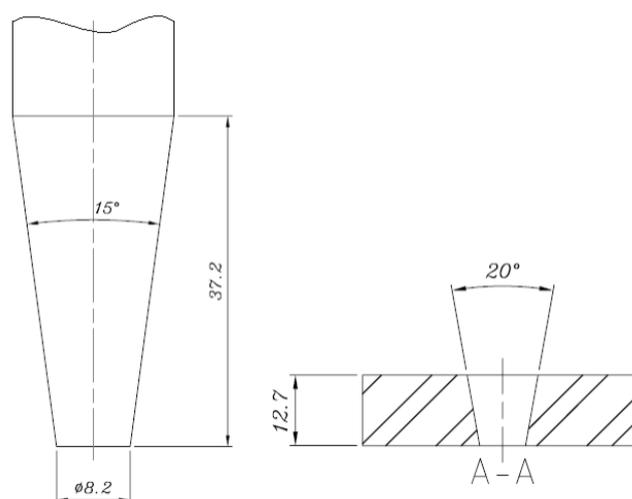


Figura 2.9 - Geometria utilizada por Carneiro (2009)

## 2.3 Aços Inoxidáveis

### 2.3.1 Conceito e Classificação

Os aços inoxidáveis recebem esta denominação devido à sua característica de elevada resistência à corrosão ao entrar em contato com o meio atmosférico, quando em meios mais agressivos e de altas temperaturas. São aços baseados nos sistemas Fe-Cr, Fe-Cr-C e Fe-Cr-Ni, e para que possam receber essa caracterização, eles devem possuir ao menos 10,5 % da sua composição de cromo e outros elementos de liga. Quanto à sua composição, os principais elementos químicos que os compõem são: cromo, níquel, molibdênio, manganês e nitrogênio; podendo ser adicionado à liga ainda nióbio, titânio, cobre, silício e alumínio. O elemento que dará a esse tipo de aço a sua principal característica – resistência à corrosão, é o cromo, por ser um metal menos nobre que o ferro. Ao entrar em contato com o oxigênio presente no meio, o cromo forma óxidos/hidróxidos que acabam por criar uma camada

protetora de grande aderência ao material, sendo ela impermeável, estável e de excelente resistência à corrosão (SABARA, 2013).

Os aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco diferentes subgrupos que se diferenciam basicamente pela composição química e microestrutura predominante, são eles: inoxidáveis martensíticos, ferríticos, austeníticos, duplex e endurecidos por precipitação. Os austeníticos são ligas Fe-Cr-Ni com 16 a 25 % de cromo em sua composição, estrutura cúbica de face centrada e são os mais comercializados atualmente devido, principalmente, à alta resistência a corrosão e oxidação. Os aços ferríticos possuem de 11 a 30 % de cromo e apresentam estrutura cúbica de corpo centrado. Os martensíticos, assim como os ferríticos, são ligas Fe-Cr-C, porém com teor de cromo que varia de 12 a 17%; e o que os difere é que são adicionados alguns elementos de liga gamagênicos no tipo martensítico que possibilitam a transformação martensítica. Os endurecidos por precipitação são os que apresentam maior resistência mecânica e maior temperatura de trabalho, o que é conseguido através de tratamentos térmicos para formação de precipitados. Por fim tem-se os aços inoxidáveis duplex (objeto de estudo deste trabalho), cujas características serão detalhadas a seguir (GRACIOSO, 2003).

### 2.3.2 Aço Inoxidável Duplex

Os aços inoxidáveis duplex (AID) possuem uma estrutura mista de ferrita e austenita (Fig. 2.10), cujas fases e suas respectivas proporções podem variar dependendo da temperatura atingida durante o seu processo de fabricação, bem como da taxa de resfriamento a qual foi submetido. É justamente essa característica dual na estrutura que confere aos aços inoxidáveis duplex inúmeras vantagens para sua aplicação. Eles combinam os principais benefícios das fases austenítica e ferrítica tratando-se de propriedades mecânicas e resistência à corrosão, sendo a fase austenítica responsável pela alta tenacidade e resistência à corrosão de forma mais geral e a fase ferrítica atribuindo maior resistência mecânica e resistência a corrosão sob tensão em meios com presença de cloreto ao material (JANA, 1991; THEODORO, 2013).

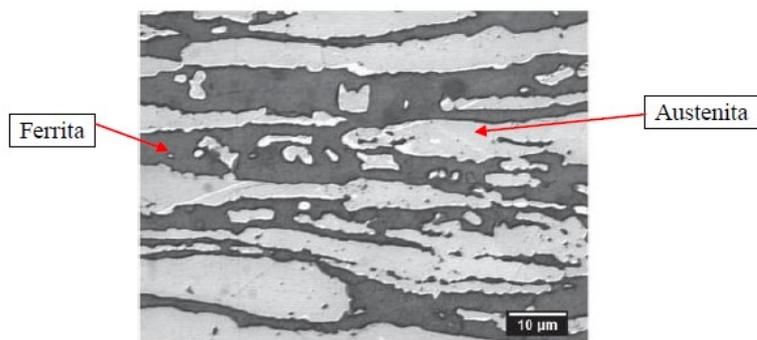


Figura 2.10 - Fases ferrítica e austenítica em aço duplex (THEODORO, 2013)

Além dos aços inoxidáveis duplex, há também os chamados aços super duplex. A principal diferença entre eles se encontra na composição química, com os super duplex apresentando maiores concentrações de molibdênio, níquel e cromo. Como consequência, eles acabam apresentando uma maior resistência a corrosão e resistência mecânica que os duplex (THEODORO, 2013).

Uma maneira de se contrastar quantitativamente as diferentes capacidades de um material a resistir a corrosão é através de uma fórmula empírica, indicada na Eq. (1.1), conhecida como resistência equivalente à corrosão por pite, ou PRE (Pitting Resistance Equivalent). Corrosão ao pite é caracterizada como sendo uma forma específica de corrosão que ocorre em meios que contém íons halogênicos, podendo-se destacar o íon cloreto em específico (VOGEL; NERY; ARAÚJO, 2013).

$$PRE = \% Cr + 3,3.( \% Mo) + 16. (\% N) \quad (1.1)$$

Para alguns casos ainda pode-se considerar uma variação desta equação. Quando em aços super duplex houver uma concentração significativa de tungstênio ( $W$ ) o PRE pode ser calculado através da Eq. (1.2) (PARDAL, 2009).

$$PRE = \% Cr + 3,3.( \% Mo + 0,5. \% W) + 16.( \% N) \quad (1.2)$$

Dessa maneira é possível comparar então os aços duplex e super duplex. Os valores de resistência a corrosão (PRE) para os duplex variam em torno de 35 a 40, já para os aços super duplex o PRE atinge valores acima de 40 (VOGEL; NERY; ARAÚJO, 2013; Pardal, 2009).

### *2.3.3 Propriedades Mecânicas do Aço Inoxidável Duplex*

As excelentes propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex vêm justamente da combinação das duas fases presentes no material. É por isso que um equilíbrio na proporção de austenita (que apresenta elevados valores de alongamento) e ferrita (elevado limite de escoamento) na estrutura, com uma concentração variando próximo dos 50% para essas fases, seria considerado a condição ótima para se atingir as melhores características possíveis. Quanto a essas propriedades pode-se destacar valores mais elevados para a tenacidade e ductilidade ao se comparar com os aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos; bem como um alto limite de escoamento, que pode apresentar valores até duas vezes maiores que os referentes aos austeníticos. Outra característica interessante dos aços duplex é o comportamento superplástico que ele pode apresentar, ou seja, grandes e uniformes deformações sem a formação de estrição quando em temperaturas próximas a 50% da sua temperatura de fusão. Isso é atingido quando o material apresenta uma estrutura bastante refinada, decorrente da transformação de uma porção de ferrita em austenita/ferrita (FARIAS, 2009).

É justamente esse conjunto de propriedades mecânicas favoráveis, ligado à elevada resistência a corrosão que explicam a sua extensa aplicação nos setores de processamento químico, petroquímico, papel e celulose, extração de petróleo em terra ou em alto mar, fertilizantes e nuclear. Nessas indústrias a utilização do aço duplex se dá principalmente em tubulações, bombas, tanques e vasos de pressão (PARDAL, 2009; SABARA, 2013).

# CAPÍTULO III

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 Equipamento de Soldagem

Os ensaios de reparo por atrito deste trabalho foram realizados no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), pertencente ao conjunto de laboratórios da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Em específico foi utilizada a Unidade de Processamento de Pinos por Atrito X, ou simplesmente UPPA X, que foi desenvolvida pelo próprio laboratório com apoio da empresa Petróleo Brasileiro SA (Petrobras). Trata-se de um equipamento compacto, com uma massa de aproximadamente 17 kg, projetada justamente para aplicação prática em campo da técnica de reparo por atrito (RODRIGUES, 2017).

O equipamento utiliza, basicamente, de uma unidade hidráulica (Fig. 3.1) para acionar um cilindro (Fig. 3.2), tanto em um sentido axial quanto em um sentido de rotação, onde é fixado o pino a ser consumido ao longo do processo. Mais detalhes sobre o funcionamento e especificações da UPPA X podem ser encontrados no trabalho de Rodrigues (2016).



Figura 3.1 - Unidade hidráulica da UPPA X (RODRIGUES, 2016)

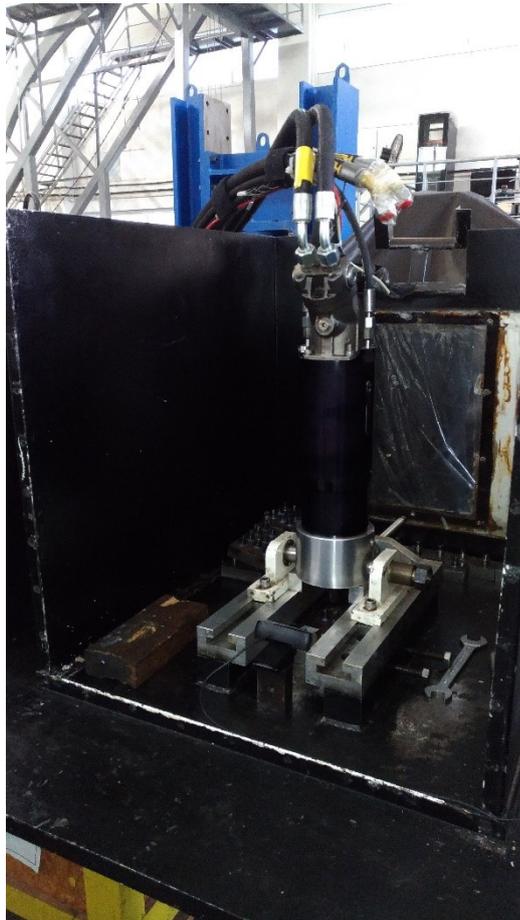


Figura 3.2 - Cilindro de reparo da UPPA X

Os valores referentes à capacidade máxima atingida por este equipamento estão expressos na Tab. 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 - Capacidade máxima operacional da unidade UPPA X (RODRIGUES, 2016)

<b>Força Axial Máxima (com Rotação)</b>	40 kN
<b>Rotação Máxima</b>	5500 rpm
<b>Torque Máximo</b>	88 N.m
<b>Capacidade de Curso do Cilindro</b>	45 mm

Quanto ao software, ao ser inicializado ele permite que o usuário determine previamente os valores desejados a serem atingidos durante o processo. Nesta configuração inicial se determina a rotação a ser utilizada, a força axial - podendo esta ser aplicada em um ou dois estágios (neste caso possibilitando ainda especificar diferentes valores para a força e o comprimento de queima em cada estágio, caso desejado), a duração e força referentes à etapa de forjamento no final do processamento e o comprimento de queima (considerando-se o ponto inicial como sendo o de contato entre o pino e bloco). Ao final, um arquivo é gerado onde se é detalhado como os principais parâmetros (rotação, posição, força, torque e velocidade) se comportaram ao longo do processo, com valores extraídos a cada 2 milésimos de segundo. Com esses dados em mãos então, se torna possível uma análise posterior mais criteriosa desses resultados, possibilitando o cálculo de outros parâmetros derivados dos inicialmente coletados (como por exemplo a potência), bem como confecção de gráficos para uma mais fácil comparação entre diferentes ensaios.

### 3.2 Materiais Utilizados

O material objeto de estudo deste trabalho é o aço inoxidável duplex. A escolha por tal material reflete uma necessidade prática da Petrobras frente aos projetos de pesquisa atualmente em andamento no laboratório. Tendo em vista um melhor conhecimento do processo de reparo por atrito aplicado em situações mais práticas, mais especificamente em meios mais agressivos onde o material está mais sujeito a ataques corrosivos, a escolha do aço duplex se mostra bastante pertinente, dadas suas características aqui já citadas.

Apesar de outras linhas de pesquisa do laboratório que abordam a utilização deste material para processamento de pinos por atrito já estarem em estágios mais avançados, elas tratam, quase que em sua totalidade, de reparos em furos cegos. Como outro ponto abordado neste projeto, também tendo em mente uma aplicação prática do processo, é referente à

utilização de furos passantes, optou-se por realizar testes preliminares em aço carbono mais comum. É evidente que o material utilizado é um fator extremamente relevante no resultado obtido, porém o objetivo com tal medida era garantir um conjunto de parâmetros e geometrias até certo ponto replicáveis que resultassem em uma solda de qualidade razoável. O aço carbono foi escolhido pois caso os primeiros resultados não fossem satisfatórios isso não representaria um gasto excessivo em uma etapa ainda inicial do trabalho, visto que os valores dos aços inoxidáveis duplex são consideravelmente mais altos.

Portanto, para os ensaios iniciais, foram usados para a fabricação dos pinos consumíveis o aço carbono ABNT 1010, disponíveis em barras cilíndricas com aproximadamente 19 mm de diâmetro. Já para a confecção dos blocos utilizou-se chapas de aço carbono ASTM A36 com meia polegada de espessura.

Para a segunda bateria de ensaios, já se tratando de AID, optou-se por utilizar o aço inoxidável duplex UNS S32205, tanto para o pino quanto para o bloco. Para confecção dos pinos ele foi disponibilizado pelo laboratório em uma barra cilíndrica de 20 mm de diâmetro. Para a usinagem dos furos cônicos nos blocos, chapas de meia polegada de espessura foram utilizadas.

Os limites para a composição química destes materiais, segundo as normas ASTM A276/276M (2016) e ASTM A36/A36M (2016), estão expostos na Tab. 3.2. Análises químicas foram realizadas através de espectroscopia de emissão ótica com plasma induzido (equipamento da marca LECO, modelo GDS 500A) para se determinar a composição dos materiais utilizados. Os resultados estão expostos na Tab. 3.3. Desconsiderando apenas as concentrações de Si para a chapa em aço carbono, Cr para a chapa de aço inoxidável e Mo para a barra em AID, os resultados apresentaram teores considerados aceitáveis para os elementos analisados.

Tabela 3.2 - Especificação técnica para composição química dos materiais (% em peso) (ASTM A36/A36M, 2016; ASTM A276/276M, 2016)

Material	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	S	P	Cu
<b>ASTM A36</b>	0,26 máx	0,6 a 0,9	-	-	-	0,40 máx	0,05 máx	0,04 máx	0,2
<b>UNS S32205</b>	0,03 máx	2,0 máx	22,0 a 23,0	4,5 a 6,5	3,0 a 3,5	1,0 máx	0,02 máx	0,03 máx	-

Tabela 3.3 - Composição química dos materiais utilizados (% em peso)

Amostra	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	S	P	Cu
<b>Barra (ABNT 1010)</b>	0,12	0,69	0,03	0,01	0,0	0,16	0,027	0,044	-
<b>Chapa (ASTM A36)</b>	0,12	1,10	0,21	0,01	0,02	1,02	0,006	0,038	-
<b>Barra (UNS S32205)</b>	0,016	1,571	22,16	5,179	2,586	0,527	0,000	0,022	0,129
<b>Chapa (UNS S32205)</b>	0,020	1,288	20,80	5,666	3,119	0,454	0,000	0,021	0,231

### 3.3 Ensaios de Preenchimento

#### 3.3.1 Determinação da Geometria para os Ensaios Preliminares

Para este trabalho, optou-se por utilizar as geometrias ensaiadas por Paes (2013) e Carneiro (2009) como referência. Em relação à geometria usada por Paes (2013), porém, se fez necessário considerar algumas alterações, já que suas dimensões seriam incompatíveis com a UPPA X. A solução, então, foi reduzir todas as dimensões a uma taxa de  $18/32 = 0.5625$ , referentes ao diâmetro maior do pino para cada caso, como pode ser visto na Fig. 3.3.

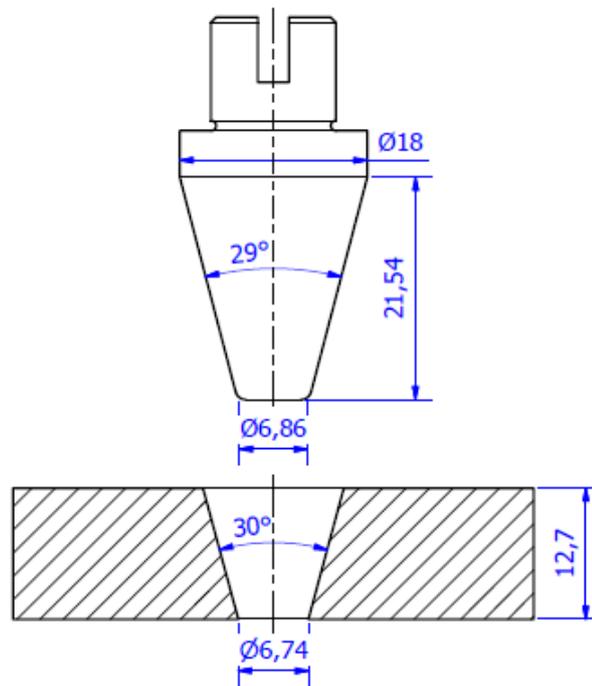


Figura 3.3 - Geometria utilizada por Paes (2013) adaptada para a UPPA X

Para uma análise inicial, então, esses dois pares de geometria foram propostos. Em ambos os casos foi considerada a espessura do bloco como sendo de meia polegada (12,7 mm), referente ao material disponível para fabricação.

Para evitar que o trabalho ficasse limitado a apenas duas geometrias, optou-se por desenvolver novas configurações de pinos e blocos, baseando-se nessas duas principais referências. Para cada par proposto, desenhos foram confeccionados com o auxílio do software Inventor, e a folga radial (distância perpendicular entre o topo do furo no bloco e a superfície do pino - Fig. 3.4), considerando a condição inicial de teste (contato inicial), foi calculada. Esse seria o principal parâmetro utilizado para tentar se antecipar o resultado referente à qualidade das juntas soldadas.

O objetivo com o levantamento deste valor era tentar visualizar o possível comportamento do material durante o reparo: folgas radiais mais elevadas poderiam indicar a necessidade de comprimentos de queima indesejavelmente elevados; folgas menores, por sua vez, poderiam levar a um travamento da máquina.

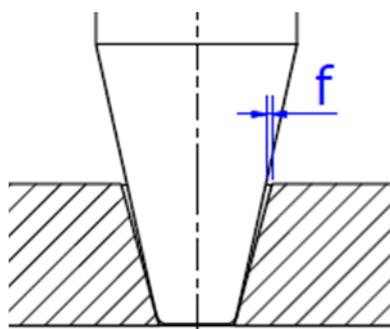


Figura 3.4 - Folga radial existente entre pino e bloco (f)

Dentre as dimensões variadas para sugestões de novas geometrias destaca-se o diâmetro da extremidade do pino ( $\varnothing_p$ ) e o ângulo do próprio pino ( $\alpha$ ) (Fig. 3.5), para ambas referências.

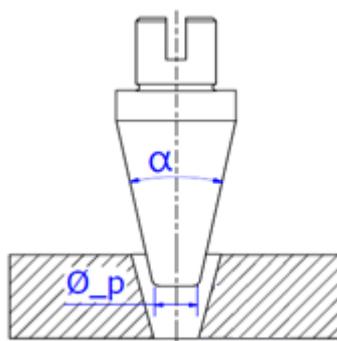


Figura 3.5 - Parâmetros modificados para sugestão de novas geometrias:  $\varnothing_p$  (diâmetro da extremidade do pino) e  $\alpha$  (ângulo do pino)

Considerando para as geometrias propostas, então: os valores de folga calculados, o fato de um formato mais semelhante ao cilíndrico corresponder a um maior comprimento de queima, oferecendo menos resistência ao deslocamento do pino, bem como os resultados obtidos por Paes (2013) e Carneiro (2009), restringiu-se as geometrias a serem utilizadas. Optou-se por descartar as opções que envolviam o bloco com furo de ângulo de  $20^\circ$ , idealizadas a partir do trabalho de Carneiro (2009).

Com isso, chegou-se a três geometrias a serem utilizadas nos ensaios de preenchimento preliminares para que pudessem ser validadas: blocos de  $30^\circ$  com pinos de  $28^\circ$ ,  $26^\circ$  e  $24^\circ$  e diâmetro inferior de 6,86 mm. As folgas no momento inicial de montagem são de, respectivamente, 0,22, 0,44 e 0,66 mm. Representações de tais geometrias podem ser vistas na Fig. 3.6 e Fig. 3.7 abaixo.

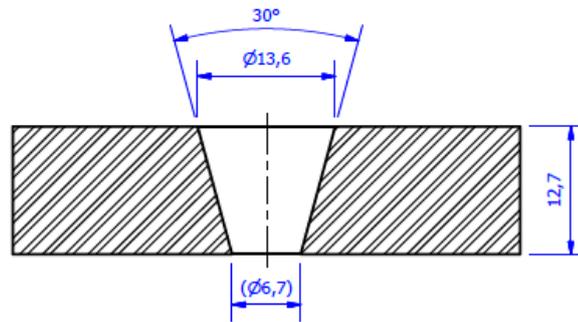


Figura 3.6 - Geometria proposta para o bloco

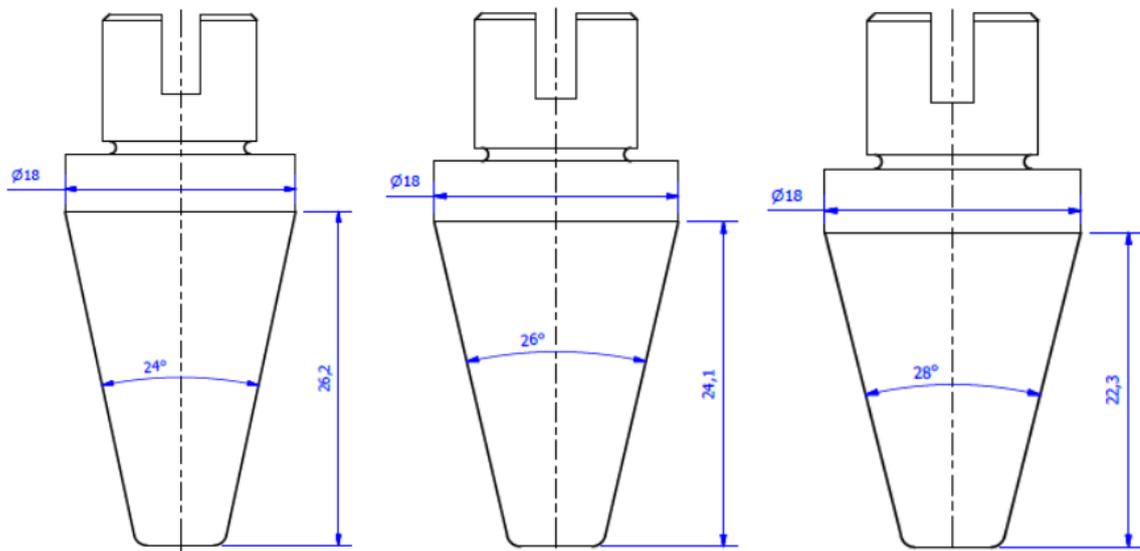


Figura 3.7 - Geometria proposta para os pinos

### 3.3.2 Ensaios Preliminares para Validação da Geometria

Como mencionado anteriormente, visando minimizar os custos de projeto quando ainda em sua fase inicial, optou-se por validar as geometrias propostas através de ensaios de preenchimento em aço carbono.

Quanto aos demais parâmetros do processo utilizou-se como referência valores utilizados em ensaios de preenchimento de outros projetos desenvolvidos pelo laboratório e que se mostraram bastante eficazes em reparos utilizando furos não passantes para aço carbono: rotação de 5500 rpm e força axial de 20 kN. Considerou-se também os testes realizados por Paes (2013), optando-se por utilizar, a princípio, o mesmo comprimento de queima de 6 mm. Por se tratar de ensaios preliminares, o valor do comprimento de queima foi modificado ao longo dos ensaios no intuito de se melhorar a qualidade da solda. A matriz com

os parâmetros utilizados durante os ensaios com aço carbono está exposta na Tab. 3.4 abaixo.

Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados na fase de ensaios preliminares

Ensaio	Ângulo - Pino	Comprimento de Queima (mm)
<b>411001</b>	28°	6
<b>411002</b>	26°	6
<b>411003</b>	24°	6
<b>411004</b>	26°	7
<b>411005</b>	24°	7

Quanto à nomenclatura, os três primeiros dígitos se referem a uma identificação do projeto em específico utilizada pelo laboratório. Os três dígitos finais indicam o número do ensaio, correspondendo à ordem cronológica em que eles ocorreram.

Para todos os ensaios foi feito um levantamento do comportamento dos principais parâmetros envolvidos durante o processamento do pino. Esses dados que foram exportados da UPPA X ao final de cada processo passaram por um tratamento, fazendo-se a redefinição do ponto inicial, indicado pelo momento em que a posição deixa de ser negativa e passa a apresentar valores positivos. Também se calculou a potência envolvida em função dos valores medidos para a rotação e o torque. Por fim, todas essas variáveis foram plotadas em um gráfico para uma compreensão mais visual e de fácil comparação. Esses gráficos de processamento encontram-se no APÊNDICE A.

### 3.3.3 Ensaio de Preenchimento em Aço Inoxidável Duplex

Com base nos conhecimentos adquiridos com os ensaios de preenchimento preliminares (aço carbono), passou-se para a execução dos testes com o material objeto de estudo desse trabalho: o aço inoxidável duplex.

Nesta etapa da pesquisa, portanto, já se considera as geometrias como devidamente validadas. Os ângulos referentes ao tronco de cone dos pinos utilizados para esse estágio do trabalho, portanto, são um reflexo desse estudo e das conclusões dele tiradas, expostas na seção 4.2 (Ensaio Preliminares: Aço Carbono ASTM A36).

Buscando melhor entender a influência dos demais critérios que podem interferir na qualidade final da solda, decidiu-se por realizar os ensaios em etapas, alterando o valor de apenas um parâmetro entre um ensaio e outro, evidenciando de maneira mais clara qual seu efeito no resultado.

O planejamento adotado, constituiu, basicamente, de se repetir os mesmos parâmetros para cada geometria analisada, destacando o seu efeito no processo. Foi abordado também o efeito do comprimento de queima através de ensaios utilizando 3 valores diferentes para este parâmetro. Por fim, examinou-se também a interferência causada pela aplicação da força em mais de um estágio. Para isso foram propostos dois ensaios, uma para cada geometria, em que uma força de 10 kN seria aplicada em uma etapa inicial (com comprimento de queima correspondente de 4 mm) seguido por um ciclo secundário com aplicação de uma força de 20 kN e comprimento de queima de 5 mm.

A Tab. 3.5 indica os parâmetros utilizados para cada um dos testes realizados. A rotação utilizada foi de 5500 rpm para todos os ensaios.

Tabela 3.5 - Parâmetros utilizados nos ensaios de preenchimento com aço inoxidável duplex

Ensaio	Ângulo - Pino	Número de Estágios	Força (kN)	Comprimento de Queima (mm)
411006	26°	1	20	7
411007	24°	1	20	7
411008	26°	1	20	8
411009	24°	1	20	8
411010	26°	1	20	9
411011	24°	1	20	9
411012	26°	2	10 / 20	9
411013	24°	2	10 / 20	9

Assim como para os ensaios preliminares, gráficos com o comportamento dos principais sinais envolvidos no processo foram gerados e armazenados para futura análise. Esses gráficos de processamento encontram-se no APÊNDICE A.

### 3.4 Peça Suporte para o Bloco

Devido à geometria dos blocos, com furos cônicos passantes, viu-se necessária a fabricação de uma peça de apoio que os possibilitassem permanecer suspensos durante os ensaios (Fig. 3.8). A utilização desse suporte tem como objetivo garantir que parte do material, tanto do bloco, mas principalmente do pino, que é extrudado para fora do bloco ao fim do processo, não atingisse a bancada de testes. Com isso evita-se interferências externas às características finais das juntas, aproximando os resultados aos que poderiam ser encontrados em condições práticas de aplicação.

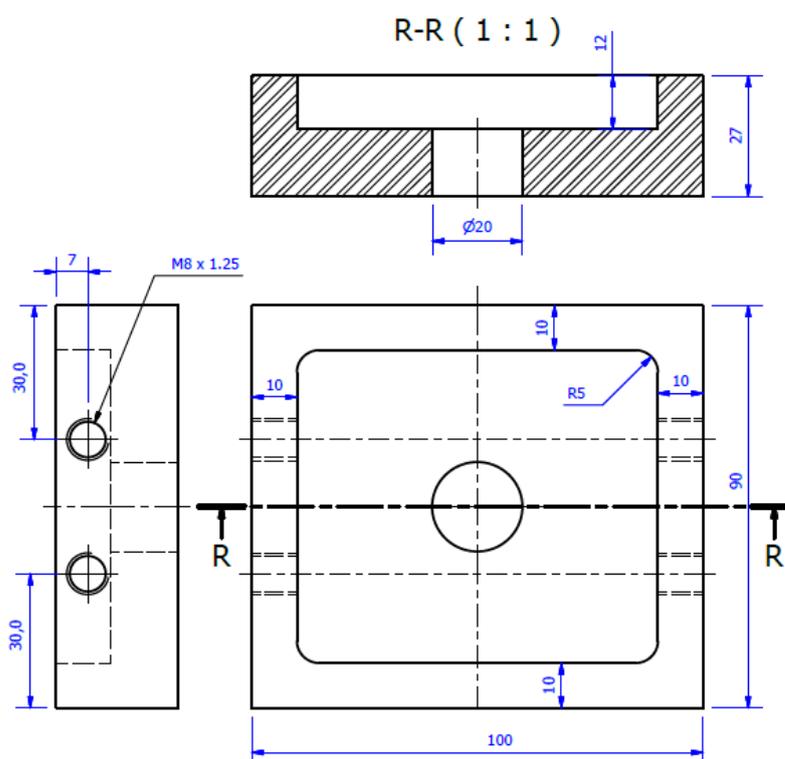


Figura 3.8 - Especificações da peça de suporte para os blocos de soldagem

Quanto ao posicionamento do bloco na peça, buscou-se garantir que ambos os furos estivessem alinhados, ou seja, que eles fossem concêntricos. Para sua fixação utilizou-se quatro parafusos de rosca M8 que permitiam pressionar duas faces opostas do bloco uma contra a outra, em dois pontos igualmente espaçados do centro da face (Fig. 3.9). O suporte, por sua vez, era fixado à UPPA X também com o auxílio de quatro parafusos. A importância de uma boa fixação do bloco ao equipamento se dá devido às elevadas forças e rotações a qual o conjunto é submetido no decorrer do ensaio e uma folga neste posicionamento poderia acarretar em uma vibração indesejada ao processo, que por sua vez poderia interferir negativamente no resultado.



Figura 3.9 - Parafusos de fixação do bloco no suporte

Observa-se ainda que os diâmetros dos furos do suporte e do bloco possuem dimensões relativamente próximas, onde suas extremidades se distanciam em apenas 6,6 mm (aproximadamente). Dessa maneira, com a configuração de montagem utilizada (Fig. 3.10), possíveis deformações decorrentes de uma flexão do material como consequência da aplicação de uma força pontual e um braço de momento, presentes em condições reais de aplicação deste processo, não serão evidenciadas neste trabalho.

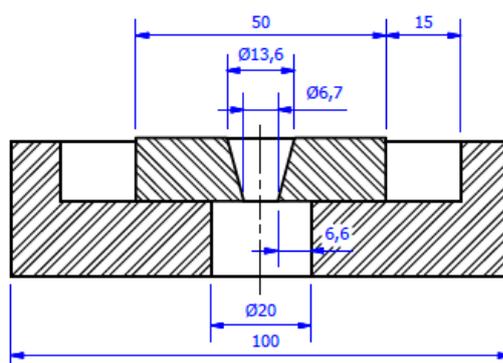


Figura 3.10 - Representação do posicionamento do bloco sobre o suporte

### 3.5 Preparação Metalográfica

#### 3.5.1 Macrografia

Após realização dos ensaios, as juntas passaram por um processo de preparação para que pudessem ser mais detalhadamente examinadas. Inicialmente se removeu a parte superior dos pinos, referente ao encaixe da peça no cilindro de reparo. Depois foi feito um corte transversal na junta paralelo à uma das faces laterais do bloco, dividindo-o em duas partes iguais e deixando exposta a região correspondente à seção central da solda. Ambos cortes foram feitos através da utilização de disco abrasivo, atentando-se para o fato de diferentes materiais requererem diferentes discos, com um fluxo constante de fluido refrigerante incidindo sob o ponto de contato. Tomou-se o cuidado também de efetuar tais cortes com uma velocidade de avanço reduzida, evitando assim um superaquecimento da região que pudesse modificar a microestrutura do material naquele ponto. As juntas ainda passaram por um processo de retificação para garantir um paralelismo entre a face a ser analisada e a oposta a ela, evitando assim possíveis problemas de foco durante análise em um microscópio ótico.

Quanto à preparação da seção a ser analisada, utilizou-se o procedimento padrão que vinha sendo adotado pelo laboratório em pesquisas anteriores. Para os aços carbono ASTM A36 usou-se lixas abrasivas de granulometria 220, 320, 400 e 600 *mesh*. As juntas foram posteriormente lavadas em banho ultrassônico e então atacadas em solução Nital 6 % por aproximadamente 10 segundos (PIRES, 2007).

Já para os aços inoxidáveis as lixas utilizadas foram as de granulometria 200, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*. Após as amostras serem limpas em banho ultrassônico, foi necessário ainda polir com pasta diamante de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ . Por fim, as peças foram submersas em uma solução aquosa de ácido nítrico 40 % com aplicação de 1,3 V de tensão por um tempo médio variando entre 4 e 8 minutos. Com as superfícies devidamente preparadas então, imagens foram digitalizadas utilizando um scanner modelo HP ScanJet 4C (RODRIGUES, 2017).

### 3.5.2 Micrografia

Feitas as devidas digitalizações e análises macrográficas das amostras, elas retornaram para preparação metalográfica. O ataque químico anterior foi então removido através do processo de lixamento semelhante ao utilizado para as macrografias. Para os aços carbono, além de se utilizar lixas 1200 *mesh*, foi feito ainda o polimento utilizando pasta diamante de 3  $\mu\text{m}$ . Já para os aços inoxidáveis o uso da sílica coloidal (0,4  $\mu\text{m}$ ) foi adicionado ao processo de polimento. Para realce das linhas da microestrutura, um ataque semelhante ao feito para as macrografias foi realizado, porém as juntas foram deixadas submersas em uma solução de menor concentração (Nital 2 %) no caso dos aços carbono. Para os AID o que se variou entre um processo e outro foi o tempo ao qual as peças foram submetidas ao ataque químico eletrolítico (aproximadamente 3 minutos para as micrografias) (PIRES, 2007; RODRIGUES, 2017).

Para obtenção das imagens foi utilizado o microscópio ótico Olympus BX51M equipado com câmera Zeiss AxioCam ICc5.

A escolha dos pontos dos quais foram tiradas microfotografias variou dependendo do material. Para os aços carbono ASTM A36, que apresentou interfaces e uma ZTA mais uniformes, optou-se por detalhar a microestrutura de pontos nas interfaces pino/bloco em quatro posições diferentes: no topo e base da junta além de dois pontos interiores a 4 e 8 mm acima da linha inferior do bloco (Fig. 3.11). Para os aços duplex, devido a uma variação mais visível da microestrutura em diferentes regiões da solda, buscou-se detalhar um conjunto de pontos que conseguisse expressar tal comportamento. Uma esquematização dos pontos analisados pode ser vista na Fig. 3.12.

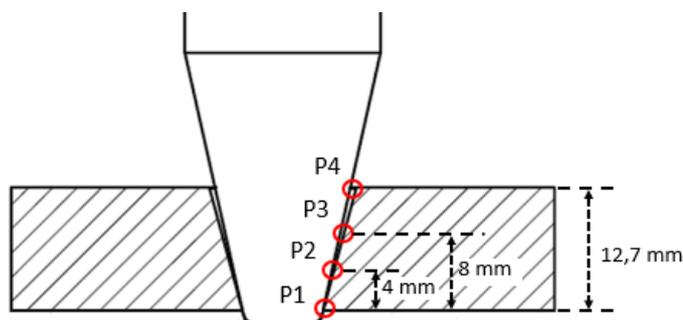


Figura 3.11 - Representação dos pontos analisados através de microscopia ótica (aços carbono A36)

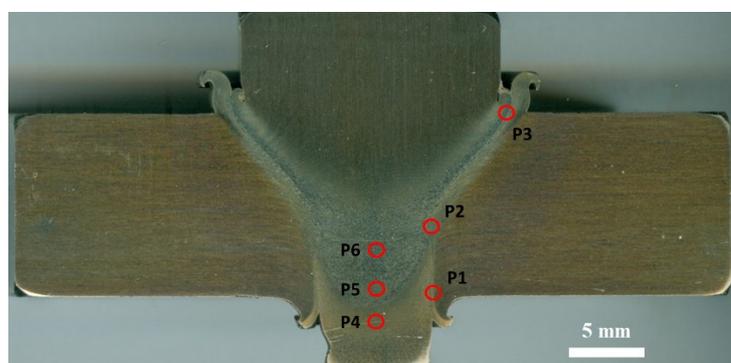


Figura 3.12 - Pontos analisados através de microscopia ótica (AID)

### 3.6 Ensaio de Microdureza Vickers

Para uma melhor caracterização da junta soldada e melhor entendimento da interferência do processamento nas propriedades mecânicas do material, um mapeamento da microdureza da seção foi elaborado. O objetivo deste ensaio consistiu em se comparar o comportamento nas diferentes regiões da junta, incluindo pontos mais próximos e distantes da interface pino/bloco (ZTA), analisando assim a variação deste valor ao longo da extensão do material. Para isso, a mesma superfície usada para micrografia foi utilizada.

Para a obtenção do mapa, um conjunto de 572 indentações foram realizadas ao longo da amostra. Por se tratar de uma junta simétrica, viu-se necessidade em mapear apenas um lado da seção, já que o comportamento esperado para o lado oposto seria o mesmo. Tendo isto em mente, essa malha de pontos foi proposta de maneira que conseguisse varrer praticamente toda a espessura da chapa, havendo apenas um espaçamento de aproximadamente 1 mm para a extremidade superior e inferior do bloco. Já no eixo horizontal as indentações tiveram início no centro da junta e se estenderam até a região do bloco cuja microestrutura não sofreu interferência aparente do processo (a aproximadamente 12,5 mm

de distância do centro) (Fig. 3.13). O espaçamento entre cada um dos pontos é de 0,5 mm, tanto vertical quanto horizontalmente.

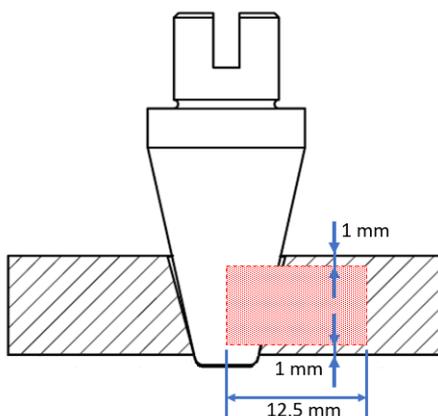


Figura 3.13 - Representação do mapa de indentações

Este ensaio foi realizado utilizando-se o microdurômetro Micro-Combi Tester da CSM Instruments (Fig. 3.14). As características para configuração das indentações foram as seguintes: carga máxima aplicada de 0,3 kgf; taxa de aplicação da força de 0,6 kgf/min e tempo de espera entre aplicações de 15 segundos.

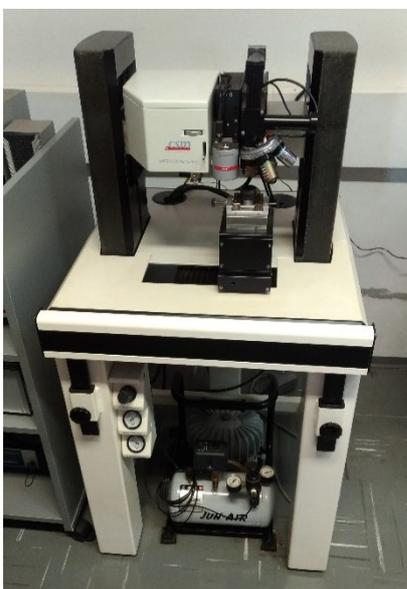


Figura 3.14 - Microdurômetro Micro-Combi Tester – CSM Instruments

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Sinais de Processamento

O gráfico abaixo (Fig. 4.1) corresponde aos sinais de processamento para o primeiro ensaio realizado, que será utilizado como exemplo para se verificar a qualidade de operação da máquina. Observa-se que o equipamento utilizado apresentou uma boa resposta, atingindo (e mantendo) de maneira bastante precisa os valores que foram estabelecidos na configuração inicial da unidade. A rotação oscilou em torno do valor pré-estabelecido (5500 rpm) por quase todo o processo, a força aplicada (20 kN) apresentou um comportamento praticamente constante e o valor final da posição correspondeu ao comprimento de queima desejado (6 mm).

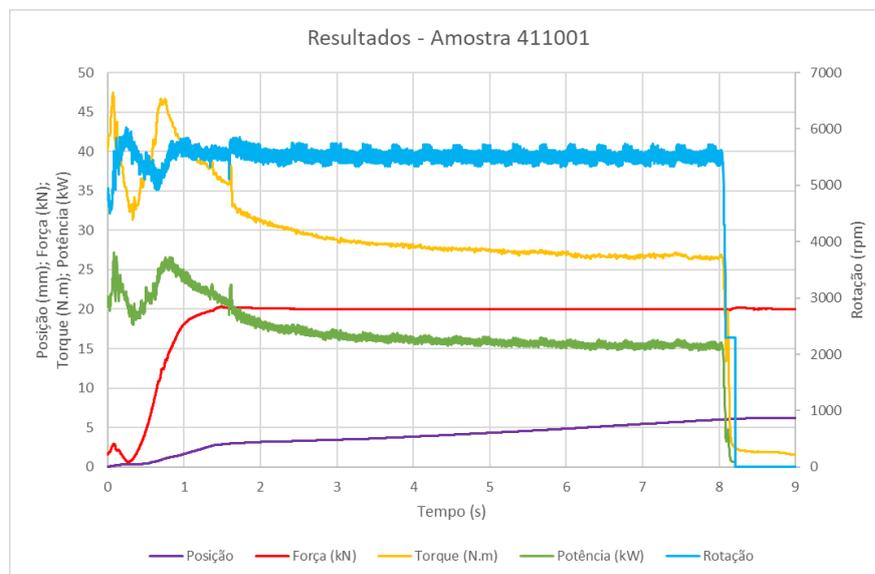


Figura 4.1 - Sinais medidos/calculados durante o processo (amostra 411001)

## 4.2 Ensaios Preliminares: Aço Carbono ASTM A36

### 4.2.1 Variação na Geometria do Pino

A primeira etapa de testes envolveu os ensaios 411001, 411002 e 411003. A única alteração que se deu entre eles foi na geometria do pino utilizada, mais especificamente, no ângulo de sua seção, sendo de 28°, 26° e 24°, respectivamente.

O objetivo principal dessa primeira bateria de testes era, basicamente, validação das geometrias propostas para o projeto. É interessante ressaltar que uma preocupação presente no desenvolvimento destas geometrias foi justamente a pequena folga radial existente entre o pino e o bloco. Esperava-se que para a configuração com menor folga (411001), com pino de 28°, o torque atingido durante o processo alcançasse um pico muito elevado que pudesse ter como consequência o travamento da máquina. Mas o comportamento observado foi em direção contrária a essa expectativa. Comparando as curvas apenas referente ao torque resistivo para os três ensaios (Fig. 4.2), nota-se que elas se deram de maneira muito semelhante, atingindo picos de valores bastante próximos e em momentos semelhantes do processo.

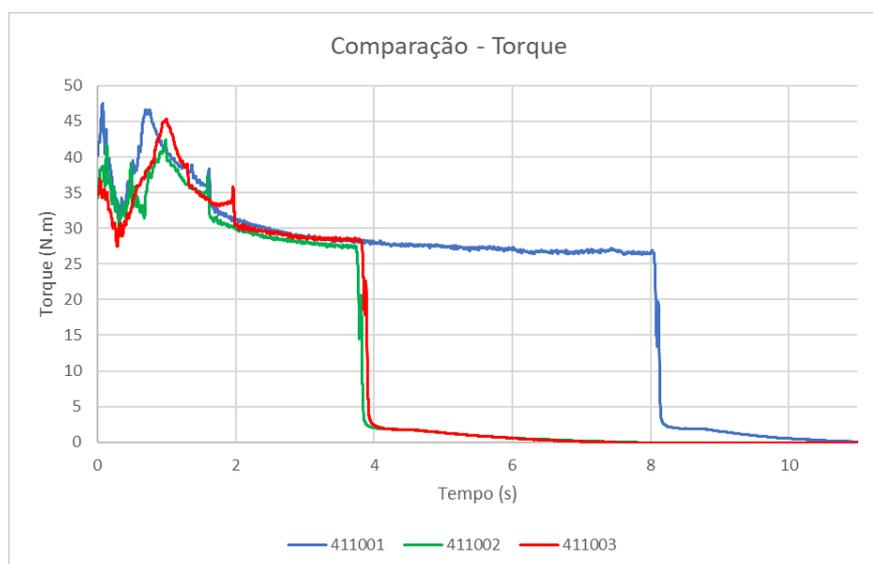


Figura 4.2 - Gráfico comparativo do torque resistivo: ensaios 411001 (28°), 411002 (26°) e 411003 (24°)

Um ponto interessante que salta aos olhos ao analisar este gráfico também é a diferença no tempo de processamento para as três amostras. Observa-se que a duração para o ensaio com pino de 28° foi quase o dobro quando comparada com as outras duas geometrias. Para averiguar tal condição mais claramente optou-se por analisar a curva referente ao avanço do

pino no decorrer dos processos (Fig. 4.3). Considera-se como fim do processamento o momento em que a rotação, e conseqüentemente, o avanço, foram cessados, dando início à etapa de forjamento. Esse comportamento é refletido no gráfico como sendo o ponto em que a curva da posição deixa de ter um comportamento crescente e passa a apresentar um valor praticamente constante, aproximando-se de uma linha horizontal. Com tal comparação nota-se que inicialmente as curvas parecem apresentar um mesmo comportamento, mas após aproximadamente 1,5 segundo há uma variação mais significativa na taxa de processamento, indicada pela variação na inclinação da curva da amostra 411001, indicando um avanço mais lento do pino.

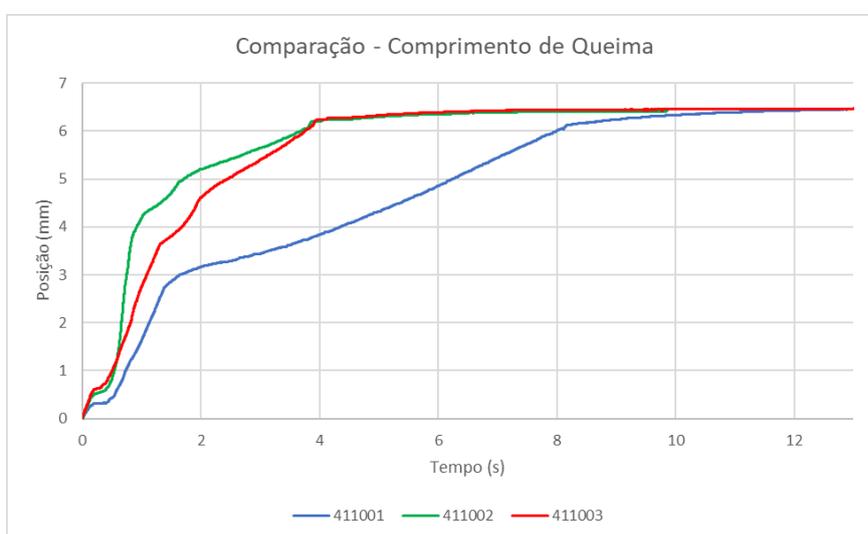


Figura 4.3 - Gráfico comparativo da posição do pino: ensaios 411001 (ângulo do pino de 28°), 411002 (26°) e 411003 (24°)

Para melhor entender, portanto, até que ponto esse comportamento interferiu no resultado, bem como a interferência da geometria de uma maneira geral na qualidade final da solda, é necessário se analisar as macrografias obtidas das três amostras geradas (Fig. 4.4). Observa-se que todos os três processos de soldagem apresentaram resultados bastante satisfatórios, com preenchimento quase que completo das cavidades, sem nenhuma falha aparente.

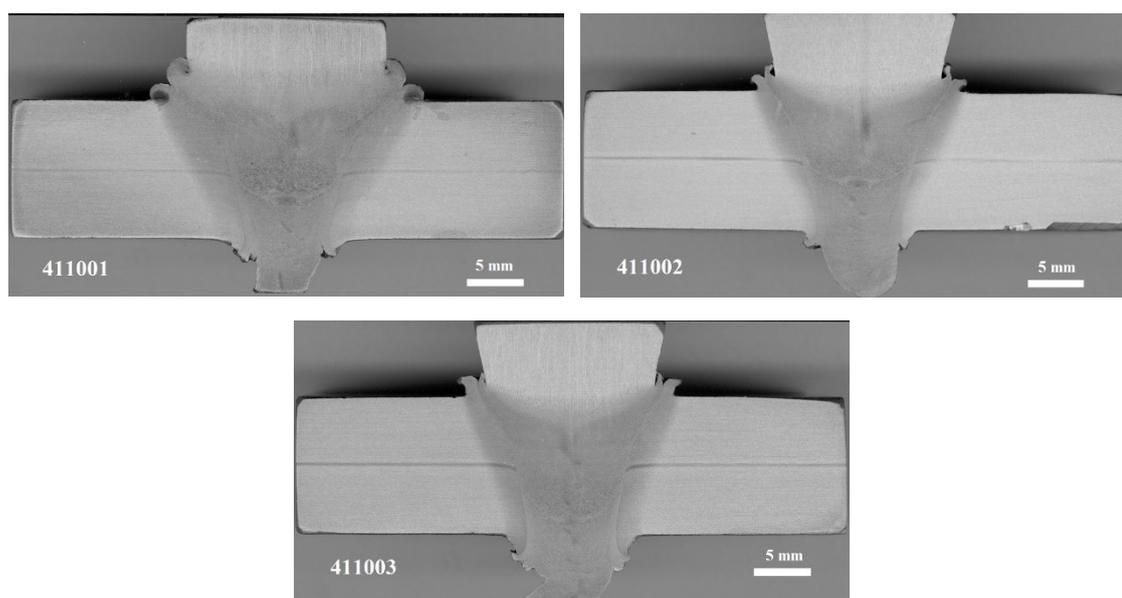


Figura 4.4 - Macrografias dos ensaios 411001 (ângulo do pino de 28°), 411002 (26°) e 411003 (24°)

Uma característica que pode ser notada nas três macrografias é que as ZTAs são mais espessas na parte superior do bloco quando comparada a sua parte inferior. Isso se dá devido à maior resistência mecânica gerada nesta região, decorrente da geometria cônica, o que favorece uma maior troca de calor ao longo do processo para esta área. Já ao se comparar as três juntas entre si, destaca-se o fato da primeira amostra apresentar uma ZTA mais marcante, indicando que a microestrutura deste material foi mais fortemente afetada pelo processo. Isso foi uma consequência direta do maior tempo de processamento observado para este teste em específico.

Para um detalhamento mais profundo da qualidade da solda analisou-se ainda as micrografias para as três juntas (Fig. 4.5, Fig. 4.6, Fig. 4.7). Demais micrografias obtidas encontram-se no APÊNDICE B. Uma varredura de toda a interface pino/bloco confirmou o que havia sido indicado pelas macrografias: nenhuma amostra apresentou qualquer tipo de falha de preenchimento, indicando uma boa união entre as peças. Para o ensaio com pino de 28°, porém, observou-se uma microtrinca formada na saída da rebarba na parte mais inferior da interface devido à má consolidação do material ao fim da soldagem. Ao se analisar mais cuidadosamente este defeito então, percebeu-se que o fim da trinca se encontrava acima da linha do substrato correspondente à face inferior do bloco, indicando que mesmo que houvesse a remoção do material excedente ao fim do processo (como é comum neste tipo de operação), a trinca não seria eliminada (Fig. 4.8).

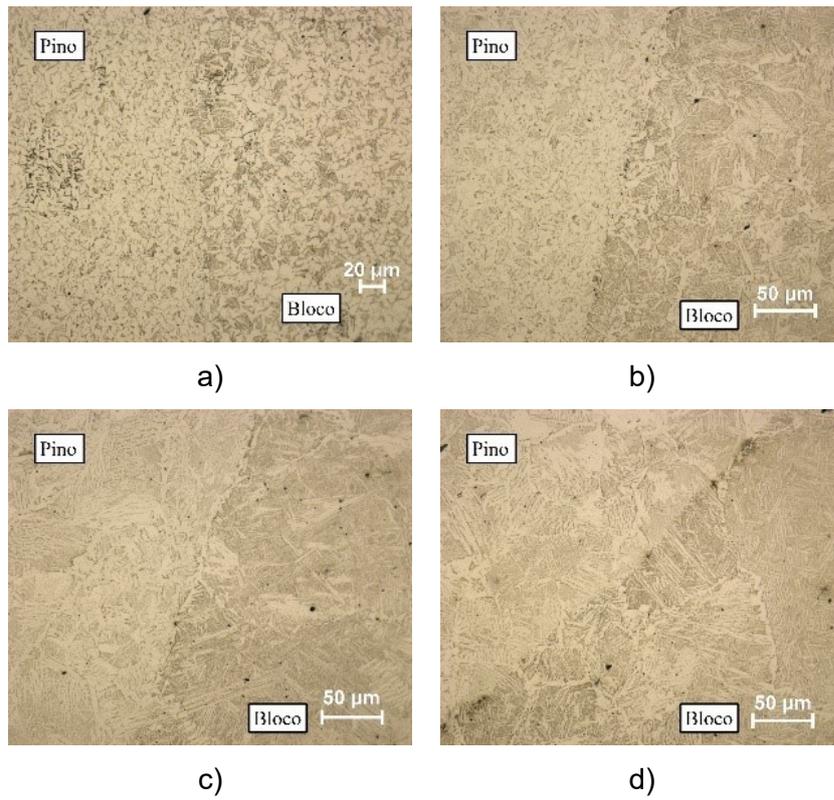


Figura 4.5 - Micrografias amostra 411001 (ângulo do pino de 28°): pontos P1 (a), P2 (b), P3 (c) e P4 (d)

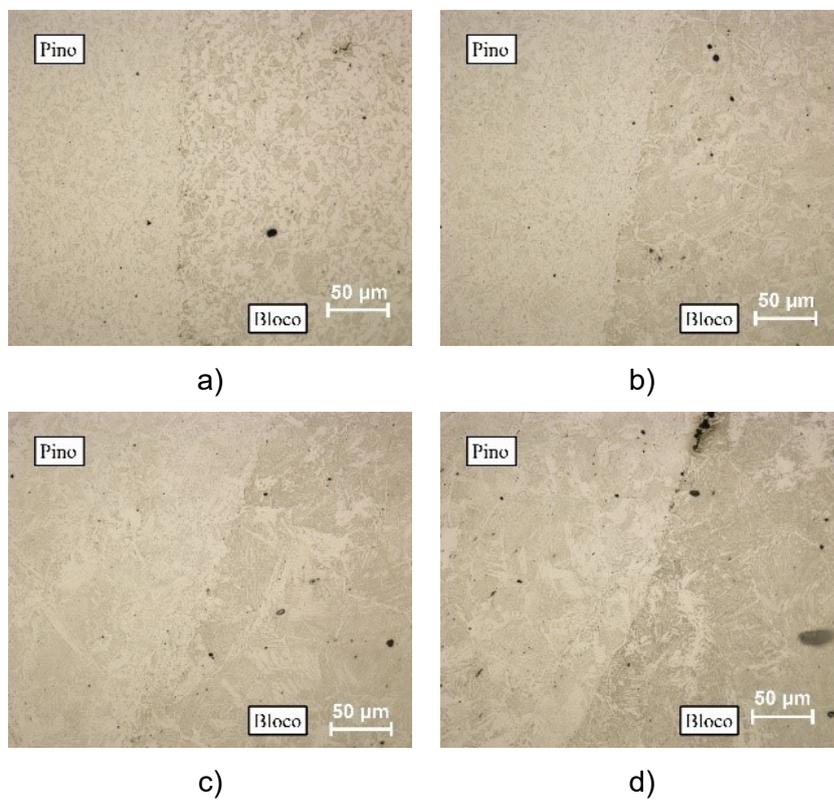


Figura 4.6 - Micrografias amostra 411002 (ângulo do pino de 26°): pontos P1 (a), P2 (b), P3 (c) e P4 (d)

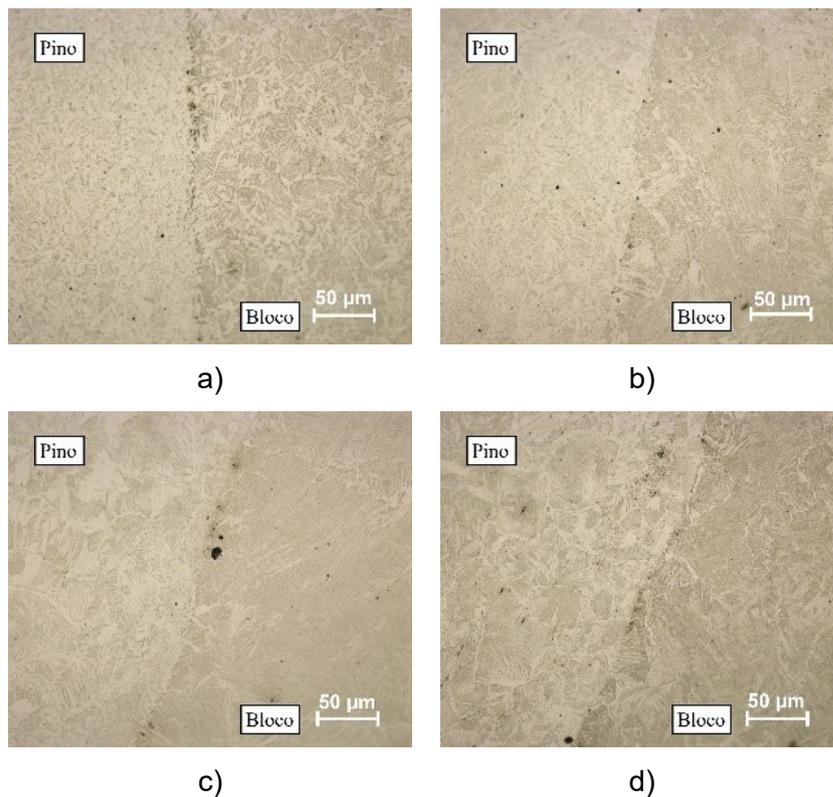


Figura 4.7 - Micrografias amostra 411003 (ângulo do pino de 24°): pontos P1 (a), P2 (b), P3 (c) e P4 (d)



Figura 4.8 - Amostra 411001 (ângulo do pino de 28°): microtrinca formada na parte inferior da junta soldada

#### 4.2.2 Variação no Comprimento de Queima

Para a segunda bateria de ensaios, então, decidiu-se por descartar a geometria com pino de 28° devido à formação da trinca na porção inferior da junta. O parâmetro modificado para os testes então foi o comprimento de queima. O objetivo com esta alteração era fazer com que o processo se estendesse por um período um pouco mais longo, possibilitando assim uma melhor união entre as peças com zonas termicamente afetadas mais expressivas; bem como a geração de um *flash* maior na parte superior da interface, já que os primeiros testes indicaram que pouco material foi formado nessa região da junta. O comprimento de queima adotado, então, passou a ser de 7 mm.

Analisando o gráfico comparativo para a duração dos 5 ensaios realizados (Fig. 4.9), então, observa-se que o aumento do comprimento de queima para a amostra 411004 foi até certo ponto eficaz no que se diz respeito a aumentar o tempo de processamento, já que se aumentou em quase 1.4 segundo a duração do ensaio. O mesmo comportamento, porém, não foi evidenciado no teste com pino de 24°, apresentando um tempo menor (aproximadamente 1 segundo) quando utilizado um maior comprimento de queima (7 mm).

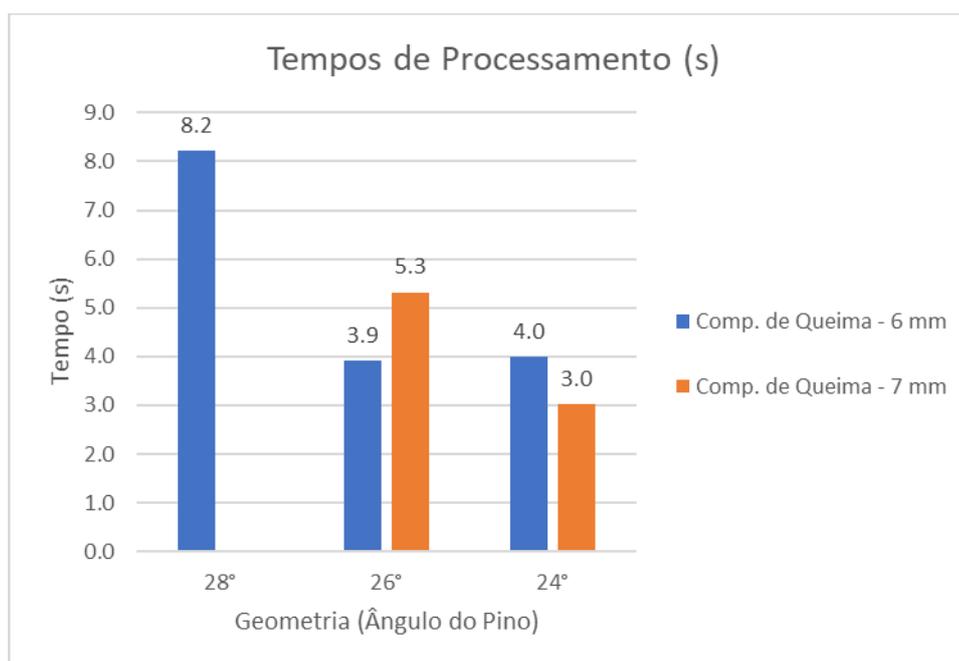


Figura 4.9 - Gráfico comparativo para o tempo de processamento dos ensaios 411001 (ângulo do pino de 28° e comprimento de queima de 6 mm), 411002 (26° - 6 mm), 411003 (24° - 6 mm), 411004 (26° - 7 mm) e 411005 (24° - 7 mm)

Ao se contrastar tal comportamento, portanto, com as respectivas macrografias (Fig. 4.10), é possível verificar que justamente a amostra 411004 apresentou uma ZTA mais espessa, bem como a rebarba formada na porção superior da interface foi mais significativa, além de nenhuma microtrinca ter sido formada nas extremidades da junta, indicando, a princípio, uma união de boa qualidade. Considerando-se então os resultados obtidos, deu-se como validadas as geometrias testadas, assim como os parâmetros utilizados.

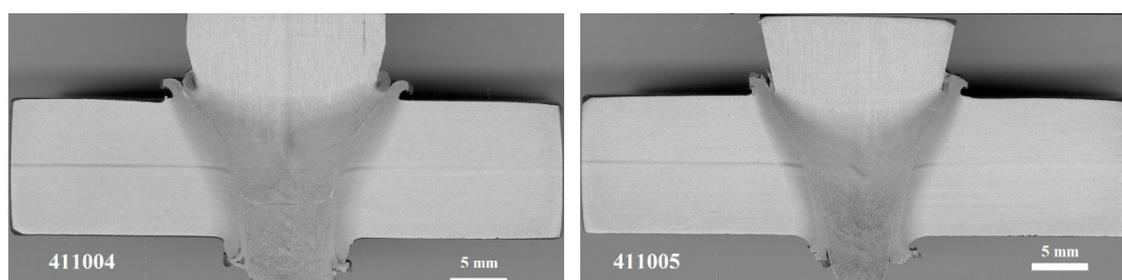


Figura 4.10 - Macrografias dos ensaios 411004 (ângulo do pino de 26°) e 411005 (24°)

### 4.3 Reparo por Atrito Utilizando Aços Inoxidáveis Duplex

#### 4.3.1 Variação na Geometria e Comprimento de Queima

Para os ensaios envolvendo aços inoxidáveis duplex, decidiu-se por não restringir, inicialmente, os parâmetros utilizados no processamento. Por se tratar de ensaios utilizando um material com propriedades bastante distintas das do aço carbono utilizado até então, não se esperou que a repetibilidade apresentada nos ensaios anteriores fosse mantida. Dessa maneira, optou-se por, além de manter duas possibilidades quanto à geometria, variar também o comprimento de queima em 7, 8 e 9 mm. A variação nesse parâmetro está relacionada à tentativa de se aumentar o tempo de processamento, já que as durações observadas para os testes preliminares foram consideravelmente baixas. As macrografias referentes a estes ensaios estão expostas na Fig. 4.11.

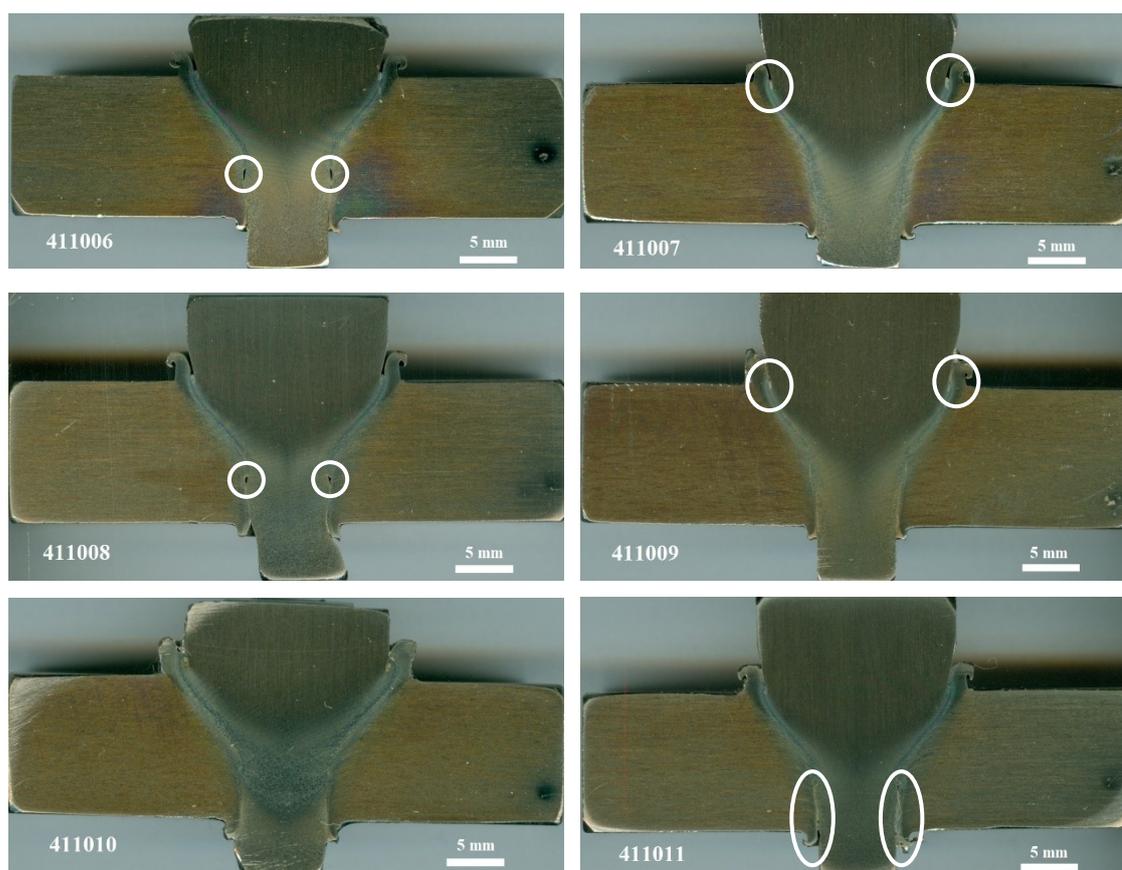


Figura 4.11 - Macrografias amostras 411006 (ângulo do pino de 26° e comprimento de queima de 7 mm), 411007 (24° - 7 mm), 411008 (26° - 8 mm), 411009 (24° - 8 mm), 411010 (26° - 9 mm) e 411011 (24° - 9 mm)

Ao se analisar essas imagens é possível destacar algumas questões. Considerando apenas os ensaios 411006 e 411007, por exemplo, que correspondem a exatamente os mesmos parâmetros que os utilizados na segunda etapa de testes utilizando aço carbono (comprimento de queima de 7 mm, força axial de 20 kN e geometrias de 26° e 24°), nota-se resultados muito distantes entre si. Para o teste 411006, observou-se uma quantidade considerável de falhas de preenchimento ao longo da interface pino/bloco, além de uma ZTA bastante estreita e união não muito eficaz, resultados opostos aos encontrados anteriormente. Para a amostra 411007, apesar de ter apresentado um preenchimento mais eficaz da cavidade, com falhas menos expressivas, o problema de uma ZTA muito estreita se persistiu, além de pouco material ter sido expelido na parte superior da junta.

Foi justamente prevendo tal comportamento que se optou por estender os primeiros ensaios com AID para testes com valores mais elevados para o comprimento de queima. Ao se analisar de uma maneira mais abrangente, então, todos estes ensaios utilizando aços inoxidáveis, é interessante a relação observada, novamente, entre o tempo de processamento e a qualidade da solda. Ao se considerar as macrografias fica evidente que a amostra 411010 foi a que apresentou uma melhor união metálica entre os corpos, evidenciada pela ZTA mais

espessa, principalmente no topo da junta, além de nenhum resquício de trinca aparente próximo às rebarbas ter sido observado. As demais amostras demonstraram algumas falhas, como sinais de falta de preenchimento e/ou trincas no topo da interface que avançam para dentro da junta, como destacado nas respectivas macrografias. E foi justamente a amostra 411010 a que apresentou maior tempo de processamento (aproximadamente 7,9 segundos), uma duração bem mais expressiva quando comparada aos demais testes, cujo tempo necessário girou em torno dos 4 segundos (Fig. 4.12). É seguro afirmar, portanto, que uma maior troca de calor, favorecida por um maior tempo de processamento, é de extrema importância para se obter soldas de boa qualidade.

É importante ressaltar também que mesmo utilizando os mesmos parâmetros de soldagem, os resultados variaram consideravelmente de acordo com a geometria. Para o teste utilizando pino com ângulo do tronco de cone de 24° ainda foi possível verificar falhas ao longo da interface, não repetindo, portanto, o resultado para o teste equivalente utilizando pino de 26°.

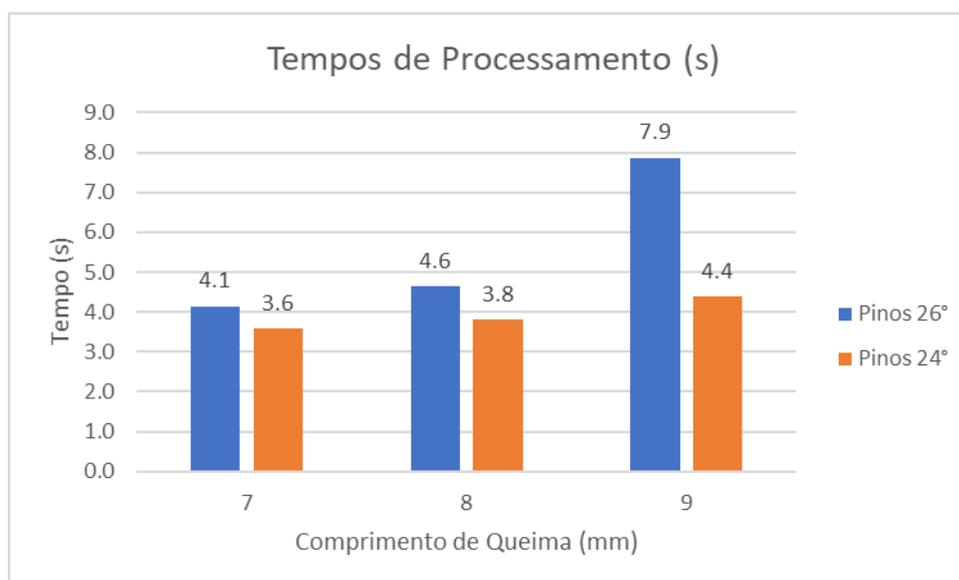


Figura 4.12 - Gráfico comparativo para o tempo de processamento dos ensaios 411006 (ângulo do pino de 26° e comprimento de queima de 7 mm), 411007 (24° - 7 mm), 411008 (26° - 8 mm), 411009 (24° - 8 mm), 411010 (26° - 9 mm) e 411011 (24° - 9 mm)

#### 4.3.2 Variação na Aplicação da Força (Número de Ciclos)

Como uma outra alternativa para tentar se delongar o processo e favorecer a geração de calor, optou-se por analisar o efeito causado ao se aplicar a força em dois estágios ao invés de apenas um. Foi adicionado, portanto, uma etapa inicial com aplicação de uma força

mais baixa (10 kN) até que o pino avançasse 4 mm. Para a segunda etapa, uma força de 20 kN foi então aplicada, com comprimento de queima de 5 mm. O intuito com tal modificação nos parâmetros é que a adição de um estágio transitório com uma força intermediária pudesse garantir um avanço menos abrupto do pino sob o bloco, compensando-se assim o fato de os aços inoxidáveis possuírem uma maior resistência com uma aplicação mais gradual da carga axial.

Essa questão da utilização de dois ciclos de preenchimento foi abordada de maneira bastante detalhada por Pires (2007), cujos resultados demonstraram que a aplicação de forças reduzidas no início do processo seguido por um incremento no seu valor possibilita menores taxas de queima, e um conseqüente melhor aquecimento, no início do processo. A carga axial final então só seria aplicada depois de que o fluxo plástico apresentasse uma condição mais propícia ao escoamento. Os resultados de Pires (2007) indicaram ainda que a aplicação da força em dois estágios se mostrou bastante eficaz no controle do tempo de processamento e da ZTA gerada.

Analisando as macrografias das duas juntas (Fig. 4.13) observou-se comportamentos bastante distintos. Enquanto que para a geometria de  $26^\circ$  notou-se um bom resultado, sem defeitos ou falhas aparentes - semelhante ao resultado referente ao ensaio com apenas um ciclo, e uma maior ZTA; para a amostra de  $24^\circ$  o resultado obtido foi o oposto: falhas de preenchimento de extensões bastante consideráveis localizadas na interface pino/bloco.

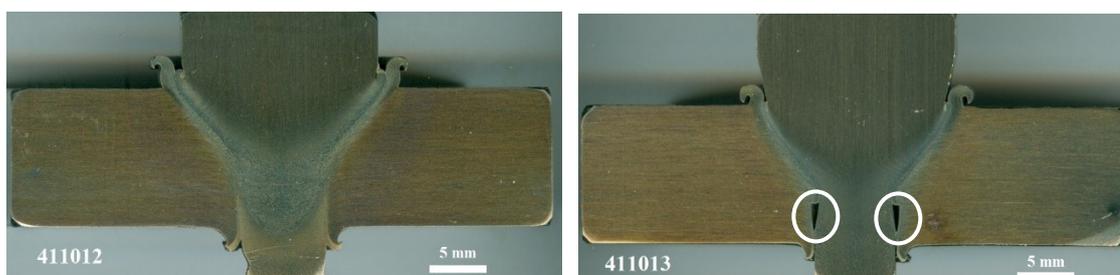


Figura 4.13 - Macrografias amostras 411012 (ângulo do pino de  $26^\circ$ ) e 411013 ( $24^\circ$ ), ambos com aplicação da força em dois estágios

Analisando novamente o tempo de processamento (Fig. 4.14), notou-se que a aplicação da força em dois estágios realmente resultou em processos mais longos, chegando a um aumento de quase um segundo para a geometria de  $26^\circ$ , mas se mostrou pouco eficaz para o pino de  $24^\circ$ , que continuou apresentando resultados bastante insatisfatórios. Pôde-se concluir então que a geometria se mostrou um aspecto mais relevante no tempo de processamento e qualidade da solda do que o número de ciclos utilizados.

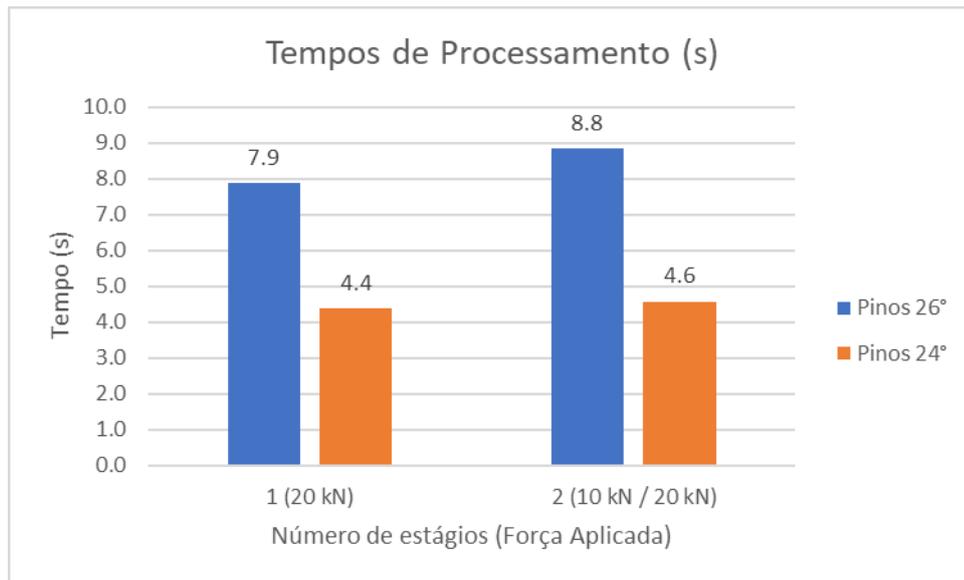


Figura 4.14 - Gráfico comparativo para o tempo de processamento dos ensaios 411010 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em um estágio), 411011 (24° - um estágio), 411012 (26° - dois estágios) e 411013 (24° - dois estágios)

#### 4.4 Micrografias

Buscando melhor entender esse comportamento, decidiu-se por verificar aspectos da microestrutura das amostras que apresentaram melhor qualidade de solda. Considerando-se os resultados mostrados até então, optou-se por utilizar as juntas referentes aos ensaios 411010 e 411012, ambas com pinos de 26° e comprimento de queima de 9 mm, diferenciando-se apenas pelo número de estágios usados para a aplicação da força (Fig. 4.15, Fig. 4.16, Fig. 4.17 e Fig. 4.18). A matriz ferrítica e a fase austenítica também foram indicadas. As demais micrografias obtidas encontram-se no APÊNDICE B.

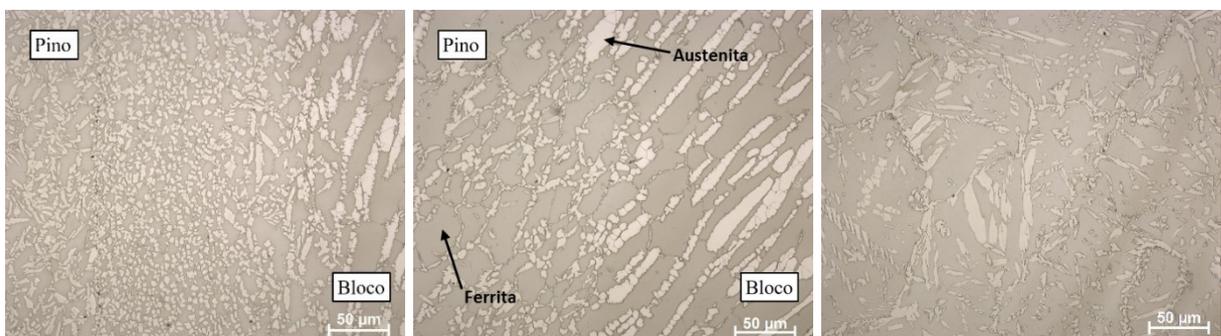


Figura 4.15 - Micrografias interface pino/bloco amostra 411010 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em um estágio): pontos P1 a P3 (esquerda p/ direita)



Figura 4.16 - Micrografias região interna do pino amostra 411010 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em um estágio): pontos P4 a P6 (esquerda p/ direita)

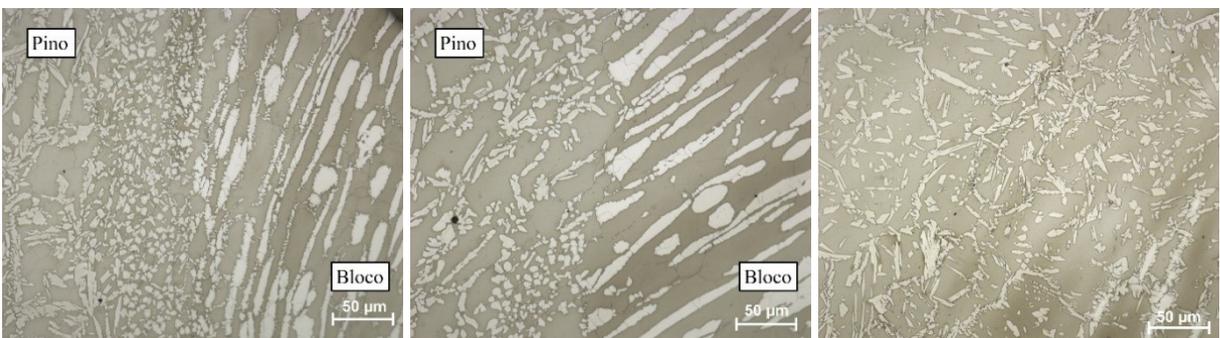


Figura 4.17 - Micrografias interface pino/bloco amostra 411012 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em dois estágios): pontos P1 a P3 (esquerda p/ direita)

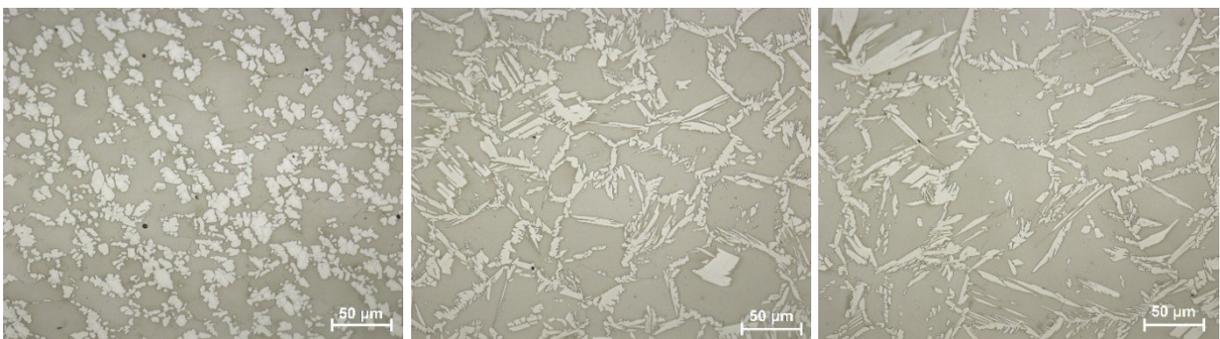


Figura 4.18 - Micrografias região interna do pino amostra 411012 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em dois estágios): pontos P4 a P6 (esquerda p/ direita)

O principal aspecto que se buscou observar ao analisar as micrografias era um detalhamento da qualidade do preenchimento realizado. Análises quantitativas das fases presentes e mais detalhes das microestruturas envolvidas e suas conseqüentes relações com as propriedades mecânicas do material foram deixadas para trabalhos futuros. Quanto à qualidade de preenchimento, analisando os pontos correspondentes à interface pino/bloco (pontos P1 a P3), observou-se uma união bastante uniforme entre os corpos, sem sinal de falha de preenchimento nesta região, confirmando as hipóteses levantadas através das macrografias, que já indicavam uma união sem defeitos. Nas regiões superiores da interface

(ponto P3), inclusive, não se observou uma linha nítida que possibilitasse a separação entre pino e bloco utilizando a mesma objetiva (50x) que a usada para os pontos P1 e P2, indicando uma zona termicamente afetada consideravelmente espessa com uma alteração considerável na microestrutura.

É interessante observar ainda que as microestruturas de ambas amostras são bastante semelhantes quando consideradas regiões correspondentes, não havendo, portanto, uma grande interferência do número de ciclos utilizados para aplicação da força no resultado. De uma maneira geral, o que se notou foi uma microestrutura bastante refinada em zonas processadas onde se houve uma maior deformação mecânica (próximas à superfície inferior da junta), contrastando com morfologias mais longas para a fase austenítica nas demais regiões, que sofreram maior influência do calor gerado no decorrer do processo (RODRIGUES, 2017).

#### 4.5 Ensaio de Microdureza Vickers

Para a confecção dos mapas de microdureza optou-se também por utilizar as amostras referentes aos testes 411010 e 411012, justamente por terem apresentado os resultados mais satisfatórios. Os mapas estão expostos nas Fig. 4.19 e 4.20.

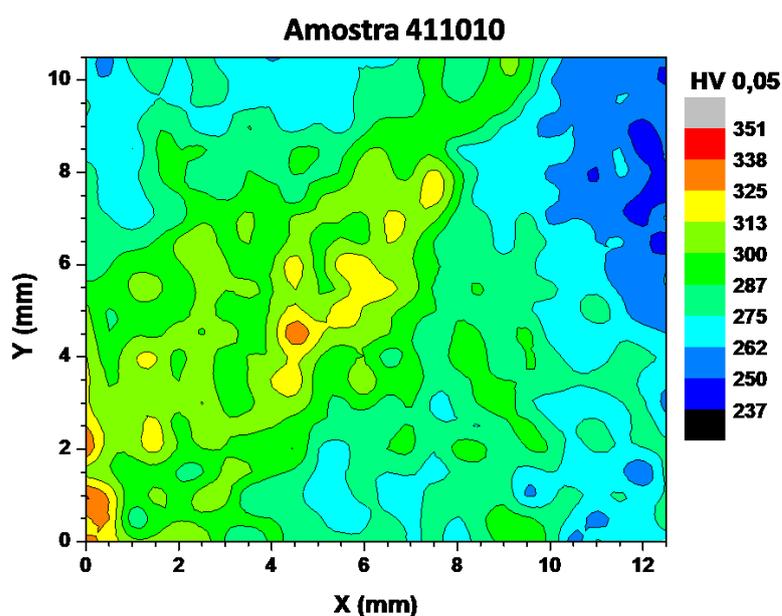


Figura 4.19 - Mapa de microdureza: amostra 411010 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em um estágio)

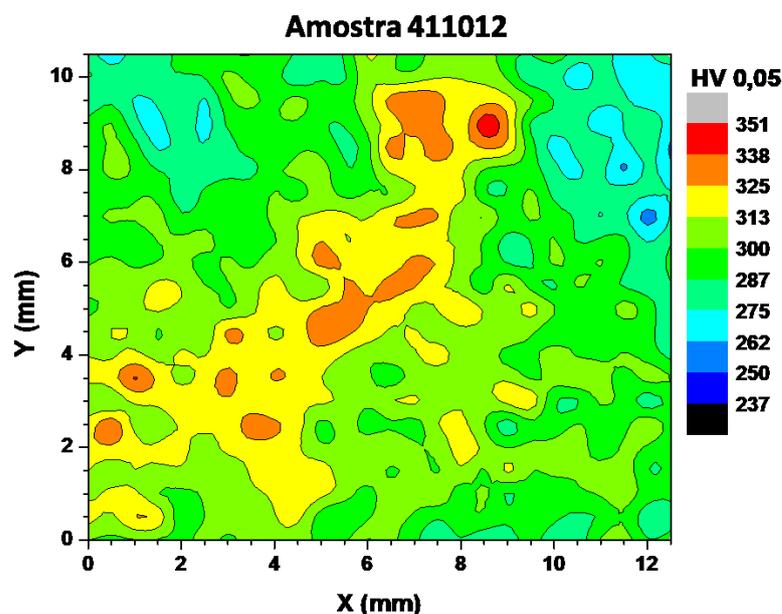


Figura 4.20 - Mapa de microdureza: amostra 411012 (ângulo do pino de 26° e força aplicada em dois estágios)

É bastante evidente nos mapas criados as linhas correspondentes à interface pino/bloco. Elas são evidenciadas por uma dureza média mais elevada para a zona de processamento quando comparada a pontos mais internos do bloco ou do próprio pino. Essa diferença nos valores medidos para essas regiões, em ambos os casos, foi de aproximadamente 60 HV, considerando-se os picos nas interfaces e valores mais intermediários que representassem melhor as regiões mais distantes. Esse comportamento, inclusive, se assemelha aos resultados encontrados em outros trabalhos envolvendo AID, como os citados por Rodrigues (2017), cuja diferença na dureza entre as regiões processadas e não-processadas foi por volta de 30 e 50 HV.

É interessante notar, porém, que apesar da variação ser semelhante, os valores absolutos são consideravelmente distintos. Para a amostra correspondente ao teste em que a força foi aplicada em dois estágios (411012), a dureza atingiu picos de até 351 HV, enquanto que para a amostra 411010 os valores não ultrapassaram a marca de 338 HV. E a dureza nas demais regiões também seguiu essa proporção.

# CAPÍTULO V

## CONCLUSÃO

Após realização dos ensaios de preenchimento, onde diversos parâmetros de soldagem foram analisados e a maneira como influenciaram na qualidade do reparo por atrito foi examinada, é possível extrair algumas conclusões:

- A geometria utilizada se mostrou um aspecto mais relevante para a qualidade da solda do que o comprimento de queima adotado ou o número de estágios em que a carga foi aplicada.
- O material utilizado interferiu drasticamente no resultado do processo. Ensaios realizados com os mesmos parâmetros, porém com materiais diferentes, apresentaram resultados bastante distintos entre si. Replicar os mesmos parâmetros que favoreceram uma boa união para os aços carbono produziu juntas com falhas de preenchimento expressivas para os aços inoxidáveis duplex.
- As ZTA foram levemente mais espessas na porção superior da junta, o que pode ser explicado pela maior resistência à deformação oferecida nesta região, possibilitando uma maior troca de calor ao longo do processo.
- Aumentar o comprimento de queima no intuito de se obter um maior tempo de processamento e uma possível melhor qualidade na solda, em ensaios utilizando aço carbono, se mostrou eficaz apenas para a geometria de 26°. Para o pino com ângulo de 24° o resultado obtido foi o oposto.
- O aumento no comprimento de queima com o objetivo de se aumentar o tempo de processamento de juntas em aço duplex, se mostrou mais eficaz para a geometria com pino de 26° do que a de 24°.
- Dentre os ensaios realizados com aços inoxidáveis duplex e aplicação da força em apenas um estágio, a configuração que se mostrou mais eficiente foi a com pino de 26° e comprimento de queima de 9 mm.

- A aplicação da força em duas etapas possibilitou um pequeno aumento no tempo de processamento para as amostras, sendo esse valor mais expressivo para a geometria com ângulo de 26°.
- As micrografias referentes às amostras em aço duplex indicaram soldas de boa qualidade, livre de defeitos aparentes. Quanto à microestrutura, observou-se uma morfologia mais alongada para as regiões superiores da junta em contraste com uma microestrutura mais refinada nas regiões inferiores.
- Perfis de microdureza indicaram uma maior dureza na região processada correspondente à interface pino/bloco, apresentando valores maiores em aproximadamente 60 HV em comparação a regiões pouco afetadas pelo processo.
- A amostra referente ao ensaio com aplicação da força em dois estágios apresentou uma microdureza média mais elevada do que a junta em que o processamento ocorreu em um ciclo apenas.

# CAPÍTULO VI

## TRABALHOS FUTUROS

Para uma melhor compreensão do processo de reparo por atrito FTPW com furos passantes em aço inoxidável duplex, recomenda-se o detalhamento de alguns pontos que não foram abordados neste trabalho:

- É necessária a execução de um maior número de ensaios com os parâmetros que nesta pesquisa resultaram em uma união de melhor qualidade, garantindo assim a repetibilidade dos resultados obtidos.
- Fazer uma análise detalhada da microestrutura da junta, bem como a quantificação das fases e identificação de suas morfologias, para melhor compreensão do processo.
- Realização de ensaios mecânicos para melhor caracterização das propriedades mecânicas da junta soldada.
- Por fim, recomenda-se avaliar o possível efeito que poderia se trazer à junta caso uma peça de suporte para o bloco que não limitasse a deformação por flexão fosse utilizada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM 276/276M. **Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes**. p1-8, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM A36/A36M. **Standard Specification for Carbon Structural Steel**. p1-3, 2016

ANDREWS, R. E.; MITCHELL, J. S. Underwater repair by friction stitch welding. **Metals and materials**, v. 6, n. 12, p. 796-797, dec. 1990.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. 8. ed. Miami, 1991. v. 2.

CARNEIRO, B. P. **Furos Passantes**. Uberlândia, 2009. 22 p. Relatório.

FARIAS, F. A. **Processamento de aço inoxidável duplex por extrusão em canal angular**. 2009. 115 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.

GONTIJO, M. F. **O efeito da espessura da chapa sobre a qualidade do reparo por atrito**. 2012. 112 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

GRACIOSO, J. F. F. **Efeitos das condições de têmpera na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico fundido CA6NM**. 2003. 115 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

HWANG, H. F. **Desenvolvimento, projeto, construção e teste de um cilindro de reparo por atrito portátil**. 2010. 78 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

JANA, S. Effect of heat input on the HAZ properties of two duplex stainless steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 33, n. 3, p. 247-261, sep. 1991.

MATTEI, F. **Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem por fricção**. 2011. 166 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MATTOS, E. P. **Estudo da influência do pré-aquecimento na soldagem por atrito com furo passante com pino consumível em aço ao carbono EN14**. 2012. 59 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEYER, A. **Friction Hydro Pillar Processing: Bonding Mechanism and Properties**. 2003. 123 f. Tese de Doutorado - Technischen Universität Braunschweig, Hamburg.

PAES, M. T. P. **Processamento termomecânico de pinos de aço no interior de cavidades de aço C-Mn através de soldagem por atrito rotacional**. 2013. 318 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PARDAL, J. M. **Efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas, magnéticas e na resistência à corrosão de aços inoxidáveis superduplex**. 2009. 411 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal Fluminense, Niterói.

PIRES, R. R. **Efeitos da geometria, da força axial e da rotação no reparo por atrito**. 2007. 136 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RODRIGUES, F. B. **Desenvolvimento, projeto e construção de sistemas e acessórios mecânicos destinados à automação de um cilindro de reparo por atrito portátil**. 2016. 167 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RODRIGUES, M. P. **Avaliação de microestrutura e propriedades mecânicas de juntas obtidas pelo processo FTPW em aço inoxidável duplex**. 2017. 62 f. Projeto de fim de curso - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SABARÁ, E. W. F. **Caracterização microestrutural e avaliação da resistência à corrosão de aços inoxidáveis austeníticos utilizados em aplicações como biomateriais**. 2013. 138 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São João del-Rei, São João Del Rei.

SANTOS, E. J. **Desenvolvimento de um processo de reparo por atritos para peças com trincas passantes**. 2013. 125 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

THEODORO, M. C. **Soldagem por atrito com pino não-consumível em juntas dissimilares de aços inoxidáveis austenítico UNS S31603 e superduplex UNS S32750**. 2013. 97 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VOGEL, J. P.; NERY, W. S.; ARAUJO, A. C. Estudo do efeito do avanço nas forças e no acabamento de um torneamento de aço superduplex. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7, 2013. Itatiaia. **Anais...**p. 1-8.

# APÊNDICE A

## GRÁFICOS DE PROCESSAMENTO

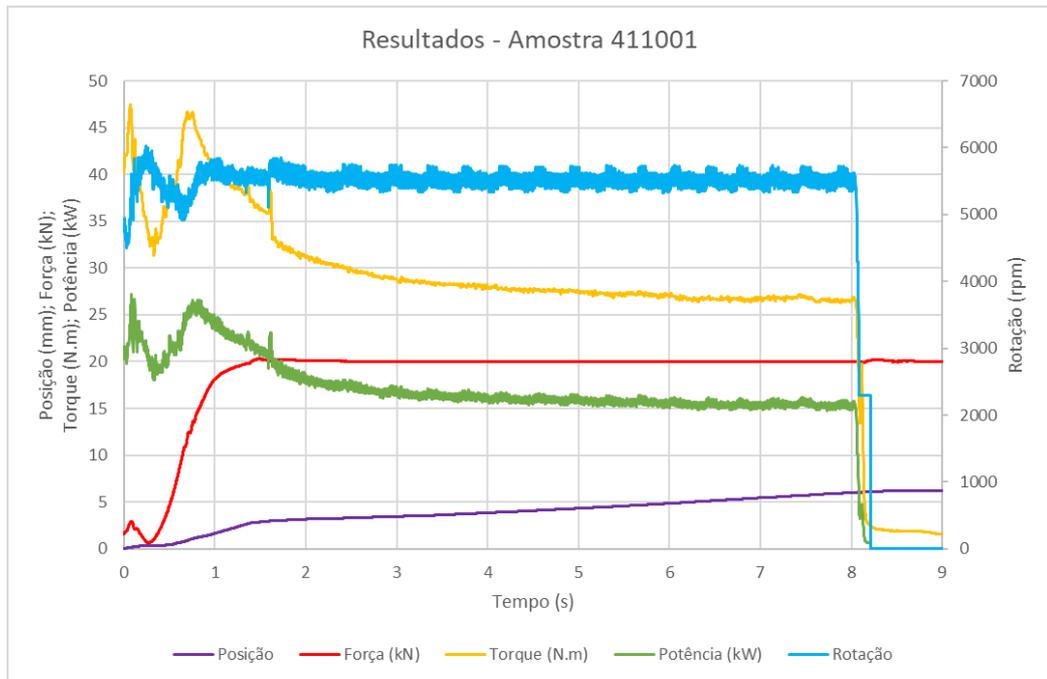


Figura A.1 - Gráfico de Processamento: amostra 411001

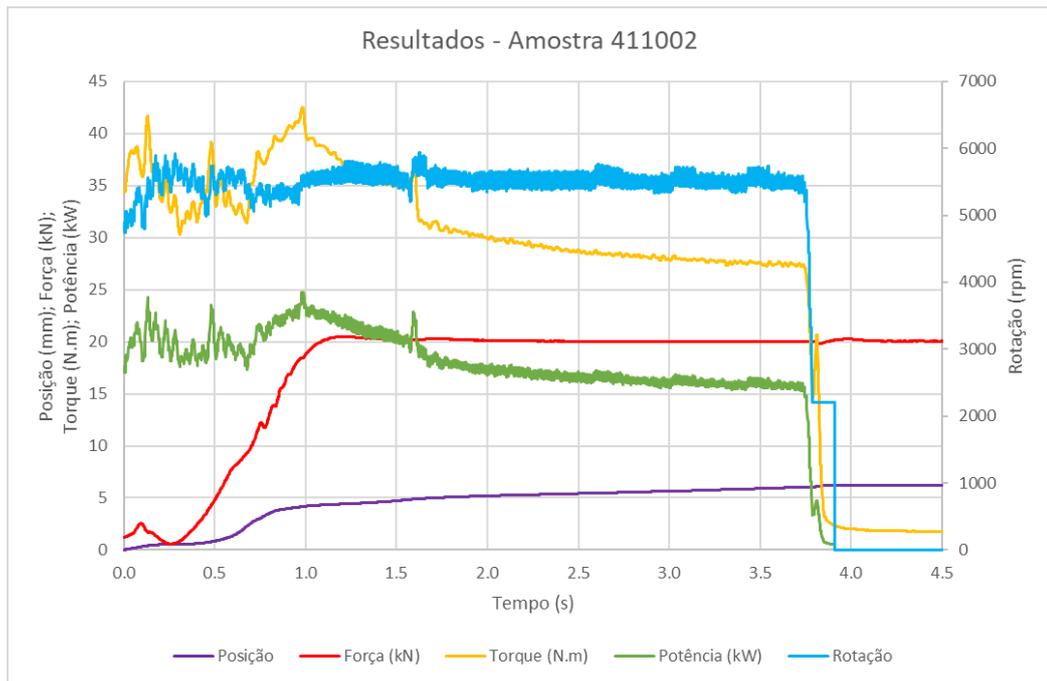


Figura A.2 – Gráfico de Processamento: amostra 411002

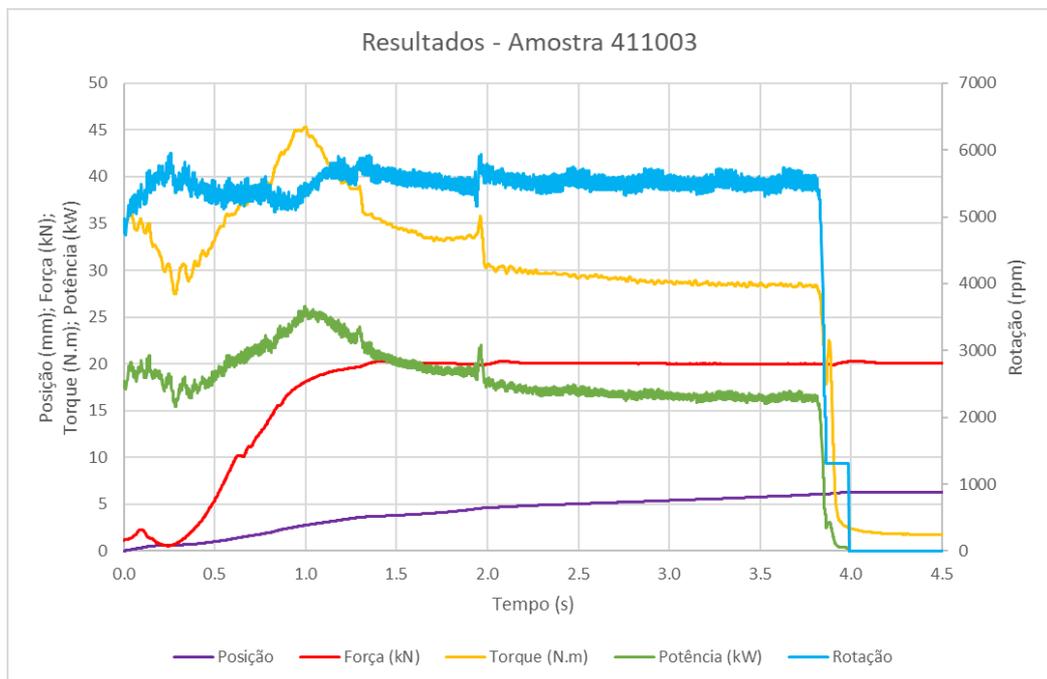


Figura A.3 - Gráfico de Processamento: amostra 411003

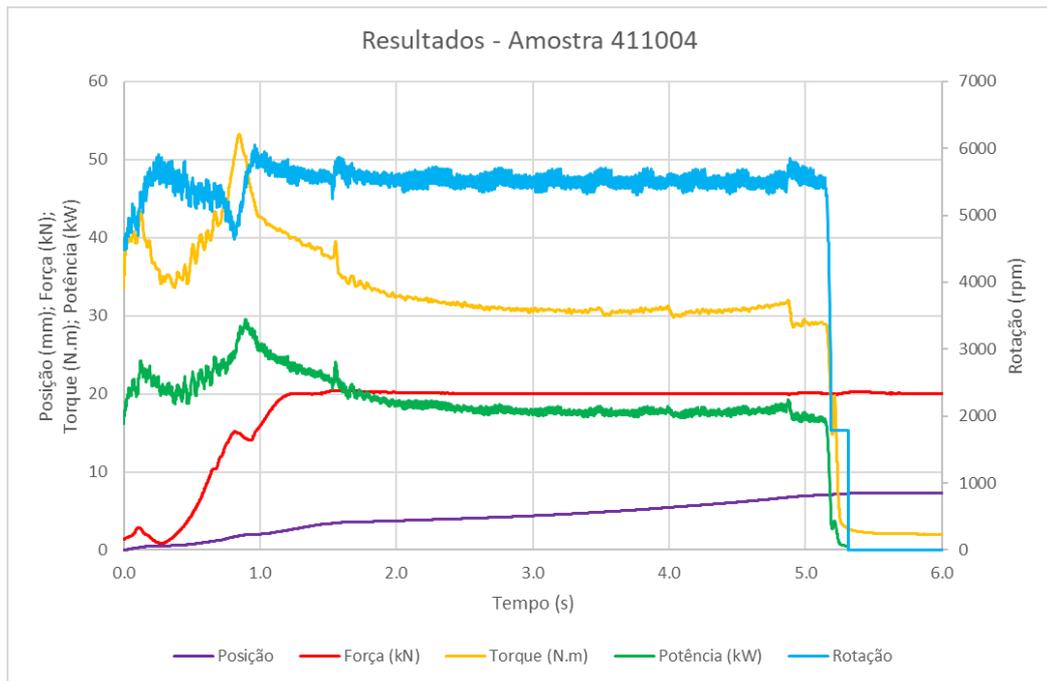


Figura A.4 - Gráfico de Processamento: amostra 411004

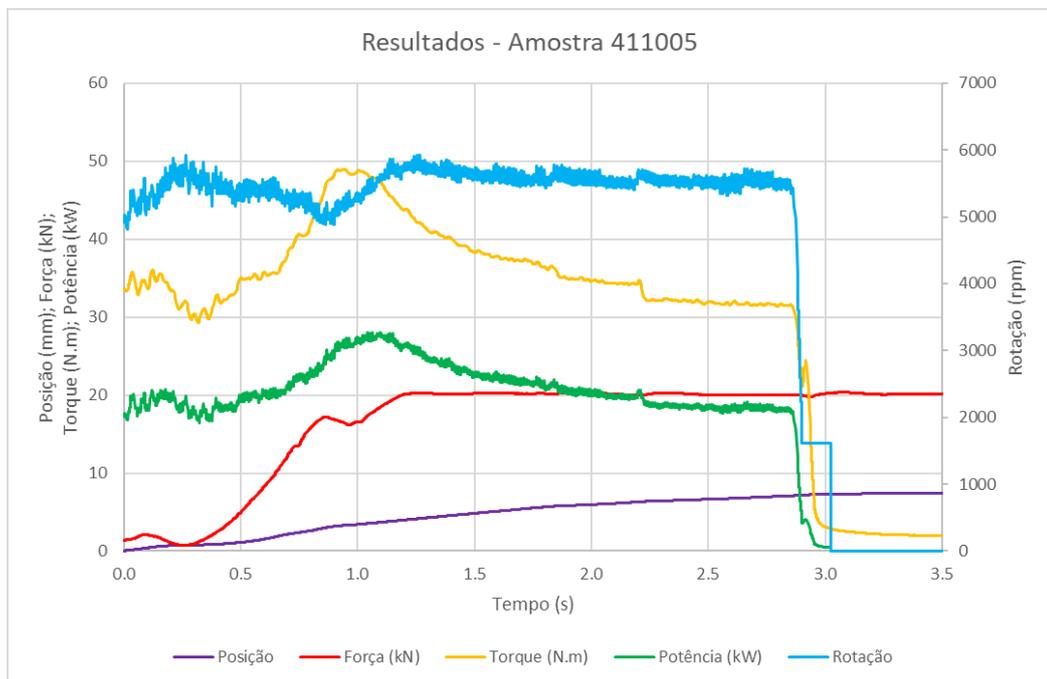


Figura A.5 - Gráfico de Processamento: amostra 411005

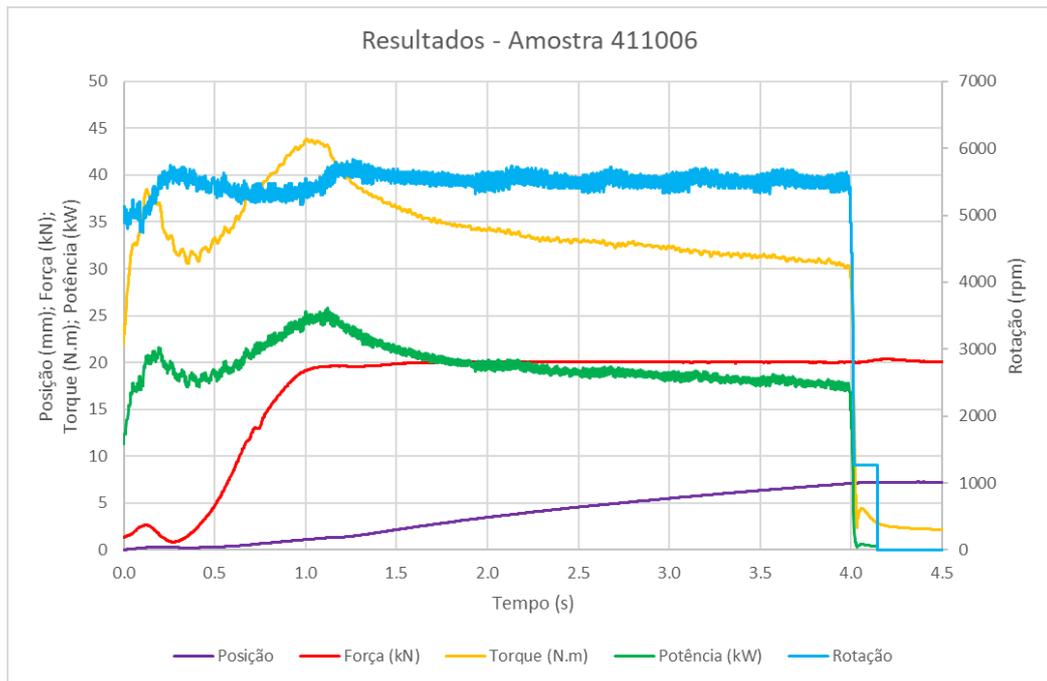


Figura A.6 - Gráfico de Processamento: amostra 411006

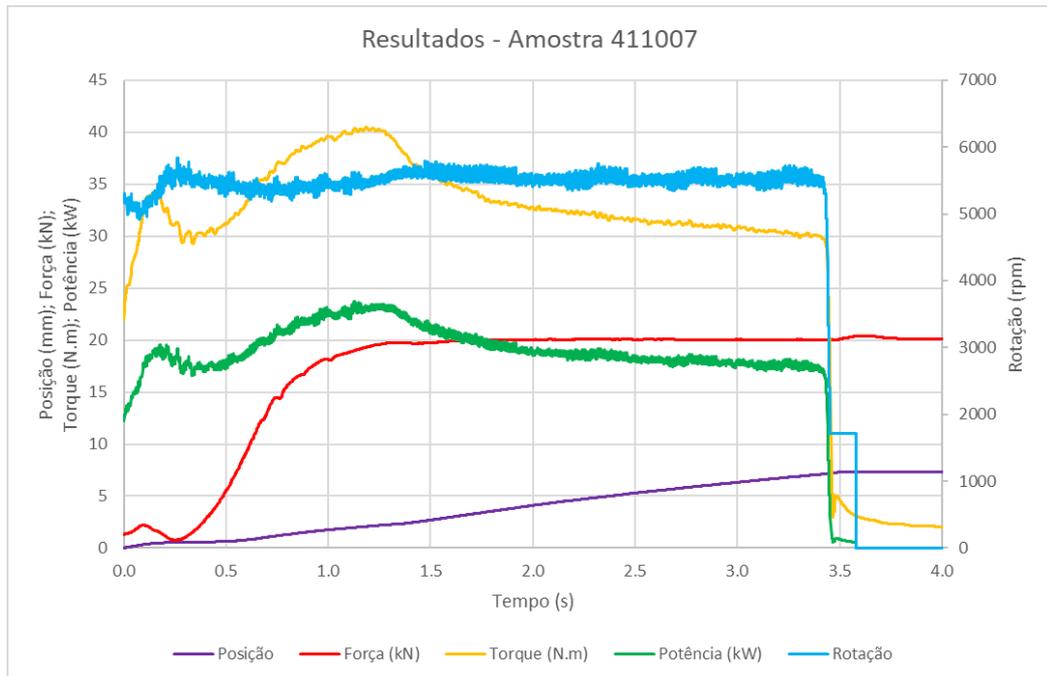


Figura A.7 - Gráfico de Processamento: amostra 411007

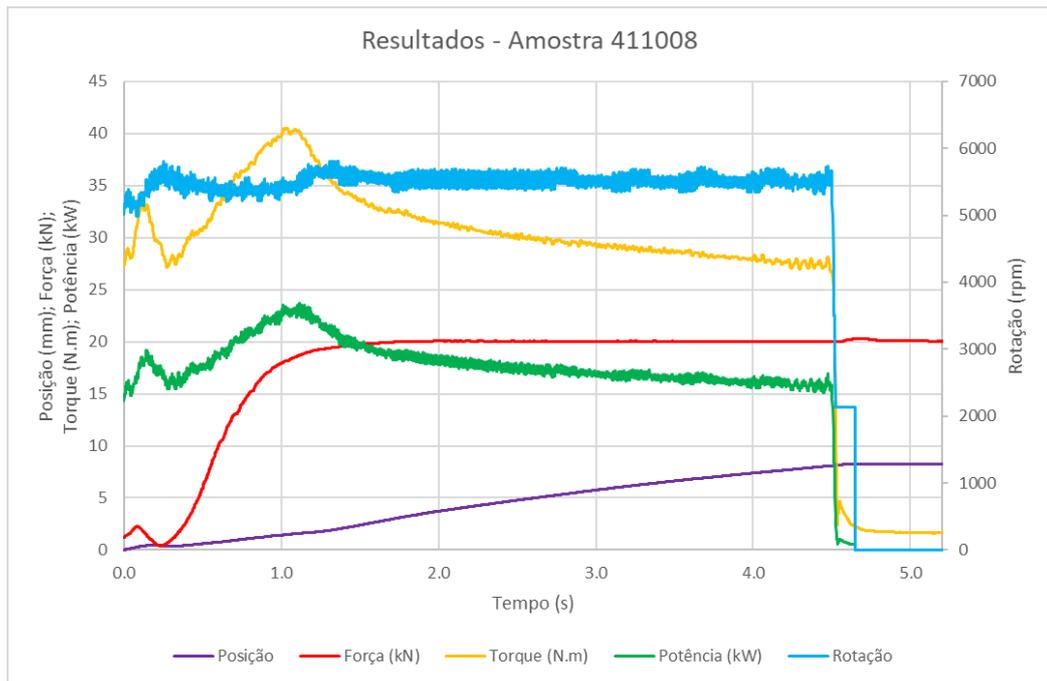


Figura A.8 - Gráfico de Processamento: amostra 411008

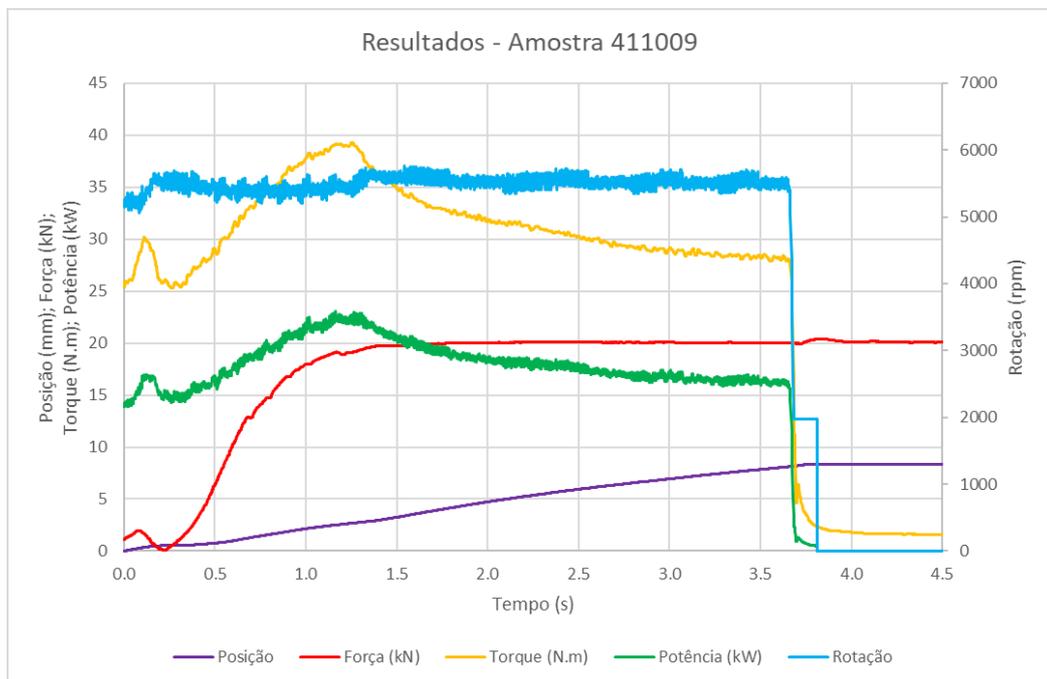


Figura A.9 - Gráfico de Processamento: amostra 411009

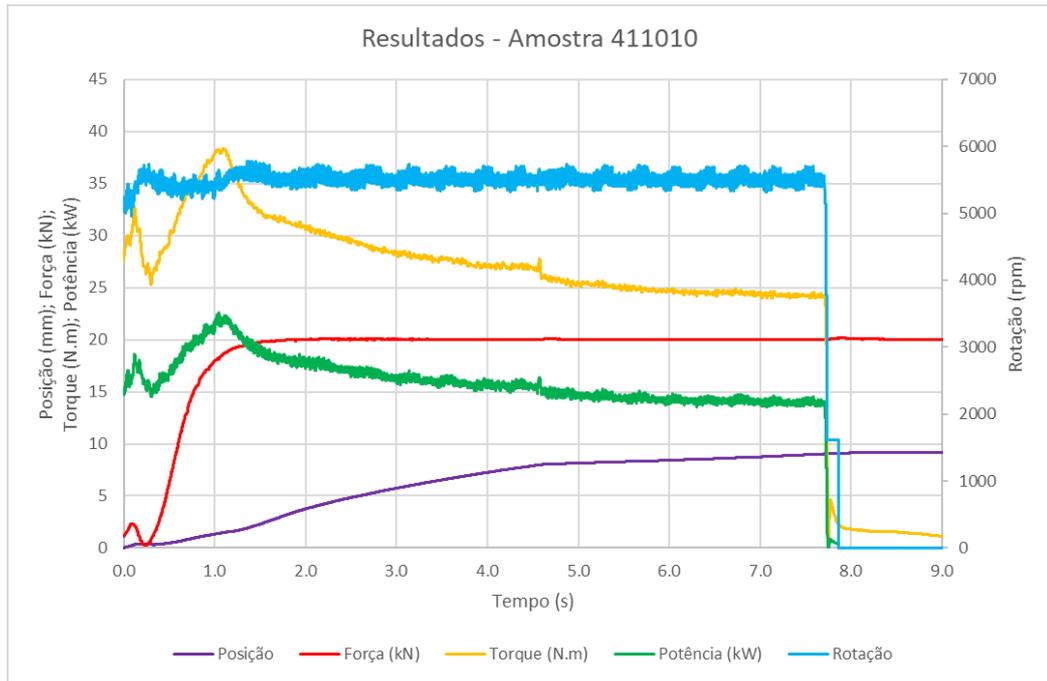


Figura A.10 - Gráfico de Processamento: amostra 411010

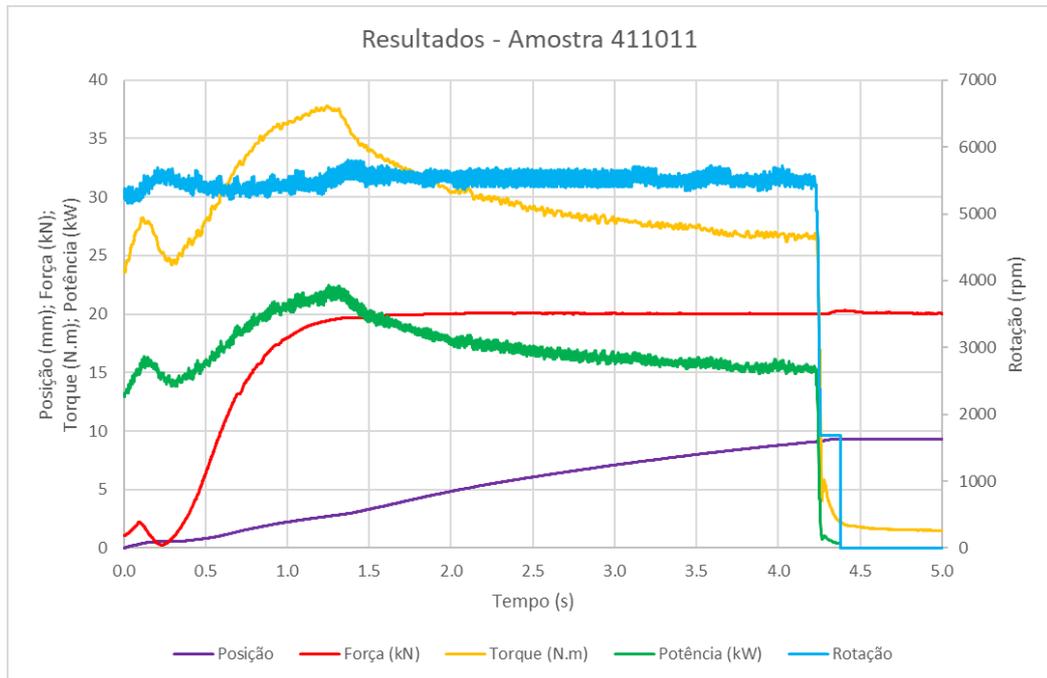


Figura A.11 - Gráfico de Processamento: amostra 411011

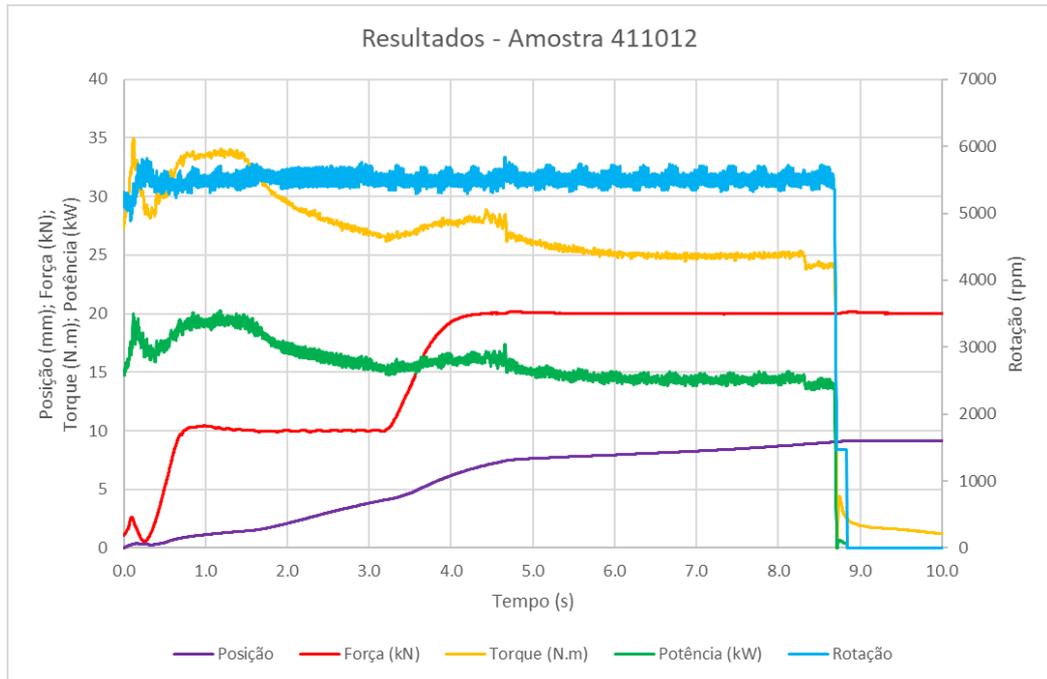


Figura A.12 - Gráfico de Processamento: amostra 411012

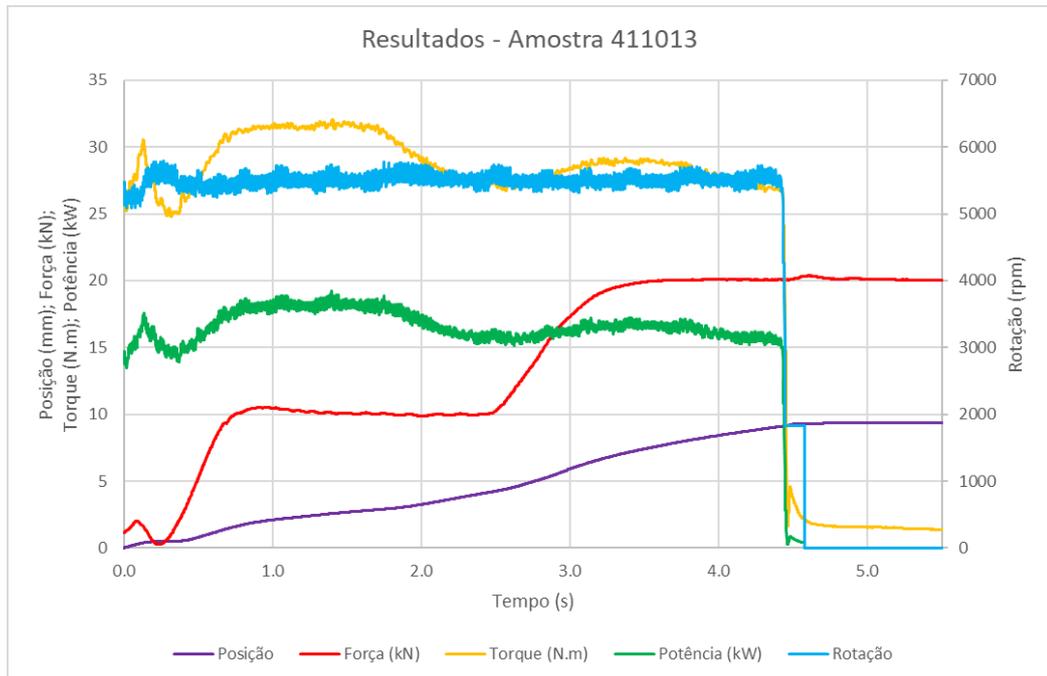


Figura A.13 - Gráfico de Processamento: amostra 411013

## **APÊNDICE B**

### **MICROGRAFIAS**

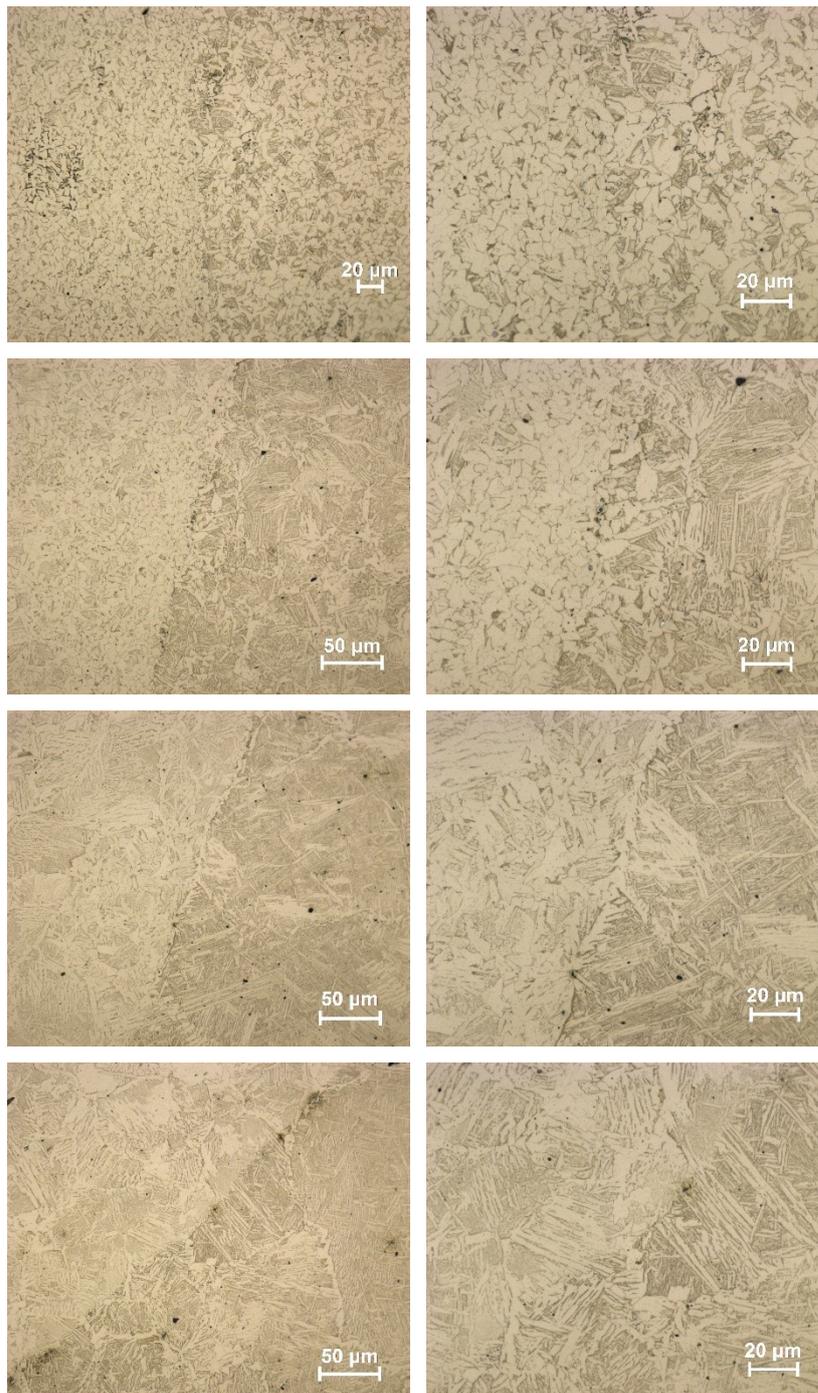


Figura B.1 - Micrografias amostra 411001 – Pontos P1 a P4 (respectivamente de cima para baixo), objetivas 50x (esquerda) e 100x (direita)

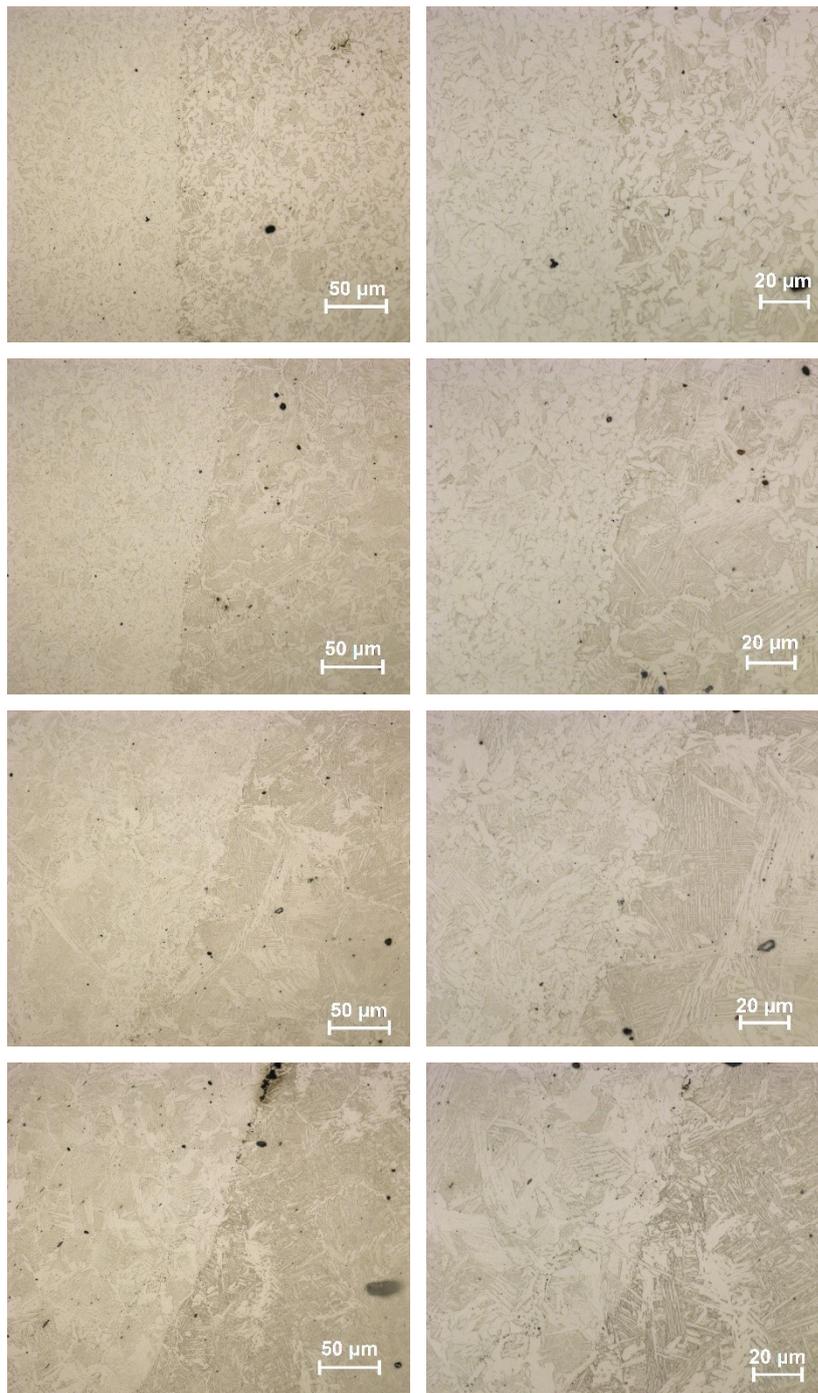


Figura B.2 - Micrografias amostra 411002 – Pontos P1 a P4 (respectivamente de cima para baixo), objetivas 50x (esquerda) e 100x (direita)

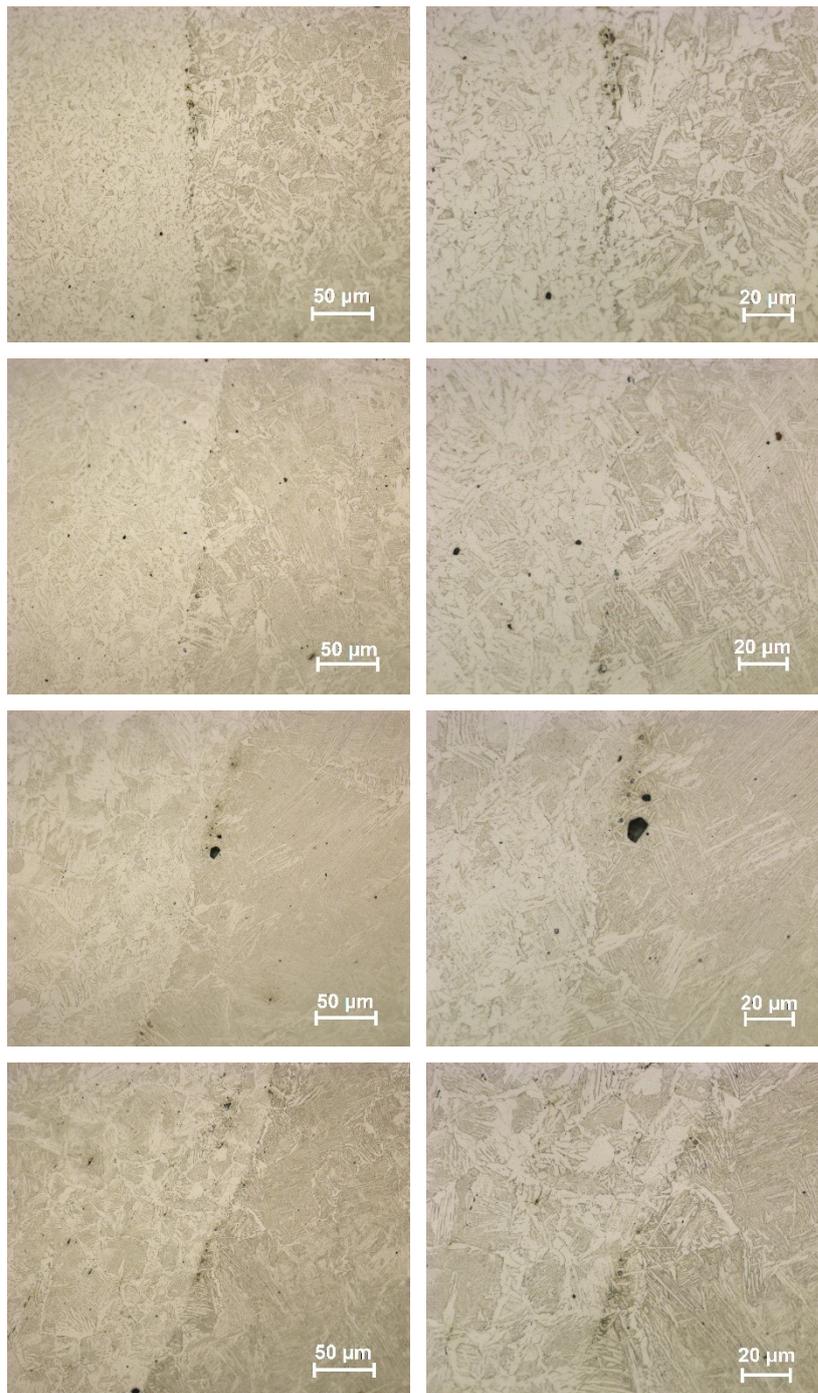


Figura B.3 - Micrografias amostra 411003 – Pontos P1 a P4 (respectivamente de cima para baixo), objetivas 50x (esquerda) e 100x (direita)

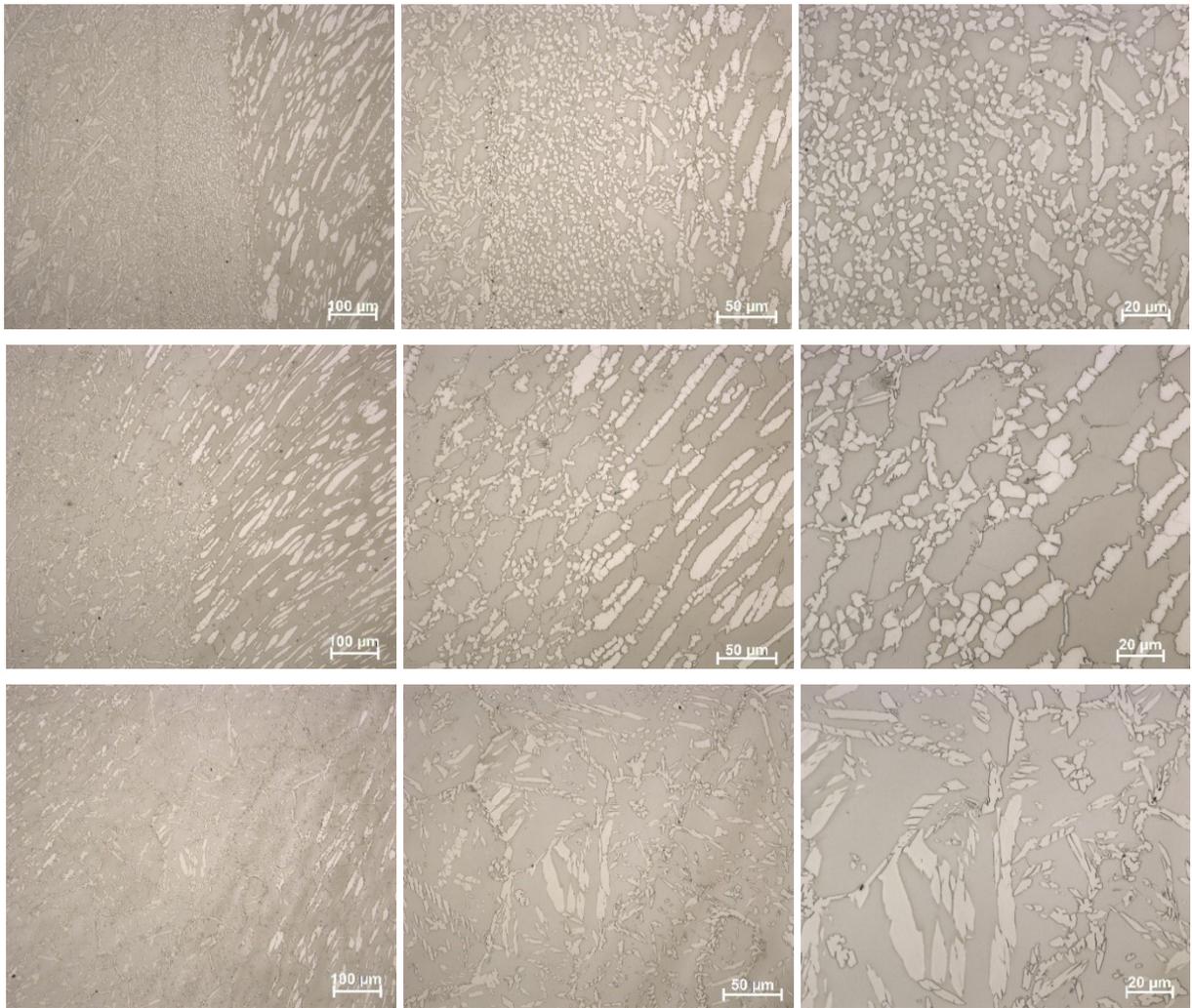


Figura B.4 - Micrografias amostra 411010, interface pino/bloco – Pontos P1 a P3 (respectivamente de cima para baixo), objetivas 20x (esquerda), 50x (meio) e 100x (direita)

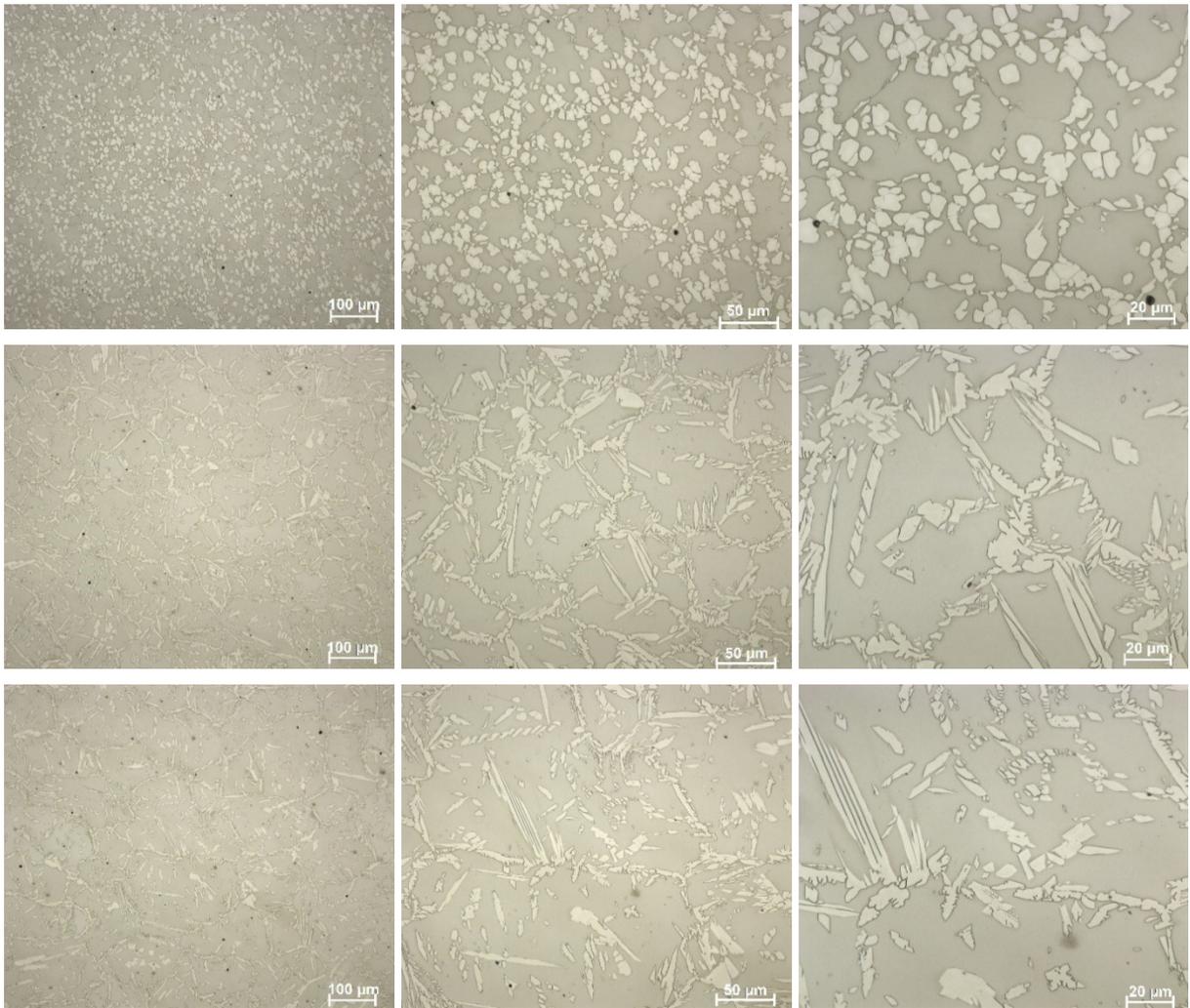


Figura B.5 - Micrografias amostra 411010, região interna do pino – Pontos P4 a P6 (respectivamente de cima para baixo), objetivas 20x (esquerda), 50x (meio) e 100x (direita)

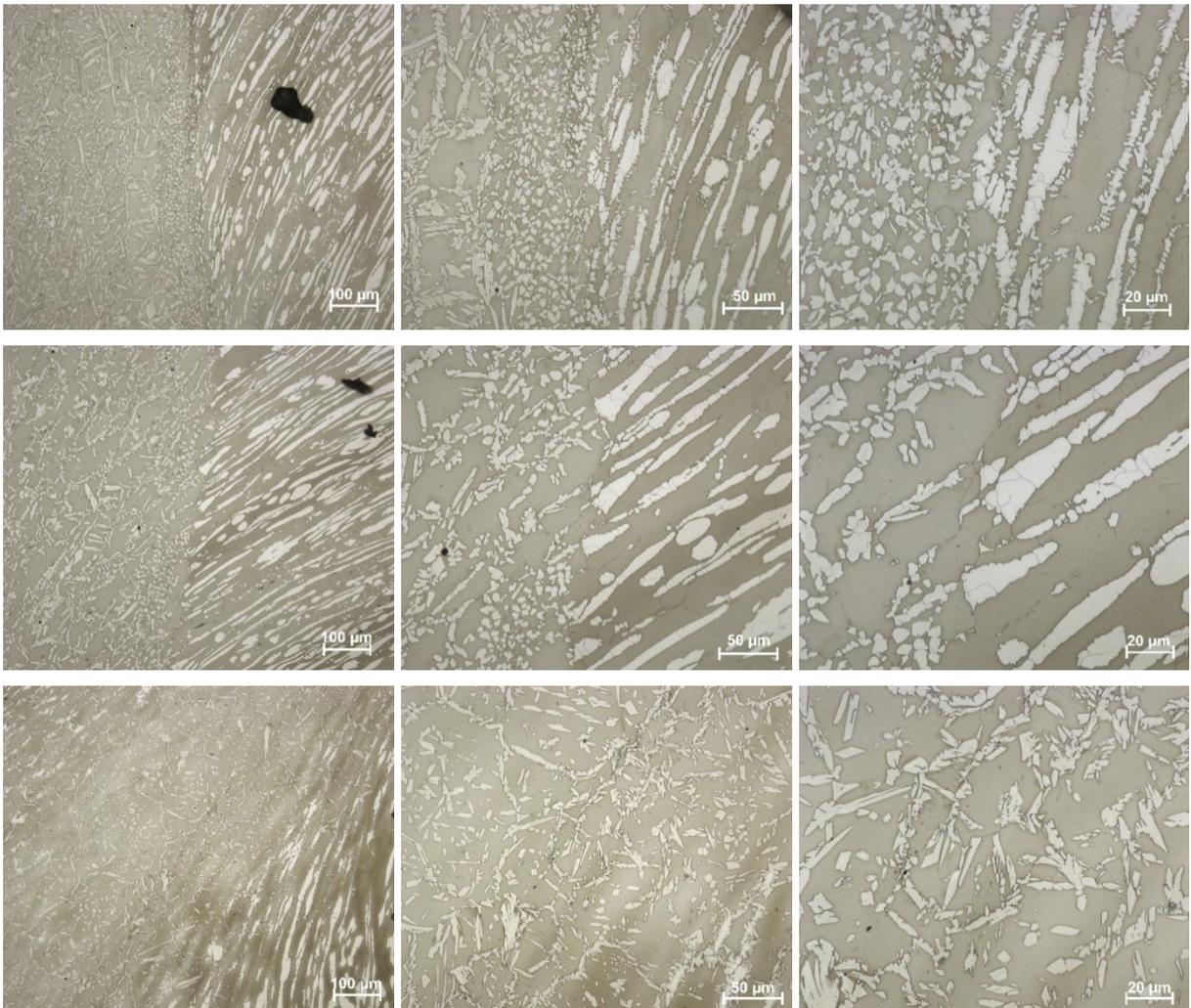


Figura B.6 - Micrografias amostra 411012, interface pino/bloco – Pontos P1 a P3 (respectivamente de cima para baixo), objetivas 20x (esquerda), 50x (meio) e 100x (direita)

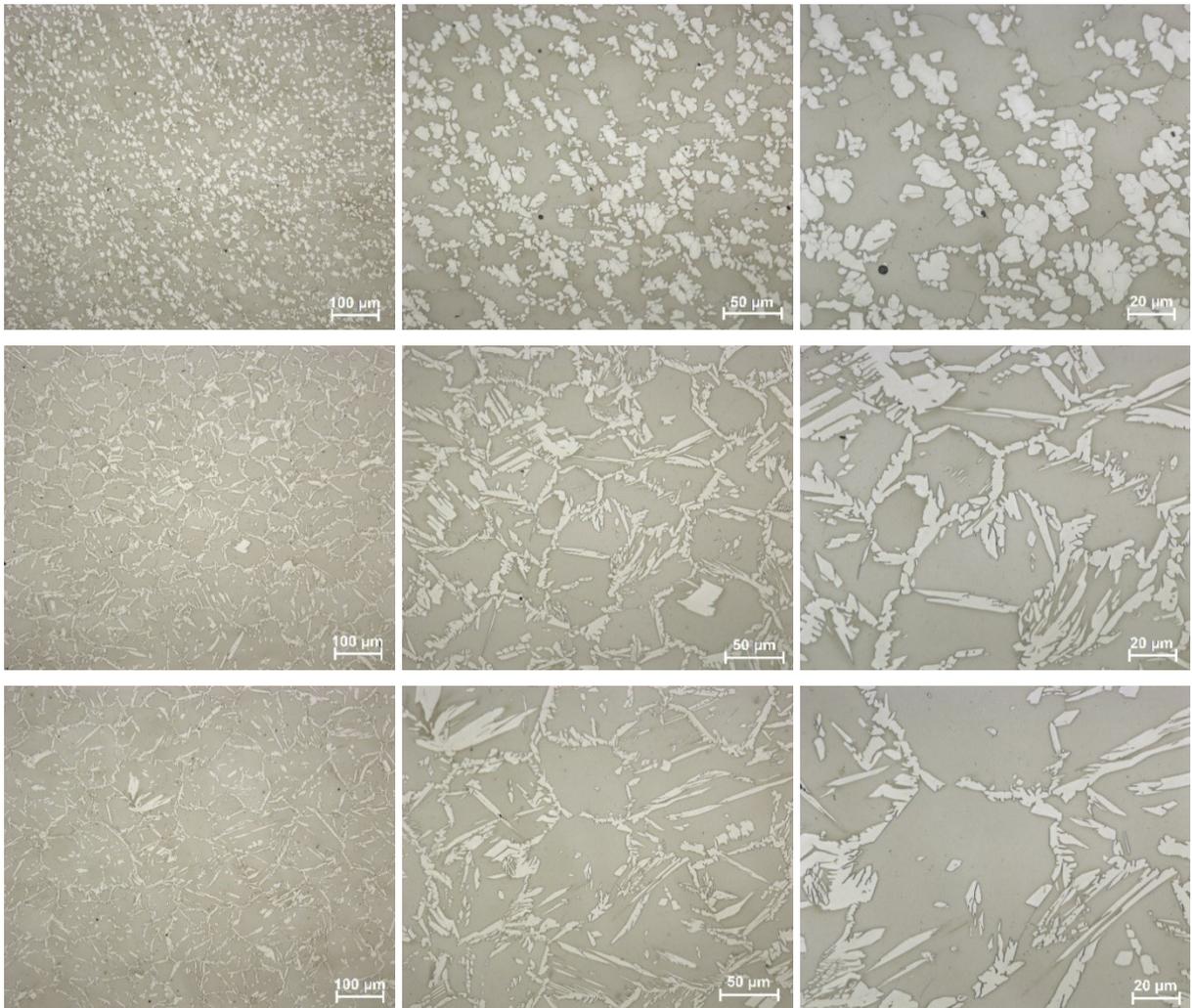


Figura B.7 - Micrografias amostra 411012, região interna do pino – Pontos P4 a P6 (respectivamente de cima para baixo), objetivas 20x (esquerda), 50x (meio) e 100x (direita)