

ERASTO JOSÉ DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE
REPARO POR ATRITO PARA PEÇAS COM TRINCAS
PASSANTES**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2013

ERASTO JOSÉ DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE
REPARO POR ATRITO PARA PEÇAS COM TRINCAS
PASSANTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Tribologia e Materiais.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Sinésio D. Franco

UBERLÂNDIA – MG

2013

**À minha mãe Ana Darc dos Santos e minha
irmã Maria Carolina dos Santos.**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força e perseverança para superar as dificuldades, mostrar os caminhos nas horas incertas e suprir todas as minhas necessidades.

A você minha mãe Ana Darc que, muitas vezes, renunciou seus sonhos para que eu pudesse realizar o meu, partilho a alegria deste momento. Agradeço à minha irmã Maria Carolina que é pra mim uma grande companheira e foi minha primeira professora.

À todos os meus familiares e amigos que me apoiaram.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

Ao professor Sinésio Domingues Franco, meu orientador e exemplo de profissional, pela oportunidade concedida de ser seu aluno, por acreditar em mim, pela paciência, compreensão, apoio e orientação durante todo o trabalho.

Ao professor Rafael Ariza Gonçalves, meu amigo, que colaborou de forma fundamental neste trabalho, pela sua paciência, pelas sugestões e análises e pelo tempo que dispensou em meu auxílio.

Aos engenheiros Raphael Rezende Pires, Fernando Buiatti Rodrigues, Dênis Soares de Freitas, pelo apoio e parceria.

Aos técnicos, Flávio Alves dos Santos e Afrânio Vieira dos Santos Filho pela solidariedade e disposição.

Aos alunos de iniciação científica Alexia Mota Silva, Marina Maciel Borges, Jonas Ávila Cunha e Simmya Staell Rodrigues Campos pela ajuda e companheirismo.

À Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras, pelo apoio financeiro.

A Capes pela concessão da bolsa de estudos.

SANTOS. E. J. Desenvolvimento de um Processo de Reparo por Atrito para Peças com Trincas Passantes. 2013. 128 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Resumo

Neste trabalho é estudado o reparo por atrito de chapas com furos passantes, mas com a inovação do uso de uma peça de retenção que simula um furo cego. Outra inovação deste trabalho foi à utilização de folgas entre a peça a ser reparada e peça de retenção que permite um caminho adicional para o fluxo plástico promovendo maior eliminação de impurezas na interface de união. Neste trabalho foram reparados chapas de aço ASTM A36 e pinos de aço ABNT 1010 sendo as geometrias dos furos e dos pinos cônicos. As forças axiais utilizadas nos reparos foram de 60, 80, 100 e 120 kN. A avaliação da qualidade dos reparos foi feita através da análise macrográfica, micrográfica, perfis de dureza e ensaio de dobramento. A verificação da limpeza da interface de união foi feita através de microscopia eletrônica com EDS. Os reparos não apresentaram defeitos de união e não apresentaram trincas nas amostras ensaiadas no dobramento, todavia, nos reparos realizados com a presença de folga faz-se necessário o controle da espessura da mesma para um completo preenchimento. O uso das folgas se mostraram eficazes como auxiliar na drenagem de impurezas da interface pino/bloco.

Palavras-chave: *Friction Hydro Pillar Processing*; Reparo por atrito com furos cônicos; Aços-carbono; Propriedades mecânicas; Microestrutura de aços.

SANTOS, E.J., Development of a Friction Tapered Plug Welding Process for Parts with Through-wall Cracks. 2013. 128 p. M.Sc. Dissertation in Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia-MG, Brazil.

Abstract

In this work, a new friction tapered plug welding (FTPW) process is used to remove through-wall cracks. In order to remove the crack, a retention plate is attached at the back of the plate to be repaired, so that at the end effect it may be assumed as a repairing process using a blind hole. Another innovation was introduced by using different gaps between the plate to be repaired and the retention plate, allowing an additional flowing path for the plasticized material and so a better elimination of oxide layers in the bonding interface. Tests were carried out using blocks made of ASTM A36 and pins of ABNT 1010, and axial forces of 60, 80, 100 and 120 kN. The welding quality was evaluated by means of metallographic examination, microhardness and bending tests. The results showed that a good metallurgical bond and no crack were observed in the bending test. Nevertheless, tests conducted with a clearance between the base and the opposing plate showed that it may lead to incomplete filling of the hole. Therefore it has to be strictly controlled during the process.

Keywords: Friction Hidro Pillar Processing; Friction Tapered Plug Welding; Plain carbon steels; Mechanical properties; Steel microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 – Trinca em um tanque de armazenamento de um FPSO (SOUZA, 2006)	1
Figura 2. 1 – Macrografia de um substrato e de um pino após processo por FTPW; liga de alumínio AA6082-T6, espessura 10 mm e pino de alumínio confeccionado na liga AA6082-T6 (BEAMISH, 2003; TWI).....	5
Figura 2. 2 – Ilustração esquemática do processo FTPW a) reparo em furo passante por compressão; b) reparo em furo passante por tração (HWANG, 2010)	6
Figura 2. 3 – Ilustração esquemática do processamento de pinos por atrito FHPP (< http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/emerging-friction-joining-technology-for-stainless-steel-and-aluminium-applications-february-1996/ >)	7
Figura 2. 4 – Ilustração esquemática do processo de costura por atrito (MATTEI, 2011).....	8
Figura 2. 5 – Geometrias cilíndrica e cônica empregadas no processo de reparo (NICHOLAS 2003)	8
Figura 2. 6 – Perfis de microdureza horizontal. As indentações (realizadas a 10 e 15 mm do da superfície do bloco) se iniciaram no material base e seguiram em direção ao pino. As setas indicam a região de interface pino/bloco (PAES <i>et al.</i> , 2010)	11
Figura 2. 7 – Picos de dureza na ZTA, observados através do perfil horizontal realizado a 10 mm do fundo do furo (bloco com furo não passante); A letra “B” refere-se às geometrias dos pinos e blocos usados, que correspondem às geometrias mostradas nas figuras 3.10 e 3.11 deste trabalho; A legenda à direita corresponde às forças utilizadas, quais sejam: 60, 100, 200, 300 e 400 kN (MAREGA, 2011)	12
Figura 2. 8 – Picos de dureza na ZTA, observados através do perfil horizontal realizado a 5,0 mm da face inferior do fundo do furo (bloco com furo não passante); A geometria A corresponde à geometria mostrada nas figuras 3.10 e 3.11 deste trabalho (PIRES, 2007)..	13
Figura 2. 9 – Picos de dureza no material base logo abaixo da interface pino/bloco (fundo do furo cego), no qual os ensaios mostrados foram realizados com dois ciclos de força e rotação; Ciclo 1: força axial de 20 kN e rotação de 7000 rpm; Ciclo 2: força axial de 35 kN e 5000 rpm. A geometria dos pinos e dos blocos utilizados são as mesmas mostradas nas figuras 3.10 e 3.11 deste trabalho (PIRES, 2007)	13
Figura 2. 10 – Perfis de dureza na região do bloco (fundo do furo cego); A letra “B” refere-se às geometrias dos pinos e blocos usados, que correspondem à geometria mostrada nas figuras 3.10 e 3.11 deste trabalho; A legenda à direita corresponde às forças empregadas nos ensaios, quais sejam: 60, 100, 200, 300 e 400 kN (MAREGA,2011).....	14
Figura 2. 11 – Temperaturas máximas na chapa, a meia profundidade do furo, durante o processamento por atrito, usando um furo cônico de 16 mm de profundidade, para blocos quadrados de 40, 60, 80 e 120 mm de lado (OSÉIAS, 2011). A espessura da chapa de teste era de uma polegada (25,4 mm)	15
Figura 2. 12 – Posições dos termopares próximos à parede do furo para investigação da temperatura durante o processo de reparo por atrito (GONTIJO, 2012)	16

Figura 2. 13 – Temperatura medida ao longo da interface pino/bloco GONTIJO (2012)	16
Figura 2. 14 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito; (a) Unidade hidráulica e bloco de válvulas; (b) Cilindro de reparo contido no pórtico (SOUZA, 2006)	19
Figura 2. 15 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 2 (HWANG, 2010)	20
Figura 2. 16 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (GONTIJO, 2012)	20
Figura 2. 17 – Diagrama esquemático da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 4 (HWANG, 2010).....	21
Figura 2. 18 – Sistema de reparo portátil HMS 3000 (HWANG, 2010).....	22
Figura 2. 19 – Representação virtual do equipamento e foto do equipamento após a fabricação respectivamente (MATTEI, 2011)	22
Figura 2. 20 – Equipamento de soldagem por atrito NEI John Thompson modelo FW-13 (MATTEI, 2011)	23
Figura 2. 21 – Máquina portátil de solda por atrito continua (PCFWM) (HATTINGH; BULBRING <i>et al.</i> , 2011).....	23
Figura 2. 22 – Visão geral da disposição das peças durante para o reparo (TAKESHITA; HIBBARD <i>et al.</i> , 2001)	25
Figura 2. 23 – Esquema de ensaio de reparo com a peça suporte (pé de pressão); Em destaque no círculo vermelho chanfro cônico para atuar como reservatório para o material plastificado; (TAKESHITA; HIBBARD <i>et al.</i> , 2001).....	25
Figura 2. 24 – a) Imagem do pino consumível antes da modificação, b) imagem do pino após a inserção de ângulos (em destaque no círculo vermelho) no topo de sua haste (COLETTA; MARK <i>et al.</i> , 2005)	26
Figura 2. 25 – Representação esquemática da disposição das peças durante o processo de reparo (BOUET <i>et al.</i> , 2006). 1 – peça a ser reparada; 1' e 1'' – Face frontal e traseira da peça a ser reparada respectivamente; 2 - furo pré-usinado na peça 1; 3 – pino de metal; 4 – eixo fixo do furo pré-usinado; 5 – peça de suporte; 6 – cavidade da peça suporte; 7 – material escoado do pino de metal; 8 – barra plana; 9 – abertura da barra plana; 10 – flash	27
Figura 2. 26 – Representação esquemática em corte da aplicação da técnica para reparo em locais de difícil acesso (BOUET; FERTE <i>et al.</i> , 2006).....	28
Figura 2. 27 – Representação esquemática da disposição das peças durante o processo de reparo (MACIEL; 2009).....	29
Figura 2. 28 – Representação esquemática da disposição das peças durante o processo de reparo (MAHONEY; TAYLOR <i>et al.</i> , 1999)	30
Figura 2. 29 – Representação esquemática do pino e do furo com geometria conóide (DELANO <i>et al.</i> , 2003)	30
Figura 3. 1 – Parte do equipamento de reparo por atrito, constituída dos componentes em destaque, que são: Motor hidráulico, Placa de três castanhas, Morsa porta blocos.....	32
Figura 3. 2 – Cilindro hidráulico responsável pela aplicação da força axial	32

Figura 3. 3 – Disposição do par de guias lineares e patins aparafusados no suporte, utilizados para eliminar a vibração do Suporte da Morsa de Mesa no qual os blocos são posicionados.....	33
Figura 3. 4 – Morsa de fixação de amostras com destaque para as mandíbulas e as barras de restrição e um conjunto bloco de reparo (A)/peça suporte (B)	34
Figura 3. 5 – Posicionamento das mangueiras das mangueiras de alta pressão conectadas ao motor e ao cilindro hidráulico (MAREGA, 2011).....	35
Figura 3. 6 – Posicionamento do receptor de sinal de torque, sensor indutivo e anel de torque no motor hidráulico	36
Figura 3. 7 – Interface Homem Máquina (IHM) para configuração do processamento por atrito (MAREGA, 2011).....	36
Figura 3. 8 – Posicionamento do sensor de deslocamento (LVDT).....	37
Figura 3. 9 – a) Micrografia do aço ASTM A36, (seção longitudinal). Microestrutura: ferrita (grãos claros) e perlita (regiões escuras e orientadas); b) Micrografia do aço carbono ABNT 1010, (seção longitudinal). Microestrutura: ferrita (grãos claros) e perlita (regiões escuras e orientadas); Ataque Nital: 2%	38
Figura 3. 10 – Geometria de referência do pino consumível utilizado nos ensaios de reparo por atrito	40
Figura 3. 11 – Bloco com furo não passante tido como referência (GONTIJO, 2012).	41
Figura 3. 12 – Dados adquiridos no reparo de furos não, onde é mostrado um torque resistivo máximo de 150 N.m, força axial de 60 kN, comprimento de queima de 7 mm e 1.500 rpm (MAREGA, 2011).....	41
Figura 3. 13 – Evolução dos dados adquiridos no reparo de furo não passante em chapa de 1" (25,4 mm), onde é mostrado um torque máximo de 200 N.m, força axial de 60 kN, rotação de 1.400 rpm e comprimento de queima de 6 mm (GONTIJO, 2012)	42
Figura 3. 14 – Geometria do bloco não passante.....	43
Figura 3. 15 – Geometria da peça de retenção, responsável pelo prolongamento das paredes do furo passante	44
Figura 3. 16 – Geometria da peça suporte, responsável por dar sustentação à peça de retenção durante o processo de reparo	45
Figura 3. 17 – a) Desenho esquemático da montagem das peças para o reparo por atrito; b) Ampliação da folga entre pino/ peça de retenção	46
Figura 3. 18 – Geometria reprojeta do pino consumível utilizado nos ensaios de preenchimento.....	47
Figura 3. 19 – a) Desenho esquemático da montagem das peças para o reparo por atrito com a modificação no tronco de cone do pino; b) Ampliação da folga entre pino/ peça de retenção.....	48
Figura 3. 20 – a) Montagem das peças para o reparo por atrito com a introdução de um par de calços de 0,5 mm de espessura entre o bloco a ser reparado e a peça suporte; b) Ampliação da folga entre pino/ peça de retenção.	51

Figura 3. 21 – a) Montagem das peças para o reparo por atrito com a introdução de um par de calços de 1 mm de espessura entre o bloco a ser reparado e a peça suporte; b) Ampliação da folga entre pino/ peça de retenção	52
Figura 3. 22 – Superfície para preparação da macrografia e micrográfica	54
Figura 3. 23 – Variação microestrutural característica do reparo por atrito, usando como pino consumível o aço ABNT 1010 e uma chapa de aço ASTM A 36.....	55
Figura 3. 24 – Indicação ilustrativa dos locais onde foram realizadas as micrografias	56
Figura 3. 25 – Posicionamento dos perfis de microdureza.....	57
Figura 3. 26 – a) Geometria do bloco passante utilizado nos ensaios de preenchimento e posterior ensaios de dobramento. b) Geometria da lâmina retirada do bloco para os ensaios de dobramento.....	59
Figura 3. 27 – A) Dispositivo usado nos ensaios de dobramento; B) Representação esquemática do dispositivo usado (PIRES, 2007).....	60
Figura 3. 28 – Layout do programa Image J (Internet – domínio público) utilizado para o cálculo das ZTA. Na região inferior direita é mostrada a marcação de uma distância conhecida; A esquerda é mostrada a janela na qual se insere o valor da distância conhecida e a unidade da mesma	61
Figura 3. 29 – Imagem do recorte (mostrada através do traço vermelho) da aresta do bloco contendo a zona termicamente afetada para a investigação.....	61
Figura 4. 1 – Dados adquiridos durante do Ensaio 1 (Amostra 31601), sem folga entre as peças (60 kN, 1.700 rpm, FN de 0 mm e Cq de 7 mm)	63
Figura 4. 2 – Evolução do torque, força axial, comprimento de queima, rotação e potência mecânica no ensaio 2 (Amostra 31602; 80 kN, 1.700 rpm, FN de 0 mm e Cq 7 mm)	64
Figura 4. 3 – Torque, força axial, comprimento de queima, rotação e potência mecânica durante o ensaio 3 (Amostra 31603; 100 kN, FN de 0 mm e Cq 7 mm)	64
Figura 4. 4 – Dados aquisicionados no ensaio 4 (Amostra 31604; 120 kN, FN de 0 mm, FR de 1,9 mm e Cq 7 mm)	65
Figura 4. 5 – Torque, força axial, comprimento de queima, rotação e potência mecânica relativas ao ensaio 9,0 (Amostra 31609; 60 kN, FN de 1 mm, FR de 1,9 mm, 1700 rpm e Cq de 7,0 mm)	65
Figura 4. 6 – Evolução do torque, força axial sobre o pino, comprimento de queima, rotação e potência mecânica para o ensaio 10 (Amostra 31610; 80 kN, FN de 1 mm, FR de 2,7 mm e Cq de 7 mm)	66
Figura 4. 7 – Dados relativos ao ensaio 11 (Amostra 31611; 100 kN, FN de 1 mm, FR de 3,3 mm e Cq de 7 mm).	66
Figura 4. 8 – Torque, força axial, comprimento de queima, rotação e potência mecânica durante o ensaio 12 (Amostra 31612; 120 kN, FN de 1 mm, FR de 2,8 mm, 1700 rpm e Cq de 7 mm)	67
Figura 4. 9 – Comparativo entre os tempos de reparo dos ensaios sem e com folga	69
Figura 4. 10 – Imagem das áreas das ZTA circundadas em amarelo, feitas nas amostras dos ensaios onde não houve a presença de calços.....	70

Figura 4. 11 – Imagem das áreas das ZTA circundadas em amarelo, feitas nas amostras cujos ensaios foram realizados com um calço de espessura 1,0 mm	71
Figura 4. 12 – Imagem das áreas das ZTA circundadas em amarelo, feitas nas amostras cujos ensaios foram realizados com um calço de espessura 0,5 mm	72
Figura 4. 13 – Imagem das áreas das ZTA circundadas em amarelo, feitas nas amostras cujos ensaios foram realizados com um calço de espessura 1,0 e 0,5 mm, respectivamente	73
Figura 4. 14 – Extensão das áreas das ZTA das amostras ensaiadas sem folga e com folga de 0,5 e 1,0 mm em função da força axial aplicada	74
Figura 4. 15 – Imagem da deflexão das duas barras de restrição utilizadas para o controle da folga entre as peças após os ensaios	75
Figura 4. 16 – Macrografia das amostras reparadas sem a presença de calço.....	77
Figura 4. 17 – Macrografia das amostras 31609 a 31612 ensaiadas com a presença de calço de 1,0 mm de espessura	78
Figura 4. 18 – Macrografia das amostras 31613 a 31616, ensaiadas com a presença de calço de 0,5 mm de espessura	79
Figura 4. 19 – Macrografia das amostras 31617 a 31618 ensaiadas com a presença de calço de 1,0 e 0,5 mm de espessura respectivamente.....	80
Figura 4. 20 – Falha de preenchimento da amostra 31610 (80 kN, FN de 1,0 mm, FR de 2,70 mm e Cq de 7,0 mm), na região superior entre pino e bloco.....	82
Figura 4. 21 – Falha de preenchimento da amostra 31611 (100 kN, FN de 1,0 mm, FR de 2,90 mm e Cq de 7,0 mm), na região superior entre pino e bloco	82
Figura 4. 22 – Falha de preenchimento da amostra 31612 (120 kN, FN de 1,0 mm, FR 2,80 mm e Cq de 7,0 mm), na região superior entre pino e bloco.....	82
Figura 4. 23 – Falha de preenchimento da amostra 31616 (120 kN, FN de 0,5 mm, FR de 3,0 mm e Cq de 7,0 mm), na região superior entre pino e bloco.....	83
Figura 4. 24 – Falha de preenchimento da amostra 31617 (120 kN, FN de 0,5 mm, FR de 4,80 mm e Cq de 9,0 mm), na região superior entre pino e bloco	83
Figura 4. 25 – Na figura da esquerda é sinalizada pela seta azul a imagem do <i>flash</i> entre a peça de retenção e o bloco de reparo da amostra 31617, e a direita é apresentada a imagem do material plastificado (<i>flash</i>) em corte transversal em maior ampliação, no qual é mostrada a linha hachurada da área de <i>flash</i> em excesso e a possível área do <i>flash</i> (acima da primeira linha vermelha segmentada), caso a folga nominal mantida tivesse sido mantida	84
Figura 4. 26 – Micrografia da amostra 31601 correspondente à interface pino/bloco a 5 mm da face inferior do bloco.....	86
Figura 4. 27 – Micrografia da amostra 31601, correspondente à interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco.....	87
Figura 4. 28 – Micrografias da amostra 31602 (80 kN, FN de 0,0 mm, 1700 rpm e Cq 7,0 mm); (A) a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; (B) a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco	88

Figura 4. 29 – (A) Macrografia da amostra 31601 (60 kN, FN de 0,0 mm, 1700 rpm, Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Inclusões observadas com maior aumento (2000 X), correspondente ao <i>flash</i> , obtidas através do MEV; (C) Mapa de distribuição dos elementos químicos encontrados nas inclusões.....	89
Figura 4. 30 – (A) Macrografia da amostra 31601 (60 kN, FN de 0,0 mm, 1700 rpm, Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Imagem da interface pino/bloco aumentada em 750 X, obtidas através do MEV	90
Figura 4. 31 – (A) Macrografia da amostra 31601 (60 kN, FN de 0,0 mm ,1700 rpm, Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Resquícios de inclusões observados na interface da região inferior com maior aumento (5000 X), obtidas através do MEV.....	90
Figura 4. 32 – Espectro de raios-X da região 1 assinalado na figura 4.31 (B)	91
Figura 4. 33 – (A) Macrografia da amostra 31609 (60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,9 mm e Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Micrografia da região destacada, com maior aumento (750 X) correspondente ao <i>flash</i> , obtidas através do MEV	92
Figura 4. 34 – Montagem de micrografias da região intermediária da amostra 31609 (aumento de 350x) evidenciando a ausência de inclusões, imagens obtidas através do MEV	93
Figura 4. 35 – (A) Macrografia da amostra 31609 (60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,9 mm e Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Micrografia da região interfacial inferior, com maior aumento (750 X) evidenciando a ausência de inclusões, obtidas através do MEV	94
Figura 4. 36 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco; Ensaios sem a presença de calços	95
Figura 4. 37 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco; Ensaios sem a presença de calços	96
Figura 4. 38 – Perfil horizontal (a 5,0 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 mm de espessura	96
Figura 4. 39 – Perfil horizontal (a 10 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 mm de espessura	97
Figura 4. 40 – Perfil horizontal (a 5,0 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 0,5 mm de espessura	97
Figura 4. 41 – Perfil horizontal (a 10 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 0,5 mm de espessura e comprimento de queima de 9,0 mm	98
Figura 4. 42 – Perfil horizontal (a 5 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 e 0,5 mm de espessura e comprimento de queima de 9,0 mm	98
Figura 4. 43 – Perfil horizontal (a 10 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 e 0,5 mm de espessura e comprimento de queima de 9,0 mm	99
Figura 4. 44 – Perfil Vertical do Pino/ Peça de Retenção; Ensaios sem a presença de calços	100

Figura 4. 45 – Perfil Vertical do Pino/ Peça de Retenção das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 mm de espessura	101
Figura 4. 46 – Perfil Vertical do Pino/ Peça de Retenção das amostras utilizadas com a presença de calços de 0,5 mm de espessura	101
Figura 4. 47 – Perfil Vertical do Pino/ Peça de Retenção das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 e 0,5 mm de espessura	102
Figura 4. 48 – Microestrutura presente na interface pino/ peça de retenção utilizada no reparo da amostra 31609)	102
Figura 4. 49 – Amostras retiradas do bloco de reparo, imagens realizadas após ensaio de dobramento; A) Amostra 31605 (Força axial de 60 kN); B) Amostra 31606 (Força axial de 60 kN); C) Amostra 31607 (Força axial de 120 kN) e D) Amostra 31608 (Força axial de 120 kN), todos os ensaios foram realizados com 1700 rpm, Cq de 7 mm e sem a presença de calço para a geração de folga.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabelas 3. 1 – Composição química dos materiais utilizados (% em peso)	39
Tabela 3. 2 – Parâmetros utilizados nos ensaios	49
Tabela 3. 3 – Parâmetros utilizados nos ensaios com calços de espessura de 1 mm (folga nominal) e comprimento de queima de 7 mm	50
Tabela 3. 4 – Parâmetros utilizados nos ensaios com calços de espessura de 0,5 mm (folga nominal) e comprimento de queima de 7 mm	53
Tabela 3. 5 – Parâmetros utilizados nos ensaios com calços de espessura de 1,0 e 0,5 mm (folga nominal) respectivamente e comprimento de queima de 9 mm.....	53
Tabela 3. 6 – Parâmetros utilizados nos ensaios com blocos de seção retangular	58
Tabela 4. 1 – Parâmetros dos ensaios onde houve aquisição dos sinais dos parâmetros de processo	63
Tabela 4. 2 – Medidas das áreas das ZTA, cujas amostras foram ensaiadas sem o uso de calços	70
Tabela 4. 3 – Medidas das áreas das ZTA, cujas amostras foram ensaiadas com o uso de calços de espessura 1,0 mm	71
Tabela 4. 4 – Medidas das áreas das ZTA, cujas amostras foram ensaiadas com o uso de calços de espessura 0,5 mm	72
Tabela 4. 5 – Medidas das áreas das ZTA, cujas amostras foram ensaiadas com força de 120 kN, comprimento de queima de 9 mm e o uso de calços de 1,0 e 0,5 mm de espessura respectivamente	73
Tabela 4. 6 – Medidas das folgas nominais e folgas reais, seguidos das forças axiais usadas nos ensaios	75
Tabela 4. 7 – Medida das áreas das falhas de preenchimento, das áreas dos flashes produzidas devido à folga real e as medidas das áreas dos flashes produzidos devido a folga nominal ter sido mantida.	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Ceq: Carbono equivalente

Cq: Comprimento de Queima (mm)

D: Distância (mm)

FN: Folga Nominal (mm)

FR: Folga Real (mm)

h: Altura (mm)

HV: Dureza Vickers (kgf/mm²)

R: Raio (mm)

RPM: Rotação por minuto

P: Potência (kW)

T: Torque (N.m)

Ø: Diâmetro (mm)

α : Ângulo (°)

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM: American Society for testing and Materials
AWS: American Welding Society
CLP: Controlador Lógico Programável
DIN: Deutsches Institut für Normung
FHPP: Friction Hydro Pillar Processing
FPW: Friction Plug Welding
FSW: Friction Stir Welding
FTPW: Friction Tapered Plug Welding
FTSW: Friction Taper Stud Welding
IHM: Interface Homem Máquina
LTAD: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
LVDT: Transdutor Diferencial Variável Linear
MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura
PID: Proporcional, Integral e Derivativo
SAE: Society of Automotive Engineers
UPPA: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito
ZTA: Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS	xvi
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Reparo por atrito	4
2.2 Processos de Reparo de Pinos por Atrito	4
2.2.1 Processamento de Pinos por Atrito em Furo passante.....	4
2.2.2 Processamento de Pinos por Atrito em Furo-Cego.....	6
2.2.3 Costura por Atrito com Pinos Cônicos	7
2.3 Influência das Geometrias do Pino e do Furo na Qualidade da União	8
2.4 Influência dos Parâmetros do Processo na Microestrutura e Propriedades Mecânicas	9
2.5 Influência da Dimensão dos Blocos de Reparo na Condução Térmica e Variação da Temperatura ao Longo da Interface Pino/Bloco.....	14
2.6 Vantagens e Limitações do Reparo por Atrito.....	17
2.7 Unidades de Processamento de Pinos por Atrito.....	18
2.8 Patentes para Reparo por Atrito em Furos Passantes e não Passantes.....	24
2.8.1 Patentes Requeridas para Reparos em Furos Passantes	24
Capítulo 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	31
3.1 Descrição da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito	31
3.1.1 Sistema Mecânico	31
3.1.2 Sistema elétrico	35
3.1.3 Sistema de instrumentação e controle	35
3.1.4 Sistema Antitravamento	37
3.2 Materiais e Métodos Experimentais	38
3.2.1 Materiais Ensaiaados	38
3.2.2 Geometria dos Blocos, Pinos, Peças de Retenção e Peças Suporte.....	39
3.3 Ensaio de Preenchimento.....	49
3.3.1 Ensaio de Reparo por Atrito com Blocos de Base Quadrada	49
3.3.2 Ensaio com Furos Passantes com Folga Entre o Bloco de Reparo e a Peça Suporte	50
3.4 Preparação Metalográfica.....	53

3.4.1	Macrografia.....	53
3.4.2	Micrografia.....	54
3.5	Ensaio de Microdureza Vickers.....	56
3.6	Ensaio de Reparo por Atrito para Obtenção de Corpo de Prova para Ensaio de Dobramento.....	57
3.7	Cálculo da Área da ZTA	60
Capítulo 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES		62
4.1	Registros dos Parâmetros de Ensaio.....	62
4.2	Tempos de processamento	68
4.3	Áreas das ZTA geradas.....	69
4.4	Caracterização Metalográfica	76
4.4.1	Aspectos Macrográficos	76
4.4.2	Aspectos Micrográficos	86
4.5	Dureza Vickers	95
4.6	Ensaio de Dobramento	103
Capítulo 5 CONCLUSÕES		105
Capítulo 6 TRABALHOS FUTUROS.....		107
Capítulo 7 REFERÊNCIAS.....		108
Anexo A.....		113
Anexo B.....		119

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As estruturas *offshore* e navios estão constantemente sendo submetidos a condições extremas no ambiente em que operam (MOAN; GAO; AYALA-URAGA, 2005). Estas estruturas devido ao movimento das ondas sofrem carregamentos e tensões significativas, as quais levam ao surgimento de trincas de fadiga em conexões soldadas (LOTSBERG/ LANDET, 2005). A figura 1.1 mostra uma trinca encontrada em um tanque de armazenamento de petróleo de uma plataforma de petróleo semi-submersível (FPSO - *Floating Production Storage and Offloading*) da Petrobras (SOUZA, 2006).

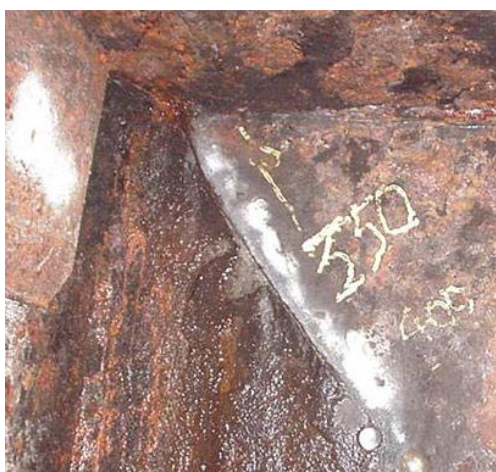


Figura 1. 1 – Trinca em um tanque de armazenamento de um FPSO (SOUZA, 2006)

Com o objetivo de reduzir as perdas devido aos custos de paradas dos equipamentos para manutenção, assim como a duração dessas manutenções tem sido estudado e desenvolvido novos processos de soldagem para reparo dessas estruturas.

Os processos de reparo de trincas tradicionalmente empregados, como a soldagem por arco voltaico, apresentam um alto risco de explosão quando empregadas em ambientes com risco de combustão (PIRES *et al.*, 2007). Na soldagem por fusão, particularmente na

solda por arco voltaico, trabalha-se com fontes de calor de elevada temperatura (1.000 a 20.000 °C) concentradas e, portanto de elevada intensidade. Devido à alta temperatura empregada neste processo, os gases da atmosfera que estão presentes em forma molecular são ionizados e passam a ser mais reativos. Estes gases (oxigênio, nitrogênio e hidrogênio) se difundem pelo material fundido, afetando de forma negativa a microestrutura e as propriedades do metal de solda. Esses gases podem levar à formação de trincas por hidrogênio, porosidades no cordão de solda, bem como à formação de estruturas frágeis na ZTA (MODENESI *et al.*, 2012).

Técnicas nas quais se faz necessária a presença de mergulhadores apresentam riscos aos mesmos e são onerosas pelo custo do equipamento utilizado e qualificação da mão de obra empregada, além de apresentarem dificuldades técnicas principalmente quando a manutenção é realizada em águas profundas ou ultra profundas (SOUZA *et al.*, 2006).

Com o objetivo de minimizar ou mesmo eliminar esses inconvenientes, foi desenvolvida a soldagem por atrito, que utiliza o atrito como fonte termomecânica para unir e processar materiais na fase sólida. Há muito tempo se sabe que o atrito gera calor, mas o registro sobre sua utilização para unir metais é conhecido a partir de 1891, quando a primeira patente (patenteada por *James H. Bevington*) sobre a utilização de calor obtido por atrito para união de cabos de aço foi utilizada nos Estados Unidos da América (MAREGA, 2011).

A técnica de soldagem por atrito consiste de um processo em estado sólido, no qual é realizada a união de componentes através do movimento relativo entre as superfícies das peças e ação de forças compressivas e ou trativas. Através do atrito, calor é gerado e um deslocamento de material viscoplástico nas superfícies em contato é obtido, promovendo assim a união metalúrgica entre as peças (AWS, 1991). A solda por atrito tem apresentado inúmeras vantagens sobre os processos tradicionais de soldagem, proporcionando união de componentes de forma rápida e de excelente qualidade (BLAKEMORE 1993 e 1999).

Uma das técnicas é o processamento de pinos por atrito FHPP “Friction Hydro Pillar Processing” (que utiliza pinos consumíveis no reparo de furos cegos), cuja técnica tem sido estudada e aprimorada para o reparo de furos-cegos. Meyer (2003) estudou a influência dos parâmetros (geometria, força e rotação) no processamento por atrito em aços, além das temperaturas envolvidas, e obteve uniões metalúrgicas sem defeitos (HWANG, 2010).

Pires (2007) também estudou a influência dos parâmetros (geometria de pinos e furos, força e rotação) na técnica de FHPP de reparo e mostrou que a qualidade de reparo está fortemente ligada aos parâmetros geométricos do furo e do pino. No seu trabalho,

foram otimizadas as geometrias de pinos e blocos, de tal forma a se minimizar os defeitos no reparo.

O reparo por atrito de furos passantes usando o processo conhecido como FTPW “Friction Tapered Plug Welding” é uma variação da solda por atrito com pinos consumíveis. Essa técnica se presta aos casos em que a trinca se estende por toda a espessura da chapa ou quase toda a sua espessura. Apesar do grande potencial, poucas pesquisas foram publicadas a respeito do método FTPW para reparo em aços estruturais, mas há patentes sobre essa técnica.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método de reparo por atrito para trincas passantes utilizando conceitos do reparo por atrito de peças com furos não passantes. Pretende-se ainda, avaliar os efeitos de parâmetros de processo, tais como: força axial aplicada sobre o pino, comprimento de queima, parâmetros de forjamento, e geometria do pino e do furo sobre a qualidade do reparo.

Os assuntos abordados neste trabalho foram organizados como descrito a seguir. No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre reparo por atrito, assim como patentes que apresentam técnicas de reparo utilizando pinos consumíveis. O Capítulo 3, por sua vez, mostra os procedimentos experimentais adotados na realização dos ensaios, a descrição dos materiais ensaiados, as geometrias de pinos e blocos, os programas de computador usados na aquisição e tratamento de dados. O capítulo 4 contem os resultados obtidos assim como suas respectivas discussões. No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e no capítulo 6 são listadas sugestões para trabalhos futuros. Finalmente, no capítulo 7 são citadas as referências bibliográficas utilizadas na redação dessa dissertação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reparo por atrito

Este processo de reparo por atrito possui as mesmas características da soldagem por atrito onde um pino consumível é utilizado como material de adição. O reparo por atrito consiste no preenchimento de um furo-cego ou passante, previamente aberto na peça a ser reparada usando um pino consumível. Este pino é rotacionado e pressionado contra a peça a ser reparada.

Durante o processo de reparo, há geração de calor devido à interação entre as superfícies em atrito, fazendo com que ocorra a diminuição do valor do limite de escoamento do pino e da superfície do furo. Isso resulta em um fluxo de material viscoplástico que faz com que ocorra o preenchimento e a união entre as superfícies do furo e do pino após o término do movimento relativo.

Nesta técnica não ocorre a fusão do material de adição, ou seja, é um processo de soldagem no estado sólido.

2.2 Processos de Reparo de Pinos por Atrito

2.2.1 Processamento de Pinos por Atrito em Furo passante

O processo de solda por atrito com pinos consumíveis, denominado de FTPW (*Friction Taperd Plug Welding*), foi desenvolvido por Adreus e Mitchel em 1990 (HWANG, 2010). Este processo de soldagem é patenteado pela TWI (*The Welding Institute*) e foi desenvolvido visando o preenchimento de furos perfurados incorretamente ou em locais não previstos, o reparo de trincas, defeitos em chapa de aço e dutos e o reparo de trincas de fadiga em cordões de solda em estruturas *offshore*, sob condições subaquáticas (PIRES,

2007), (HWANG, 2010) e (<<http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-friction-taper-plug-welding/>>).

O método de reparo FTPW (também conhecido como FPW- Friction Plug Welding) consiste, em um primeiro momento, na retirada de defeitos através da usinagem de um furo passante cônico na peça a ser reparada. Na sequência o furo é preenchido por um pino consumível cônico, dotado de alta rotação (TAKESHITA; HIBBARD *et al.*, 2001).

À medida que o pino toca as paredes laterais da cavidade (local de maior concentração de deformação plástica), o aquecimento gerado pelo atrito entre as superfícies produz um fluxo visco-plástico ao longo de planos de cisalhamento nas laterais do consumível, resultando na união metalúrgica, exemplo Fig. 2.1.

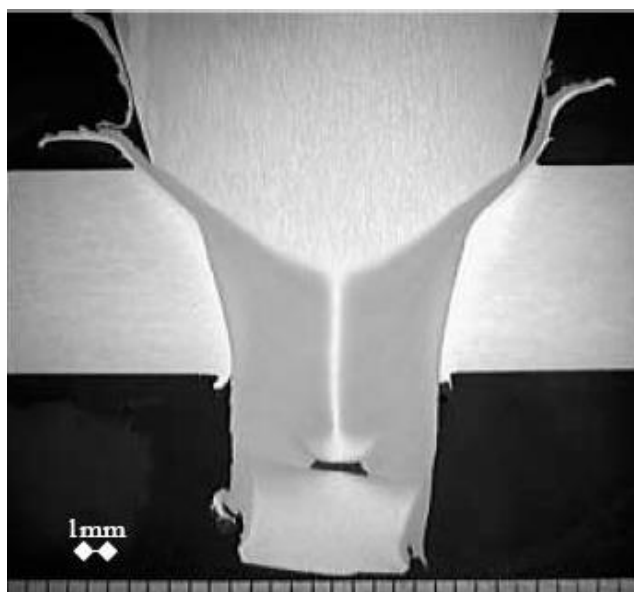


Figura 2. 1 – Macrografia de um substrato e de um pino após processo por FTPW; liga de alumínio AA6082-T6, espessura 10 mm e pino de alumínio confeccionado na liga AA6082-T6 (BEAMISH, 2003; TWI)

A força axial imposta pode ser realizada por compressão ou tração quando há facilidade de acesso nas duas faces da peça a ser reparada.

A figura 2.2 ilustra as etapas do processo FTPW por compressão e tração respectivamente.

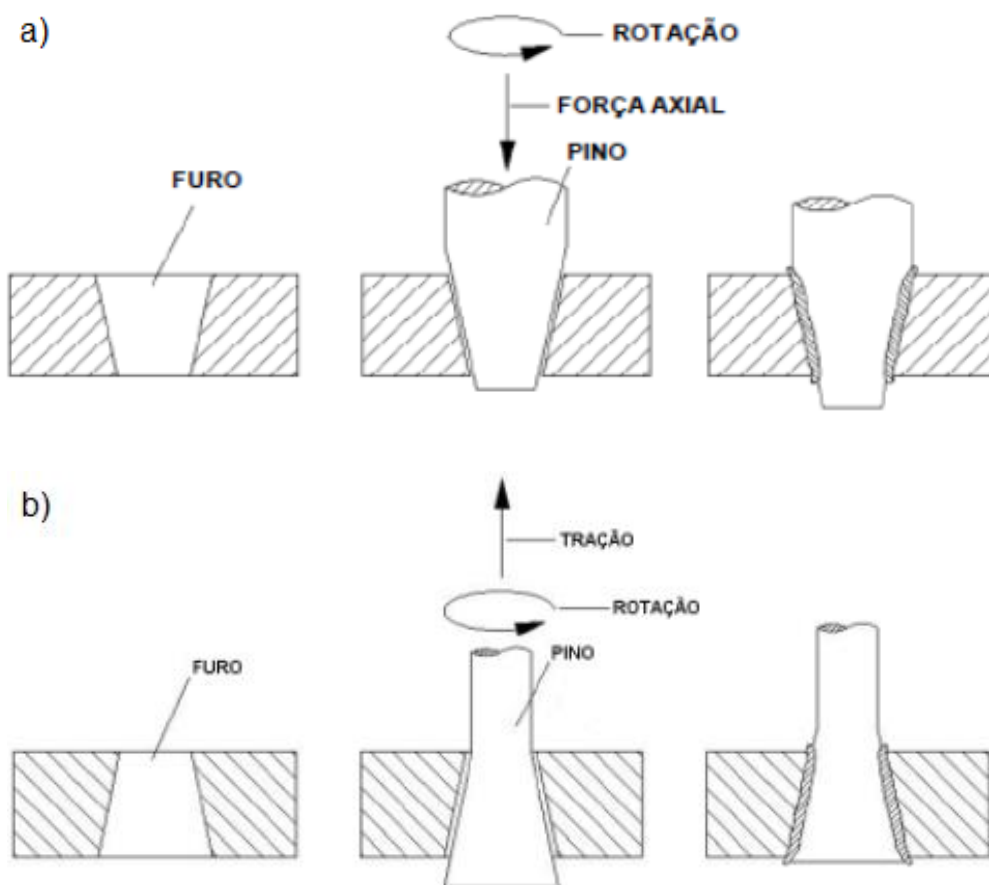


Figura 2. 2 – Ilustração esquemática do processo FTPW a) reparo em furo passante por compressão; b) reparo em furo passante por tração (HWANG, 2010)

2.2.2 Processamento de Pinos por Atrito em Furo-Cego

O processo de reparo de trincas por atrito FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*) é uma variante do processo FTPW (*Friction Tapered Pluge Welding*), sendo patenteada em 1993 por THOMAS e NICHOLAS, através do TWI. O processo envolve as etapas de furação e preenchimento, onde um pino consumível cônico é rotacionado e inserido coaxialmente em um furo circular ou cônico (HWANG, 2010).

Diferentemente do FTPW, o FHPP utiliza furos não passantes e o processo somente pode ser feito por forças compressivas, de modo que o trabalho termomecânico do pino consumível acontece no contato da ponta do pino com o fundo do furo e ao longo das paredes laterais (PIRES, 2007).

À medida que o pino toca o fundo da cavidade, o aquecimento gerado pelo atrito entre as superfícies promove a deformação plástica do pino, e é produzido um fluxo viscoplástico ao longo de planos de cisalhamento na base do consumível (Fig. 2.3).

Através de combinações de pressão axial e velocidade de rotação, os planos de cisalhamento são induzidos a mover-se axialmente, de forma que o material de adição entre em contato com a parede interna da cavidade promovendo o preenchimento do furo e consequentemente a união metalúrgica do material base e do pino.

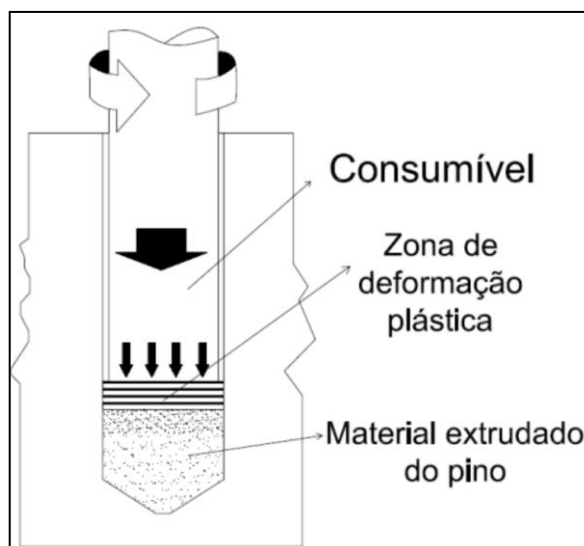


Figura 2. 3 – Ilustração esquemática do processamento de pinos por atrito FHPP (<<http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/emerging-friction-joining-technology-for-stainless-steel-and-aluminium-applications-february-1996/>>)

2.2.3 Costura por Atrito com Pinos Cônicos

O processo conhecido como costura por atrito ou *Friction Taper Stitch Welding*, consiste na aplicação do processamento de pinos por atrito FHPP ao longo de um defeito, mediante sobreposições de pinos em sequência.

A costura por atrito é realizada com o Processamento de Pinos por Atrito em um primeiro furo aberto no início do defeito, em seguida é retirado o excesso do pino da superfície da chapa, em seguida é feita uma nova furação para um novo preenchimento, sendo este novo preenchimento uma sobreposição ao pino anterior (Fig. 2.4).

O Reparo por Costura foi desenvolvido pela TWI, foi concebido para o reparo de estruturas com furos previamente abertos, estruturas com defeitos em chapa de grande espessura, e reparos de estruturas “*offshore*”, tais como gasodutos, oleodutos e estruturas de navios.

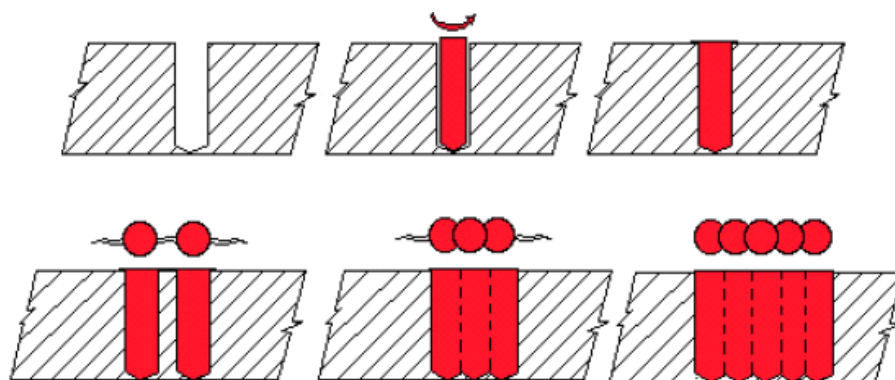


Figura 2. 4 – Ilustração esquemática do processo de costura por atrito (MATTEI, 2011)

2.3 Influência das Geometrias do Pino e do Furo na Qualidade da União

As geometrias mais utilizadas para reparos por atrito são: geometria cilíndrica e cônica (Fig.2.5). A geometria cilíndrica é mais indicada no reparo de estruturas com paredes espessas, e a geometria cônica é utilizada em paredes com menores espessuras. Em estruturas com grandes espessuras a utilização de perfis cônicos é inviável para aplicações práticas, devido o excesso do diâmetro do pino, que resultaria na utilização de equipamentos mais robustos e motores de elevada potência para se efetuar o reparo (NICHOLAS, 1995; PINHEIRO *et al.*, 2001).

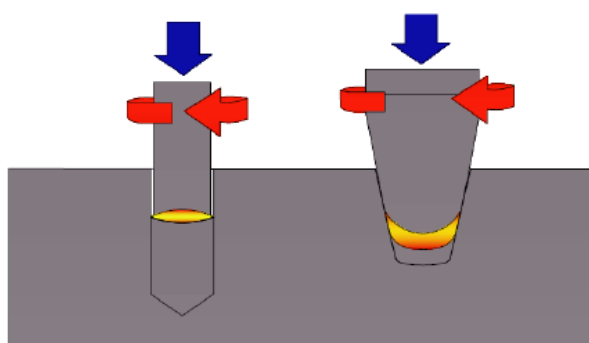


Figura 2. 5 – Geometrias cilíndrica e cônica empregadas no processo de reparo (NICHOLAS 2003)

PAULY (1999) verificou que a região de preenchimento entre o fundo do furo e as paredes laterais inferiores, representa um ponto concentrador de defeitos, devido à falta de união metalúrgica e estreitamento da ZTA. No trabalho de MEYER (2003) citado por PIRES

(2007) foi investigado o efeito de varias geometrias das pontas dos pinos e dos fundos dos furos com objetivo de eliminar tais defeitos. Na sua investigação foi constatado que quando se utiliza furos com geometria arredondada, houve um grande incremento na qualidade da solda nas extremidades inferiores da região de preenchimento, independentemente do tipo de geometria do pino empregada sugerindo então, ser a geometria do furo a de maior importância na qualidade do reparo e eliminação da falta de união.

É conhecido que preenchimentos completos e sem falhas podem ser obtidos controlando-se o comprimento do tronco-de-cone do pino cônico (GONÇALVES, BRAZÃO *et al.*, 2012). De forma que a geometria dos pinos e dos furos é de grande importância para se obter preenchimentos sem falhas.

2.4 Influência dos Parâmetros do Processo na Microestrutura e Propriedades Mecânicas

MEYER (2003) investigando a influência dos parâmetros de soldagem sobre as propriedades mecânicas da região de reparo; mostrou a importância de quatro parâmetros que atuam diretamente na qualidade final do processo de união metalúrgica, são eles: força axial, velocidade de rotação, taxa de queima e tempo de aquecimento, os quais são detalhados a seguir.

Força Axial: O parâmetro força axial é de primordial importância no processo. Ela é responsável por manter as superfícies em contato durante o movimento relativo das peças, de forma a retirar da interface partículas indesejadas através de extrusão, e romper filmes óxidos (MEYER, 2003).

O aumento da força leva à redução do tempo de processamento e a uma zona termicamente afetada (ZTA) menor, obtendo assim uma microestrutura mais refinada, o que melhora a tenacidade da estrutura final (AWS,1991). Para forças mais baixas, a ZTA se caracteriza por uma maior espessura. Apesar de forças mais elevadas necessitarem de aumento da potência requerida no processo, propiciam também, uma diminuição da energia de soldagem, devido ao menor tempo de processamento e em uma menor ZTA, (MEYER, 2003) e (MAREGA, 2011).

Velocidade de Rotação: A variação do parâmetro velocidade de rotação não tem grande influência na qualidade da solda (AWS, 1991). No entanto, segundo VILL (1962), existem velocidades ótimas para cada par de materiais utilizados. Elevadas velocidades de

rotação levam à redução das asperidades das superfícies em, deixando as superfícies de atrito polidas. Isso leva ao aumento do tempo de aquecimento para serem alcançadas as condições de escoamento plástico. Períodos prolongados de aquecimento geram um maior volume de material aquecido, além de diminuir a velocidade de resfriamento das peças unidas. Assim, a utilização de uma elevada velocidade de rotação pode aumentar a zona afetada termicamente, e resultar na queda das propriedades mecânicas, como limite de resistência e dureza (ELLIS, 1972).

Comprimento Queima (CQ): Este parâmetro representa a quantidade de material consumida durante um intervalo de tempo (GONTIJO, 2012). Segundo MEYER (2003) o comprimento de queima é influenciado pela velocidade de rotação e é mais fortemente afetado pela força axial, sendo que o aumento da força aumenta o comprimento de queima, enquanto o aumento da velocidade reduz a taxa de queima.

Tempo de Aquecimento: É o período de tempo compreendido entre o contato inicial das superfícies e o instante em que a velocidade de rotação se anula. Este parâmetro é inversamente proporcional à força axial e diretamente proporcional à velocidade de rotação. O tempo de aquecimento e a quantidade de rebarba (*flash*) gerada irão influenciar na taxa de resfriamento, que irá por sua vez, influenciar nas propriedades mecânicas da região soldada (MEYER, 2003).

Segundo MEYER (2003) dentro da região de reparo e na ZTA, as propriedades mecânicas, dureza, limite de escoamento e limite de resistência são relativamente aumentadas, e é observada uma queda na capacidade de alongamento; sendo a influência dos parâmetros mais nítida nos perfis de dureza.

Apesar dos processos de união metalúrgica por atrito gerarem menores ZTA devido aos menores aportes térmicos, ainda há regiões de crescimento de grão que por sua vez causam o aumento da temperabilidade que combinadas às altas taxas de resfriamento devido ao fluxo de calor para o bloco de reparo, podem levar à formação de martensita e por consequência gerar trincas. A geração de martensita na ZTA, levando a formação de picos de dureza, foi observada por (PIRES *et al.*, 2012) em trabalho de reparo por atrito do aço ABNT 4140 sendo o problema contornado através de preaquecimento. Mesmo em reparos por atrito de peças de aços de baixo carbono, a questão da formação de picos de dureza deve ser observada em virtude da formação de estruturas aciculares e no caso da utilização de aços com baixo controle de impurezas e largas faixas de composição terem seus carbonos equivalentes aumentados.

PAES *et al.*, 2010, estudaram o efeito da microestrutura formada no processo de soldagem por atrito em um aço C-Mn. Neste trabalho foram realizados reparos por atrito utilizando pinos consumíveis de aço BS970-3 150M19 (originalmente classificado como EN14) com forças axiais de 50, 200 e 400 kN em blocos de aço EN 10025 (antigo BS4360 Gr50D) contendo furos cegos. Foi observado que com o aumento da força axial aplicada houve melhor adesão ao longo da interface pino/bloco, obteve-se também maior refino da microestrutura formada, o que gerou maiores picos durezas, vistos na Fig. 2.6.

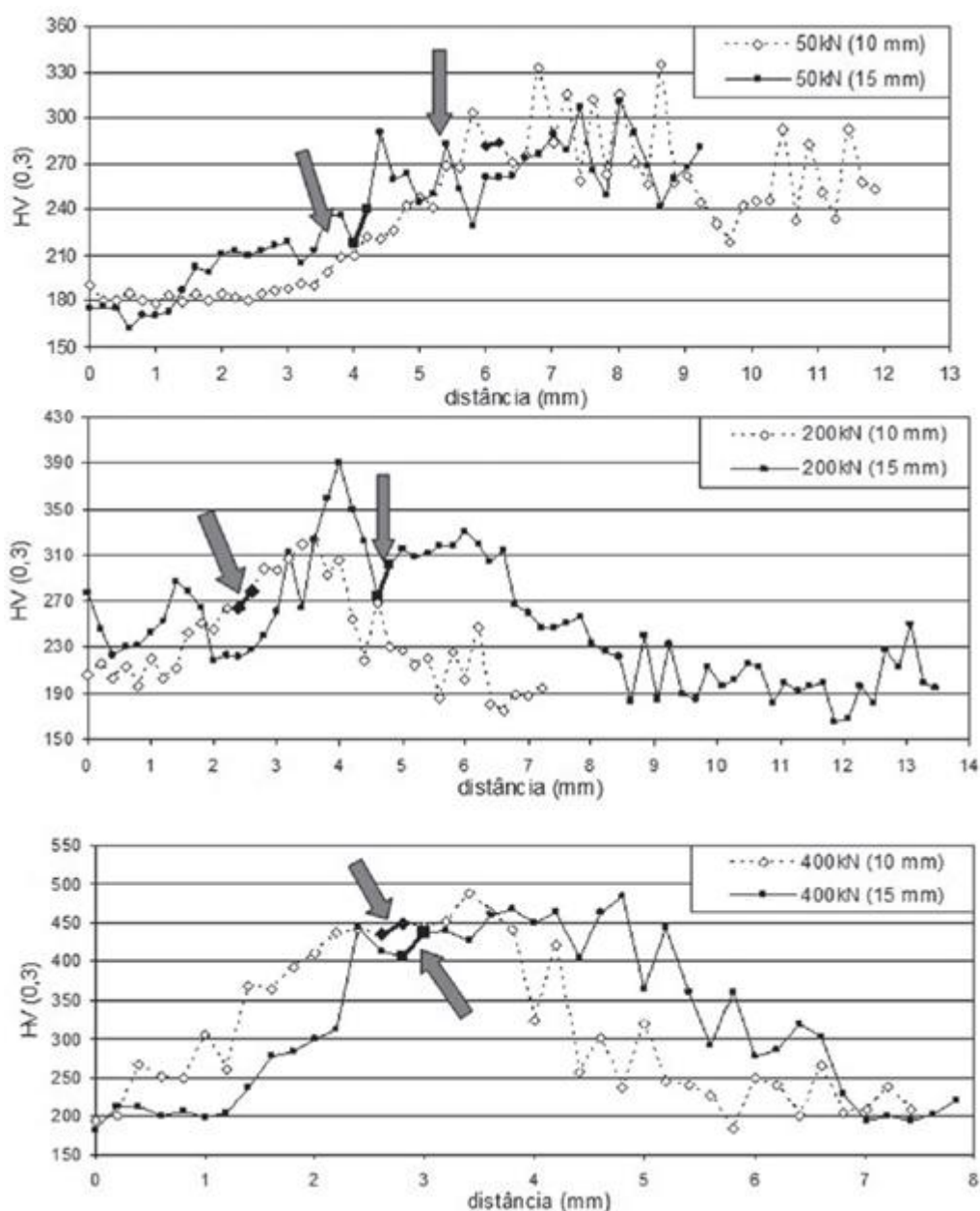


Figura 2. 6 – Perfis de microdureza horizontal. As indentações (realizadas a 10 e 15 mm da superfície do bloco) se iniciaram no material base e seguiram em direção ao pino. As setas indicam a região de interface pino/bloco (PAES *et al.*, 2010)

Nos trabalhos de MAREGA (2011) e PIRES (2007) também pode ser observado o aumento de dureza na interface de união entre pino/bloco, como mostrado nas figuras 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10, que são referentes aos perfis de microdureza realizados na horizontal e na vertical (pino/ fundo do furo cego).

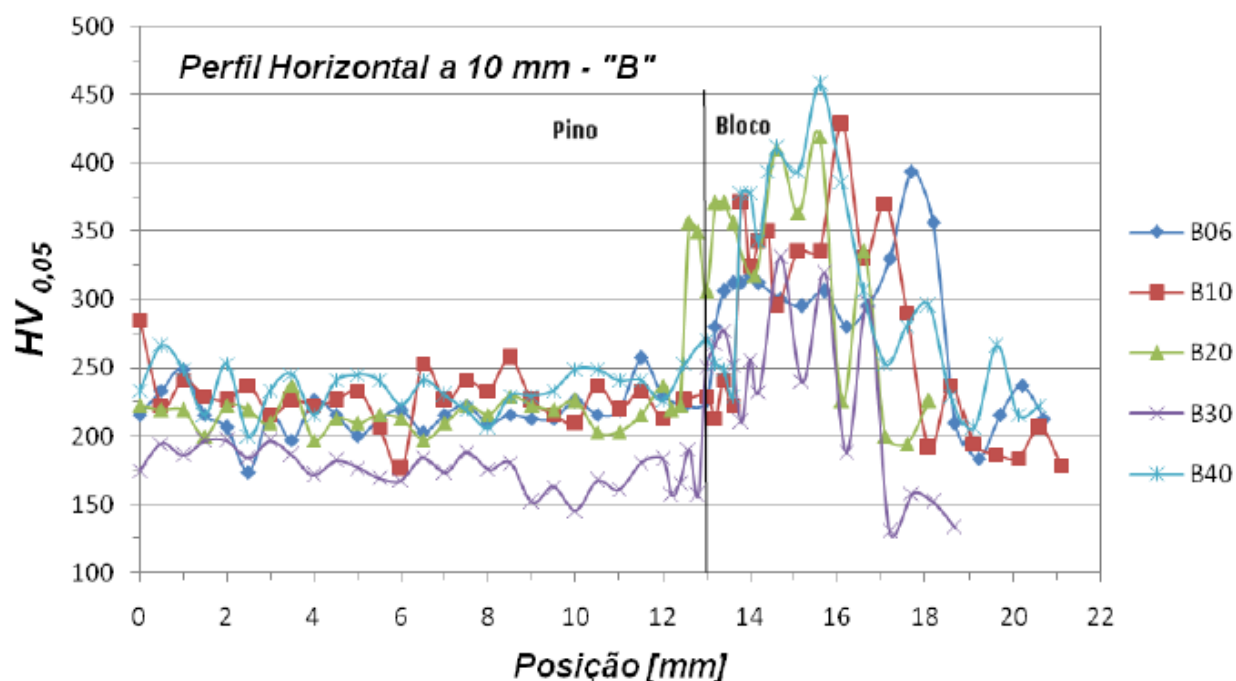


Figura 2. 7 – Picos de dureza na ZTA, observados através do perfil horizontal realizado a 10 mm do fundo do furo (bloco com furo não passante); A letra "B" refere-se às geometrias dos pinos e blocos usados, que correspondem às geometrias mostradas nas figuras 3.10 e 3.11 deste trabalho; A legenda à direita corresponde às forças utilizadas, quais sejam: 60, 100, 200, 300 e 400 KN (MAREGA, 2011)

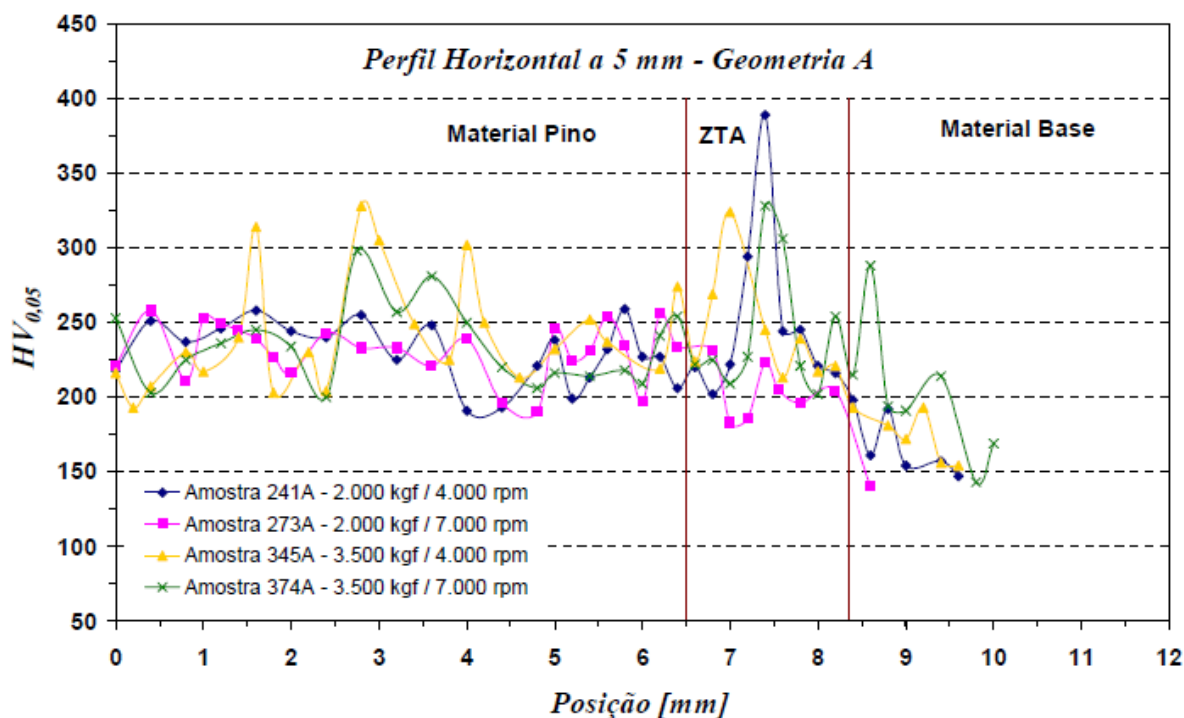


Figura 2. 8 – Picos de dureza na ZTA, observados através do perfil horizontal realizado a 5,0 mm da face inferior do fundo do furo (bloco com furo não passante); A geometria A corresponde à geometria mostrada nas figuras 3.10 e 3.11 deste trabalho (PIRES, 2007)

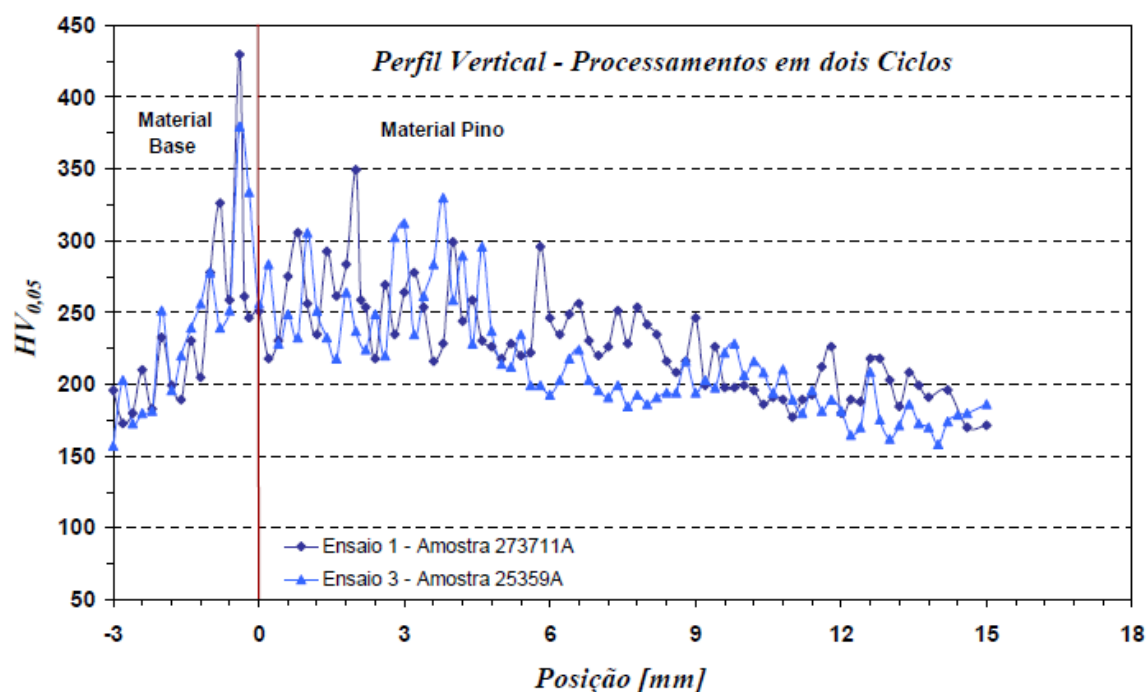


Figura 2. 9 – Picos de dureza no material base logo abaixo da interface pino/bloco (fundo do furo cego), no qual os ensaios mostrados foram realizados com dois ciclos de força e rotação; Ciclo 1: força axial de 20 kN e rotação de 7000 rpm; Ciclo 2: força axial de 35 kN e 5000 rpm. A geometria dos pinos e dos blocos utilizados são as mesmas mostradas nas figuras 3.10 e 3.11 deste trabalho (PIRES, 2007)

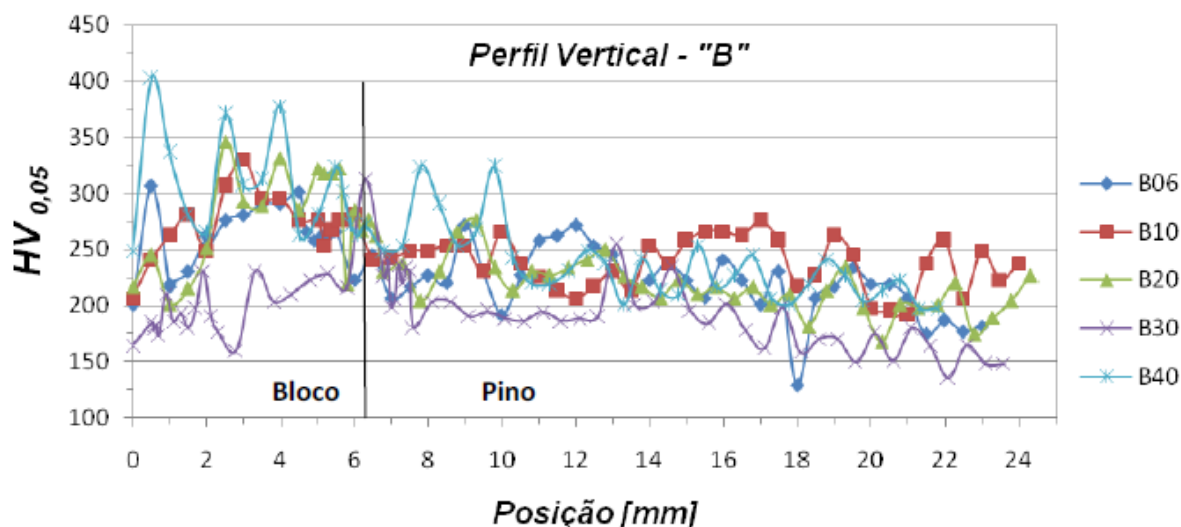


Figura 2. 10 – Perfis de dureza na região do bloco (fundo do furo cego); A letra “B” refere-se às geometrias dos pinos e blocos usados, que correspondem à geometria mostrada nas figuras 3.10 e 3.11 deste trabalho; A legenda à direita corresponde às forças empregadas nos ensaios, quais sejam: 60, 100, 200, 300 e 400 kN (MAREGA,2011)

Em geral, a interface pino/ bloco é de sutil identificação, e caracterizam-se pela formação de ferrita acicular e martensita, como resultado das altas taxas de resfriamento o que eleva a dureza na interface. A porção mais central da região de processamento é composta, mais pronunciadamente, por uma ferrita acicular, com regiões de aquecimento elevadas caracterizadas pela formação de uma ferrita de Widmantatten mais grosseira (PIRES, 2007).

2.5 Influência da Dimensão dos Blocos de Reparo na Condução Térmica e Variação da Temperatura ao Longo da Interface Pino/Bloco

OSÉIAS (2011), usando elementos finitos, simulou os efeitos das dimensões de blocos quadrados usados nos ensaios de reparo por atrito sobre a temperatura máxima em pontos posicionados no bloco, como mostrado na Fig. 2.11. A espessura da chapa foi mantida constante e igual a uma polegada (25,4 mm), bem como a profundidade do furo, no caso, de 16 mm. As máximas temperaturas foram identificadas para posições localizadas à metade da profundidade do furo.

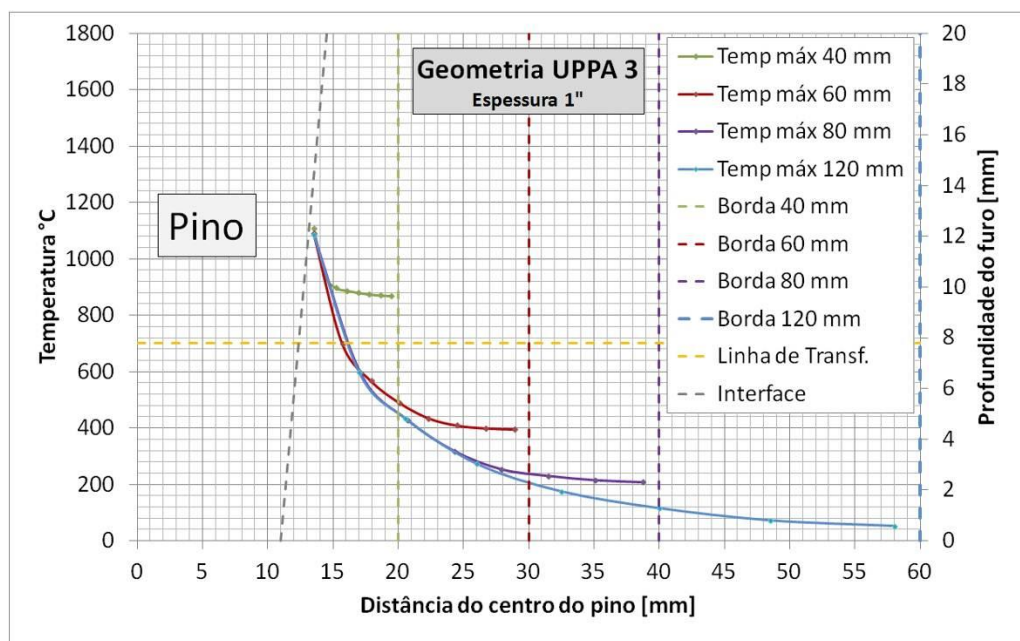


Figura 2. 11 – Temperaturas máximas na chapa, a meia profundidade do furo, durante o processamento por atrito, usando um furo cônico de 16 mm de profundidade, para blocos quadrados de 40, 60, 80 e 120 mm de lado (OSÉIAS, 2011). A espessura da chapa de teste era de uma polegada (25,4 mm)

Observou-se que blocos com comprimento de aresta de 40 mm apresentam temperaturas elevadas na lateral do bloco, chegando a valores acima da linha crítica de transformação A1 do diagrama Fe-C, (linha horizontal, tracejada). Nesse caso, a ZTA se estenderia ao longo de todo corpo de prova, dificultando a avaliação dos efeitos da espessura sobre a qualidade do reparo por atrito. Foi constatado que blocos com aresta acima de 60 mm apresentam na superfície lateral temperaturas abaixo da linha A1 do diagrama Fe-C de transformação (GONTIJO, 2012). O comportamento da temperatura na simulação mostra que arestas com comprimento acima de 60 mm demonstram ser mais indicadas para observação dos efeitos da evolução da temperatura no material do bloco, pois com arestas maiores é possível observar a real dimensão da ZTA e a transição desta para o material base não afetado pelo calor.

GONTIJO (2012) investigou também o comportamento da temperatura nos blocos de reparo, mas sua investigação foi feita através da medida das temperaturas de processamento próximas à interface pino/bloco, utilizando termopares que foram posicionados como mostrado na Fig. 2.12. Ele observou que as temperaturas de processamento durante o reparo na região próxima ao fundo do furo cego elevam-se gradativamente à medida que se percorre a interface no sentido oposto ao fundo do furo Fig. 2.13.

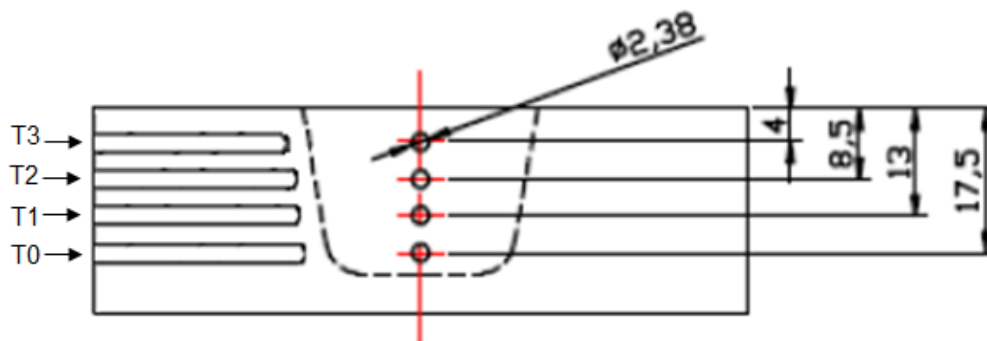


Figura 2. 12 – Posições dos termopares próximos à parede do furo para investigação da temperatura durante o processo de reparo por atrito (GONTIJO, 2012)

GONTIJO (2012) observou, no entanto, que não se teve o controle sobre a fixação dos termopares nas paredes dos furos usinados, o que prejudicou as medidas, mas seu trabalho comprova que as temperaturas nas regiões superiores são maiores que as temperaturas nas regiões inferiores. Isto ocorre porque o primeiro contato entre pino e o bloco se dá entre a ponta do pino e o fundo do furo usinado, sendo então, o local inicial de aquecimento, de modo que este local não recebe calor vindo de outras regiões do bloco durante o processo de soldagem.

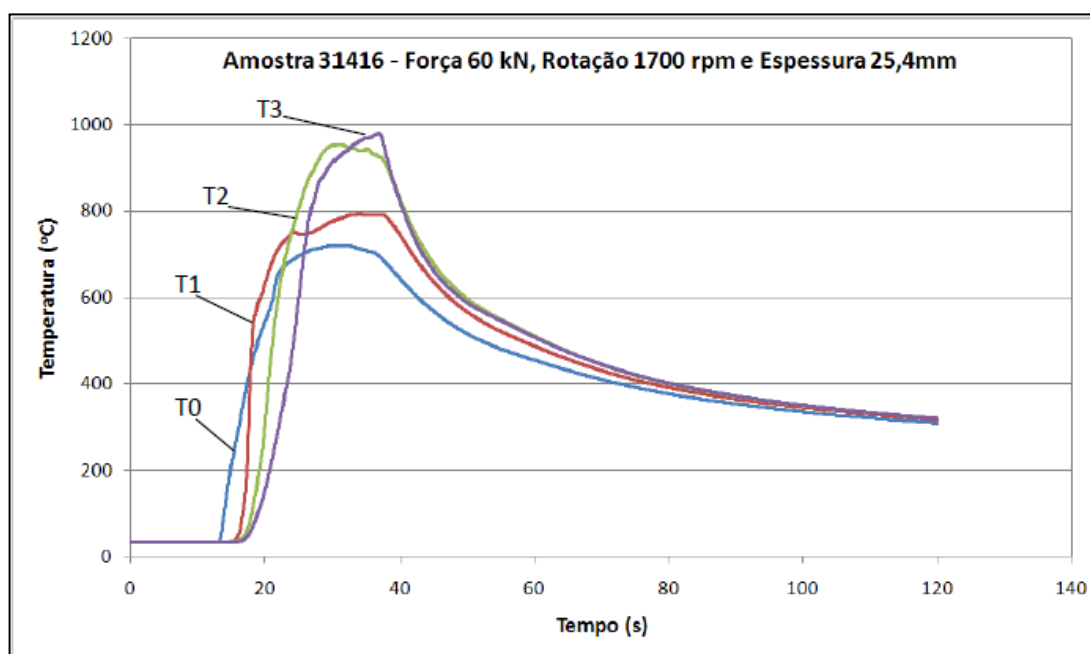


Figura 2. 13 – Temperatura medida ao longo da interface pino/bloco GONTIJO (2012)

2.6 Vantagens e Limitações do Reparo por Atrito

O processo de reparo por atrito tem-se tornado bastante atrativo devido ao seu potencial. Entretanto, este processo de reparo também possui algumas limitações.

O reparo por atrito tem as mesmas vantagens e limitações da soldagem por atrito e são apresentados abaixo, com base nas descrições apresentadas por: ELLIS (1972), NICHOLAS (1984), BLAKMORE (1993 e 1999), PINHEIRO (2001), MAYER (2003), PIRES (2007), HWANG (2010) e GONTIJO (2012).

Vantagens:

- O processo é autolimpante e tende a expulsar impurezas para fora da interface de união, durante o processo de extrusão do material escoado as impurezas ficam retidas no “flash” (rebarba);
- É uma prática que não oferece risco à saúde ao operador, pois comparada a solda por arco voltaico não há fagulhas, radiação, risco com alta tensão ou fumaça tóxica envolvida;
- Os operadores não precisam de habilidades manuais específicas para execução do processo de reparo;
- Não são necessários fluxo de material granulado ou gás protetor. É um processo limpo, sem respingos, fumaça, arcos ou escória.
- O processo pode ser automatizado, possibilitando a produção seriada de reparos de alta qualidade, além de o equipamento poder ser operado a longas distâncias, adequado para aplicação em áreas de difícil acesso ao operador;
- O baixo aporte térmico e o curto ciclo de soldagem, permitem que o processo seja implementado para o uso em atmosferas explosivas, sendo atrativa na indústria petrolífera, além da possibilidade de realização de reparos sem que haja necessidade de paradas na linha de produção;
- É indicado para realização em condições subaquáticas, visto que este processo não sofre influência da pressão ambiente;
- O reparo acontece no estado sólido, ou seja, com ausência de material fundido, de modo que este processo não produz os problemas metalúrgicos apresentados por outros processos de soldagem, tais como: porosidade, segregação e adsorção de hidrogênio;

- É um processo que resulta em soldas de alta qualidade e boas propriedades metalúrgicas, conseguidas tanto em aço-carbono quanto em combinações de diversos metais cuja soldagem seria limitada ou impossível de ser feita por outros processos;
- A Zona Termicamente Afetada (ZTA) é extremamente reduzida;

Limitações:

- Pelo menos uma das peças deve girar sobre o eixo do plano de soldagem;
- Pelo menos um dos materiais a ser soldado deve se deformar plasticamente;
- A preparação e o alinhamento das peças podem ser um ponto crítico, para o desenvolvimento uniforme da deformação plástica e aquecimento da superfície de atrito;
- O processo é normalmente limitado para fazer juntas de topo planas ou angulares (cônicas);
- Custo inicial elevado com o equipamento e ferramentas;
- Há necessidade da usinagem do excesso do pino consumível ao final do reparo;
- Em alguns casos, é preciso ter acesso aos dois lados da peça para se efetuar o procedimento de reparo.

2.7 Unidades de Processamento de Pinos por Atrito

Foi realizada uma pesquisa com o intuito de se conhecer equipamentos que fazem reparos por atrito com pinos consumíveis.

Dentre as máquinas de reparo encontradas, quatro são equipamentos de soldagem por atrito denominados de Unidades de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA), projetadas e construídas no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Os detalhes sobre as Unidades de Processamento de Pinos por Atrito são descritos a seguir:

- UPPA 1: A primeira Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (Fig. 2.14) foi desenvolvida por SOUZA (2006), com capacidade de aplicar 50 kN de força e rotação de 8000 rpm. O equipamento é constituído de quatro componentes principais, a saber: unidade hidráulica, bloco de válvulas, cilindro de reparo contido em um pórtico e sistema de controle. Esta unidade foi utilizada por PIRES (2007) para estudos de otimização de geometrias e parâmetros de soldagem, obtendo uniões metalúrgicas de boa qualidade.

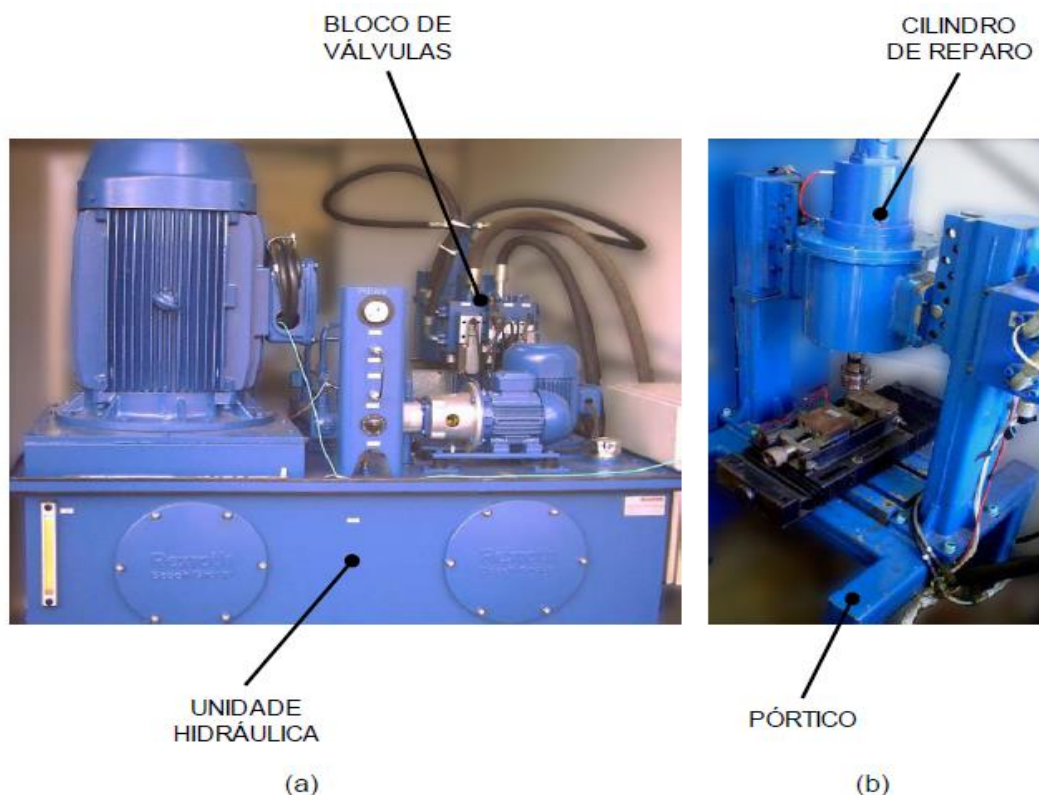


Figura 2. 14 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito; (a) Unidade hidráulica e bloco de válvulas; (b) Cilindro de reparo contido no pórtico (SOUZA, 2006)

➤ UPPA 2: Posteriormente, foi desenvolvido uma segunda versão da Unidade de processamento de Pinos por Atrito (Fig. 2.15), com capacidade de aplicar forças axiais de 250 kN e rotações menores em relação a primeira versão, em torno de 2500 rpm. O UPPA 2 foi construído com o objetivo de simular situações de campo, sendo que esta versão possui 60 metros de mangueiras hidráulicas, onde a unidade hidráulica está a uma determinada distância do local de reparo (HWANG, 2010). O contato dos corpos de prova nas versões UPPA 1 e UPPA 2 ocorre pelo deslocamento vertical descendente do pino em rotação sobre o bloco fixo em uma base. A unidade hidráulica utilizada pela versão 2 é a mesma utilizada pela versão 3, onde o motor hidráulico, que é utilizado para implementar a velocidade de rotação, é conectado por mangueiras a bomba por um motor diesel de 158 kW (215 CV) (GONTIJO, 2012).

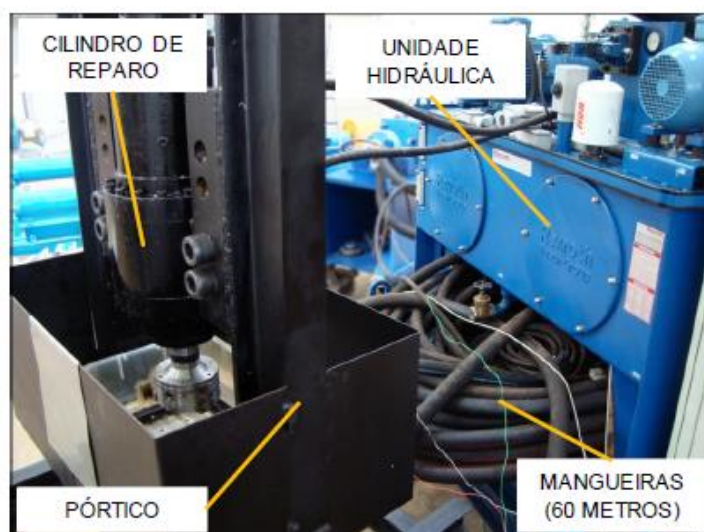


Figura 2. 15 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 2 (HWANG, 2010)

➤ UPPA 3: A terceira versão é uma unidade com capacidade de aplicação de força axial de até 500 kN e rotação de até 1700 rpm (Fig. 2.16).

O contato dos corpos de prova no UPPA 3 ocorre pelo deslocamento horizontal do pino em rotação sobre o bloco fixo em uma base. Sendo os ensaios deste trabalho realizados nesta unidade, seu detalhamento será feito no capítulo 3.



Figura 2. 16 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (GONTIJO, 2012)

➤ UPPA 4: A Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 4 (Fig. 2.17) trabalha com força axial de até 40 kN e rotação de 5000 rpm. O mesmo utiliza a unidade hidráulica e sistema de controle desenvolvidas para o UPPA 1. O UPPA 4 foi planejado com objetivo de reparar estruturas submersas em água, a profundidades de até 30 metros, sendo o cilindro de reparo desenvolvido e construído por HWANG (2010) para ser portátil, possuindo 15 kg, em comparação com cabeça de reparo da primeira versão (UPPA 1), que possui 80 kg. A UPPA 4 passa a ser de fácil manuseio em campo.

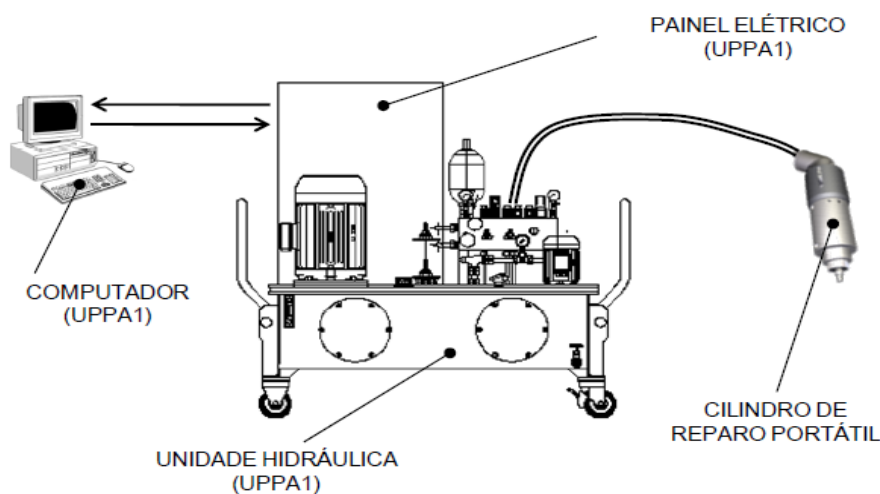


Figura 2. 17 – Diagrama esquemático da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 4 (HWANG, 2010)

Foi encontrado disponível para comercialização o equipamento HMS3000 da empresa *Circle Technical Services Ltd* (Escócia).

O HMS3000 (Fig. 2.18) é um equipamento portátil, para utilização de soldas por atrito subaquáticas através de mergulhadores ou remotamente, permitindo operações a distância de até 4 km. O sistema é constituído por: uma unidade de energia hidráulica, carretel de mangueiras, cilindro de reparo e o sistema de controle ou contêiner de solda por atrito, este último responsável pelo controle dos parâmetros do processo e a aquisição dos dados em tempo real durante o reparo. (<http://www.earthtt.com/circle_technical_services.html>)

O cilindro de reparo foi projetado para soldar pinos de 10 a 25 mm de diâmetro; possui um peso de 16 kg e suas dimensões são 600 mm de comprimento e 160 mm de diâmetro, operando com até 6000 rpm e aplicando força axial máxima de 40 kN.

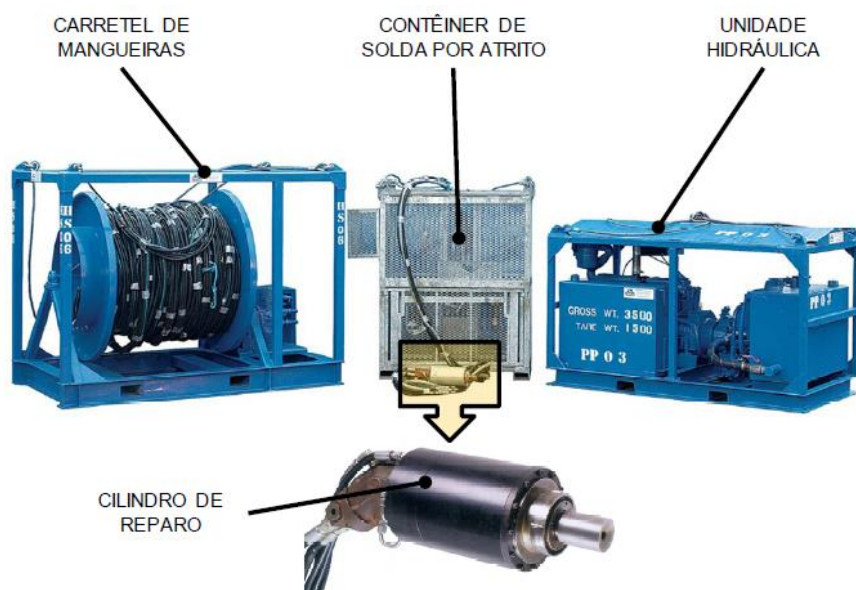


Figura 2. 18 – Sistema de reparo portátil HMS 3000 (HWANG, 2010)

Outros equipamentos de reparo por atrito foram encontrados em institutos de pesquisa, como a Máquina de Soldagem por Fricção (MPF1000), desenvolvido no Laboratório do Departamento de Metalurgia (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O equipamento MPF1000 (Fig. 2.19) é capaz de realizar reparos em furos cegos em chapas de até 40 mm de espessura, com forças axiais tanto de compressão como tração de até 1000 kN e velocidade máxima de deslocamento de 15 mm/s e rotação de 2000 rpm.

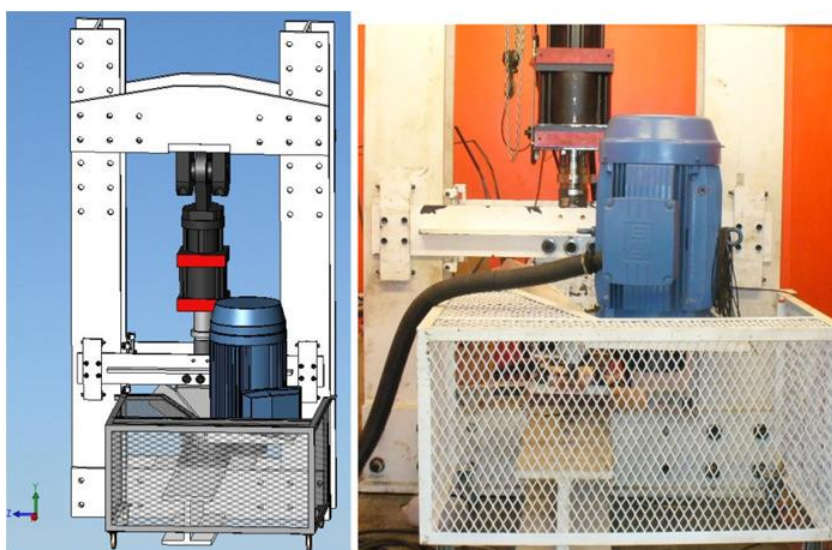


Figura 2. 19 – Representação virtual do equipamento e foto do equipamento após a fabricação respectivamente (MATTEI, 2011)

Também consta no LAMEF um modelo modificado de máquina de soldagem por atrito (NEI – John Thompson modelo FW-13; Fig. 2.20) cuja força axial limite é de 480 kN.

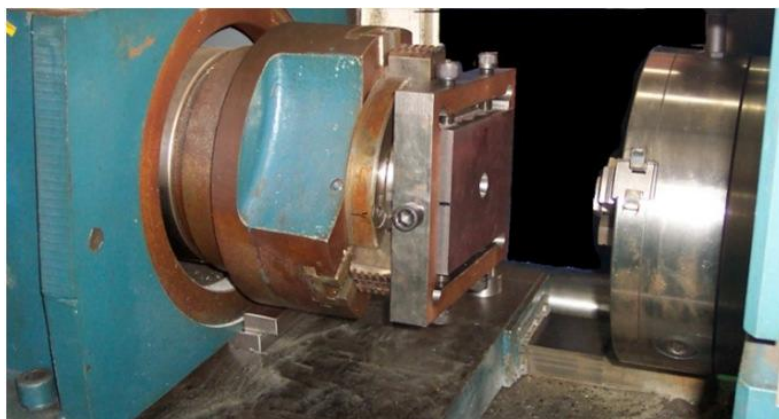


Figura 2. 20 – Equipamento de soldagem por atrito NEI John Thompson modelo FW-13 (MATTEI, 2011)

Outro equipamento foi encontrado na Universidade Metropolitana Nelson Mandela, na África do Sul em Porto Elizabeth (GONTIJO, 2012). Trata-se de uma máquina portátil de solda por atrito contínua (*Portable Continuous Friction Welding Machine – PCFWM*; Fig. 2.21) que utiliza a técnica *Friction Taper Stud Welding (FTSW)*.

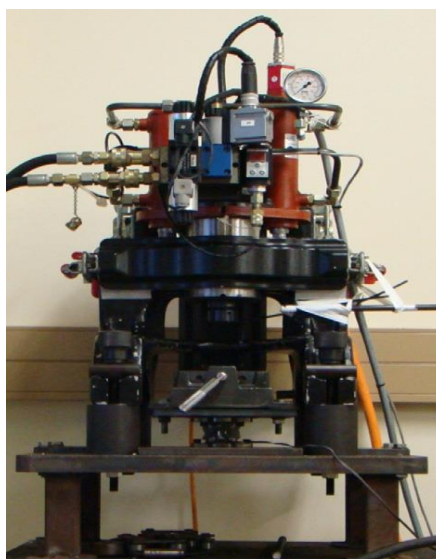


Figura 2. 21 – Máquina portátil de solda por atrito contínua (PCFWM) (HATTINGH; BULBRING *et al.*, 2011)

Há também unidades de processamento no instituto de soldagem TWI em Cambridge, Inglaterra e em Geesthacht, no Instituto de Pesquisas Alemão HZG (Helmholtz-Zentrum Geesthacht-Zentrum für Material und Küstenforschung GmbH ex-GKSS), (GONTIJO, 2012).

Como foi visto, há uma variedade de equipamentos e técnicas de reparo por atrito através da utilização de furos não passantes. Há também diversas patentes para reparo de chapas através de furos passantes, descritas a seguir.

2.8 Patentes para Reparo por Atrito em Furos Passantes e não Passantes

Na literatura técnica, há patentes que descrevem procedimentos de reparo por atrito, bem como patentes que propõem melhoramentos de geometrias de pinos e furos, tanto para furos cegos, quanto para furos passantes. Os processos patenteados e similares ao proposto neste trabalho são apresentados a seguir. Essas patentes estão à disposição em bancos tais como os do o INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial), da EPO (*European Patent Office*), da FPO *ip Research & Communities* (Free Patents Online; cujo banco de dados abrange patentes americanas, *abstracts* do Japão e patentes alemãs), bem como no *Google Patents*. A seguir as patentes são detalhadas conforme o tipo de reparo.

2.8.1 Patentes Requeridas para Reparos em Furos Passantes

A patente registrada em 2001 pelos inventores TAKESHITA e HIBBARD, com o título *Friction Plug Welding*, (FPW) tem como proposta de resolução de problema o reparo de defeitos de soldas por fusão realizadas em ligas de Al-Cu-Li. A Fig. 2.22 ilustra a técnica. A técnica (FPW também conhecida como FTPW) consiste na usinagem de um orifício (preferencialmente cônico) para retirar o defeito de uma solda por fusão anteriormente realizada e através do preenchimento de um pino provido de rotação e força axial contra o furo, realizar a soldagem por atrito e, dessa forma corrigir a falha da solda anterior.

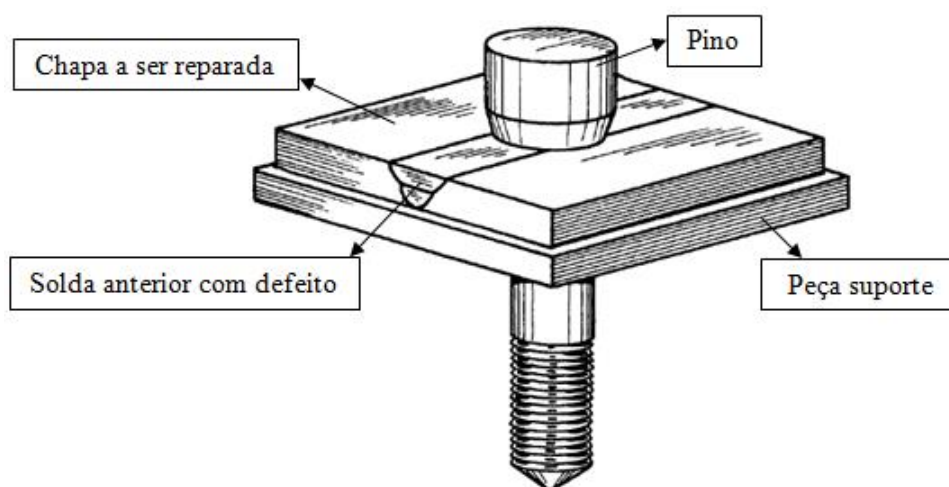


Figura 2. 22 – Visão geral da disposição das peças durante para o reparo (TAKESHITA; HIBBARD *et al.*, 2001)

O processo é feito por tração, e para dar sustentação ao processo, há a inserção de uma peça suporte denominada pé-de-pressão localizada na face da chapa que contém o menor diâmetro do furo, que suporta a força axial do pino contra a peça a ser reparada. A Fig. 2.23 ilustra a realização de um preenchimento com o uso da peça suporte. O perfil da peça suporte pode incluir um chanfro cônico, ou um tipo de depressão para atuar como reservatório para o material plastificado que irá fluir durante o reparo.

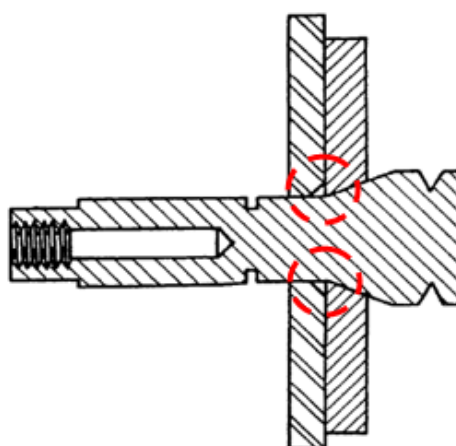


Figura 2. 23 – Esquema de ensaio de reparo com a peça suporte (pé de pressão); Em destaque no círculo vermelho chanfro cônico para atuar como reservatório para o material plastificado; (TAKESHITA; HIBBARD *et al.*, 2001)

A patente registrada em 2005, pelos inventores COLETTA; MARK *et al.*, com o título: *Friction Pull Plug Welding: Chamfered Heat Sink Pull Plug Design*, tem como proposta a

alteração geométrica do pino consumível (Fig. 2.24), de modo a eliminar defeitos (decorrentes do uso do método FPW utilizado com força trativa) na parte superior do reparo onde ocorre falta ligação metalúrgica. O pino apresenta um ângulo duplo em seu topo (região da haste de maior diâmetro), que aumenta o calor e a pressão da solda na região superior do pino durante o reparo.

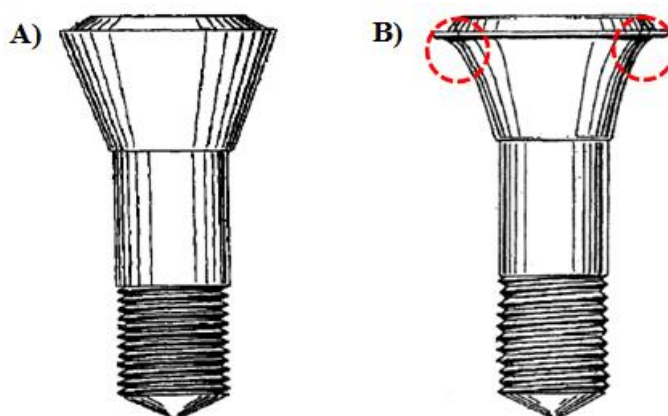


Figura 2. 24 – a) Imagem do pino consumível antes da modificação, b) imagem do pino após a inserção de ângulos (em destaque no círculo vermelho) no topo de sua haste (COLETTA; MARK *et al.*, 2005)

A patente registrada em 2006, pelos inventores BOUET; FERTE *et al.*, com o título: *Friction Plug Welding Method for a Hole in Metal part. Use of a Restraint and Supporting part for Implementing the Method*, tem como proposta a resolução do problema do uso da solda por atrito no reparo de peças de alumínio.

Devido ao baixo ponto de fusão do alumínio ocorre o escoamento do material da peça muito rápido fazendo com que o pino consumível avance sobre a peça deformando-a, além de resultar em fissuras, poros e crateras, e o reparo em peças com espessuras menores que 12 mm.

Essa técnica compreende a retirada do defeito através da usinagem de um furo para posterior soldagem por atrito com um pino consumível.

A peça a ser reparada é mostrada na Fig. 2.25, que é identificada aqui pelo número 1. A face frontal é denominada por 1' e a face traseira denominada 1''. Um pino de metal 3 é inserido com um eixo fixo 4 em um furo xpré-usinado 2 na peça a ser reparada. Este pino é rotacionado com uma dada força de compressão. Uma peça 5 é posicionada na saída do furo, na face 1''. Esta peça contém uma cavidade 6 de largura d e altura h que recebe a ponta do pino consumível. A peça 5 tem a função de suportar os esforços de compressão realizados pelo pino e conter o material escoado plasticamente 7 que é extrudado durante a

soldagem. Uma barra 8, plana, com uma abertura 9, cujas dimensões são escolhidas de acordo com os parâmetros de soldagem e dimensões desejadas de *flash* 10, é colocada sobre a peça 1 como uma peça de apoio, afim de evitar o que é chamado de efeito parafuso, provocado pela subida do material escoado ao longo da superfície do pino 3.

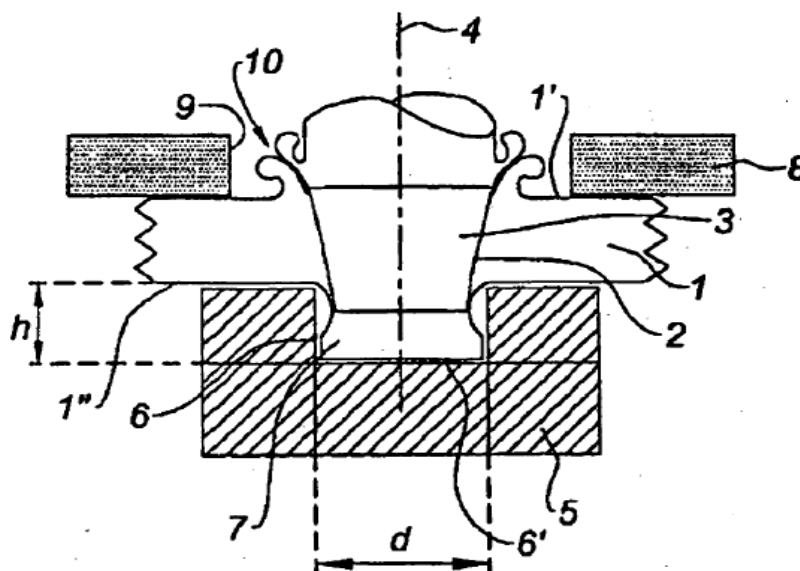


Figura 2. 25 – Representação esquemática da disposição das peças durante o processo de reparo (BOUET *et al.*, 2006). 1 – peça a ser reparada; 1' e 1'' – Face frontal e traseira da peça a ser reparada respectivamente; 2 - furo pré-usinado na peça 1; 3 – pino de metal; 4 – eixo fixo do furo pré-usinado; 5 – peça de suporte; 6 – cavidade da peça suporte; 7 – material escoado do pino de metal; 8 – barra plana; 9 – abertura da barra plana; 10 – flash

A patente registrada em 2006, também pelos inventores BOUET e outros, com o título: *Friction Plug Welding Method for a Hole in Metal part. Use of a Metal Bar and a Bearing Supporting Part for Implementing the Method*, propõe um método caracterizado por uma barra com um eixo inclinado em relação ao eixo do furo com ângulo diferente de zero. Com esta técnica é possível alcançar os furos de difícil acesso (ver Fig. 2.26).

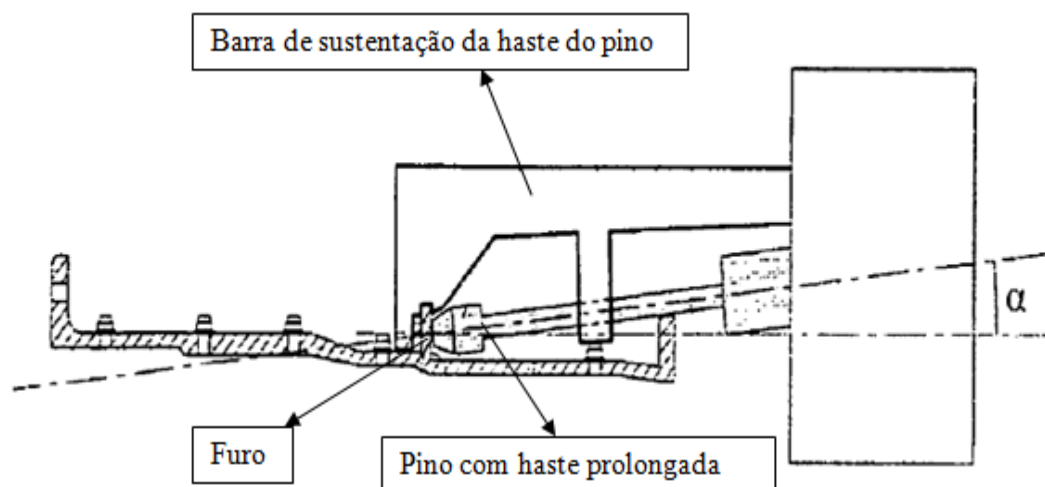


Figura 2. 26 – Representação esquemática em corte da aplicação da técnica para reparo em locais de difícil acesso (BOUET; FERTE *et al.*, 2006)

A patente registrada em 2009 pelo inventor MACIEL, através da Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A (EMBRAER), como título: *Plug Welding Methods and Systems*, tem como proposta a minimização (ou eliminação) de defeitos e falhas anelares. Estes defeitos ocorrem devido ao excesso de material escoado (*flash*), tanto na região frontal como traseira do furo após o preenchimento com o pino consumível.

Utilizando o método FWP, a técnica desta patente se utiliza de uma peça suporte com uma abertura que pode ser ou não cega. Esta peça é posicionada coaxialmente ao furo da peça a ser reparada. Na abertura desta peça de sustentação existe um rebaixamento (ou reentrância) anelar onde se encaixa uma peça de sacrifício no qual em seu centro se localiza uma abertura passante. A abertura da peça de sacrifício é igual ou ligeiramente menor do que o diâmetro do furo usinado na peça a ser reparada. O pino utilizado possui uma ponta cônica com um ressalto anelar, o qual fica adjacente a face da peça, cujo diâmetro do furo é maior (Fig. 2.27).

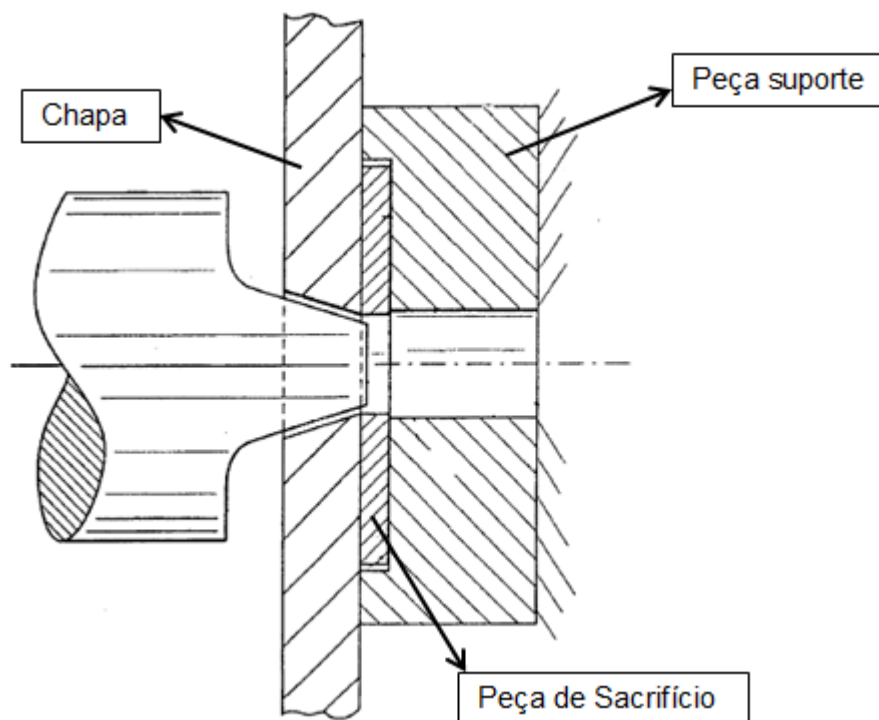


Figura 2. 27 – Representação esquemática da disposição das peças durante o processo de reparo (MACIEL; 2009)

2.7.2 Patentes Requeridas para Reparos em Furos Cegos

A patente registrada em 1999 pelos inventores MAHONEY; TAYLOR *et al.*, através da *The Boeing Company*, com o título: *Method to Repair Voids in Aluminum Alloys*, propõe um método de reparar vazios em uma liga de alumínio, em particular um vazio resultante de um orifício não passantes deixado após a utilização da soldagem FSW. O método inclui a usinagem das regiões vazias, fazendo um furo cônico com ranhuras em suas paredes laterais, sendo o ângulo destes furos igual ou inferior ao ângulo do tronco de cone do pino consumível. O pino tem próximo a sua extremidade um dissipador de calor não consumível para remover o excesso de calor gerado durante a rotação do pino. Além disso, um elemento de suporte é temporariamente ligado à peça de alumínio, adjacente ao furo cônico, de forma a receber e suportar a carga axial aplicada durante o processo de reparo (ver Fig. 2.28).

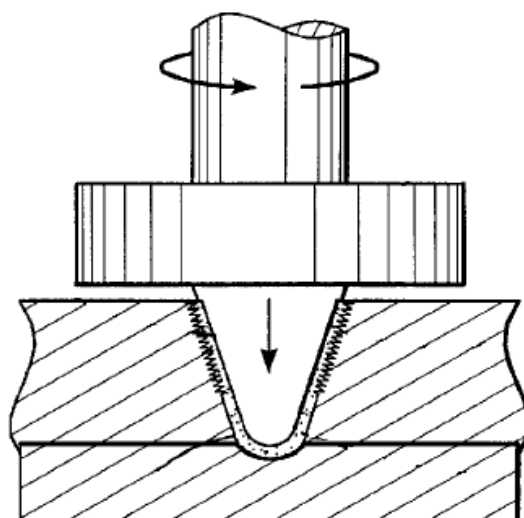


Figura 2. 28 – Representação esquemática da disposição das peças durante o processo de reparo (MAHONEY; TAYLOR *et al.*, 1999)

A patente registrada em 2003 pelo inventor DELANO *et al.*, com o título: *Friction Welding With Conoids*, aborda que técnicas predecessoras como a patente de nº US 5.975.406 (MAHONEY; TAYLOR *et al.*, 1999) não considera de forma adequada as geometrias de pino e cavidade para reparo de vazios ou defeitos provocados pelo processo de FSW, e propõe modificações geométricas tanto no pino consumível quanto no furo cego (usinado no ato de retirada do defeito da peça). O método inclui um pino ou uma cavidade, ou ambos com forma conóide não esférica, tal como um parabolóide (ver Fig. 2.29).

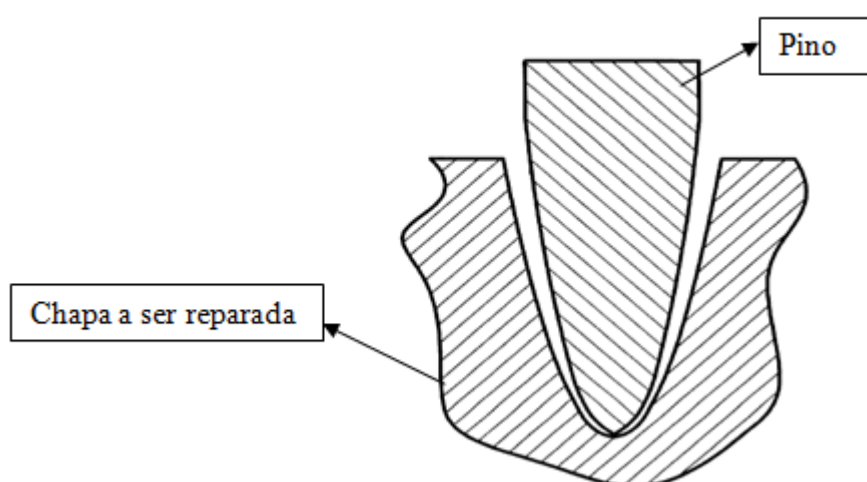


Figura 2. 29 – Representação esquemática do pino e do furo com geometria conóide (DELANO *et al.*, 2003)

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Descrição da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito

O equipamento utilizado de reparo de trincas por atrito para furos passantes, denominado aqui de Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA 3), foi projetado e construído no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia. Para melhor compreensão do funcionamento desta terceira versão da unidade de reparo por atrito, a descrição do mesmo será dividida em três partes: sistema mecânico, sistema elétrico e sistema de instrumentação e controle.

3.1.1 Sistema Mecânico

O sistema mecânico é constituído basicamente de duas partes:

- O equipamento de reparo e
- O sistema hidráulico

Os componentes do equipamento de reparo são: o Motor Hidráulico, Placa de Castanhas, Morsa Porta Blocos e Cilindro Hidráulico. Devido o extenso comprimento da viga tipo caixão onde estão montados, os mesmos são apresentados em duas figuras distintas, são elas: Figs. 3.1 e 3.2.

Na figura 3.1 é mostrada a placa de três castanhas, responsável pela fixação e rotação do pino consumível. A rotação é gerada pelo motor hidráulico que é acionado por uma bomba específica para o sistema de rotação. Uma válvula direcional proporcional é responsável pelo controle da vazão e, conseqüentemente, pela rotação do motor hidráulico. A rotação máxima atingida pelo motor hidráulico é de 2.800 rpm, mas o equipamento só é estável com rotação máxima de 1700 rpm. O torque máximo atingido pelo motor hidráulico é de 500 N.m para uma pressão de trabalho de 400 bar. O torque medido é por um

torquímetro fabricado pela Autogard®, modelo Monitorq™, acoplado ao sistema (GONTIJO, 2012).

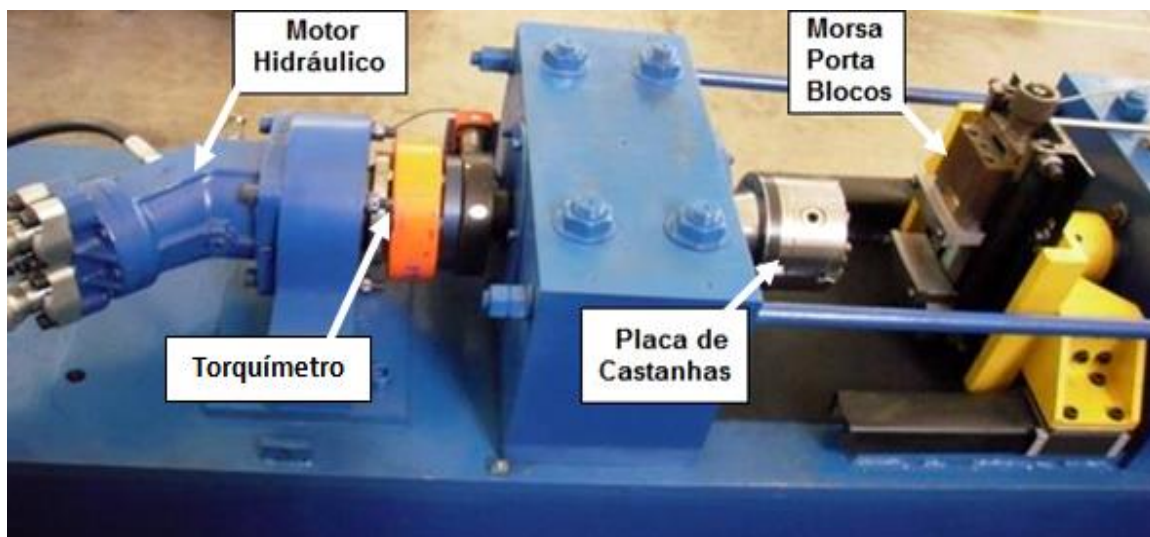


Figura 3. 1 – Parte do equipamento de reparo por atrito, constituída dos componentes em destaque, que são: Motor hidráulico, Placa de três castanhas, Morsa porta blocos

Na figura 3.2 é mostrado o cilindro hidráulico, responsável pela movimentação da morsa porta blocos e aplicação de carga axial de até 500 kN. O curso máximo do cilindro hidráulico é de 200 mm.



Figura 3. 2 – Cilindro hidráulico responsável pela aplicação da força axial

Com o intuito de garantir o correto posicionamento do pino e do bloco, foram realizadas melhorias no equipamento no presente trabalho. Assim, foram soldadas duas bases na estrutura de sustentação, permitindo a fixação de guias lineares, como mostrado na Fig. 3.3. Estas guias, por sua vez, orientam em seus trilhos, patins, que são

aparafusados em uma peça suporte, ligada ao suporte da morsa de mesa (Fig. 3.3). O sistema guia linear e patim, foi selecionado de tal forma que suportassem o peso de todo o conjunto porta amostra. O sistema selecionado tem a capacidade de sustentar uma carga estática de até 111 kN (11,1 ton) e uma carga dinâmica de até 59 kN (5,9 ton), assumindo apenas movimentação coaxial ao pino (RODRIGUES, 2013). Além da adição das guias e dos patins, foi realizada a troca da placa de três castanhas, assim como sua lubrificação.

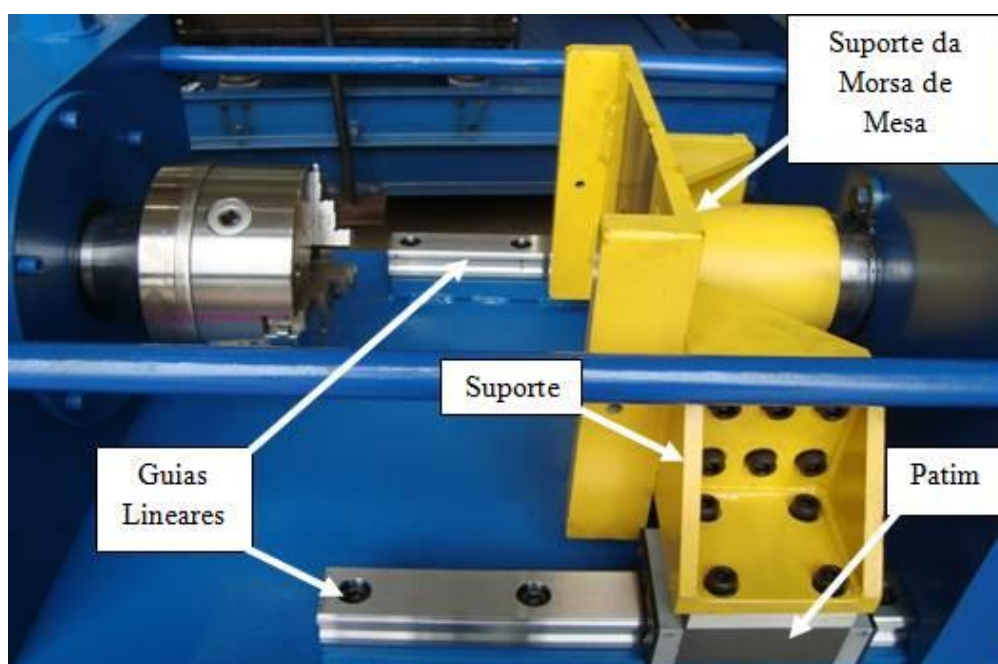


Figura 3. 3 – Disposição do par de guias lineares e patins aparafusados no suporte, utilizados para eliminar a vibração do Suporte da Morsa de Mesa no qual os blocos são posicionados

Além dos ajustes estruturais, foram projetadas e confeccionadas novas mandíbulas da morsa de fixação em virtude da original ter apenas 20 mm de largura e o conjunto bloco de reparo/peça suporte terem conjuntamente 40 mm de espessura. Além disso, foram inseridas barras de restrição para evitar o surgimento de folgas entre a peça de reparo e a peça suporte em virtude da força de atrito do fluxo plástico em sentido contrário à força axial aplicada através do pino. A Figura 3.4 mostra as peças projetadas e confeccionadas com um conjunto bloco de reparo/peça suporte montados na morsa.

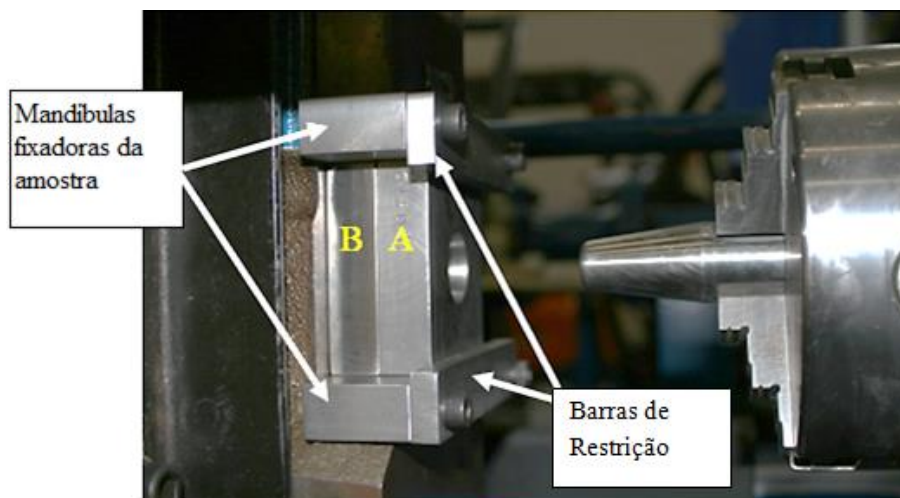


Figura 3. 4 – Morsa de fixação de amostras com destaque para as mandíbulas e as barras de restrição e um conjunto bloco de reparo (A)/peça suporte (B)

A rotação da placa de castanhas e o deslocamento axial do cilindro hidráulico têm como energia motriz o fluxo de óleo. O sistema hidráulico, responsável pela geração desta energia motriz é composto por dois motores elétricos, um motor diesel, um reservatório de óleo hidráulico, com capacidade de 630 litros, válvulas proporcionais servocontroladoras, mangueiras hidráulicas, transdutores de pressão, bomba e motor hidráulicos.

Para o acionamento da bomba hidráulica responsável pela pressão transmitida através da haste do cilindro hidráulico, é utilizado um motor elétrico de 7,5 kW (10,0 CV). Este motor é usado na aplicação da força axial durante a realização dos ensaios. No caso da movimentação da haste do cilindro sem que esteja ocorrendo ensaios, um segundo motor elétrico de 5,5 kW (7,5 CV) é utilizado.

O motor responsável por fornecer óleo ao motor hidráulico e, consequentemente, pela rotação do sistema é um motor diesel (Fig. 3.5) com potência máxima de 158 kW (215 CV). Esse motor é conectado a uma bomba com vazão máxima de 180 l/min e pressão máxima de 350 bar (GONTIJO, 2012).



Figura 3. 5 – Posicionamento das mangueiras das mangueiras de alta pressão conectadas ao motor e ao cilindro hidráulico (MAREGA, 2011)

3.1.2 Sistema elétrico

O sistema elétrico é composto pelos motores elétricos, válvulas servocontroladoras, sensores e um painel elétrico. Os dois motores elétricos com potência de 7,5 e 10,0 CV são alimentados com tensão 220 V trifásica e acionados por partida direta. No painel se encontram todas as chaves liga/desliga, controladores, conversores, relés, contadores, etc. (GONTIJO, 2012).

3.1.3 Sistema de instrumentação e controle

O sistema de instrumentação e controle é composto por sensores de aquisição de dados e sensores de controles, e monitoramento dos parâmetros do processo.

No motor hidráulico estão posicionados um sensor indutivo para leitura da rotação do pino e um sensor de torque (Fig. 3.6). Dentro do motor hidráulico existe uma roda dentada na qual cada vez que há transição de um dente para outro ocorre à geração de pulsos elétricos. O receptor de sinal de torque foi posicionado a 5 mm do anel de torque. Este sensor adquire os valores de torque em um determinado instante através de ondas de

rádio transferidas pelo anel de torque. Posteriormente, o sinal passa por um conversor de sinais de frequência e tensão. Por fim, as informações são transmitidas para uma placa de aquisição de dados em um computador.



Figura 3. 6 – Posicionamento do receptor de sinal de torque, sensor indutivo e anel de torque no motor hidráulico

O sistema de controle composto pelo Controlador Lógico Programável (CLP), cartões PID (Proporcional Integral Derivativo), conversor de frequência/tensão, sensores e válvulas permite controlar os parâmetros do processo e das condições para a aquisição em tempo real dos dados (GONTIJO, 2012). Os parâmetros de processo são fornecidos através de uma Interface Homem Máquina, ou IHM (Fig. 3.7), que fica acoplado à porta do painel elétrico. O IHM é composto por um programa exclusivo para os ensaios de reparo por atrito.



Figura 3. 7 – Interface Homem Máquina (IHM) para configuração do processamento por atrito (MAREGA, 2011)

O sensor de deslocamento do cilindro hidráulico, responsável pela medição do comprimento de queima do pino consumível, é do tipo LVDT (Transdutor Diferencial Variável Linear). Através de comparação entre o valor da posição atual e o valor da posição pré-determinado para o comprimento de queima é feito o controle do deslocamento do eixo do cilindro. O LVDT é fixado no eixo do cilindro e sua haste é aparafusada sobre o mancal de deslizamento (Fig. 3.8).



Figura 3. 8 – Posicionamento do sensor de deslocamento (LVDT)

3.1.4 Sistema Antitravamento

Durante o ensaio de reparo por atrito, quanto maior a força axial aplicada, maior é o torque necessário, de tal sorte que não ocorra o travamento. Nos momentos iniciais do reparo, ocorre o pico máximo de torque devido à baixa temperatura do material e consequentemente, há um maior coeficiente de atrito entre o pino e o bloco. Assim, nessa fase se encontra o maior risco de ocorrer o travamento.

O sistema antitravamento implementado por FREITAS (2012) através da reprogramação do CLP, atua diretamente na correção da força axial no sentido de reduzi-la para 60 kN quando a rotação cai em 10% do valor determinado pelo usuário. Esta força é mantida até que a rotação recupere o valor previamente determinado, voltando automaticamente ao valor programado. No caso dos ensaios com força axial de 60 kN, a mesma permanece constante durante o ensaio.

3.2 Materiais e Métodos Experimentais

3.2.1 Materiais Ensaçados

Dentre os aços estruturais existentes, o mais utilizado e conhecido é o ASTM A36, que é classificado como um aço carbono de média resistência mecânica (<http://www.cbca-acobrasil.org.br/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>). Devido a sua grande aplicação como aço comercial, o aço ASTM A36 é empregado neste trabalho como material base para o estudo de reparo por atrito. Outro aço estrutural utilizado no presente trabalho é o ABNT 1010 (utilizado como consumível), devido à faixa de composição química e a microestrutura serem semelhante às do ASTM A36, minimizando modificações das propriedades mecânicas finais da peça reparada. O aço ASTM A36 tem uma microestrutura típica com bandejamento de ferrita e perlita, devido o seu maior grau de impurezas. A figura 3.9 (a) e (b) mostram as microestruturas típicas de um aço ASTM A36 e de um aço ABNT 1010, constituídas de ferrita e perlita.

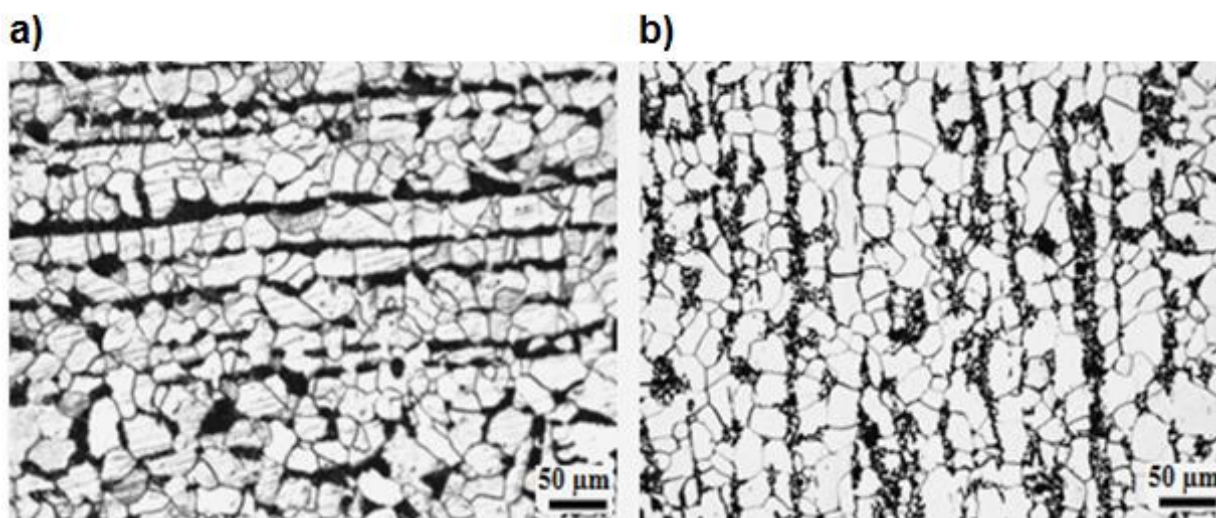


Figura 3. 9 – a) Micrografia do aço ASTM A36, (seção longitudinal). Microestrutura: ferrita (grãos claros) e perlita (regiões escuras e orientadas); b) Micrografia do aço carbono ABNT 1010, (seção longitudinal). Microestrutura: ferrita (grãos claros) e perlita (regiões escuras e orientadas); Ataque Nital: 2%

Para execução dos ensaios deste trabalho foram utilizadas chapas laminadas do aço ASTM A36 de 25,4 mm de espessura para confecção de blocos passantes e peças suporte, além de chapas de 12,7 mm de espessura para a confecção de peças de retenção. Para a

confecção dos pinos consumíveis foi empregado o aço ABNT 1010, o qual foi fornecido em barras cilíndricas com 32 mm de diâmetro e 2 metros de comprimento.

A composição química dos blocos passantes, peças de retenção e pinos consumíveis é apresentada na tabela 3.1, sendo determinada via técnica de espectrometria de emissão ótica.

Tabelas 3. 1 – Composição química dos materiais utilizados (% em peso)

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Nb	Mo	Ni
Blocos e Peças Suporte ASTM A36	0,163	0,204	1,024	0,013	0,017	0,009	0,001	-	0,002	0,001
Peças de Retenção ASTM A36	0,120	1,020	1,100	0,038	0,006	-	0,210	-	0,020	0,010
Pinos ABNT 1010	0,158	0,151	0,695	0,029	0,019	-	0,003	0,004	-	0,004

3.2.2 Geometria dos Blocos, Pinos, Peças de Retenção e Peças Suporte

A concepção do método de reparo por atrito para trincas passantes, objeto do presente trabalho, foi baseada em geometrias bem sucedidas empregadas anteriormente no reparo de trincas não passantes no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste. Assim os parâmetros geométricos empregados neste trabalho, referentes ao tronco de cone do pino e do furo, bem como a profundidade do furo cônico do bloco passante e a dimensão do bloco, têm como referência as geometrias otimizadas por MAREGA (2011), usadas também por GONTIJO (2012). Essas geometrias mostradas nas figuras 3.10 e 3.11, por sua vez, se basearam no trabalho de PIRES (2007). As dimensões dos blocos foram definidas tendo-se como referências os estudos de OSÉIAS (2011), sendo empregados para ensaios de reparo blocos de seção quadrada de largura e comprimento de 80 mm e altura de 20 mm.

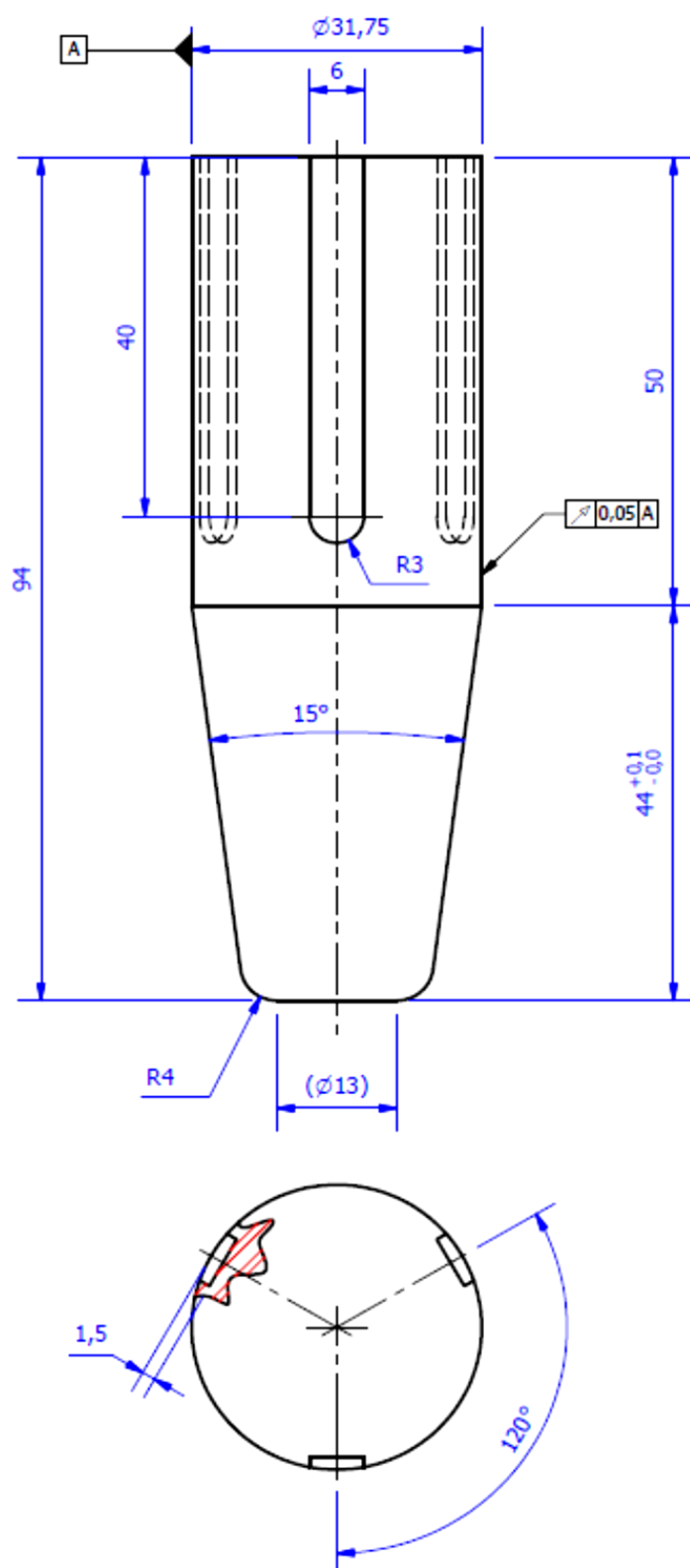


Figura 3. 10 – Geometria de referência do pino consumível utilizado nos ensaios de reparo por atrito

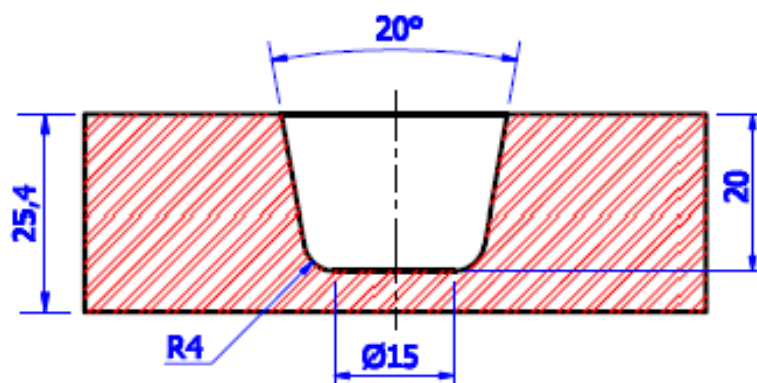


Figura 3. 11 – Bloco com furo não passante tido como referência (GONTIJO, 2012).

Nas figuras 3.12 e 3.13 são mostrados os dados adquiridos dos reparos de furos não passantes de MAREGA (2011) e GONTIJO (2012), respectivamente, utilizando as geometrias de pino e bloco mostradas nas figuras 3.10 e 3.11.

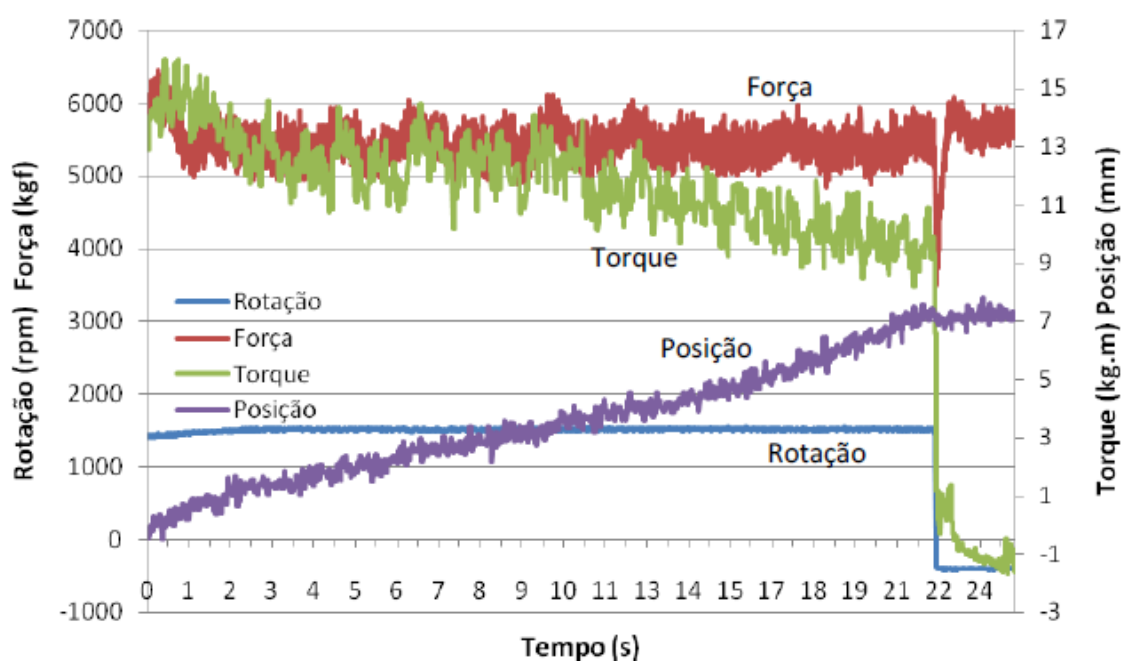


Figura 3. 12 – Dados adquiridos no reparo de furos não, onde é mostrado um torque resistivo máximo de 150 N.m, força axial de 60 kN, comprimento de queima de 7 mm e 1.500 rpm (MAREGA, 2011)

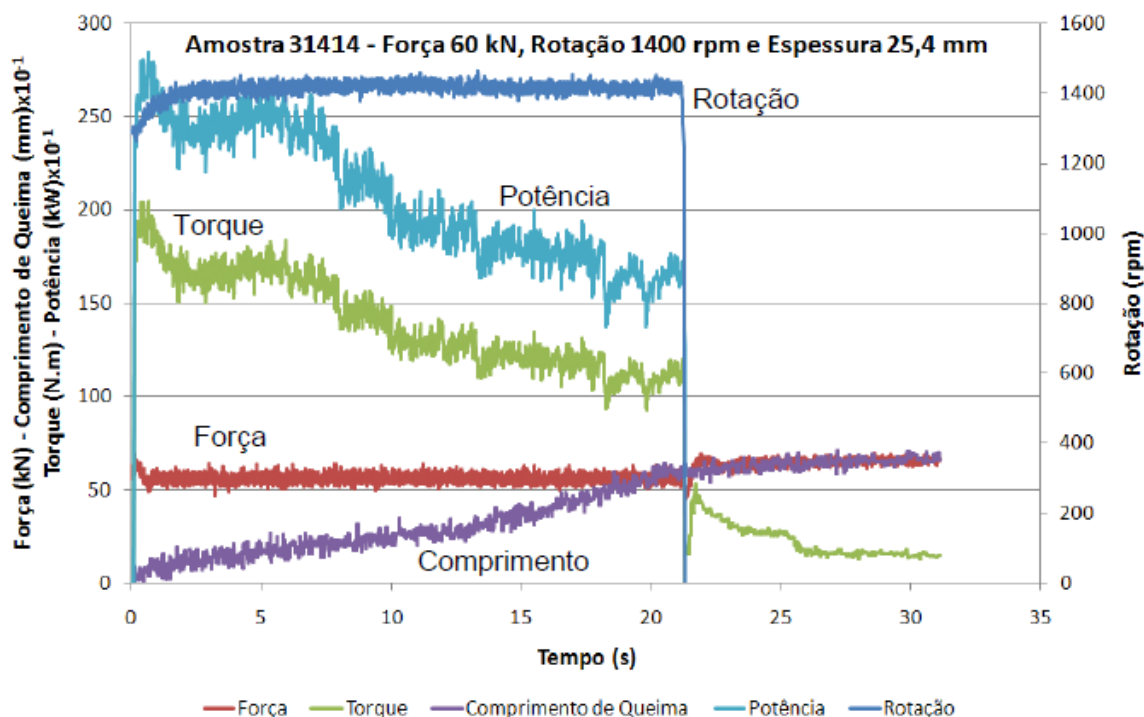


Figura 3. 13 – Evolução dos dados adquiridos no reparo de furo não passante em chapa de 1" (25,4 mm), onde é mostrado um torque máximo de 200 N.m, força axial de 60 kN, rotação de 1.400 rpm e comprimento de queima de 6 mm (GONTIJO, 2012)

Levando-se em consideração os trabalhos anteriormente mencionados, foram selecionados os parâmetros geométricos dos pinos e dos blocos observados nas Figs. 3.10 e 3.11, sendo que a geometria cônica do furo passante é exatamente a mesma do tronco de cone do furo não passante utilizado por MAREGA (2011) e GONTIJO (2012) como mostrado na Fig. 3.14.

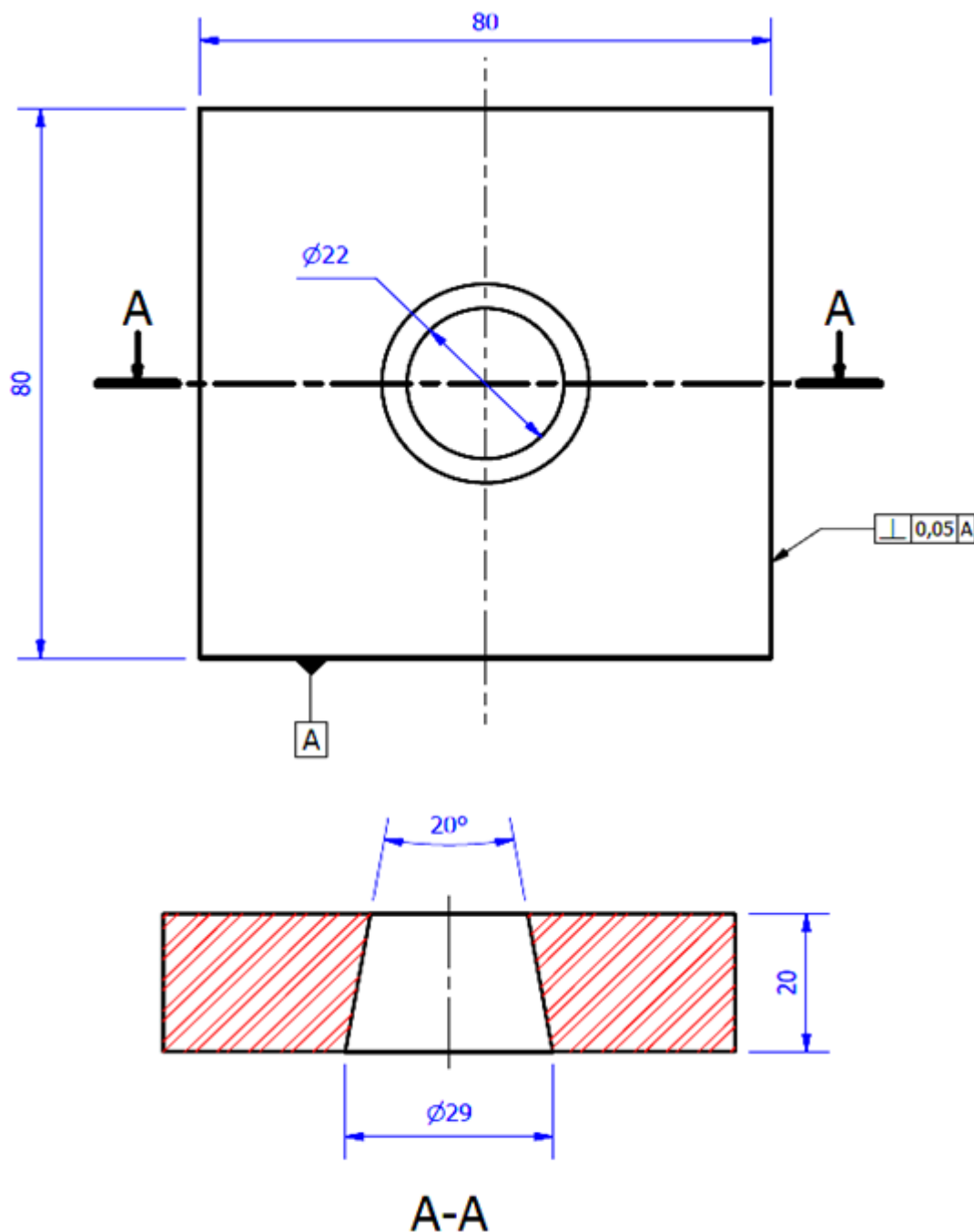


Figura 3. 14 – Geometria do bloco não passante

Para a realização dos reparos neste trabalho, foram inseridas duas outras peças que compõem o sistema de reparo que são: a peça de retenção (Fig. 3.15) e a peça suporte (Fig. 3.16). A peça de retenção tem a finalidade de prolongar as paredes do furo passante, fazendo com que haja um fundo para o orifício feito no bloco, simulando assim um furo cego.

A peça suporte tem a função de acomodar a peça de retenção e suportar os esforços rotativos e axiais do pino consumível durante a soldagem

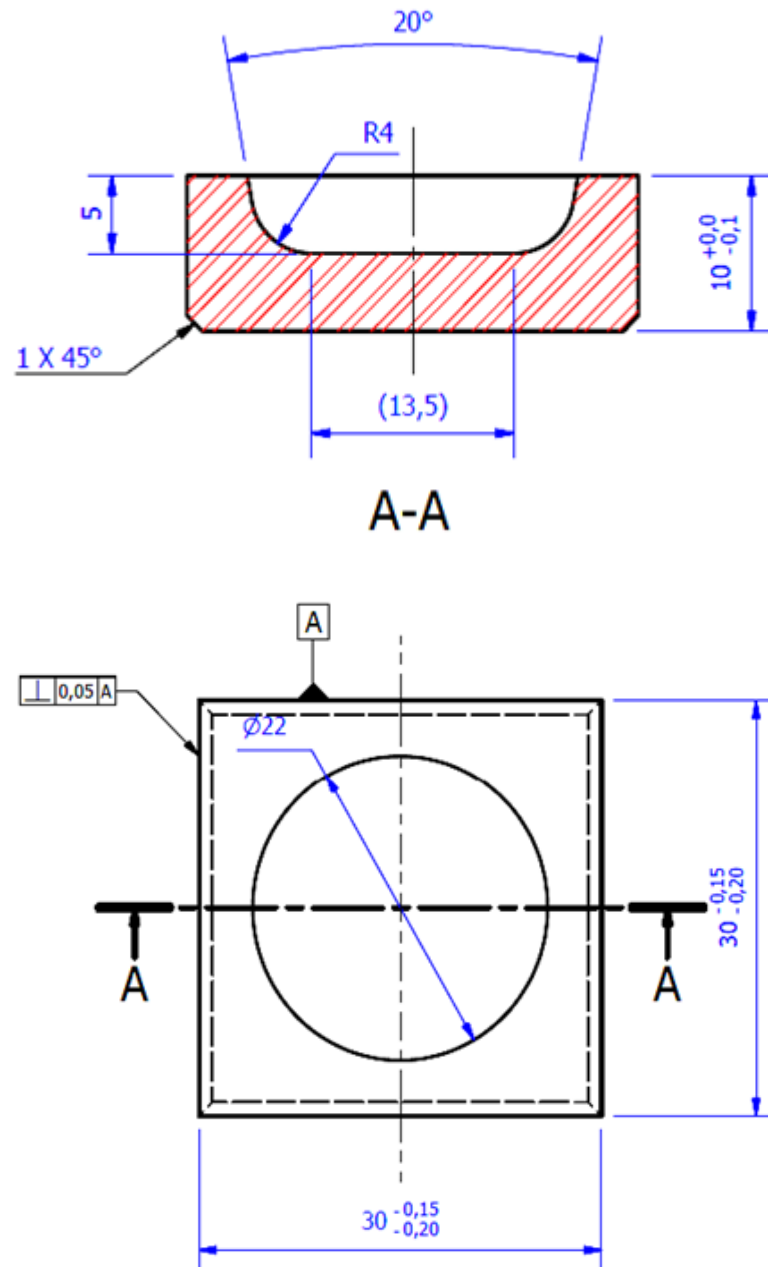


Figura 3. 15 – Geometria da peça de retenção, responsável pelo prolongamento das paredes do furo passante

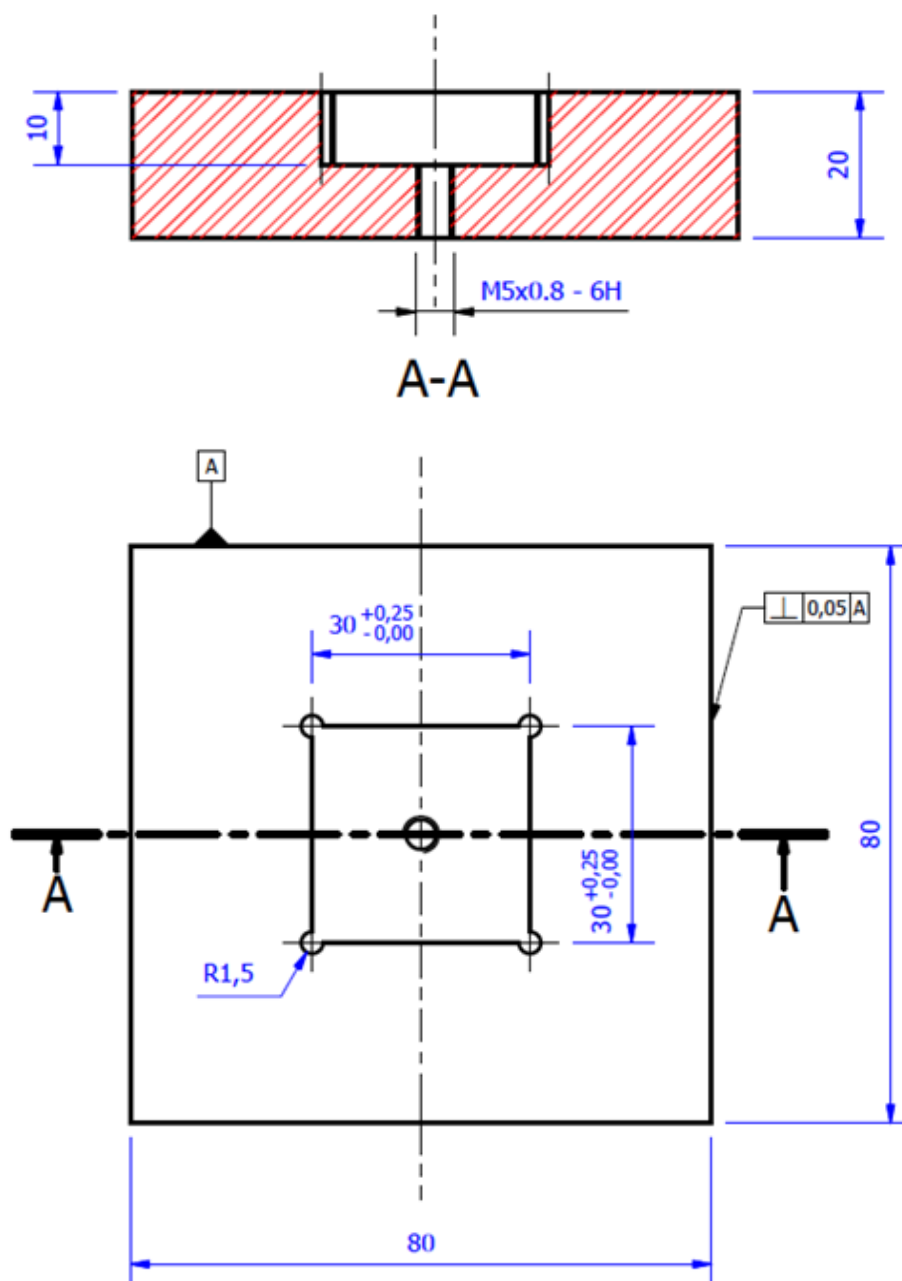


Figura 3. 16 – Geometria da peça suporte, responsável por dar sustentação à peça de retenção durante o processo de reparo

Ensaio preliminares com as geometrias selecionadas para o pino (Fig. 3.10) e para o bloco (Fig. 3.14) levaram a travamentos durante o preenchimento.

Foi então realizada uma minuciosa análise para detectar as prováveis causas do problema. Na investigação verificou-se que em virtude da extensão do furo através da peça de retenção e a manutenção da geometria do pino, este tocava prematuramente na parede do furo, causando o travamento. A Figura 3.17 mostra detalhes da montagem do bloco com furo passante e com a peça de retenção encaixada na peça suporte. Vê-se que a folga é muito pequena o que causa o travamento.

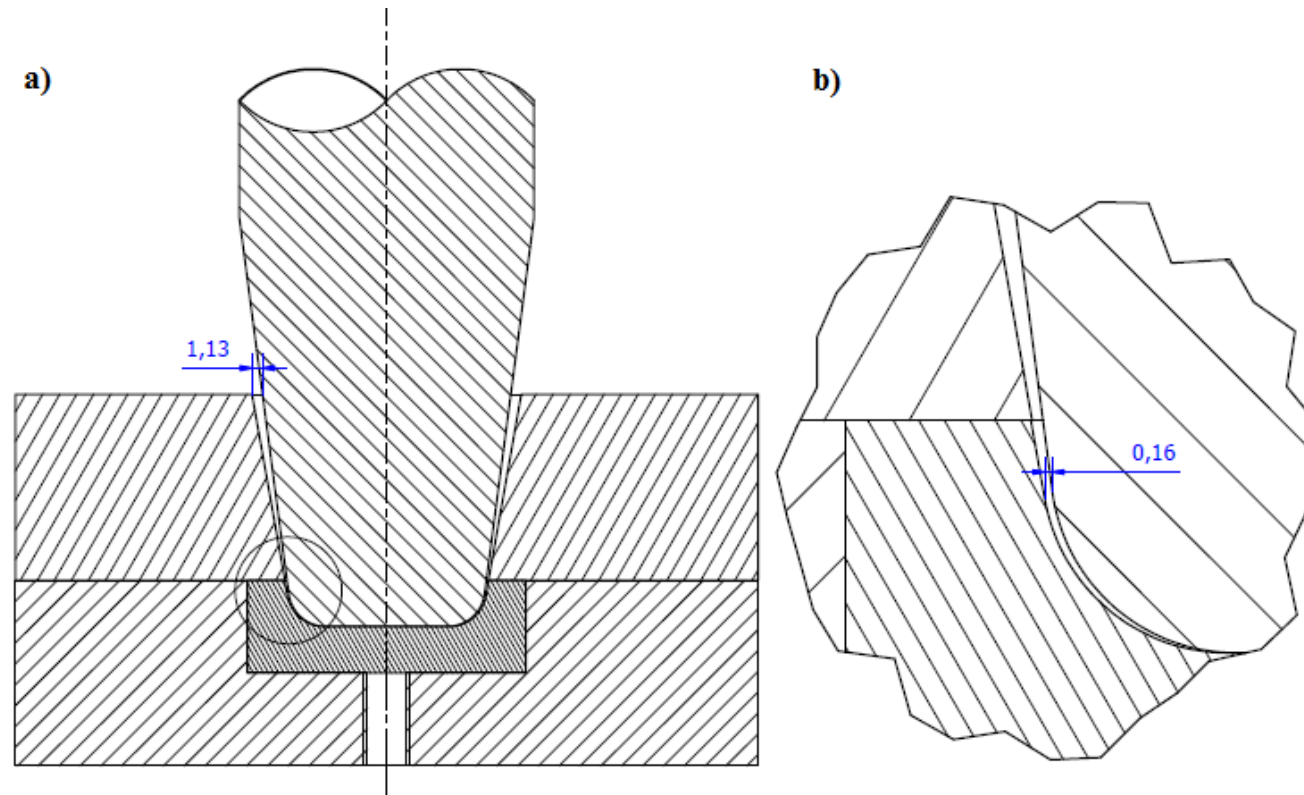


Figura 3. 17 – a) Desenho esquemático da montagem das peças para o reparo por atrito; b) Ampliação da folga entre pino/ peça de retenção

Para sanar o problema de travamento, o pino foi reprojeto mantendo-se o ângulo do tronco de cone e aumentada a sua altura de modo que a ponta do pino teve a sua área reduzida de modo a manter uma folga suficiente para não causar o travamento. A Figura 3.18 mostra a nova geometria do pino e a Fig.3.19 mostra a montagem completa.

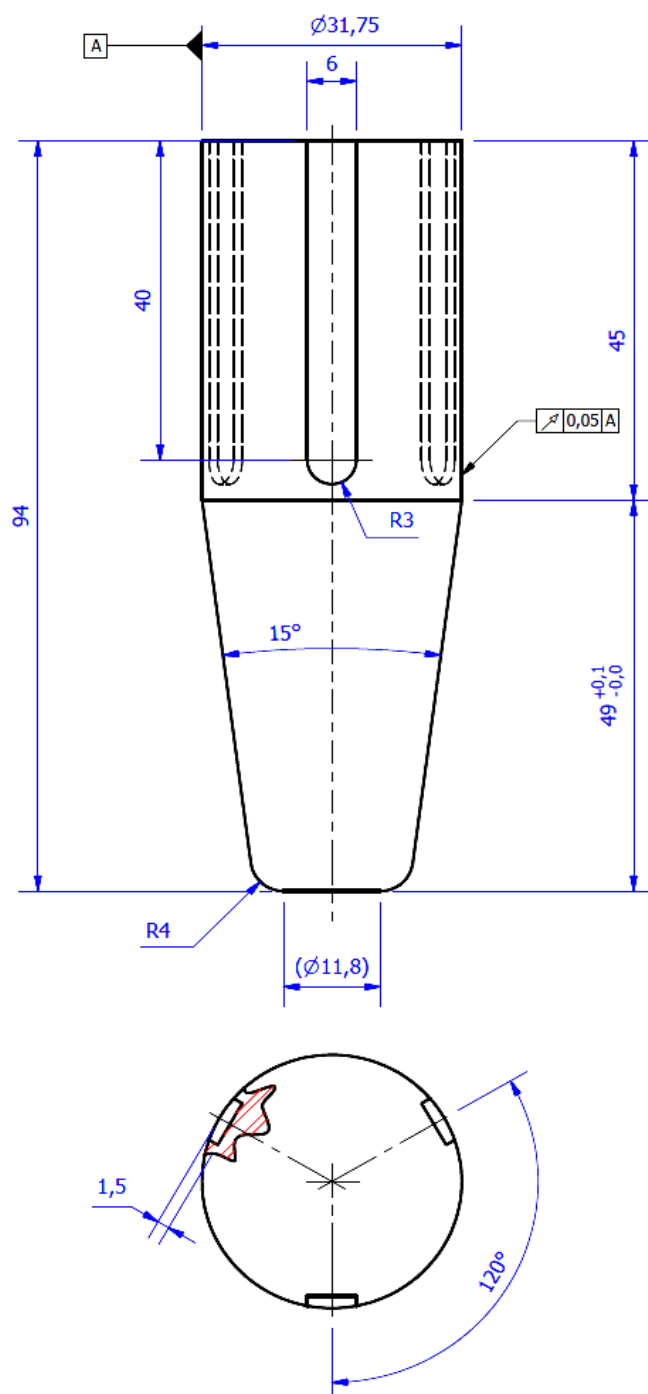


Figura 3. 18 – Geometria reprojetoada do pino consumível utilizado nos ensaios de preenchimento

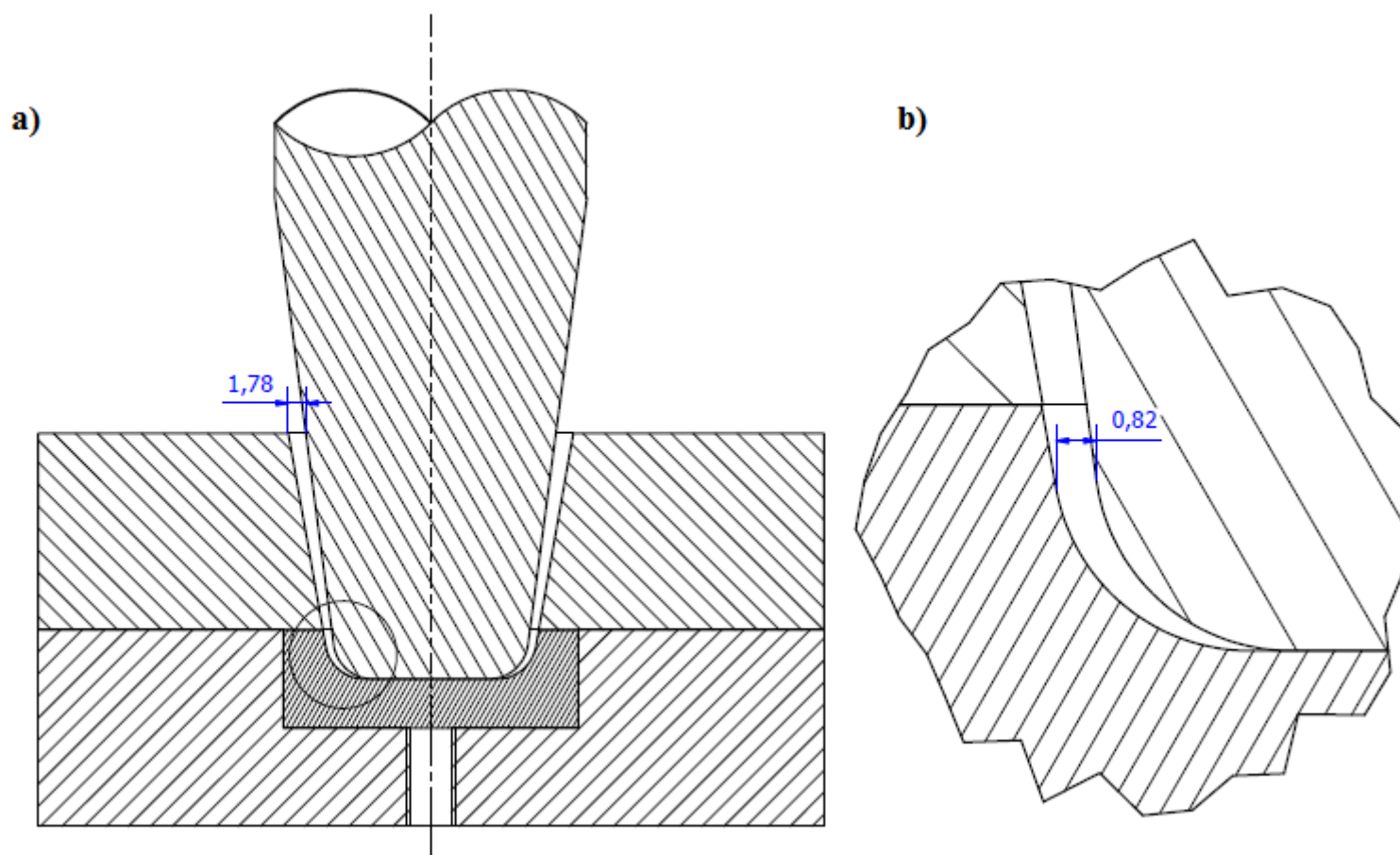


Figura 3. 19 – a) Desenho esquemático da montagem das peças para o reparo por atrito com a modificação no tronco de cone do pino; b) Ampliação da folga entre pino/ peça de retenção

3.3 Ensaios de Preenchimento

3.3.1 Ensaios de Reparo por Atrito com Blocos de Base Quadrada

A partir da modificação na geometria do pino foram realizados ensaios com blocos de base quadrada que apresentavam as seguintes dimensões: largura e comprimento de 80 mm e altura de 20 mm, todos com furos cônicos passantes, como mostrado na Fig. 3.14. Os parâmetros de processo foram definidos tomando-se como referência os trabalhos de PIRES (2007), MAREGA (2011) e GONTIJO (2012).

Foram fixados os valores de rotação, o tempo de forjamento e o comprimento de queima. A força de forjamento foi definida como igual ao valor da força axial aplicada ao durante o processo de reparo.

A rotação foi fixada em 1.700 rpm, o comprimento de queima em 7 mm e o tempo de forjamento em 10 segundos. As forças axiais utilizadas neste trabalho foram: 60 kN, 80 kN, 100 kN e 120 kN. Segundo MAREGA (2011), a força axial mínima no equipamento utilizado deve ser igual a 60 kN, pois abaixo desta o mesmo pode travar. A tabela 3.2 sintetiza os parâmetros empregados.

Tabela 3. 2 – Parâmetros utilizados nos ensaios

Ensaio	Identificação da amostra	Força Axial [kN]	Forjamento [kN/10s]xxx
1	31601	60	60
2	31602	80	80
3	31603	100	100
4	31604	120	120

Os ensaios foram realizados com o sistema de peças posicionadas de modo que não houvesse folga entre o bloco a ser reparado e a peça suporte, promovendo, assim, a continuidade do furo passante através da peça de retenção e simulando, portanto, um furo cego.

Para facilitar a retirada da peça suporte do conjunto pino/bloco/peça de retenção soldados, um lubrificante sólido (grafite) foi pulverizado na cavidade da mesma.

Os dados de todos os ensaios realizados foram adquiridos e os gráficos de força axial, rotação, comprimento de queima e torque, foram plotados em tempo real e armazenados para posterior análise.

Após os ensaios, os conjuntos pino/bloco foram cortados longitudinalmente em relação aos pinos, de modo a preservar a linha central dos pinos. Na sequência, esses conjuntos foram preparados para observação macrográfica e micrográfica como detalhado nos itens 3.4.1 e 3.4.2.

3.3.2 Ensaios com Furos Passantes com Folga Entre o Bloco de Reparo e a Peça Suporte

Considerando que, durante o processamento do pino, podem aparecer folgas entre o bloco e a peça devido a falhas de fixação e, considerando que um dos problemas do reparo por atrito é a presença de impurezas na interface pino/bloco, foram realizados ensaios de reparo por atrito com a existência de folgas entre a parte inferior do bloco e a peça de.

Para essa configuração, ensaios foram realizados reparos com folgas geradas através de calços de 0,5 e 1,0 mm, como mostrado nas Figs. 3.20 e 3.21.

Os parâmetros dos ensaios foram os mesmos selecionados para os reparos realizados sem a presença de calços: a rotação foi fixada em 1700 rpm, o comprimento de queima em 7 mm e o tempo de forjamento em 10 segundos. As forças axiais utilizadas foram 60 kN, 80 kN, 100 kN e 120 kN. Foram também realizados ensaios adicionais com a força axial de 120 kN, mas com comprimentos de queima de 9 mm, com o intuito de se verificar a influência desse parâmetro na qualidade do reparo.

Nas tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 são apresentadas as matrizes dos ensaios, de acordo com a variação da espessura do calço utilizado (folga nominal - FN).

Tabela 3. 3 – Parâmetros utilizados nos ensaios com calços de espessura de 1 mm (folga nominal) e comprimento de queima de 7 mm

Ensaio	Identificação da Amostra	Força Axial [kN]	Forjamento [kN/10s]
9	31609	60	60
10	31610	80	80
11	31611	100	100
12	31612	120	120

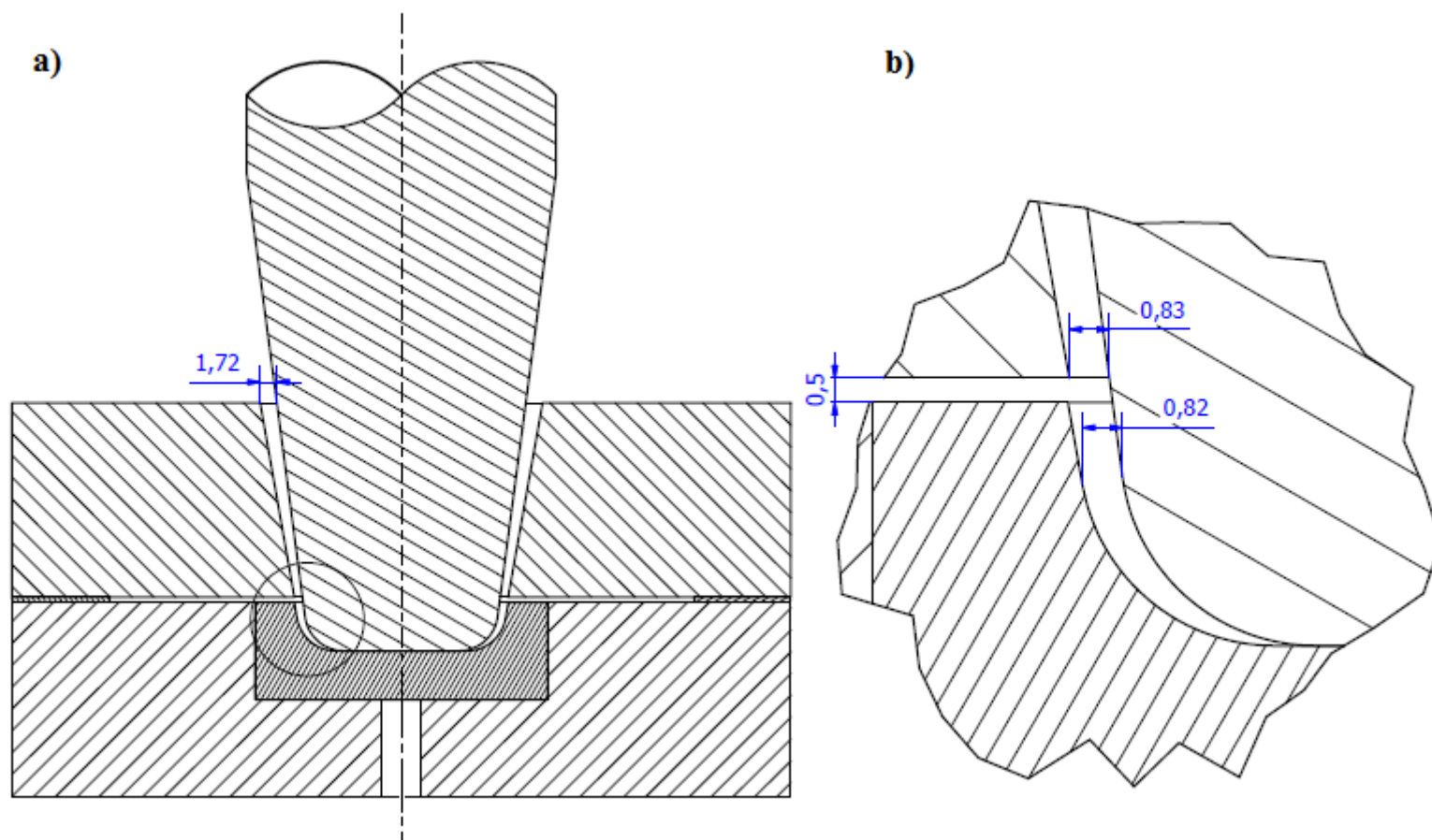


Figura 3. 20 – a) Montagem das peças para o reparo por atrito com a introdução de um par de calços de 0,5 mm de espessura entre o bloco a ser reparado e a peça suporte; b) Ampliação da folga entre pino/ peça de retenção.

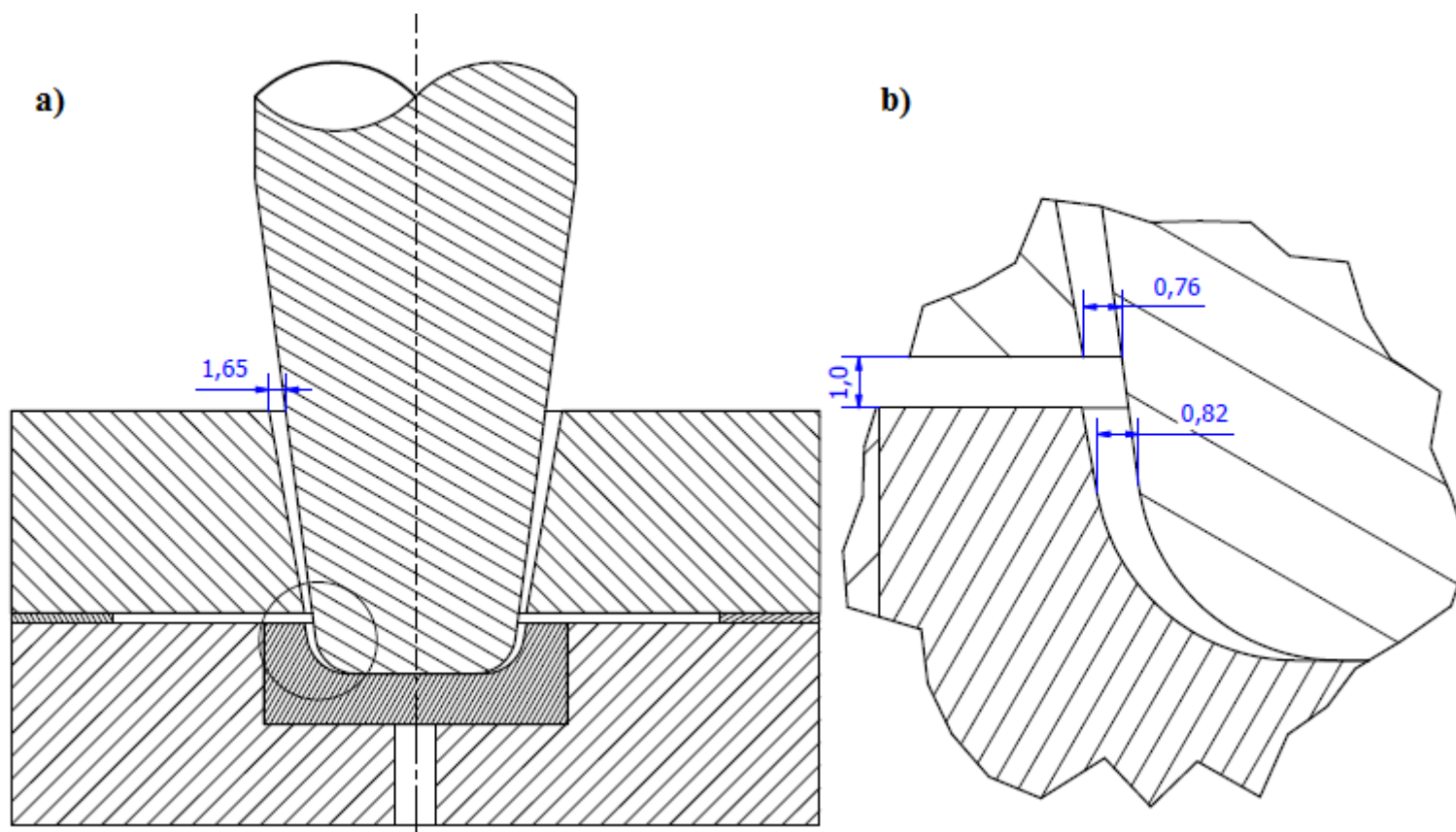


Figura 3. 21 —: a) Montagem das peças para o reparo por atrito com a introdução de um par de calços de 1 mm de espessura entre o bloco a ser reparado e a peça suporte; b) Ampliação da folga entre pino/ peça de retenção

Tabela 3. 4 – Parâmetros utilizados nos ensaios com calços de espessura de 0,5 mm (folga nominal) e comprimento de queima de 7 mm

Ensaio	Identificação da Amostra	Força Axial [kN]	Forjamento [kN/10s]
13	31613	60	60
14	31614	80	80
15	31615	100	100
16	31616	120	120

Tabela 3. 5 – Parâmetros utilizados nos ensaios com calços de espessura de 1,0 e 0,5 mm (folga nominal) respectivamente e comprimento de queima de 9 mm

Ensaio	Identificação da Amostra	Folga Nominal [mm]	Força Axial [kN]	Forjamento [kN/10s]
17	31617	1	120	120
18	31618	0,5	120	120

Após a definição dos parâmetros dos ensaios, os blocos foram devidamente marcados de acordo com as matrizes de testes, limpos em banho ultrassônico com acetona e realizados os ensaios de preenchimento.

3.4 Preparação Metalográfica

Após os ensaios de preenchimento as amostras foram preparadas para análise metalográfica. Esta etapa é dividida em duas partes: a macrografia que visa à caracterização da macroestrutura do reparo, onde são feitas observações a olho nu e a micrografia que é realizada através de microscopia ótica, visando à caracterização da microestrutura do material reparado e observação de possíveis falhas de preenchimento e trincas.

3.4.1 Macrografia

Inicialmente, as peças soldadas tiveram a parte superior do pino removida por corte com preservação do flash superior.

Logo em seguida foi feito um corte longitudinal ao pino, paralelo a uma das faces do bloco, tomando-se o cuidado de descontar a espessura do disco abrasivo de modo que a superfície gerada após os lixamentos contivesse o eixo longitudinal do pino. Para facilitar as operações de lixamento e posteriores operações de polimento, e considerando a simetria da peça, um terceiro corte foi realizado a 5 mm da linha central do pino. A Fig. 3.22 mostra a superfície final de trabalho obtida após os três cortes.

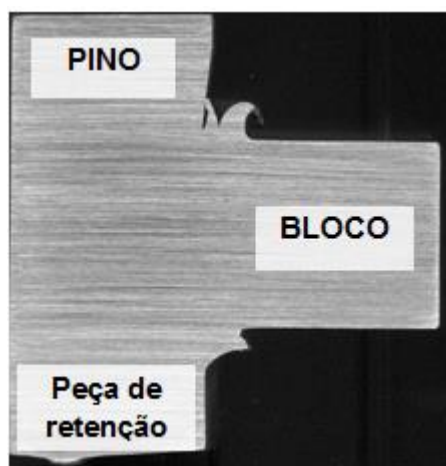


Figura 3. 22 – Superfície para preparação da macrografia e micrográfica

Todos os cortes foram executados em cortadora metalográfica, constituída de um disco abrasivo refrigerado (disco de carboneto de silício - SiC).

As superfícies geradas com os terceiros cortes das amostras foram lixadas com lixas de Al_2O_3 (alumina), de granulometrias 220, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*. Após o lixamento, as amostras foram limpas em banho ultrassônico e em seguida atacadas com solução de Nital 6%, sendo o tempo de exposição das amostras ao reagente variável, sendo este tempo, em média, entre 30 e 40 segundos. Com as superfícies atacadas, as amostras passaram por apreciação visual. O objetivo foi verificar a existência de falta de união metalúrgica ao longo da interface (entre o pino e o bloco) e avaliar a extensão das ZTA nos blocos. Foram geradas imagens digitalizadas das regiões atacadas das amostras através de um *scanner*.

3.4.2 Micrografia

Finda as observações das macroestruturas, as amostras foram novamente submetidas à lixamento com lixas de Al_2O_3 de granulometria 600 *mesh* para remoção do

macro ataque. Em seguida, realizou-se o lixamento com lixa de granulometria 1200 *mesh*, lavagem com água corrente, limpeza em banho ultrassônico e o polimento com pastas de diamante de 6, 3 e 1 μ m. Posteriormente, as superfícies polidas foram atacadas com Nital 2%, com tempo médio de 7 a 10 segundos. A figura 3.23 **Erro! Indicador não definido.** mostra a variação microestrutural característica encontrada em um pino ABNT 1010 e um bloco ASTM A36 após reparo por atrito em regiões distintas da amostra.

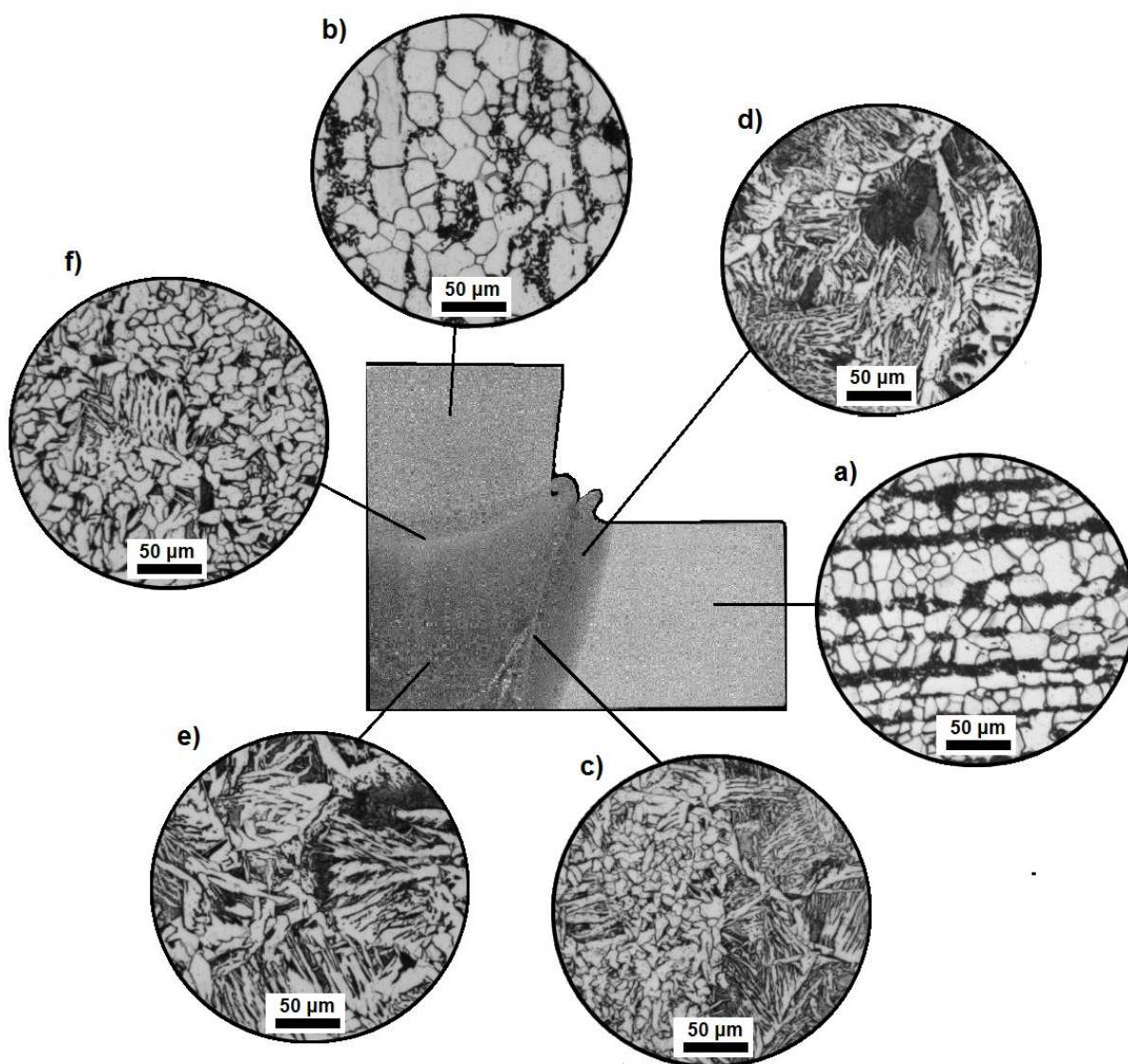


Figura 3. 23 – Variação microestrutural característica do reparo por atrito, usando como pino consumível o aço ABNT 1010 e uma chapa de aço ASTM A 36

As regiões em destaque na figura 3.23 são identificadas como:

- (a) e (b) Material base da chapa e do pino, respectivamente;
- (c) Linha de união entre pino e chapa;

- (d) Zona Termicamente Afetada (ZTA) na chapa;
- (e) Região Termomecanicamente Afetada;
- (f) Material forjado com grãos finos na região de transformação.

A investigação da microestrutura e da presença de possíveis defeitos foi realizada em dois perfis horizontais específicos, um perfil a 5 mm e outro perfil a 10 mm da face inferior do bloco. As fotomicrografias foram realizadas com a objetiva de 20x, com intervalo de distância de 1 mm entre as fotos de modo a cobrir a interface pino/bloco e toda a extensão da ZTA. A Fig. 3.24 mostra de forma ilustrativa os locais marcados onde foram feitas as fotomicrografias.

As micrografias foram avaliadas e registradas através de microscopia ótica e eletrônica de varredura. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado era do tipo *Field Emission* (de alta resolução), da marca Zeiss, modelo Supra 40, equipado com detector de elétrons secundários, retroespalhados e raios-X.

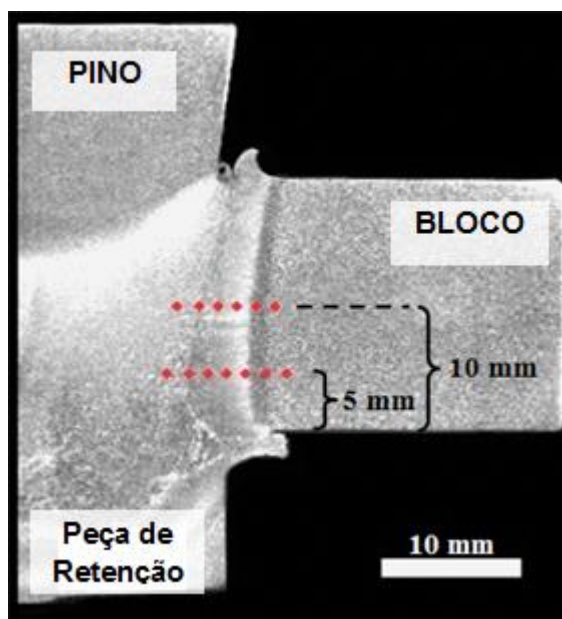


Figura 3. 24 – Indicação ilustrativa dos locais onde foram realizadas as micrografias

3.5 Ensaios de Microdureza Vickers

As mesmas regiões da análise micrográfica foram mantidas para a obtenção de perfis de microdureza Vickers. O primeiro perfil horizontal foi realizado a 5 mm da face inferior do bloco, e o segundo a 10 mm. Foram realizados ensaios com carga de 1 kgf, com

o tempo de aplicação de carga de 15 segundos e com intervalos de 0,5 mm de distância entre as indentações.

As indentações foram iniciadas na interface pino/bloco e se estenderam em direção à aresta do bloco até não serem percebidas modificações microestruturais devido o efeito térmico (Fig. 3.25). As outras indentações foram realizadas em direção ao pino, em sentido oposto às indentações feitas inicialmente no material do bloco. Além dos perfis horizontais, foi obtido um perfil vertical de dureza.

As indentações do perfil vertical se iniciaram a 5 mm da face inferior da peça de retenção. Essa determinação foi feita porque não foi possível observar na maioria das amostras a interface pino/peça de retenção. Neste ponto a superfície da região interna da peça de retenção é tocada pelo pino durante o reparo, onde provavelmente houve a formação da interface. O perfil vertical se estendeu ao longo do centro do pino até o ponto em que a microestrutura avaliada tornava-se idêntica à microestrutura original do pino. As outras indentações foram realizadas em direção à face inferior da peça de retenção.

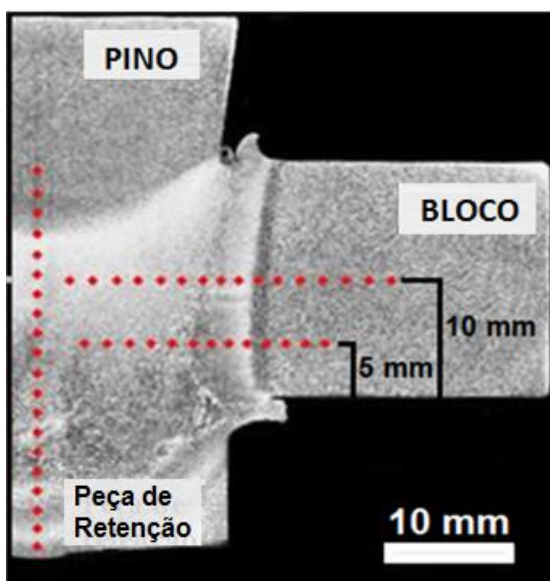


Figura 3. 25 – Posicionamento dos perfis de microdureza

3.6 Ensaios de Reparo por Atrito para Obtenção de Corpo de Prova para Ensaios de Dobramento

As amostras confeccionadas para os ensaios de dobramento possuem comprimento, largura e altura de 152 mm, 80 mm e 20 mm, respectivamente, Fig.3.26 (a). Os blocos

destinados aos ensaios de dobramento foram retirados da mesma chapa de aço ASTM A36 em que os blocos de comprimento e largura 80 mm e altura 20 mm foram retirados.

Os parâmetros de força axial aplicadas foram 60 e 120 kN. Deste modo foram testados os extremos de força usados nos processos de reparos anteriores. Os ensaios foram realizados sem a presença de calço para gerar folga, ou seja, o bloco de reparo e a peça de retenção permanecem em íntimo contato.

A Tab. 3.6 mostra os parâmetros de ensaio utilizados nos reparos por atrito para obtenção dos corpos de prova para os ensaios de dobramento.

Tabela 3. 6 – Parâmetros utilizados nos ensaios com blocos de seção retangular

Ensaio	Identificação da Amostra	Força Axial [kN]	Forjamento [kN/10s]
5	31605	60	60
6	31606	60	60
7	31607	120	120
8	31608	120	120

Para a realização dos ensaios de dobramento, o corpo de prova (lâminas retiradas do bloco preenchido, Fig. 3.26(b)) foi posicionado entre dois apoios cilíndricos afastados do equipamento (Fig. 3.27 (a)).

Por intermédio de um êmbolo foi aplicada uma força na seção central da amostra, exatamente na posição equivalente à do preenchimento, até que atingisse o ângulo de dobramento máximo (180°). Segundo a norma ANSI/AWS B 4.0-98, 1997, o tempo de execução do ensaio deve ser superior a 15 segundos e inferior a 2 minutos. Nos ensaios o tempo foi de 25 a 35 segundos.

A Fig. 3.27 mostra o equipamento para ensaios de dobramento construído no LTAD e sua representação esquemática.

O ensaio é encerrado após ser atingido o ângulo máximo de 180°, onde a amostra passa a ter o perfil em “U”. A região flexionada das amostras foi observada com auxílio de uma lupa com aumento de 5X, procurando identificar a presença de possíveis trincas e fissuras.

Após a realização dos ensaios de preenchimento dos blocos, as peças foram usinadas, de tal forma a se obter lâminas da seção longitudinal de 152 mm de comprimento, 3,2 mm de espessura e 20 mm de altura. A geometria da lâmina para dobramento pode ser vista na Fig. 3.26 (b). Estas medidas de corte foram seguidas de acordo com a norma para ensaio de dobramento ASTM E 190-92 (2003).

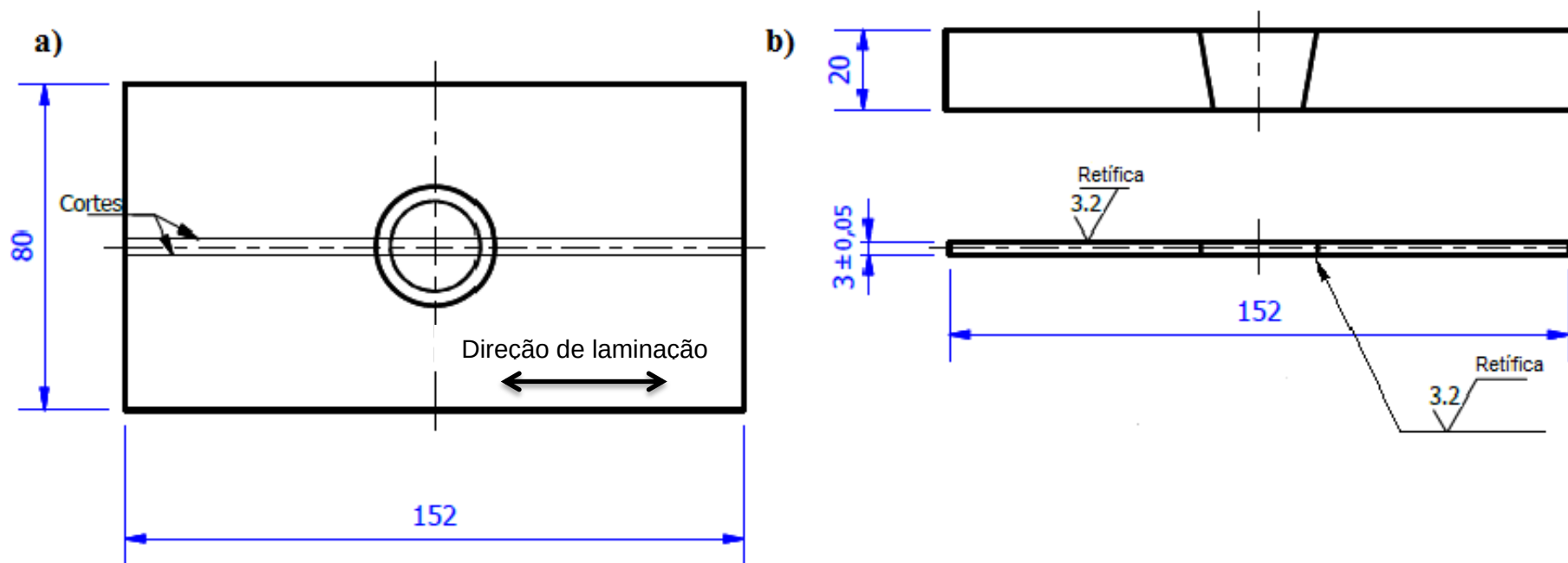


Figura 3. 26 – a) Geometria do bloco passante utilizado nos ensaios de preenchimento e posterior ensaios de dobramento. b) Geometria da lâmina retirada do bloco para os ensaios de dobramento

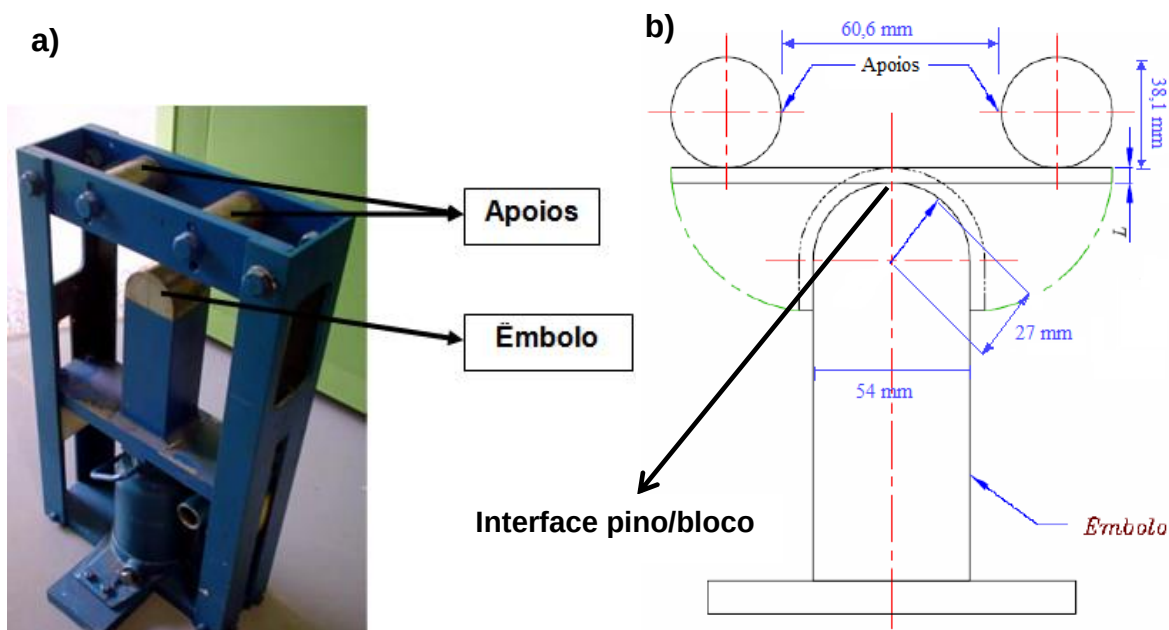


Figura 3. 27 – A) Dispositivo usado nos ensaios de dobramento; B) Representação esquemática do dispositivo usado (PIRES, 2007)

3.7 Cálculo da Área da ZTA

A extensão da zona termicamente afetada nos blocos foi estimada com o auxílio do o programa *Image J*. Para que o programa calculasse a área da ZTA, a superfície das amostras foi digitalizada. Após o reconhecimento do arquivo de imagem pelo programa, é feita a configuração de dimensões através de ferramenta própria do programa.

Foi realizada uma marcação na imagem digitalizada (linha amarela) cuja medida é conhecida (medida de referência). Através desta linha o programa faz uma escala, baseada no comprimento conhecido e quantidade de *pixels* desta medida. A figura 3.28 mostra uma imagem digitalizada de uma das amostras e ferramentas do programa.

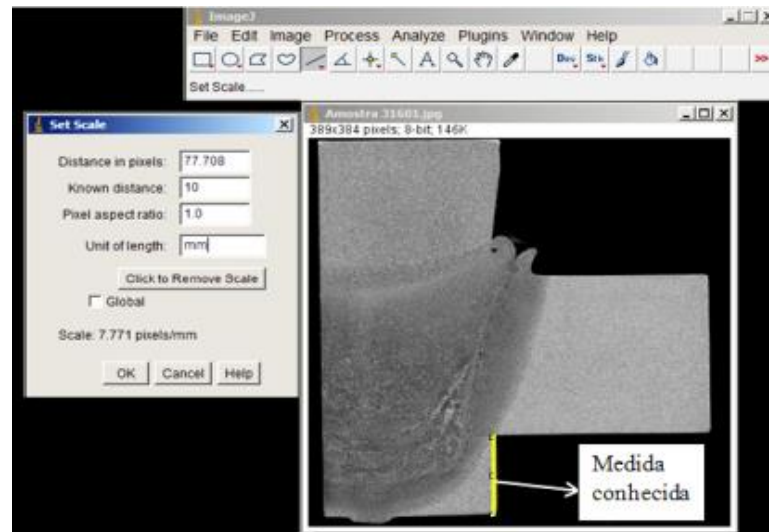


Figura 3. 28 – Layout do programa Image J (Internet – domínio público) utilizado para o cálculo das ZTA. Na região inferior direita é mostrada a marcação de uma distância conhecida; A esquerda é mostrada a janela na qual se insere o valor da distância conhecida e a unidade da mesma

Com o intuito de se obter maior precisão na medida das áreas das ZTA, as macrografias foram tratadas mediante o recorte da imagem da aresta do bloco contendo a zona termicamente afetada. O restante da imagem, composto pelo pino, a peça de retenção e a parte restante da aresta do bloco a esquerda da linha vermelha foram eliminados, Fig. 3.29.

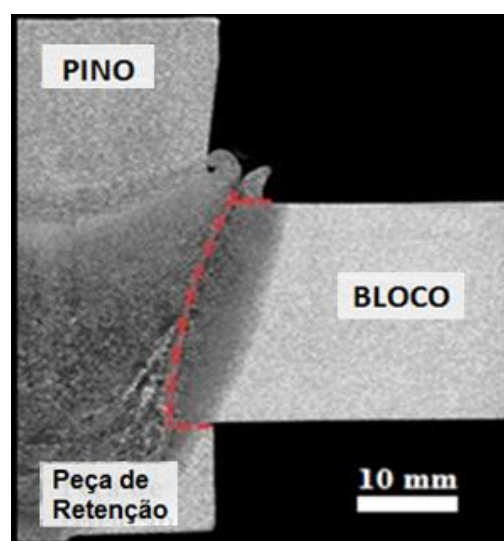


Figura 3. 29 – Imagem do recorte (mostrada através do traço vermelho) da aresta do bloco contendo a zona termicamente afetada para a investigação

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os registros dos parâmetros de processo impostos (força axial e de forjamento, rotação e comprimento de queima), os parâmetros calculados pelo programa de aquisição de dados (torque resistivo e potência mecânica), os tempos de processo, as áreas das ZTA geradas, a caracterização metalográfica, os perfis de dureza e os ensaios de dobramento.

4.1 Registros dos Parâmetros de Ensaios

Através dos dados adquiridos, força axial, comprimento de queima, torque, potência e rotação, todos em função do tempo, foram plotados os gráficos referentes aos ensaios sem folga e com folga de 1,0 mm os quais são mostrados nas Figs. de 4.1 a 4.8.

Houve, no entanto, falha na aquisição de dados que impossibilitou o registro dos gráficos dos ensaios 5 e 6 (destinados à obtenção de corpos de prova de dobramento), 13 e 14 (ensaios com folga de 0,5 mm) e 17 (ensaio com folga de 1,0 mm). A falha impossibilitou a comparação dos tempos de reparo e dos torques resistivos, mas não inviabilizou as comparações e análises das macro e micrografias, das ZTA e dos perfis de microdureza, bem como a realização dos ensaios de dobramento.

Na tabela 4.1 são mostrados os parâmetros de alguns dos ensaios, bem como os valores das folgas reais entre bloco de reparo e peça de retenção. A medição da folga real é explicada nas páginas 73 e 74 deste capítulo.

Tabela 4. 1 – Parâmetros dos ensaios onde houve aquisição dos sinais dos parâmetros de processo

Ensaio	Identificação da amostra	Força Axial [kN]	Forjamento [kN/10s]	Folga Nominal [mm]	Folga Real [mm]
1	31601	60	60	-	1,90
2	31602	80	80	-	1,90
3	31603	100	100	-	2,70
4	31604	120	120	-	3,30
9	31609	60	60	1	2,80
10	31610	80	80	1	1,90
11	31611	100	100	1	1,90
12	31612	120	120	1	2,70

A rotação do pino foi de 1.700 rpm. O comprimento de queima em todos os ensaios onde houve aquisição dos parâmetros de processo foi de 7,0 mm e o tempo de forjamento é de 10 segundos.

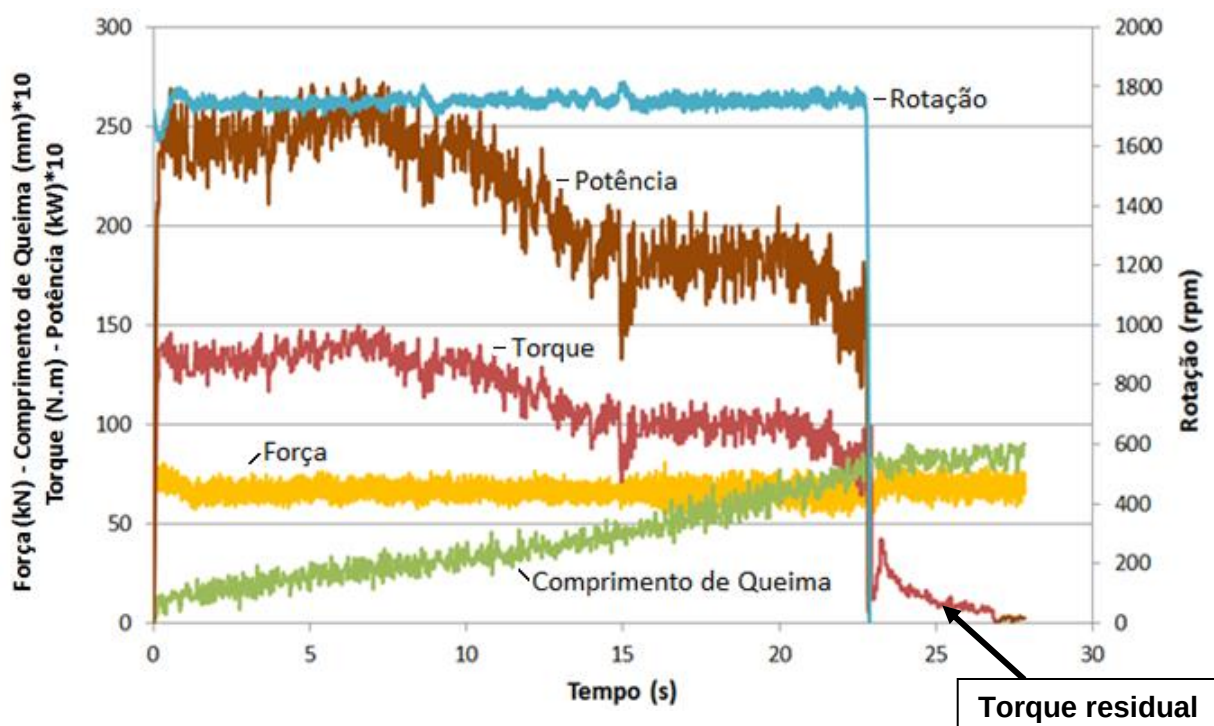


Figura 4. 1 – Dados adquiridos durante do Ensaio 1 (Amostra 31601), sem folga entre as peças (60 kN, 1.700 rpm, FN de 0 mm e Cq de 7 mm)

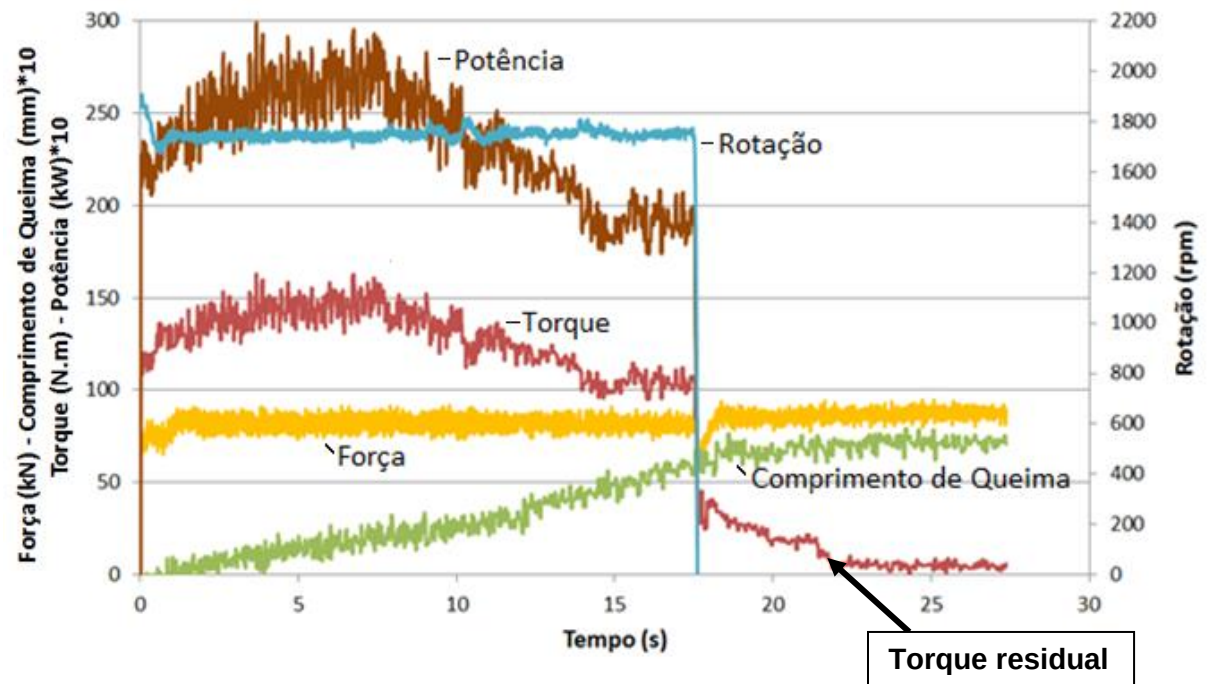


Figura 4. 2 – Evolução do torque, força axial, comprimento de queima, rotação e potência mecânica no ensaio 2 (Amostra 31602; 80 kN, 1.700 rpm, FN de 0 mm e Cq 7 mm)

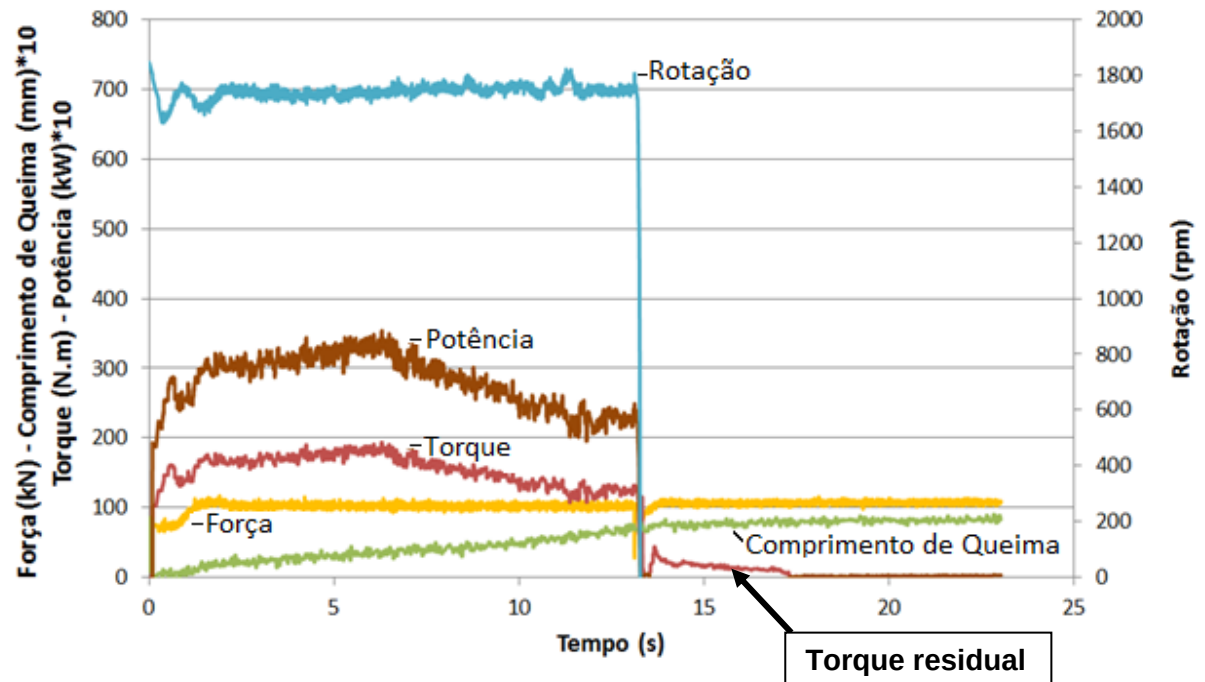


Figura 4. 3 – Torque, força axial, comprimento de queima, rotação e potência mecânica durante o ensaio 3 (Amostra 31603; 100 kN, FN de 0 mm e Cq 7 mm)

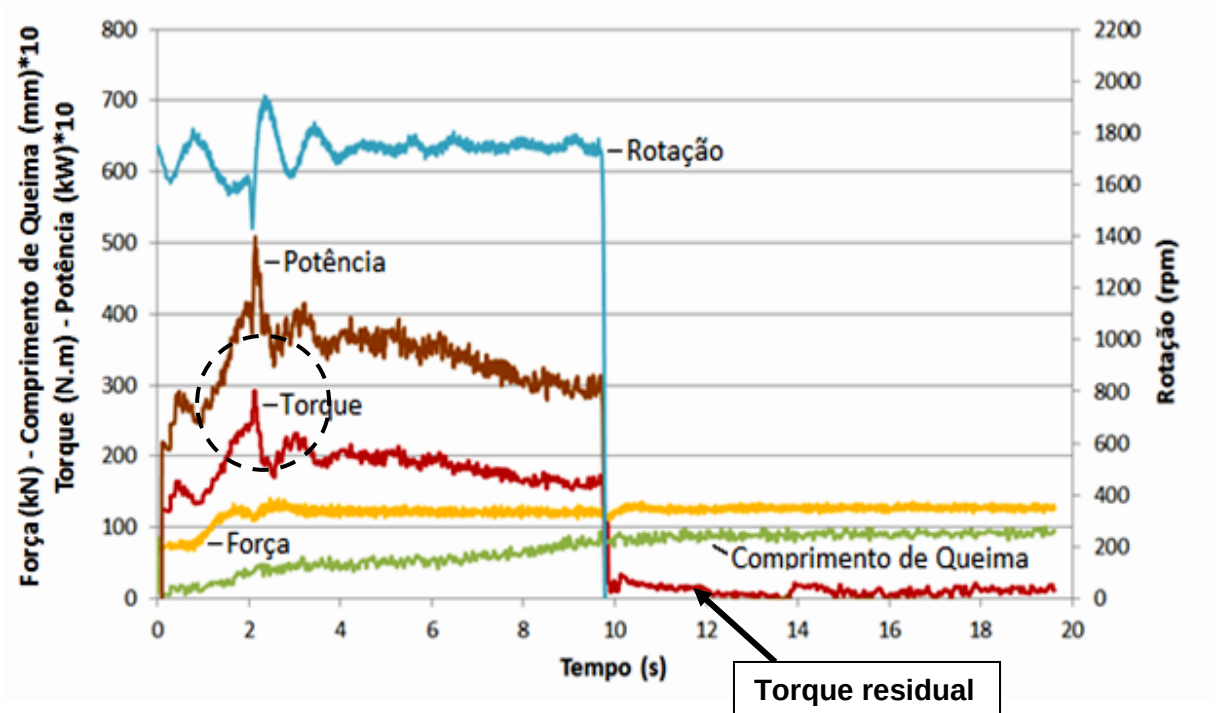


Figura 4. 4 – Dados aquisicionados no ensaio 4 (Amostra 31604; 120 kN, FN de 0 mm, FR de 1,9 mm e Cq 7 mm)

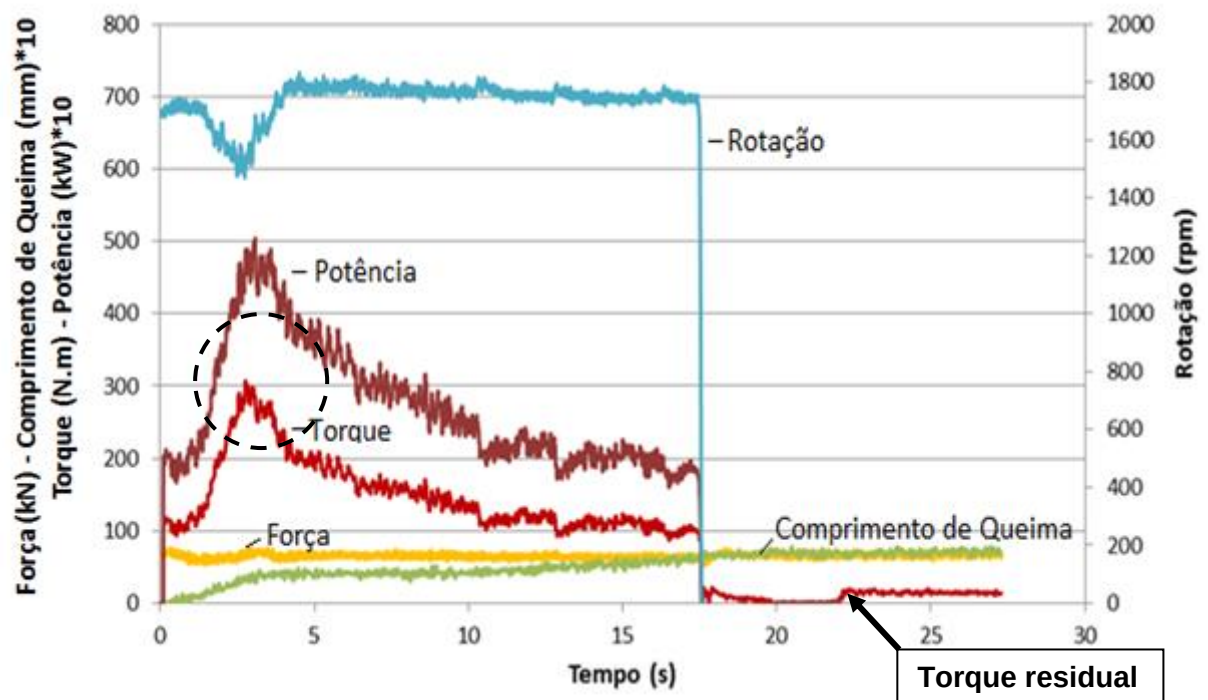


Figura 4. 5 – Torque, força axial, comprimento de queima, rotação e potência mecânica relativas ao ensaio 9,0 (Amostra 31609; 60 kN, FN de 1 mm, FR de 1,9 mm, 1700 rpm e Cq de 7,0 mm)

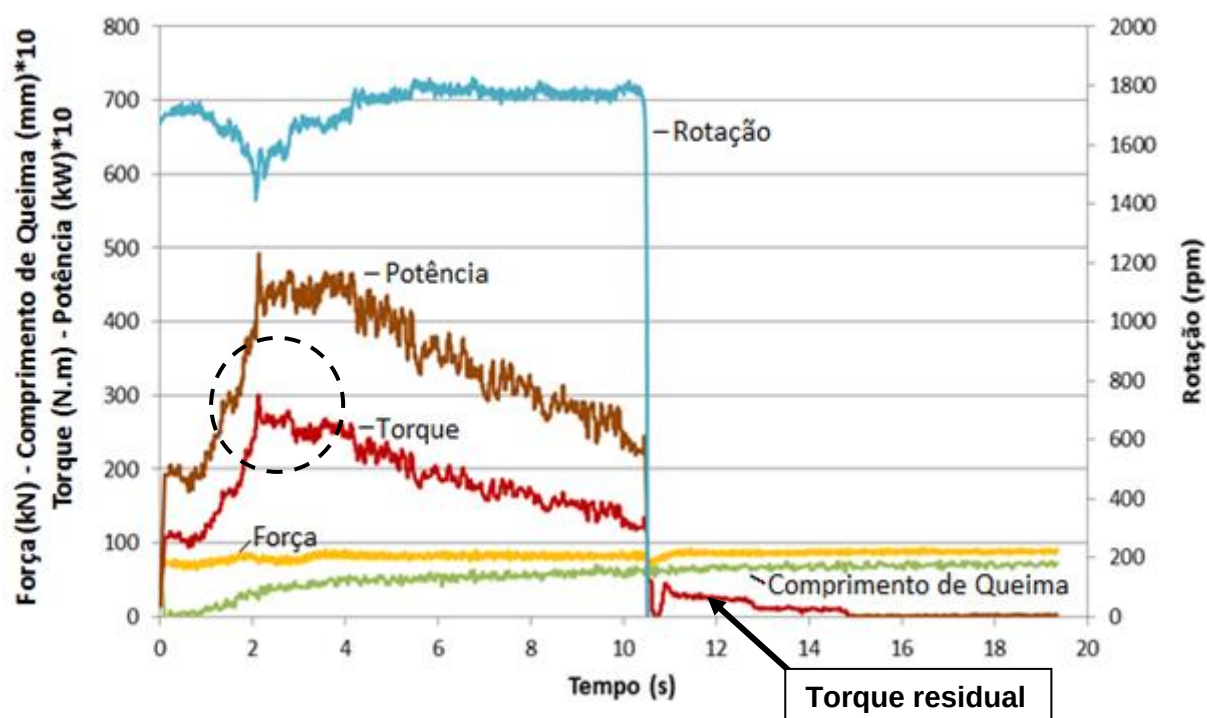


Figura 4. 6 – Evolução do torque, força axial sobre o pino, comprimento de queima, rotação e potência mecânica para o ensaio 10 (Amostra 31610; 80 kN, FN de 1 mm, FR de 2,7 mm e Cq de 7 mm)

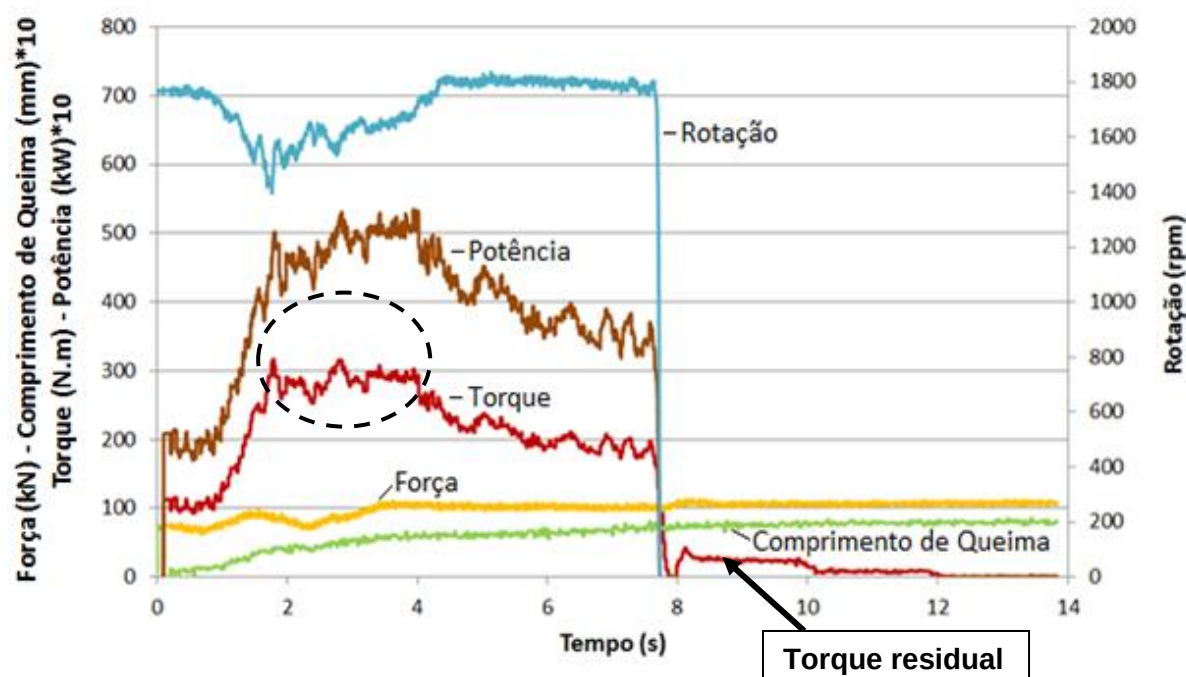


Figura 4. 7 – Dados relativos ao ensaio 11 (Amostra 31611; 100 kN, FN de 1 mm, FR de 3,3 mm e Cq de 7 mm).

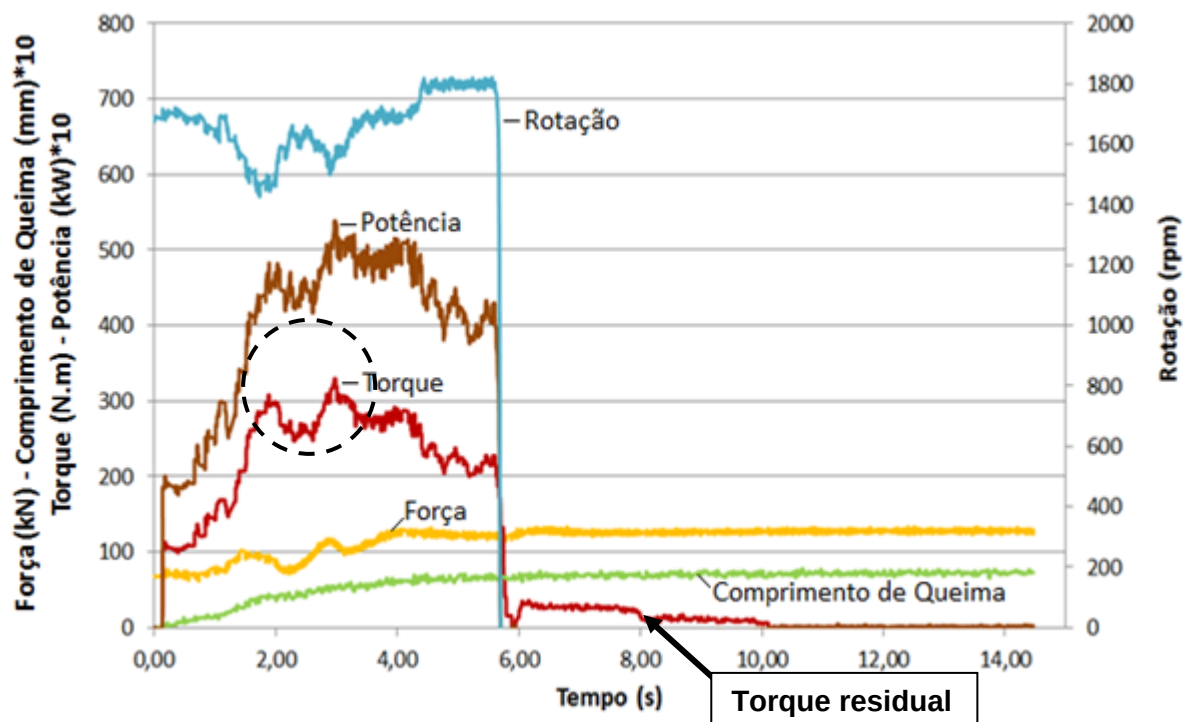


Figura 4. 8 – Torque, força axial, comprimento de queima, rotação e potência mecânica durante o ensaio 12 (Amostra 31612; 120 kN, FN de 1 mm, FR de 2,8 mm, 1700 rpm e Cq de 7 mm)

É possível analisar através das Figs. de 4.1 a 4.8 que à medida que se aumenta a força axial selecionada, o torque e a potência também aumentam assim como a velocidade de consumo do material do pino.

Nos ensaios 1, 2 e 3 deste trabalho não foram observados picos de torque elevados como mostram as Figs. 4.1, 4.2 e 4.3. Já nos ensaios apresentados nas Figs. 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, foram observados picos de torque bastante acentuados (observados através dos círculos segmentados), os quais ocorreram nos ensaios onde houve o aumento da folga nominal em virtude da deformação da peça de restrição.

No caso do ensaio 4 não havia sido predeterminada nenhuma folga, mas devido à deflexão das barras de restrição ocorreu folga, gerando um fluxo de material plástico por entre a peça de retenção e o bloco de reparo, como será mostrado na seção relativa às macrografias.

A folga em excesso entre bloco e peça de retenção provoca o aumento da profundidade do furo, o que faz com que a distância entre as paredes do furo e do pino diminuam, aumentando assim a área de contato e por consequência o atrito e por fim aumentando o torque resistivo.

Nota-se nas figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, que o torque resistivo gerou inicialmente uma acentuada perturbação nas curvas de rotação, caracterizada por uma significativa queda da mesma. Isto ocorreu devido à folga existente entre o pino e a peça de retenção (Fig. 3.19), que mesmo sendo aumentada com a modificação do tronco de cone do pino, mostrada na Fig. 3.18, não foi suficiente para evitar elevados torques resistivos.

O sistema antitravamento implementado atua no sentido de reduzir a força axial, podendo esta ser reduzida em até 60 kN, de modo a reestabelecer a rotação programada para que os ensaios ocorram sem travamento.

A manutenção da força pelo sistema antitravamento pode ser vista através de variações das curvas de força nos momentos iniciais dos reparos, como mostrado nas Figs. 4.7 e 4.8.

É possível observar também que em todos os ensaios, após a interrupção da rotação e começo do estágio de forjamento, há um torque residual (destacado pelas setas). Isso se deveu à existência de pressão hidráulica no sistema de rotação do pino.

Nos estudos referentes a reparos de furos não passantes de MAREGA (2011), Fig. 3.12, utilizando a geometria inicial de pino e bloco mostrados nas Figs. 3.10 e 3.11, não se observam picos de torque característicos de travamento e sinuosidade nas curvas de rotação. Da mesma forma, GONTIJO (2012) não observou picos de torque e perturbações nas curvas de rotação nos seus experimentos como pode ser observado na Fig. 3.13.

4.2 Tempos de processamento

Ainda analisando os gráficos plotados, nota-se uma diminuição do tempo de reparo à medida que a força axial é aumentada. Comparando os tempos de reparo dos testes realizados sem folga entre as peças de retenção e a peça a ser reparada (Figs. 4.1 a 4.8), verifica-se uma redução do tempo de reparo de 13,38 segundos entre o ensaio de menor força axial (60 kN) e o ensaio de maior força axial aplicada (120 kN), o que pode ser melhor observado na Fig. 4.9.

Segundo MEYER (2003) e também citado por GONTIJO (2012), a diminuição nos tempos de reparo ocorrem devido ao aumento do atrito entre as superfícies. Quanto maior a força de contato entre os dois corpos, maior a força de atrito, maior é a taxa de aquecimento e menor o tempo de soldagem entre as superfícies em movimento relativo.

Os ensaios cujos calços foram introduzidos no sentido de gerar uma folga de 1,0 mm (Fig. 4.5 a 4.8), apresentaram também uma redução do tempo de processamento em 11,86

segundos entre o ensaio de menor força axial (60 kN) e o ensaio de maior força axial aplicada (120 kN) como é mostrado na Fig. 4.9.

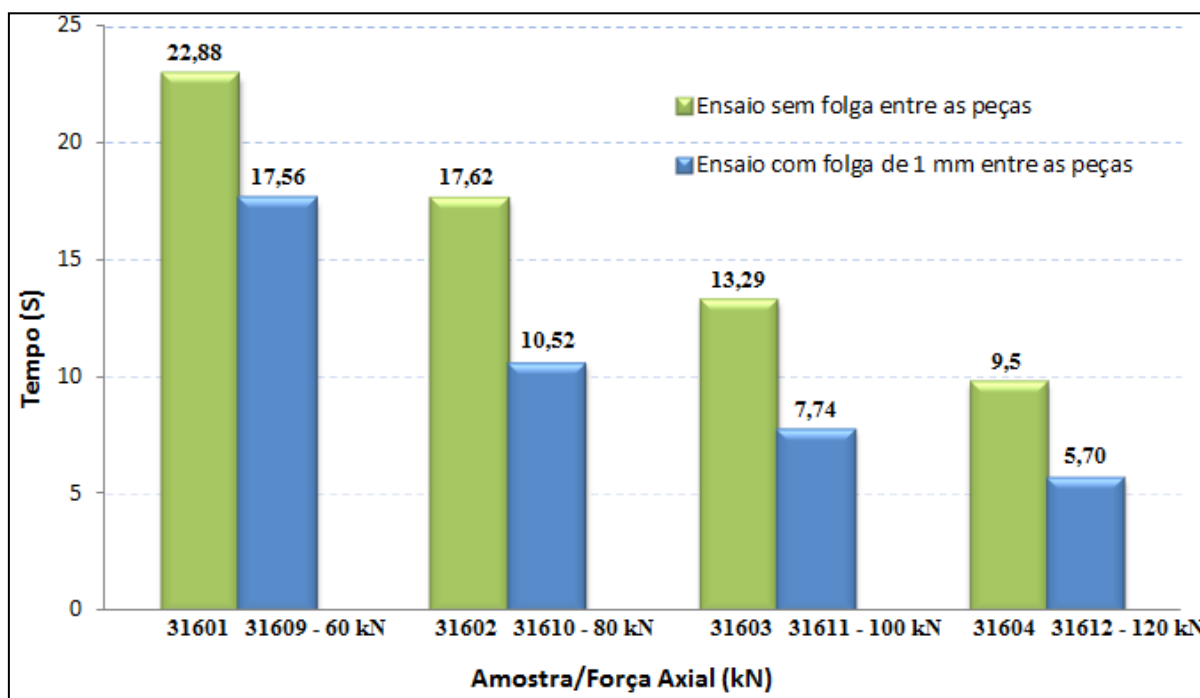


Figura 4. 9 – Comparativo entre os tempos de reparo dos ensaios sem e com folga

Comparando os ensaios sem folga e com folga, observa-se que os tempos de ensaio sem folga, com geração de *flash* superior, são maiores que os tempos de ensaio com folga, com geração de *flash* superior e inferior (Fig. 4.9).

Acredita-se que essa redução de tempo aconteça em virtude da menor resistência ao escoamento de material plastificado pela somatória das folgas superiores e inferiores.

4.3 Áreas das ZTA geradas

As áreas das ZTA geradas foram calculadas através do programa *Image J*. O programa possui ferramenta que permite delinear a área destacada pelo ataque químico e através de uma medida de referência fornecida pelo operador pode-se calcular a área.

A figura 4.10 mostra as ZTA das amostras 31601 a 31604 que foram ensaiadas sem folga entre a peça de retenção e o bloco. Vê-se nessa figura o contorno das ZTA (em amarelo), executado pelo programa o que já permite uma comparação visual das áreas.

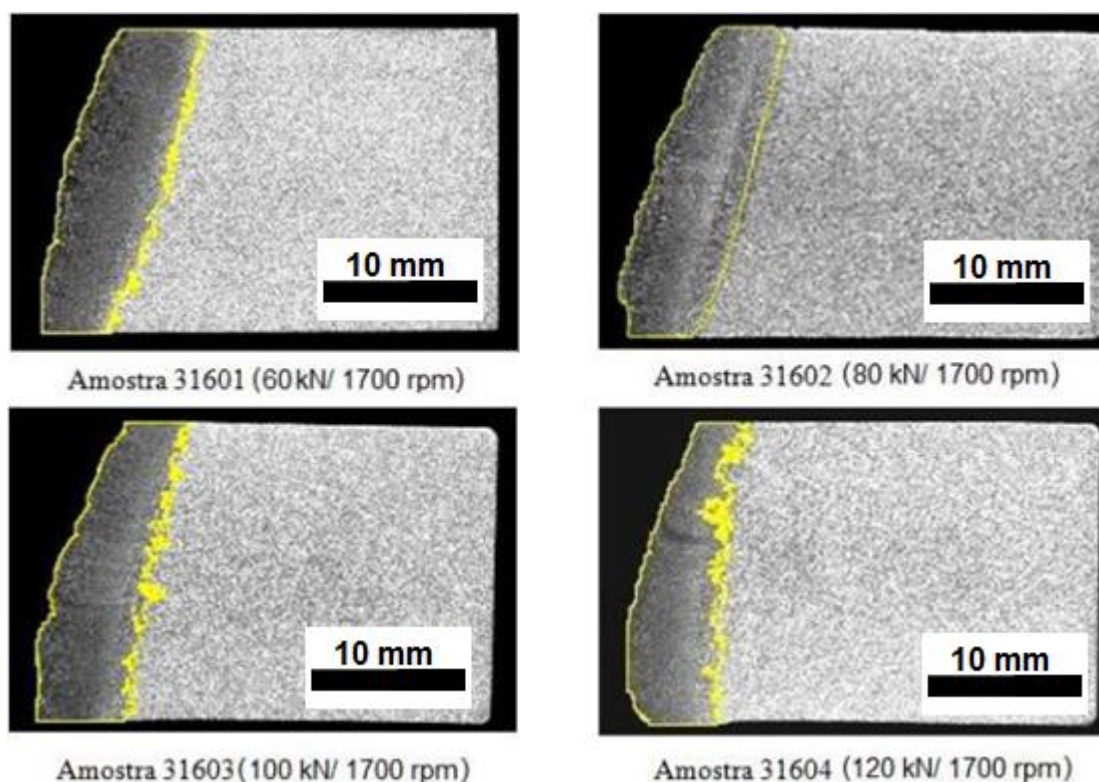


Figura 4. 10 – Imagem das áreas das ZTA circundadas em amarelo, feitas nas amostras dos ensaios onde não houve a presença de calços

As áreas calculadas das ZTA apresentadas na Fig. 4.10 são mostradas na Tab.4.2, onde se vê claramente que há um decréscimo da área correspondente à ZTA da amostra 31601 para a 31604.

Tabela 4. 2 – Medidas das áreas das ZTA, cujas amostras foram ensaiadas sem o uso de calços

Amostra	Área 1 [mm ²]	Área 2 [mm ²]	Área 3 [mm ²]	Área 4 [mm ²]	Área 5 [mm ²]	Área 6 [mm ²]	Área 7 [mm ²]	Média [mm ²]	Desv. Padrão
31601	116,9	117,1	115,5	117,3	117,4	117,2	117,6	117,2	0,6
31602	114,9	114,7	114,8	114,6	115,0	115,0	114,9	114,9	0,1
31603	109,5	109,6	109,8	107,2	108,4	110,4	108,2	109,5	1,1
31604	82,6	82,6	84,4	84,6	83,6	83,1	83,0	83,1	0,8

Uma análise conjunta da tabela 4.2 com a Fig. 4.10 mostra que há uma redução da área da ZTA com a diminuição do tempo de processamento à medida que a força axial pré-selecionada aumenta.

Os ensaios das amostras 31609 a 31612 foram realizados com a presença de folga nominal de 1,0 mm entre a peça de retenção e o bloco. Pode ser visto na Fig. 4.11 que estes ensaios apresentaram os menores tempos de processamento, gerando as ZTA com as menores áreas dentre os reparos realizados. Isso é visto através da média das áreas na Tab. 4.3.

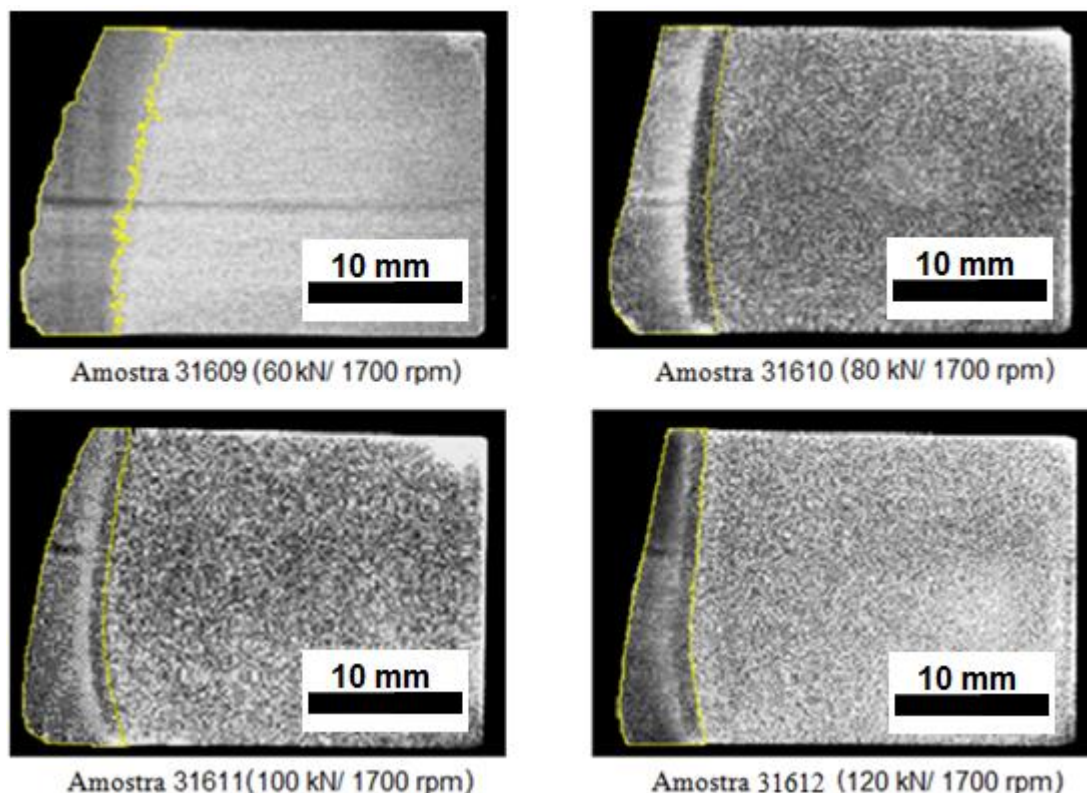


Figura 4. 11 – Imagem das áreas das ZTA circundadas em amarelo, feitas nas amostras cujos ensaios foram realizados com um calço de espessura 1,0 mm

Tabela 4. 3 – Medidas das áreas das ZTA, cujas amostras foram ensaiadas com o uso de calços de espessura 1,0 mm

Amostra	Área 1 [mm ²]	Área 2 [mm ²]	Área 3 [mm ²]	Área 4 [mm ²]	Área 5 [mm ²]	Área 6 [mm ²]	Área 7 [mm ²]	Média [mm ²]	Desv. Padrão
31609	105,1	106,4	104,9	106,0	107,6	107,6	107,5	106,4	1,1
31610	104,0	103,9	103,3	103,4	103,9	103,7	103,6	103,7	0,2
31611	84,4	84,6	84,4	83,3	84,4	83,9	84,5	84,2	0,4
31612	72,4	72,3	72,6	72,0	72,5	72,4	72,3	72,4	0,1

Os ensaios das amostras 31613 a 31616 foram realizados com a presença de folga nominal de 0,5 mm entre a peça de retenção e o bloco. Embora não se tenha podido adquirir os tempos de processamento para estes ensaios (13 a 16) é possível notar através das regiões delimitadas em amarelo mostradas na Fig. 4.12 e através das médias apresentadas na Tab.4.4 que as áreas das ZTA apresentam valores intermediários entre as áreas dos ensaios onde não se usou calços e dos ensaios realizados com folga nominal de 1,0 mm. Isso sugere que os tempos de processamento sejam intermediários.

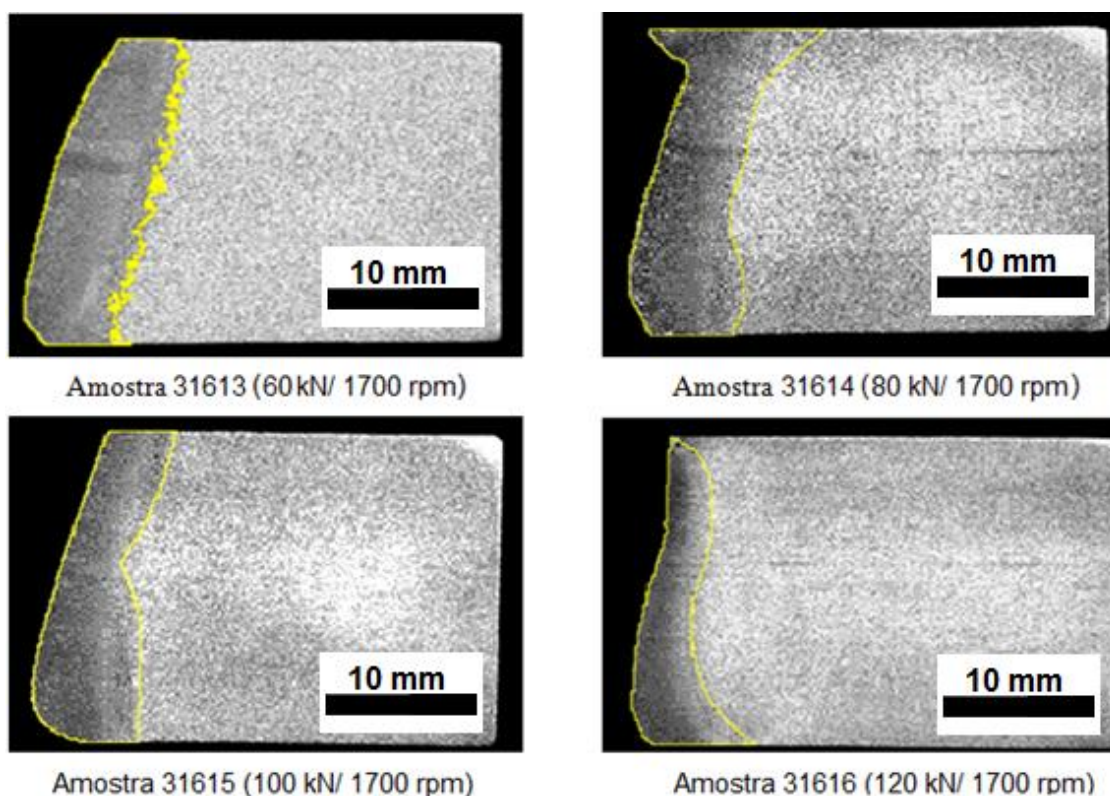


Figura 4. 12 – Imagem das áreas das ZTA circundadas em amarelo, feitas nas amostras cujos ensaios foram realizados com um calço de espessura 0,5 mm

Tabela 4. 4 – Medidas das áreas das ZTA, cujas amostras foram ensaiadas com o uso de calços de espessura 0,5 mm

Amostra	Área 1 [mm ²]	Área 2 [mm ²]	Área 3 [mm ²]	Área 4 [mm ²]	Área 5 [mm ²]	Área 6 [mm ²]	Área 7 [mm ²]	Média [mm ²]	Desv. Padrão
31613	114,5	114,4	113,6	114,0	114,5	114,4	114,7	114,4	0,3
31614	113,7	113,5	113,0	113,1	112,5	111,5	113,2	113,1	0,7
31615	97,5	96,8	97,3	96,2	96,8	97,3	97,3	97,3	0,4
31616	62,1	62,3	62,2	62,2	61,4	61,6	62,2	62,2	0,3

Os ensaios das amostras 31617 e 31618 foram realizados com força de 120 kN e comprimento de queima de 9,0 mm. A amostra 31617 foi ensaiada com a utilização de calços de espessura de 1,0 mm e a amostra 31618 com calços de 0,5 mm de espessura. A Fig. 4.13 mostra as áreas das ZTA desses ensaios e na Tab.4.5 são apresentados os valores das áreas medidas.

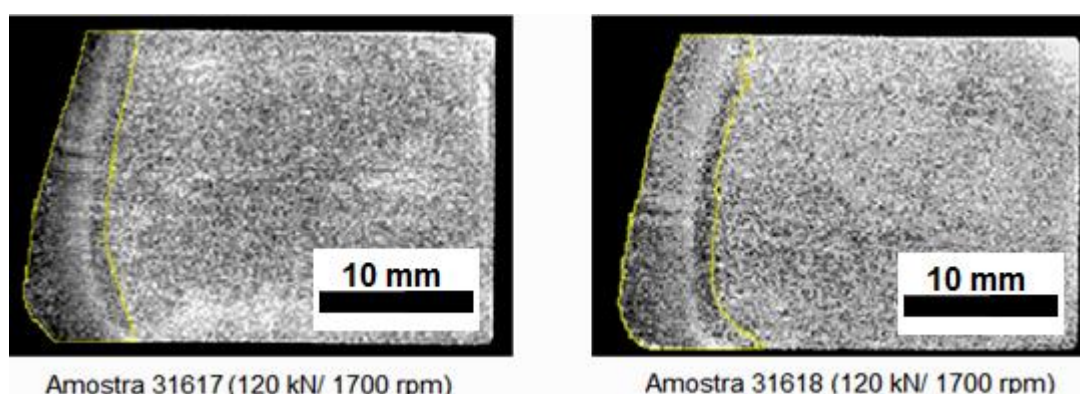


Figura 4. 13 – Imagem das áreas das ZTA circundadas em amarelo, feitas nas amostras cujos ensaios foram realizados com um calço de espessura 1,0 e 0,5 mm, respectivamente

Tabela 4. 5 – Medidas das áreas das ZTA, cujas amostras foram ensaiadas com força de 120 kN, comprimento de queima de 9 mm e o uso de calços de 1,0 e 0,5 mm de espessura respectivamente

Amostra	Área 1 [mm ²]	Área 2 [mm ²]	Área 3 [mm ²]	Área 4 [mm ²]	Área 5 [mm ²]	Área 6 [mm ²]	Área 7 [mm ²]	Média [mm ²]	Desv. Padrão
31617	85,6	85,1	84,5	84,8	85,1	85,2	84,8	85,1	0,3
31618	102,2	102,4	101,1	101,0	101,8	102,7	103,1	102,2	0,7

Tendo em mente que os ensaios das amostras 31601 a 31616 foram realizados com valores de rotação fixos e valores de força axial distintos, ao se analisar as médias das áreas dentro de uma mesma tabela, é possível observar a diminuição destas áreas à medida em que se aumenta o valor da força axial.

A análise geral das áreas medidas e dos tempos de processamento de todos os ensaios realizados (Tabs. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5) permite afirmar que quanto maior a força de contato entre os dois corpos, maior a força de atrito, maior é a taxa de aquecimento e menor o tempo de soldagem entre as superfícies em movimento relativo, o que está de acordo com MEYER (2003), PIRES (2007) e GONTIJO (2012). ELLIS (1972) também

mostrou em seus estudos que forças axiais mais elevadas produzem estreitamento das ZTA.

Para melhor análise da extensão das áreas das ZTA em função da força axial, foram comparados os valores das áreas médias (observadas nas Tabs.: 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5), como mostra a Fig. 4.14.

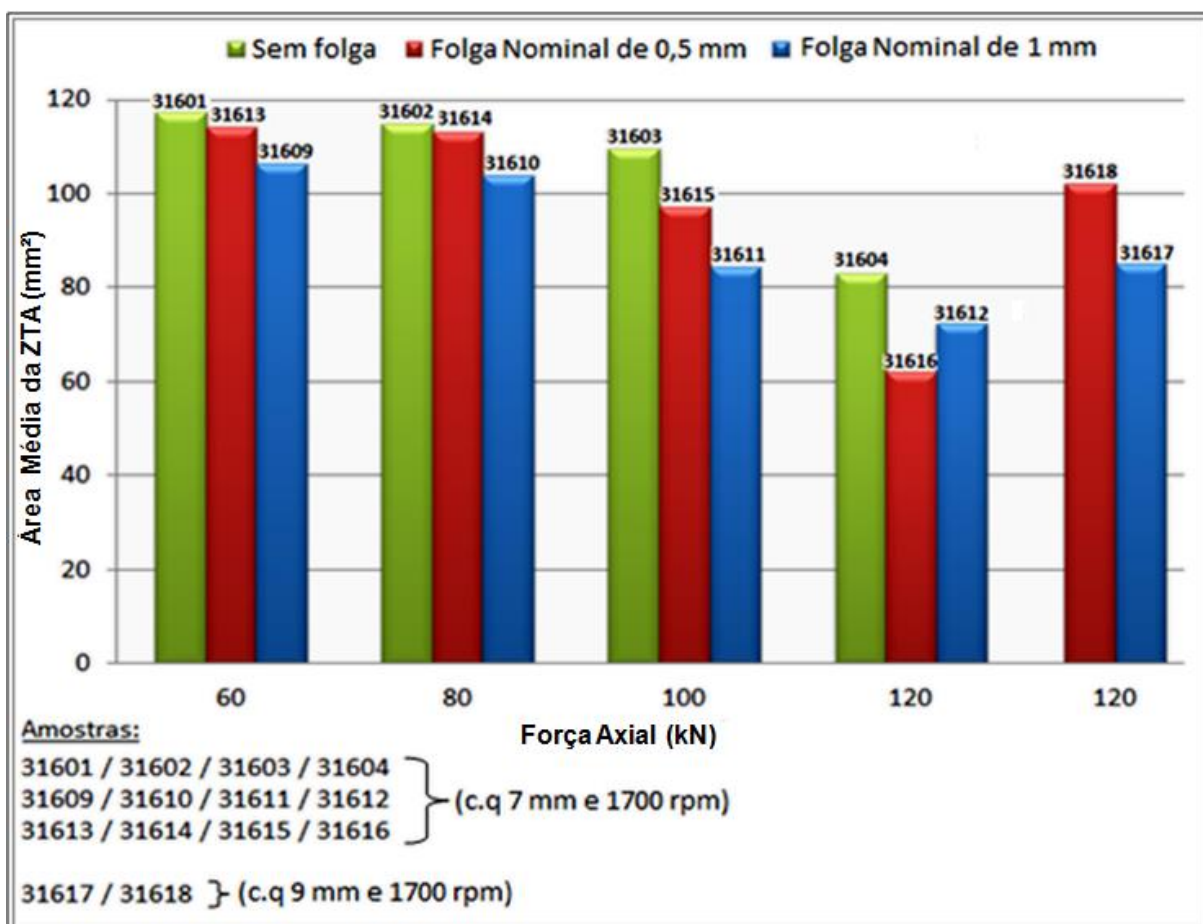


Figura 4. 14 – Extensão das áreas das ZTA das amostras ensaiadas sem folga e com folga de 0,5 e 1,0 mm em função da força axial aplicada

A diminuição das áreas da ZTA e do tempo de reparo parece ocorrer também nos ensaios com as amostras 31617 e 31618, sendo ambos os ensaios submetidos à mesma força (120 kN), mas com folgas diferentes o que reafirma a influência das dimensões das folgas nos tempos de reparo das amostras.

A análise das áreas das ZTA mostradas na Fig. 4.14 mostra que entre os ensaios realizados com força axial de 120 kN, a amostra 31616 apresenta a menor área comparando-se às áreas das amostras 31604 e 31613.

Foi então realizada uma análise das barras de restrição, onde foi observada a deformação das mesmas após todos os ensaios realizados, como mostrado na Fig. 4.15. Devido à deflexão das barras de restrição, não houve controle sobre a espessura da folga nominal, aumentando assim a quantidade de material escoado por esta abertura.

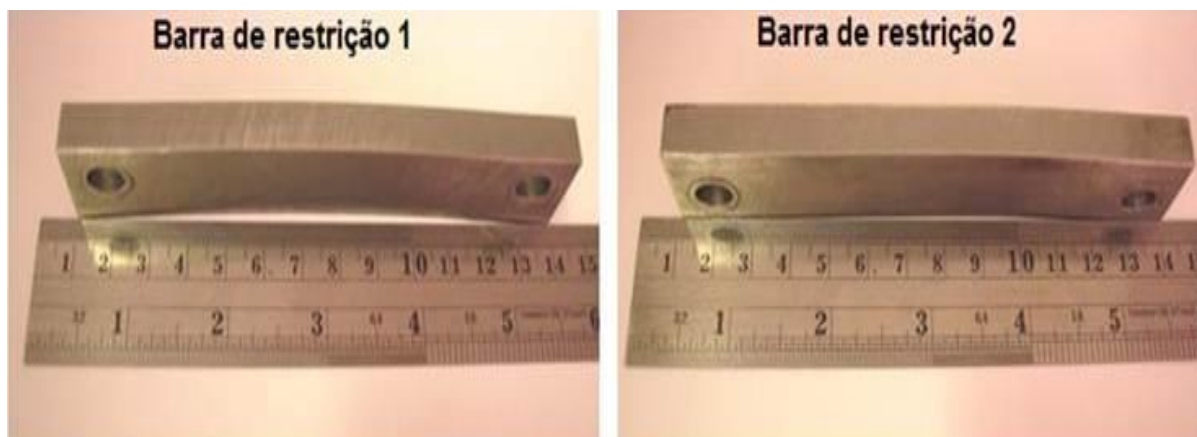


Figura 4. 15 – Imagem da deflexão das duas barras de restrição utilizadas para o controle da folga entre as peças após os ensaios

A título de investigação, foi realizada a medição da espessura da folga final produzida (folga real) após a soldagem, na região entre o bloco reparado e a peça de retenção. Os resultados desta investigação são apresentados na Tab.4.6.

Tabela 4. 6 – Medidas das folgas nominais e folgas reais, seguidos das forças axiais usadas nos ensaios

Ensaio	Identificação da Amostra	Força Axial [kN]	Folga Nominal [mm]	Folga Real [mm]
4	31604	120	-	1,90
9	31609	60	1,0	1,90
10	31610	80	1,0	2,70
11	31611	100	1,0	3,30
12	31612	120	1,0	2,80
13	31613	60	0,5	1,00
14	31614	80	0,5	1,90
15	31615	100	0,5	2,00
16	31616	120	0,5	3,00
17	31617	120	1,0	4,80
18	31618	120	0,5	3,50

Através da análise da tabela 4.6 pode-se constatar que o limite imposto para a folga nominal correspondente à espessura do calço, não foi mantido. Folgas maiores que as programadas ocorreram devido à deflexão das barras de restrição, fazendo com que o material escoado empurrasse o bloco de reparo em sentido oposto à movimentação do pino consumível. Ainda é possível observar que os maiores folgas ocorreram nos ensaios com aplicação das maiores forças axiais. Nota-se também que houve folga até mesmo no ensaio 4, onde não havia folga pré-selecionada.

O excesso de folga provoca um menor fluxo de material escoado para a região superior da interface pino/bloco, podendo gerar falhas de preenchimento, que podem nuclear trincas e/ou acelerar processos corrosivos. Falhas de preenchimento na região superior da interface pino/bloco são observadas na caracterização metalográfica, apresentada a seguir.

4.4 Caracterização Metalográfica

4.4.1 Aspectos Macrográficos

As macrografias obtidas das amostras 31601 a 31604 da Tab.3.2 são apresentadas na Fig. 4.16.

As amostras referem-se ao processo de reparo no qual foi pré-estabelecido o íntimo contato entre a peça de retenção e o bloco com furo passante, de modo que não houvesse descontinuidade entre as paredes internas das peças, simulando um furo cego. Através de análise visual das amostras, Fig. 4.16, é possível observar que não há falhas ao longo da interface pino/bloco. Nota-se também o desenvolvimento de uma ZTA adjacente à linha de união, no material do bloco de reparo. Na amostra 31604 (120 kN, FN de 0 mm, FR de 1,90 mm e Cq 7,0 mm) verificou-se o escoamento de material viscoplástico entre o bloco e a peça suporte (Fig. 4.16) devido a uma descontinuidade entre as paredes da peça de retenção e as paredes do furo do bloco. Essa descontinuidade não prevista assim, como a saída do *flash* por entre as peças, não gerou falta de preenchimento na região superior da interface pino/bloco. Através da tabela 4.6 é possível ver a espessura da folga real provocada entre as peças, que no caso foi de 1,90 mm.

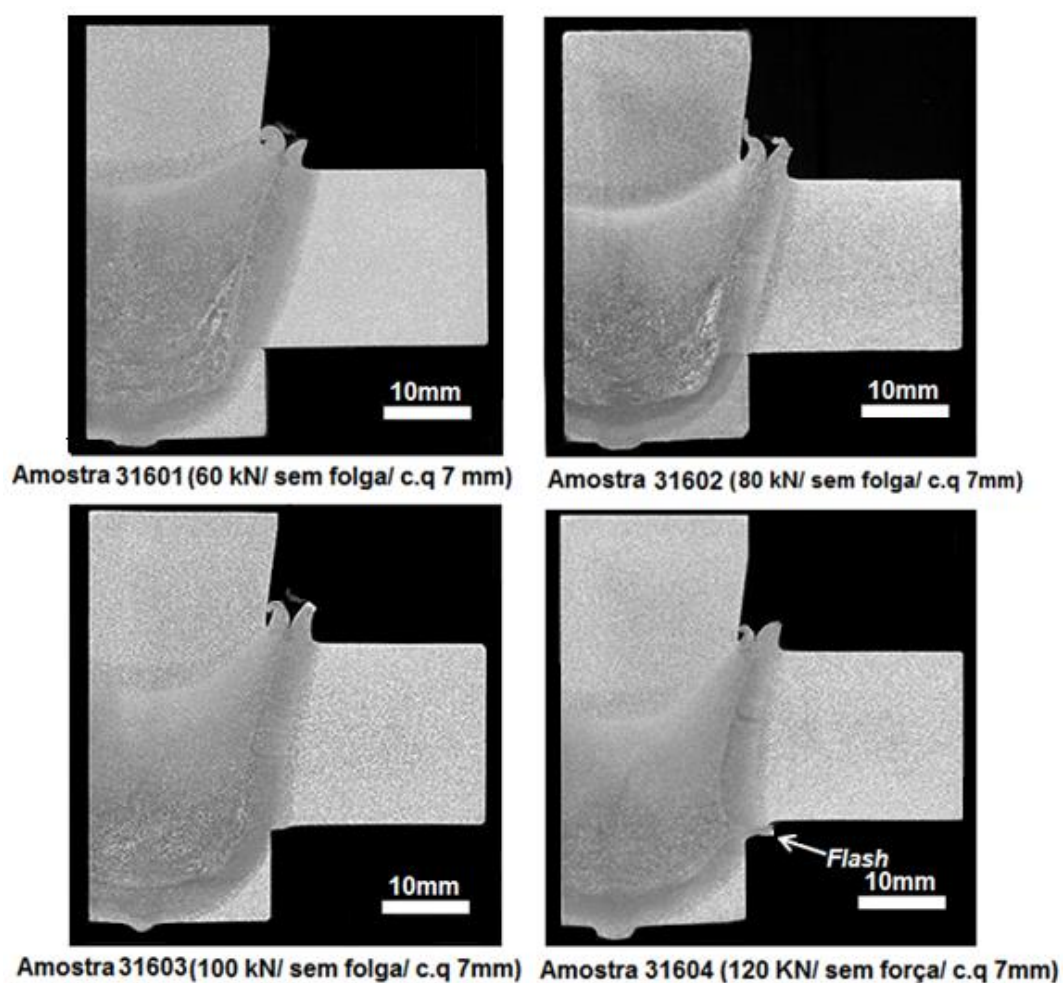


Figura 4. 16 – Macrografia das amostras reparadas sem a presença de calço

As macrografias referentes às amostras 31609 a 31612, descritos na Tab. 3.3, são apresentadas na Fig. 4.17, obtidas após reparos com calços com 1,0 mm de espessura. Através da análise das imagens é possível notar com melhor clareza a tendência à redução das ZTA dos blocos à medida que a força axial aumenta.

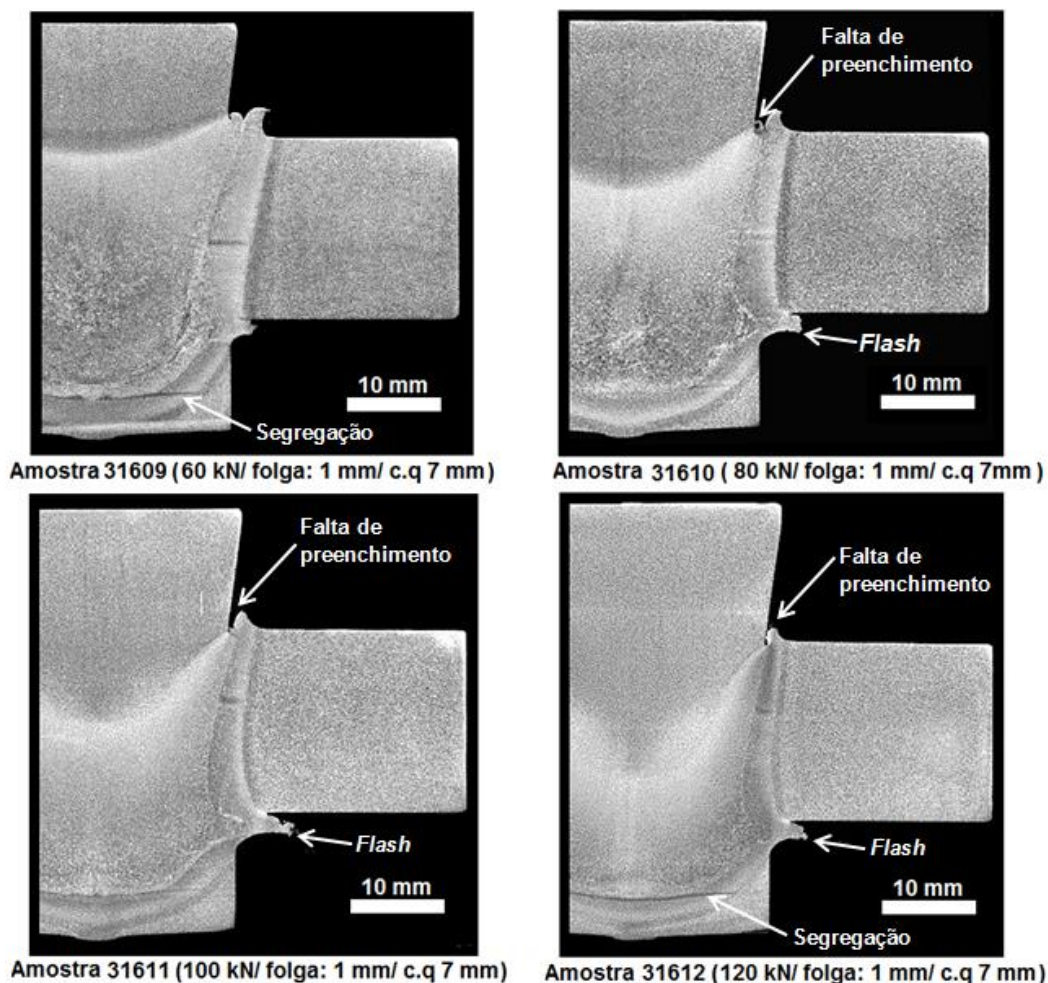


Figura 4. 17 – Macrografia das amostras 31609 a 31612 ensaiadas com a presença de calço de 1,0 mm de espessura

Nas macrografias 31609 (60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,90 mm e Cq de 7,0 mm) e 31612 (120 kN, FN de 1,0 mm, FR de 2,80 mm e Cq de 7,0 mm), Fig. 4.17, é possível ver linhas escuras que atravessam a peça de retenção. Estas linhas são regiões de segregação do aço, ou seja, regiões com concentração de impurezas do metal. Estas linhas tiveram sua origem durante a fabricação (laminação a quente) das chapas utilizadas como material base para a confecção das peças de retenção.

Observando a imagem da amostra 31609 (60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,90 mm e Cq de 7,0 mm), Fig. 4.17, verifica-se uma união metalúrgica completa sem nenhum defeito aparente. Já nas amostras 31610 (80 kN, FN de 1,0 mm, FR de 2,70 mm e Cq de 7,0 mm), 31611 (100 kN, FN de 1,0 mm, FR de 3,30 e Cq de 7,0 mm) e 31612 (120 kN, FN de 1,0 mm, FR de 2,80 mm e Cq de 7,0 mm), nota-se a falta de preenchimento (vazio) na região superior da interface pino/ bloco. É possível também notar uma maior quantidade de *flash* na região entre o bloco e a peça de retenção com aplicações maiores de forças axiais.

Devido à falta de controle da folga, houve uma expulsão maior de material plastificado através da abertura entre as peças, resultando na insuficiência de material para o completo preenchimento na região superior.

As macrografias referentes às amostras 31613 a 31616, descritos na Tab. 3.4, são apresentadas na Fig. 4.18, obtidas após reparos com calços com 0,5 mm de espessura. Assim como na Fig. 4.17, é possível observar também na Fig. 4.18 o estreitamento das ZTA à medida que se aumenta a força axial. As amostras 31613 (60 kN, FN de 0,5 mm, FR de 1,0 mm e Cq de 7,0 mm) e 31615 (100 kN, FN de 0,5 mm, FR de 2,0 mm e Cq de 7,0 mm) apresentam uma completa união metalúrgica, não apresentando vazios aparentes. Entretanto as amostras 31614 (80 kN, FN de 0,5 mm, FR de 1,90 mm e Cq de 7,0 mm) e 31616 (120 kN, FN de 0,5 mm, FR de 3,0 mm e Cq de 7,0 mm) apresentam falta de preenchimento na região entre o pino/peça de retenção e região superior da interface pino/bloco respectivamente.

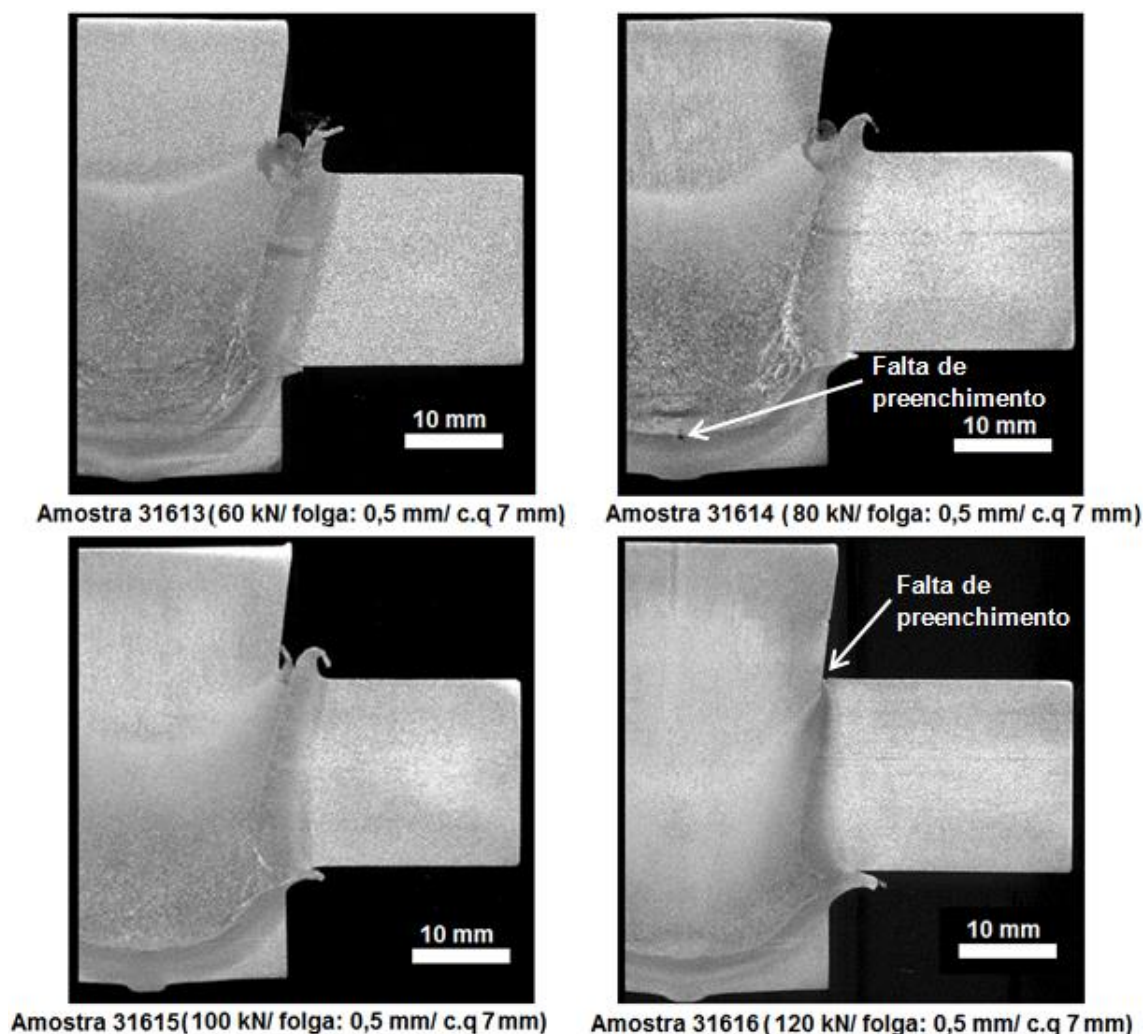


Figura 4. 18 – Macrografia das amostras 31613 a 31616, ensaiadas com a presença de calço de 0,5 mm de espessura

As macrografias referentes às amostras 31617 (120 kN, FN de 1,0 mm, FR de 4,80 mm e Cq de 9,0 mm) e 31618 (120 kN, FN de 0,5 mm, FR de 3,50 mm e Cq de 9,0 mm) descritos na Tab. 3.5, são apresentadas na Fig. 4.19, após reparos com força axial de 120 kN e com calços de espessura de 0,5 e 1,0 mm. Analisando essas imagens é possível observar que houve completa união metalúrgica na amostra 31618, entretanto na amostra 31617, mesmo com o aumento do comprimento de queima (Cq) para 9,0 mm houve falta de preenchimento na interface superior.

Verificando a tabela 4.6, nota-se que o ensaio da amostra 31617 tinha como folga nominal 1,0 mm de espessura, e após a medida da dimensão final da folga após o reparo, constatou-se que a folga real era de 4,80 mm de espessura, excedendo em 3,80 mm a medida pré-estabelecida. Isso justifica a falta de preenchimento na amostra 31617.

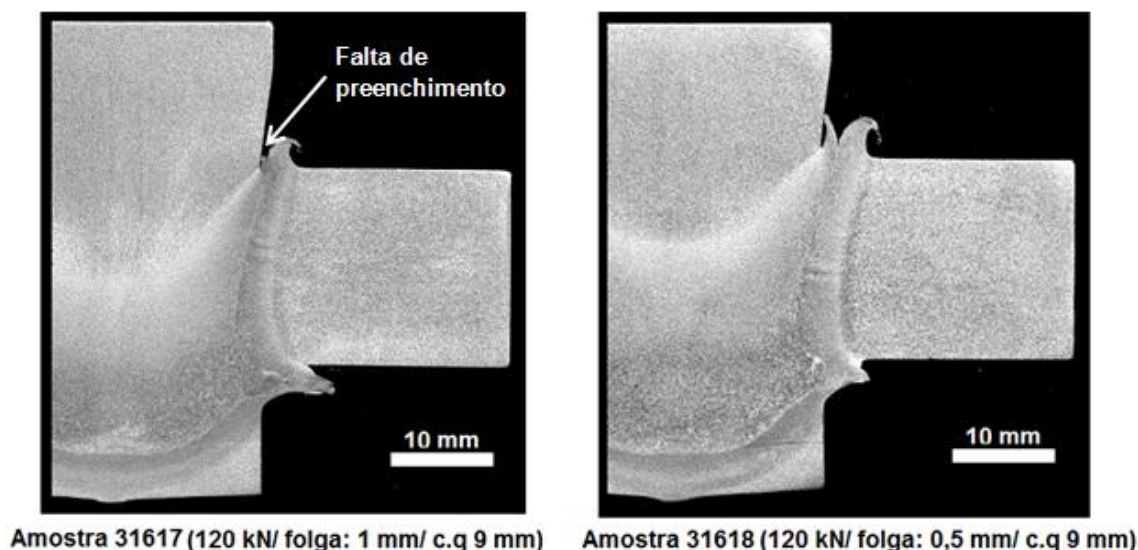


Figura 4. 19 – Macrografia das amostras 31617 a 31618 ensaiadas com a presença de calço de 1,0 e 0,5 mm de espessura respectivamente

Com relação às amostras que apresentaram defeitos na região interfacial superior, é possível observar que os mesmos se deram com as maiores forças axiais aplicadas, forças estas que foram responsáveis por provocar os maiores excessos nas dimensões finais da folga como pode ser constatado na Tab.4.6. Nota-se também, exceto para a amostra 31614 (80 kN, FN de 0,5 mm, FR de 1,90 mm e Cq de 7,0 mm), Fig. 4.18, que não houve defeitos na região inferior da interface pino/peça de retenção em todas as outras amostras.

A peça de retenção usada no reparo da amostra 31614 apresentou uma pequena cavidade em seu centro e, em decorrência desta, houve uma falha de preenchimento no local (ver Fig. 4.18, amostra 31614, indicado pela seta).

GONTIJO (2012) através de medidas de temperatura por termopares dispostos próximo da região correspondente à interface pino/fundo do furo observou que neste local a temperatura produzida é menor em relação às temperaturas medidas no sentido oposto ao fundo do furo. Como relatado no Capítulo 2, subitem 2.5 deste trabalho, o primeiro contato entre pino e o bloco se dá entre a ponta do pino e o fundo do furo usinado, sendo então o local inicial de aquecimento, de modo que este local não recebe calor vindo de outras regiões do bloco durante o processo de soldagem. A ocorrência do defeito apontado pela seta na macrografia referente à amostra 31614, Fig. 4.18, é o somatório do defeito de acabamento da peça de retenção, geração de menor aquecimento e menor escoamento do material do pino neste local.

Embora a amostra 31614 tenha apresentado falta de preenchimento nesta região, a qualidade de reparo não foi comprometida porque uma das vantagens do processo de reparo com a utilização da peça de retenção simulando um furo cego é justamente a eliminação desses defeitos pelo corte da peça de retenção ao final do reparo.

Analisando as micrografias das amostras 31610 (80 kN, FN de 1,0 mm, FR de 2,70 mm e Cq 7,0 mm), 31611 (100 kN, FN de 1,0 mm, FR de 3,3 mm e Cq de 7,0 mm), 31612 (120 kN, FN de 1,0 mm, FR 2,80 mm e Cq 7,0 mm) e também das amostras 31616 (120 kN, FN de 0,5 mm, FR de 3,0 mm e Cq de 7,0 mm) e 31617 (120 kN, FN de 0,5 mm, FR de 4,8 mm e Cq de 9,0 mm) nas figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, respectivamente, é possível observar falhas de preenchimento, destacadas pelos círculos. Essas falhas mostram que não houve fluxo plástico suficiente para o total preenchimento da região superior entre o pino e o bloco, devido à ocorrência de fluxo de material para a região inferior em razão das folgas.

Compreende-se por total preenchimento uma quantidade de material que ultrapasse totalmente a linha segmentada (em vermelho) que corresponde à face superior do bloco a ser reparado, Fig. 4.20.

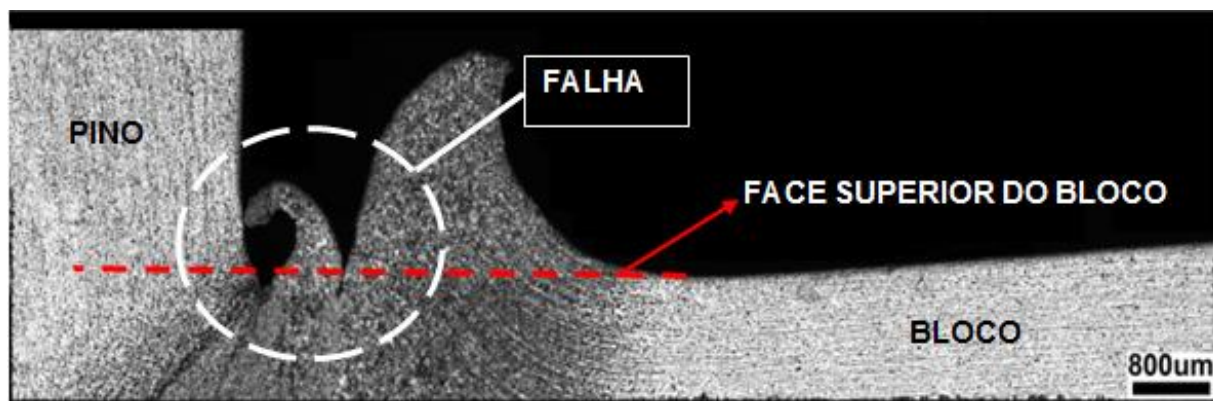


Figura 4. 20 – Falha de preenchimento da amostra 31610 (80 kN, FN de 1,0 mm, FR de 2,70 mm e Cq de 7,0 mm), na região superior entre pino e bloco

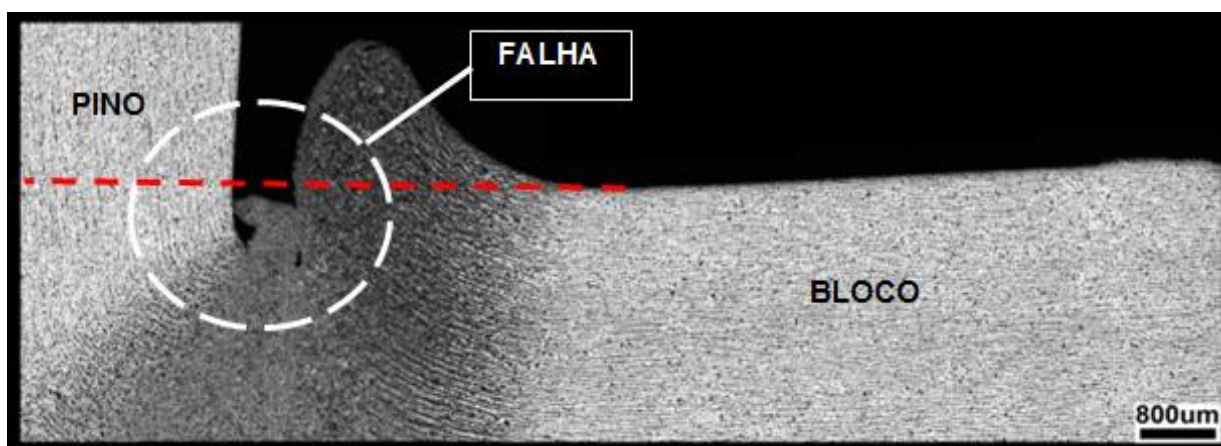


Figura 4. 21 – Falha de preenchimento da amostra 31611 (100 kN, FN de 1,0 mm, FR de 2,90 mm e Cq de 7,0 mm), na região superior entre pino e bloco

X

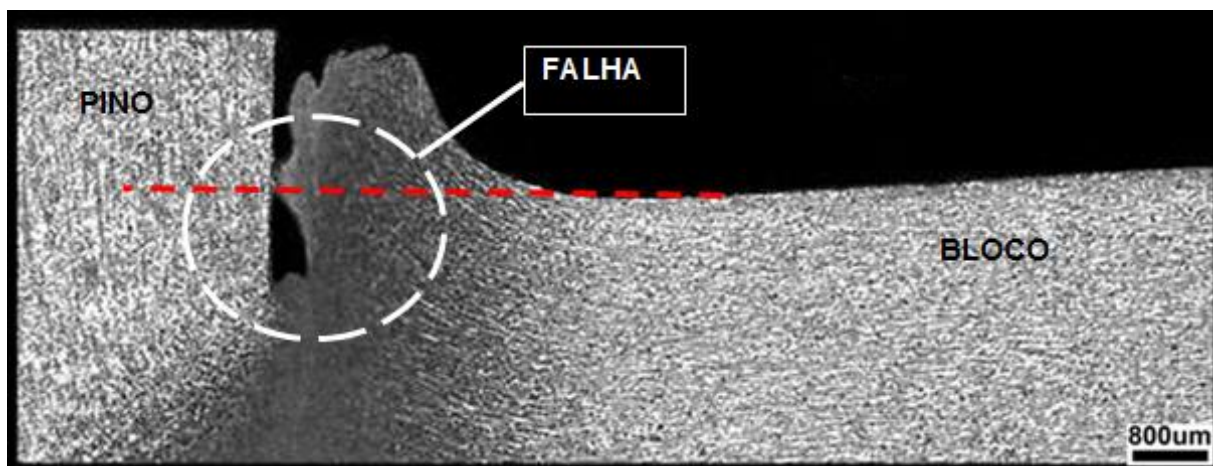


Figura 4. 22 – Falha de preenchimento da amostra 31612 (120 kN, FN de 1,0 mm, FR 2,80 mm e Cq de 7,0 mm), na região superior entre pino e bloco

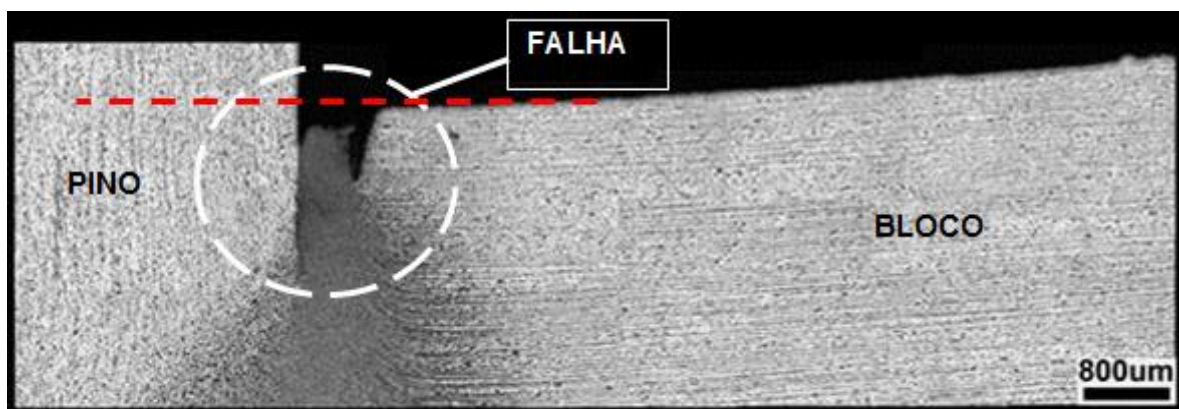


Figura 4. 23 – Falha de preenchimento da amostra 31616 (120 kN, FN de 0,5 mm, FR de 3,0 mm e Cq de 7,0 mm), na região superior entre pino e bloco

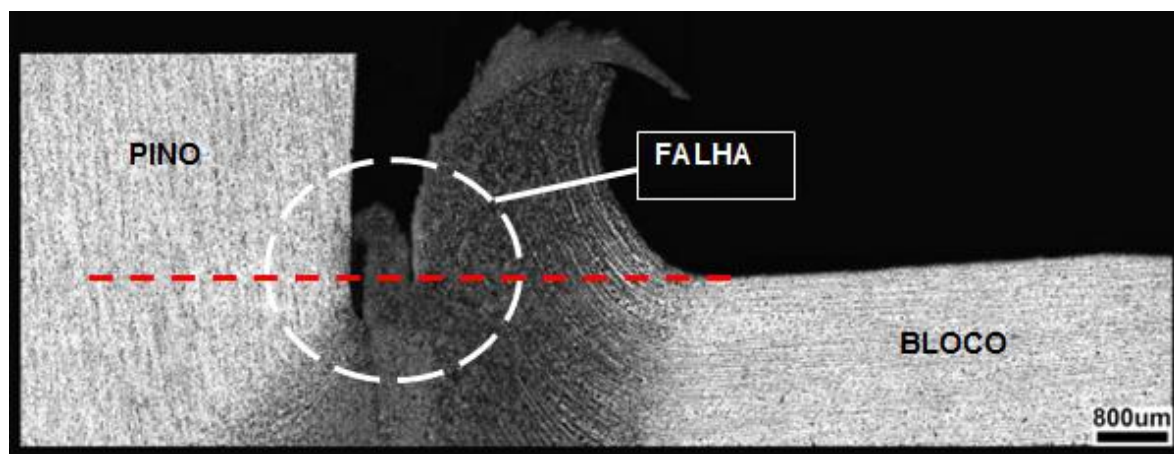


Figura 4. 24 – Falha de preenchimento da amostra 31617 (120 kN, FN de 0,5 mm, FR de 4,80 mm e Cq de 9,0 mm), na região superior entre pino e bloco

As áreas dos *flashes* inferiores foram provocadas por aberturas maiores que as folgas nominais causadas pelos calços de 1,0 e 0,5 mm, em virtude das barras de restrição não suportarem os esforços produzidos o que provocou um excesso de material. Um exercício simples para verificar se não haveria falta de preenchimento na região superior, caso não houvesse ocorrido o excesso de folga, é calcular as áreas dos *flashes* descontando as áreas equivalentes causadas pelas respectivas folgas nominais. Na Fig. 4.25 é mostrado um exemplo com o *flash* produzido na amostra 31617 que tinha como folga nominal pré-determinada 1,0 mm de espessura.

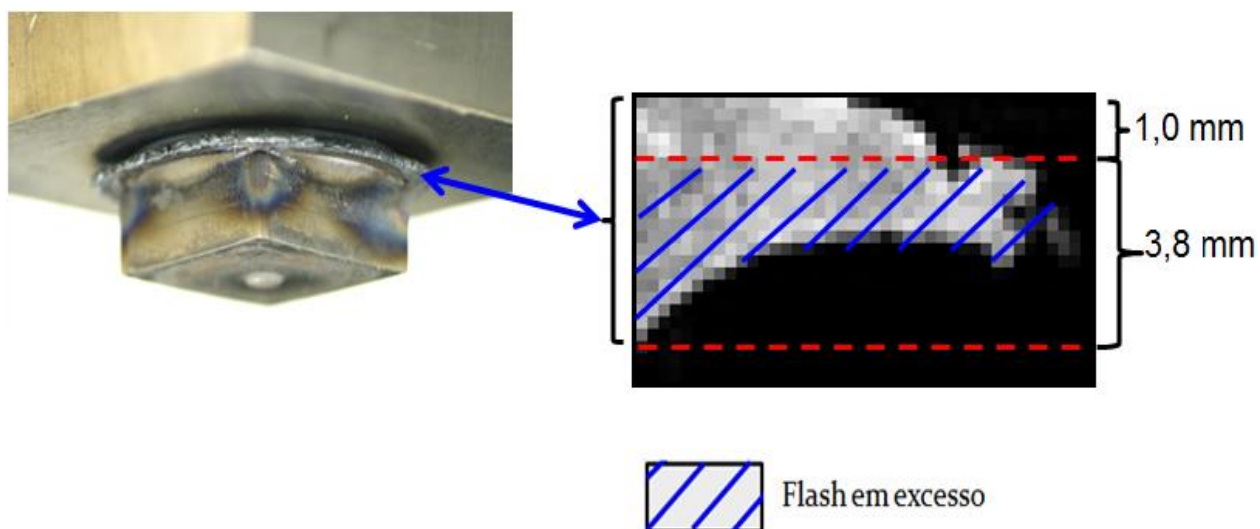


Figura 4. 25 – Na figura da esquerda é sinalizada pela seta azul a imagem do *flash* entre a peça de retenção e o bloco de reparo da amostra 31617, e a direita é apresentada a imagem do material plastificado (*flash*) em corte transversal em maior ampliação, no qual é mostrada a linha hachurada da área de *flash* em excesso e a possível área do *flash* (acima da primeira linha vermelha segmentada), caso a folga nominal mantida tivesse sido mantida

A tabela 4.7 mostra as áreas dos *flashes* escoados através das folgas reais (área do *flash*), as possíveis áreas causadas pelas folgas nominais, as diferenças dessas áreas e as áreas das falhas de preenchimento.

Tabela 4. 7 – Medida das áreas das falhas de preenchimento, das áreas dos flashes produzidas devido à folga real e as medidas das áreas dos flashes produzidos devido a folga nominal ter sido mantida.

Ensaio	Amostra	Força Axial [kN]	Folga Nominal [mm ²]	Folga Real [mm ²]	Área do flash produzido c/ FR [mm ²]	Possíveis Áreas do <i>flash</i> produzido c/ FN de 1 [mm ²]	Área do <i>flash</i> em excesso [mm ²]	Área da falha de preenchimento [mm ²]
10	31610	80	1,0	2,70	20,10	8,90	11,20	$7,17 \cdot 10^{-4}$
11	31611	100	1,0	3,30	27,70	8,70	19,00	$1,22 \cdot 10^{-4}$
12	31612	120	1,0	2,80	16,70	5,40	11,30	$7,23 \cdot 10^{-4}$
16	31616	120	0,5	3,00	45,20	6,00*	39,20	$2,51 \cdot 10^{-3}$
17	31617	120	1,0	4,80	82,00	10,50	71,50	$4,58 \cdot 10^{-3}$

* - Ensaio realizado com folga nominal de 0,50 mm.

Observando a tabela nota-se que, se não houvesse o aumento da folga nominal, não haveria falha de preenchimento porque os excessos produzidos excedem as áreas das falhas de preenchimento da região superior.

4.4.2 Aspectos Micrográficos

Após a verificação das macrografias das amostras, foi realizada a análise micrográfica com o objetivo de observar de forma mais apurada a qualidade da união metalúrgica e as variações microestruturais devido aos efeitos termomecânicos.

A seguir são mostradas as micrografias das interfaces pino/bloco a 5 e a 10 mm em relação à face inferior do bloco das amostras 31601 (Figs. 4.26 e 4.27) e 31602 Fig. 4.28. A totalidade das fotomicrografias das interfaces analisadas ao longo dos dois perfis horizontais é apresentada no Anexo A. No Anexo B são apresentadas as micrografias desde o material do pino até a região do bloco onde não houve alteração da microestrutura original.

A interface pino/bloco foi escolhida para análise por ser um ponto crítico, onde foram observadas as maiores concentrações de defeitos em reparos realizados por MEYER (2003), SOUZA (2006), PIRES (2007) e GONTIJO (2012) em blocos com furos cegos.

A microestrutura mostrada na figura 4.26 revela uma diferença na morfologia da microestrutura do pino junto à interface lateral, onde houve austenitização do material desta região do pino, recristalizando e produzindo grãos equiaxiais de ferrita. Esta camada estreita de grãos de ferrita granulares também foi observada por PIRES (2007) e GONTIJO (2012).

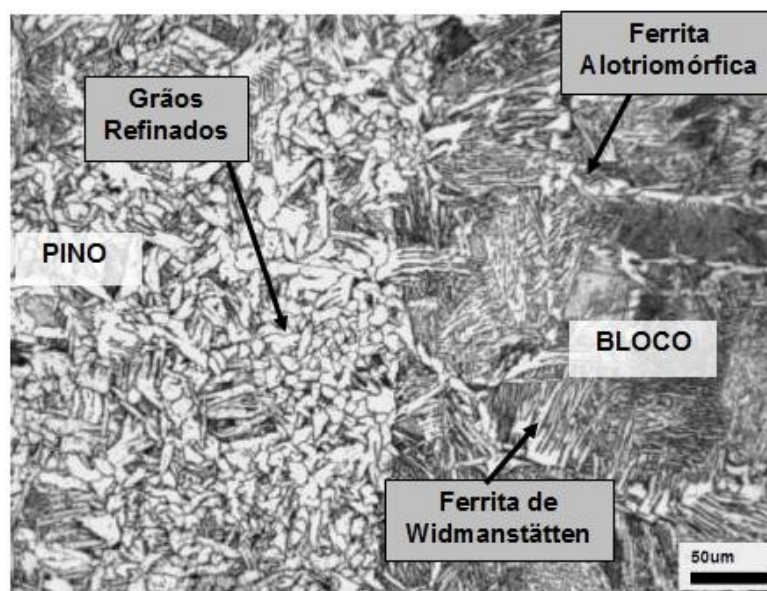


Figura 4. 26 – Micrografia da amostra 31601 correspondente à interface pino/bloco a 5 mm da face inferior do bloco

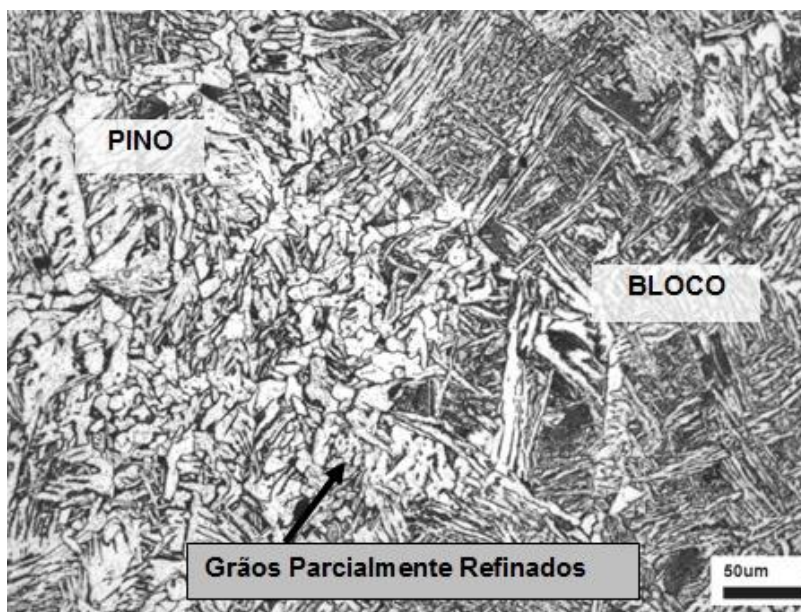


Figura 4. 27 – Micrografia da amostra 31601, correspondente à interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

Foi realizada uma comparação quanto ao tamanho do grão ASTM original do pino e o tamanho do grão no pino na região da interface após o reparo da amostra 31601 (60 kN, FN de 0,0 mm, 1700 rpm e Cq de 7,0 mm). Constatou-se que o tamanho de grão da microestrutura original do pino é igual a ASTM 8, e dos grãos recristalizados na interface apresentaram tamanho maior que 8. Isso pode ser visto comparado a Fig. 4.26 com a Fig. 3.9 (b).

Ainda analisando a fotomicrografia da interface pino/bloco da amostra 31601 (60 kN, FN de 0,0 mm, 1700 rpm e Cq de 7,0 mm), realizada a 5,0 mm da face inferior do bloco (Fig. 4.26), observa-se que esta região tem um posicionamento equivalente ao do termopar T1 na Fig. 2.8 (mostrada no capítulo 2, subitem 2.5). A figura 2.13 mostra as curvas das temperaturas medidas através dos termopares mostrados na Fig. 2.12 no trabalho de GONTIJO (2012). Verificando a curva de temperatura no ponto referente a T1, observa-se que o valor máximo é de cerca de 800 °C. Segundo MODENESI (2012), para temperaturas da ordem de 800 °C a ferrita cresce de forma reconstrutiva no contorno de grão da austenita. Esta ferrita é denominada de ferrita alotriomórfica, e, no resfriamento, a partir desta, ocorre à formação de ferrita de Widmanstätten. A formação destes microconstituintes é favorecida por um maior tamanho de grão da austenita.

Na figura 4.27, obtida a 10 mm da face inferior do bloco, observa-se tanto no pino quanto no bloco a presença de ferritas de morfologia acicular, demonstrando que as

temperaturas são maiores, o que causou a acicularização também da microestrutura do pino.

Há principalmente na microestrutura do bloco, uma estrutura acicular (região mais escura), que poderia ser bainita e/ou martensita.

As micrografias da interface pino/bloco tanto a 5,0 mm, quanto a 10 mm das amostras 31602 a 31618 mostram um comportamento análogo. Foi observado em todas as amostras citadas o domínio de microestrutura acicular (ferrita de Widmanstätten) e ferrita alotriomórfica, tanto no pino quanto no bloco, evidenciando que as temperaturas aportadas nestas interfaces foram semelhantes. Na figura 4.28, referente à mostra 31602, é possível observar o tipo de microestrutura encontra em todas as outras amostras e entre os perfis horizontais investigados (que podem ser vistas no Anexo A).

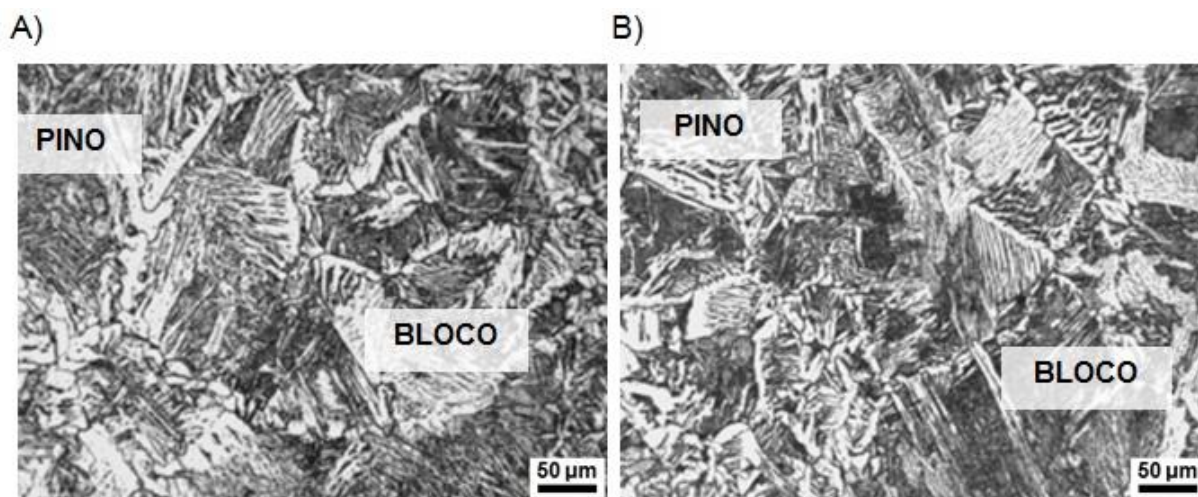


Figura 4. 28 – Micrografias da amostra 31602 (80 kN, FN de 0,0 mm, 1700 rpm e Cq 7,0 mm); (A) a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; (B) a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

Considerando que um problema da técnica de reparo por atrito pode ser a concentração de impurezas na interface soldada, o que pode levar a fratura devido à concentração de tensões, foram feitas análises em microscópio eletrônico de varredura para comparação entre os reparos sem e com folga.

As análises foram realizadas em duas amostras: uma sem folga (amostra 31601; 60 kN, FN 0,0 mm e Cq de 7,0 mm) e uma com folga (amostra 31609; 60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,9 mm e Cq de 7,0 mm).

A investigação ocorreu ao longo de toda a interface pino/bloco das amostras, sendo feitas imagens de três regiões: a) região interfacial superior (que corresponde ao *flash*), b)

região interfacial intermediária do bloco e c) região interfacial inferior do bloco, como pode ser visto nas Figs. 4.29, 4.30, 4.31, 4.33, 4.34 e 4.35.

Na figura 4.29 é apresentada a imagem da região interfacial superior da amostra 31601.

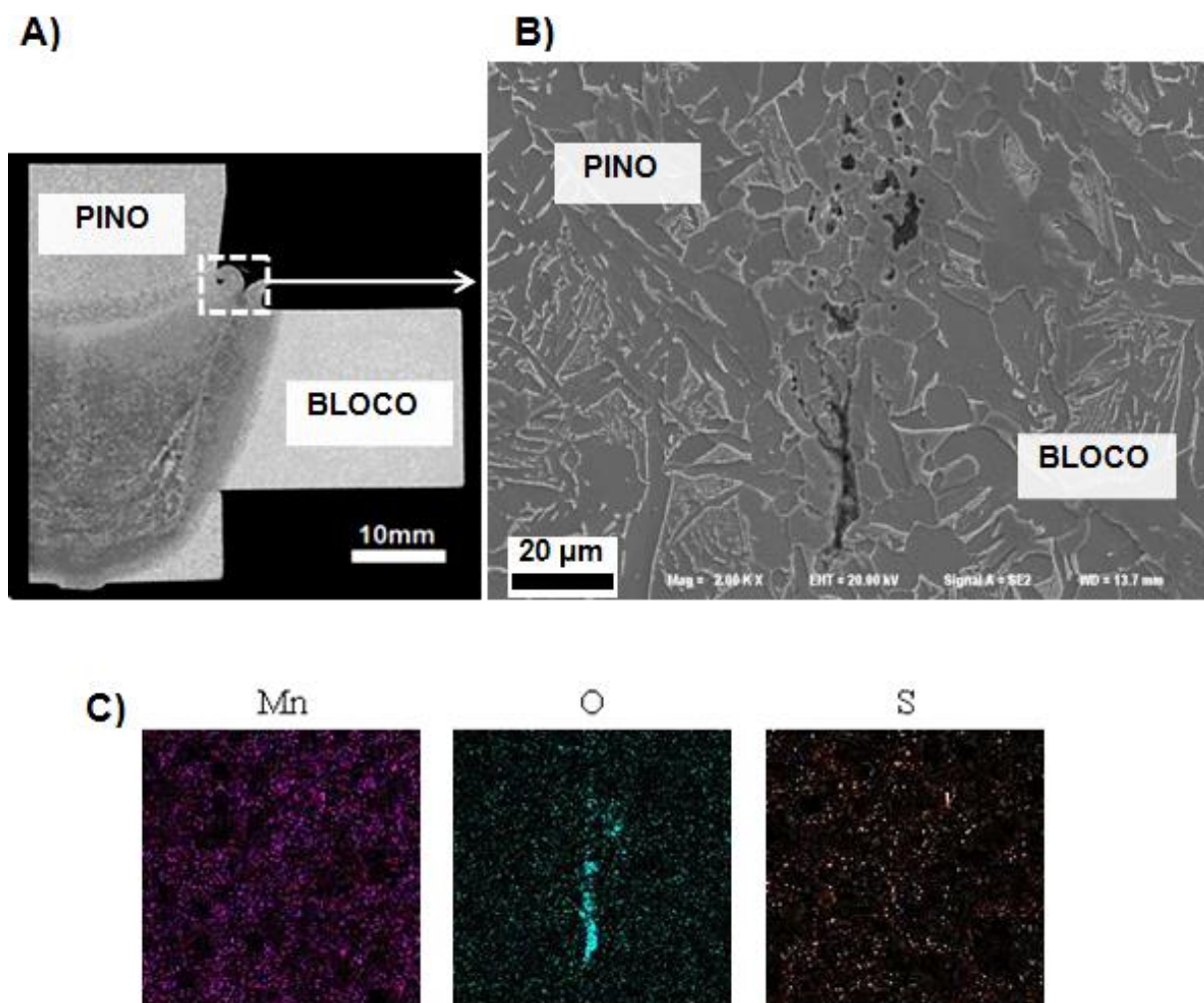


Figura 4. 29 – (A) Macrografia da amostra 31601 (60 kN, FN de 0,0 mm, 1700 rpm, Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Inclusões observadas com maior aumento (2000 X), correspondente ao *flash*, obtidas através do MEV; (C) Mapa de distribuição dos elementos químicos encontrados nas inclusões.

Na figura 4.30 é apresentada a imagem da região interfacial intermediária da amostra 31601.

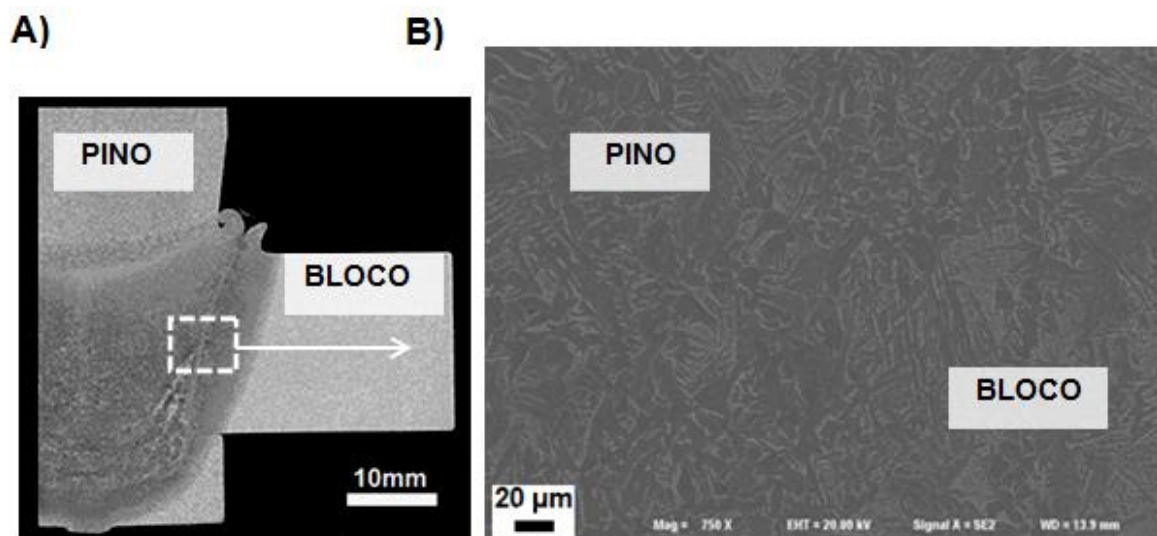


Figura 4. 30 – (A) Macrografia da amostra 31601 (60 kN, FN de 0,0 mm, 1700 rpm, Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Imagem da interface pino/bloco aumentada em 750 X, obtidas através do MEV

Na figura 4.31 é apresentada a imagem da região interfacial inferior da amostra 31601.

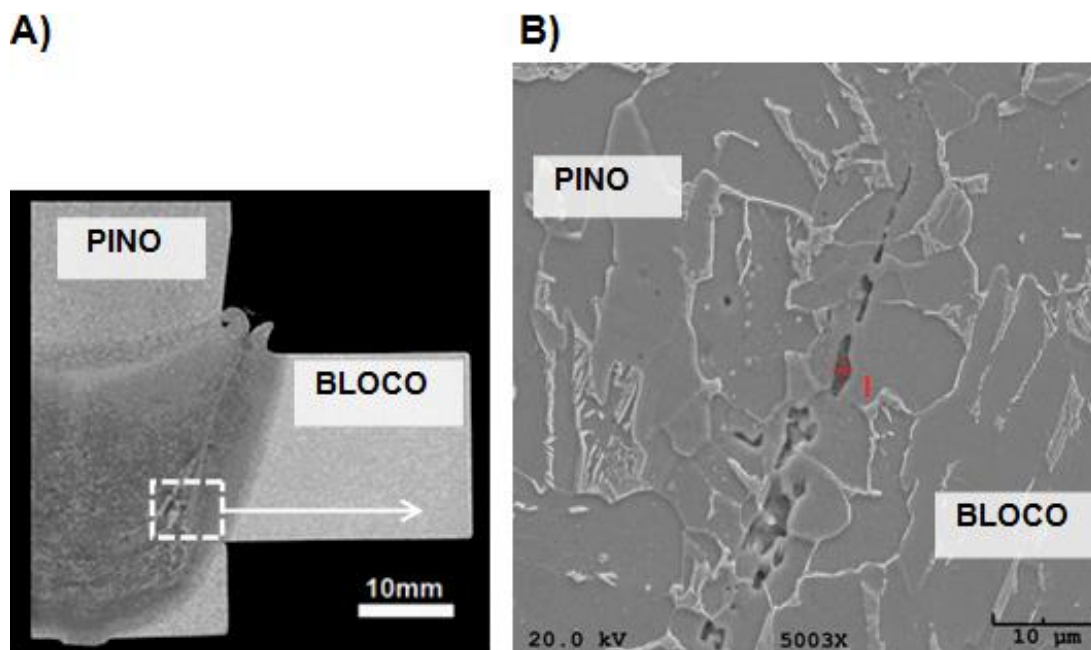


Figura 4. 31 – (A) Macrografia da amostra 31601 (60 kN, FN de 0,0 mm ,1700 rpm, Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Resquícios de inclusões observados na interface da região inferior com maior aumento (5000 X), obtidas através do MEV.

A Figura 4.32 mostra o espectro de raios-X obtido no ponto 1 da Fig. 4.31 (B).

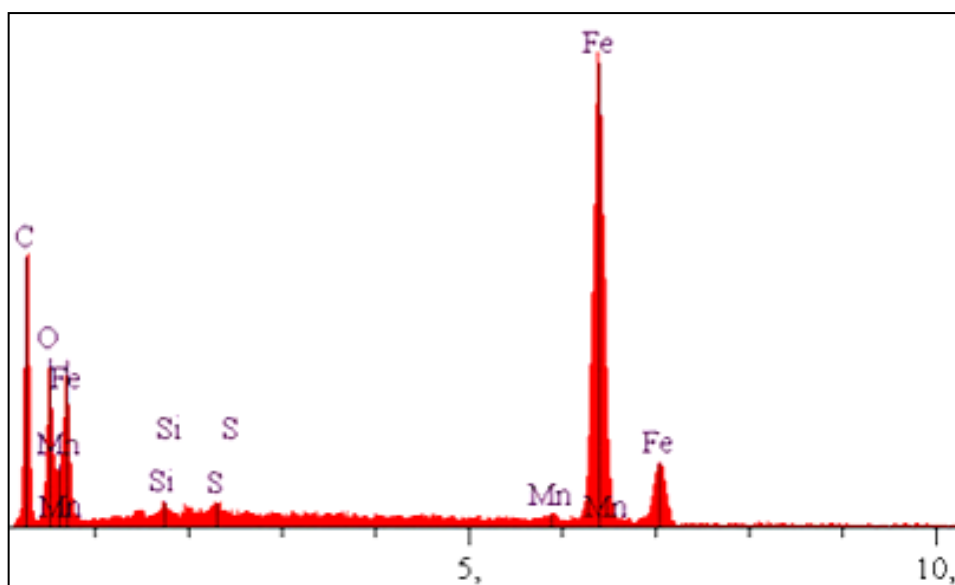


Figura 4. 32 – Espectro de raios-X da região 1 assinalado na figura 4.31 (B)

Pela análise micrográfica (Fig. 4.29 (B)), é possível observar inclusões dispostas longitudinalmente na interface desta região. Estas inclusões foram investigadas sendo feito o mapeamento da sua distribuição de elementos químicos. A imagem (C) da Fig. 4.29 mostra que estas inclusões apresentam teores elevados de oxigênio, sugerindo que se trata aqui basicamente de óxido de ferro, podendo ser FeO , Fe_2O_3 e/ou Fe_3O_4 . Os óxidos são originários do processo de oxidação das superfícies do pino e o do bloco durante o reparo e/ou óxidos remanescentes das superfícies oxidadas.

Não se descarta também nessa região a formação de MnS , devido ao elevado teor de enxofre dos aços empregados na fabricação do pino e do bloco (ver Tab. 3.1).

Os sulfetos de manganês são impurezas advindas do processo de fabricação do aço, onde tais impurezas em grandes quantidades diminuem a resistência mecânica e resultam em defeitos de ligação entre os materiais do pino e do bloco. Portanto, faz-se necessário a redução ou mesmo eliminação das impurezas da interface pino/bloco.

Na figura 4.31, correspondente a região interfacial intermediária da amostra 31601 é mostrado que não há presença de inclusões.

A inspeção da interface na região inferior, Fig. 4.31, revelou resquícios de inclusões. O espectro de raios-X (Fig. 4.32), mostra no ponto 1, basicamente ferro, carbono e quantidades muito pequenas de enxofre, manganês e oxigênio sugerindo deste modo, que durante o processo de reparo o fluxo de material escoado dirigido de forma ascendente

levou consigo quase toda impureza para fora da interface, sendo estas impurezas depositadas no *flash*, como pode ser observado na Fig. 4.29.

Na figura 4.33 é apresentada a imagem da região interfacial superior da amostra 31609.

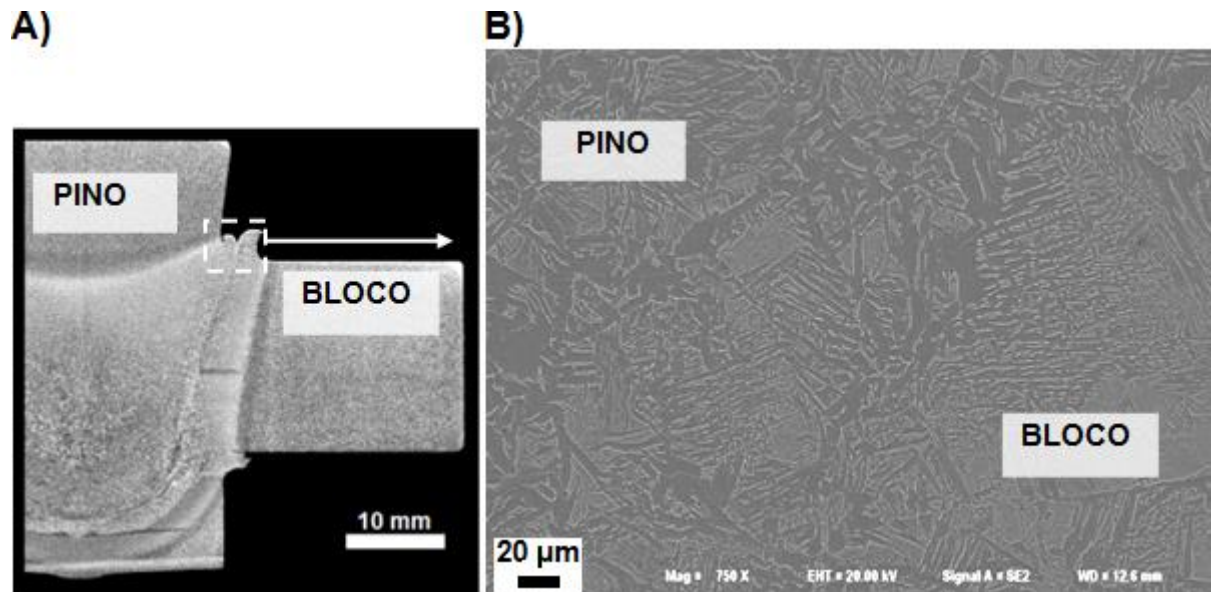


Figura 4. 33 – (A) Macrografia da amostra 31609 (60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,9 mm e Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Micrografia da região destacada, com maior aumento (750 X) correspondente ao *flash*, obtidas através do MEV

Na figura 4.34 é apresentada a imagem da região interfacial na região intermediária da amostra 31609 (60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,9 mm e Cq de 7,0 mm)

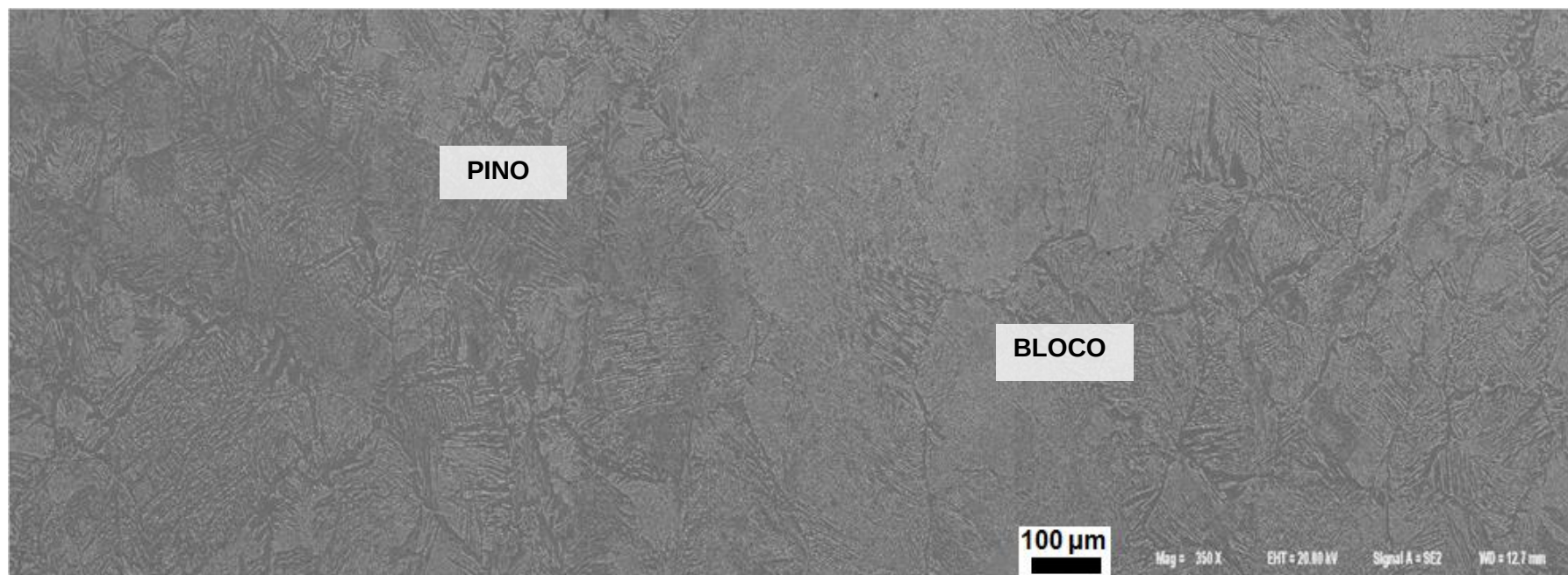


Figura 4. 34 – Montagem de micrografias da região intermediária da amostra 31609 (aumento de 350x) evidenciando a ausência de inclusões, imagens obtidas através do MEV

Na figura 4.35 é apresentada a imagem da região interfacial inferior da amostra 31609:

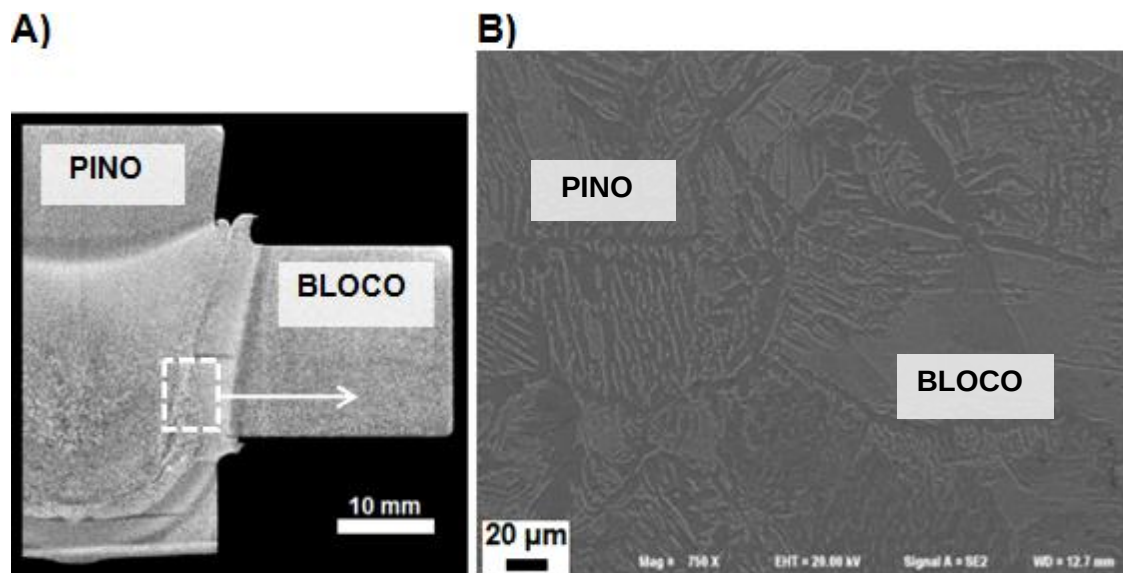


Figura 4. 35 – (A) Macrografia da amostra 31609 (60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,9 mm e Cq de 7,0 mm) com indicação tracejada da área inspecionada; (B) Micrografia da região interfacial inferior, com maior aumento (750 X) evidenciando a ausência de inclusões, obtidas através do MEV

A amostra 31609 (60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,9 mm e Cq de 7,0 mm) foi igualmente analisada ao longo de sua interface. Comparando com a amostra 31601, na amostra 31609 não foram encontrados quaisquer sinais de inclusão como pode ser observado na Fig. 4.33 correspondente a região superior (*flash*), na Fig. 4.34, região interfacial pino/bloco na posição intermediária e também na Fig. 4.35, região interfacial inferior da amostra.

A presença da folga propicia um segundo caminho, através do qual o material plastificado é escoado por entre o bloco de reparo e o bloco suporte, aumentando deste modo a limpeza da interface da amostra 31609.

Em virtude da homogeneidade microestrutural conseguida nos reparos não se consegue distinguir os limites entre pino e bloco com facilidade. Este aspecto persistiu ao longo de toda a linha de união como são mostradas nas Figs. de 4.29 a 4.31 e 4.33 a 4.35.

4.5 Dureza Vickers

Foram realizados ensaios de dureza Vickers com objetivo de investigar como variaram as propriedades mecânicas por interferência do processo de união dos materiais. A variação microestrutural ocorre devido à exposição da superfície do pino e da parede interna do furo usinado no bloco à elevada temperatura e contato mecânico.

Para investigação das propriedades mecânicas foram realizados perfis de dureza Vickers a 5 e a 10 mm da face inferior do bloco e um perfil vertical ao longo do eixo pino/peça de retenção para cada peça ensaiada.

Os gráficos apresentados nas Figs. 4.36 a 4.43 revelam o comportamento da dureza nos perfis horizontais.

Os perfis verticais do centro do pino e da peça de retenção são apresentados na Fig. 4.44 a 4.47.

Os perfis de dureza foram obtidos conforme o mapeamento apresentado na Fig. 3.25. Os perfis de dureza das amostras são apresentados de forma comparativa de acordo com: ausência de folga, presença de folga de 1,0 mm e presença de folga de 0,5 mm.

Nas figuras, a linha preta corresponde à linha de união entre as peças, sejam elas pino/bloco ou pino/peça de retenção e as linhas tracejadas e coloridas mostradas nos gráficos indicam os limites da extensão das ZTA (medidas com um paquímetro) para cada amostra.

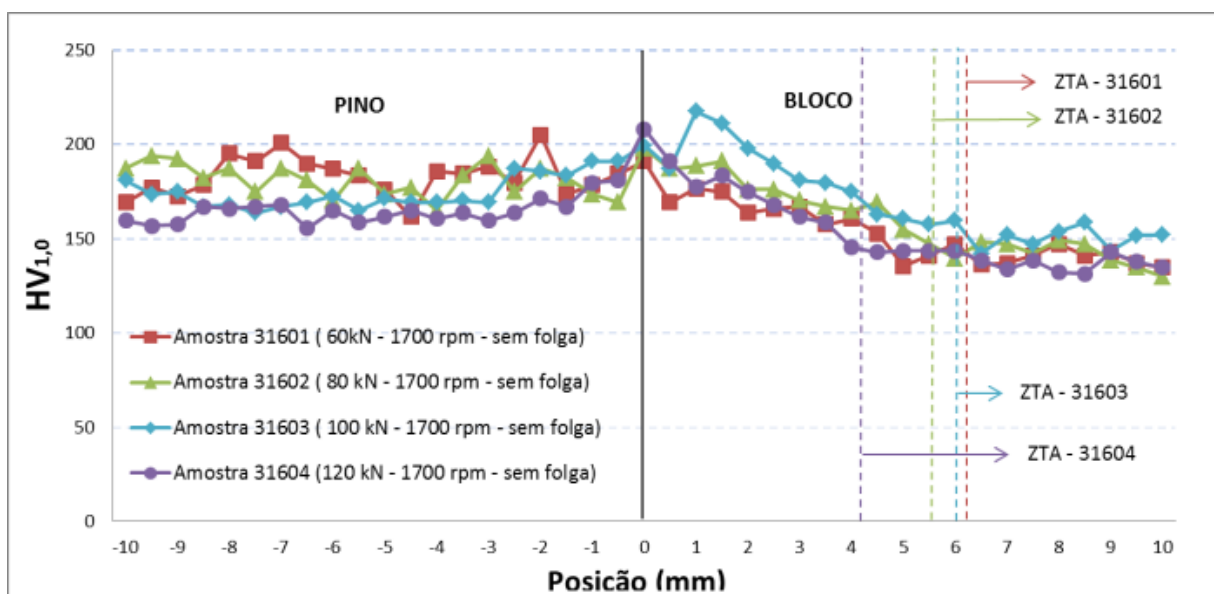


Figura 4. 36 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco; Ensaios sem a presença de calços

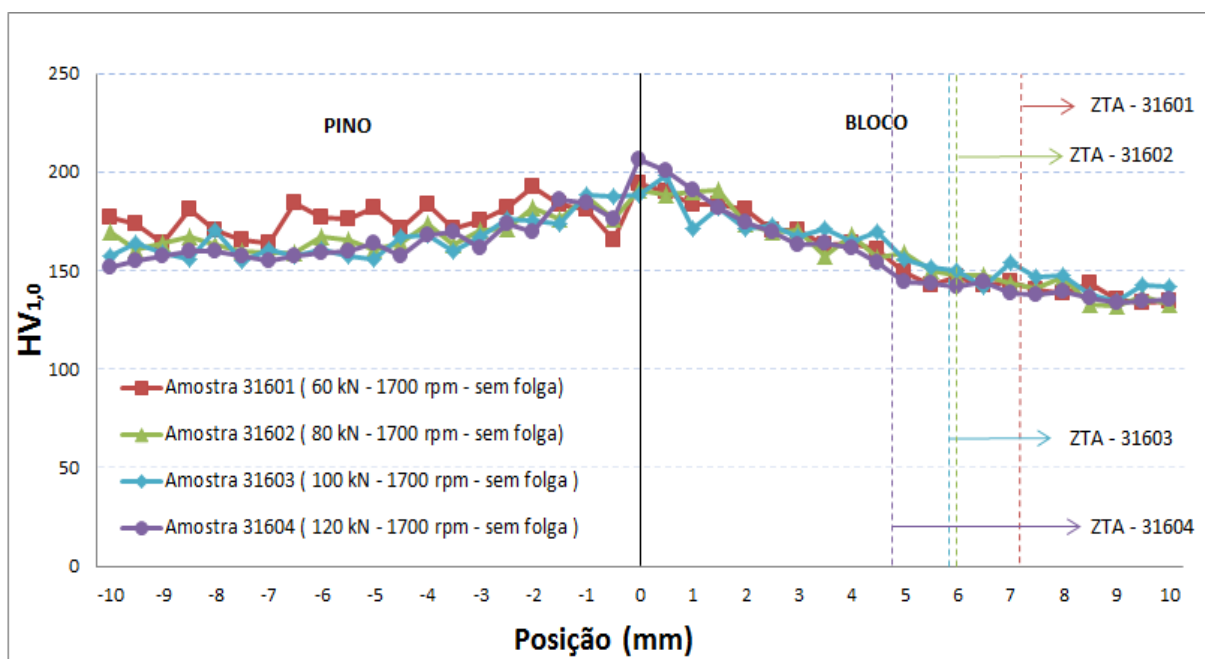


Figura 4. 37 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco; Ensaios sem a presença de calços

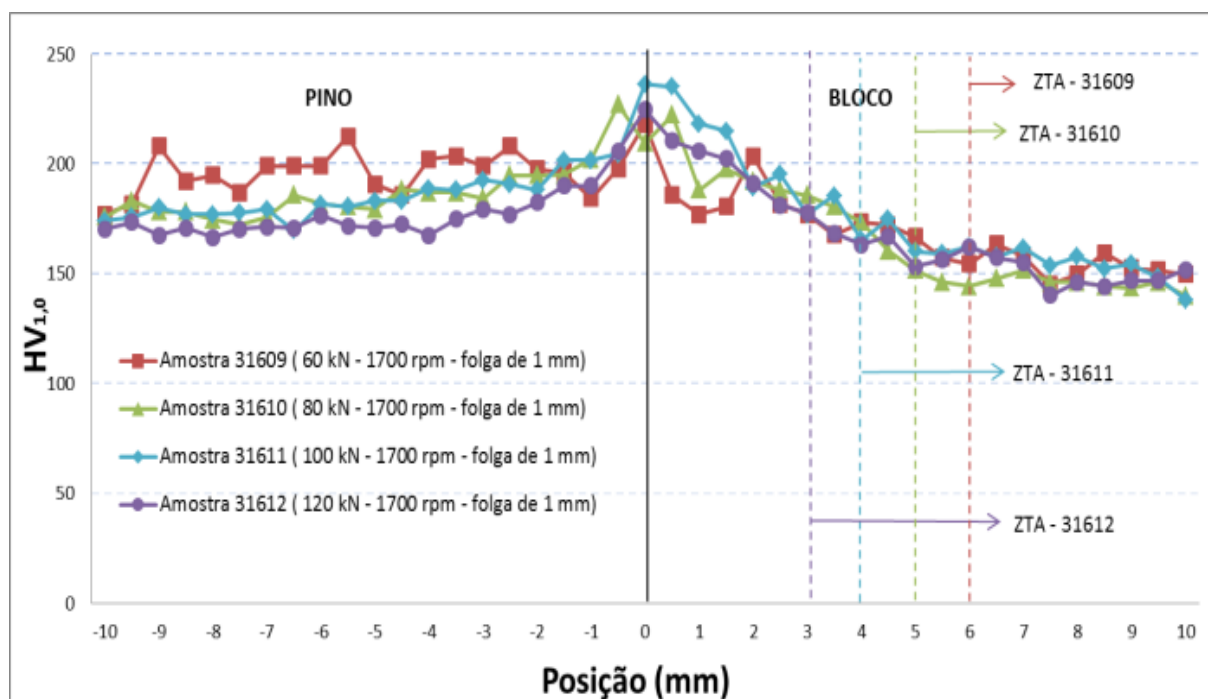


Figura 4. 38 – Perfil horizontal (a 5,0 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 mm de espessura

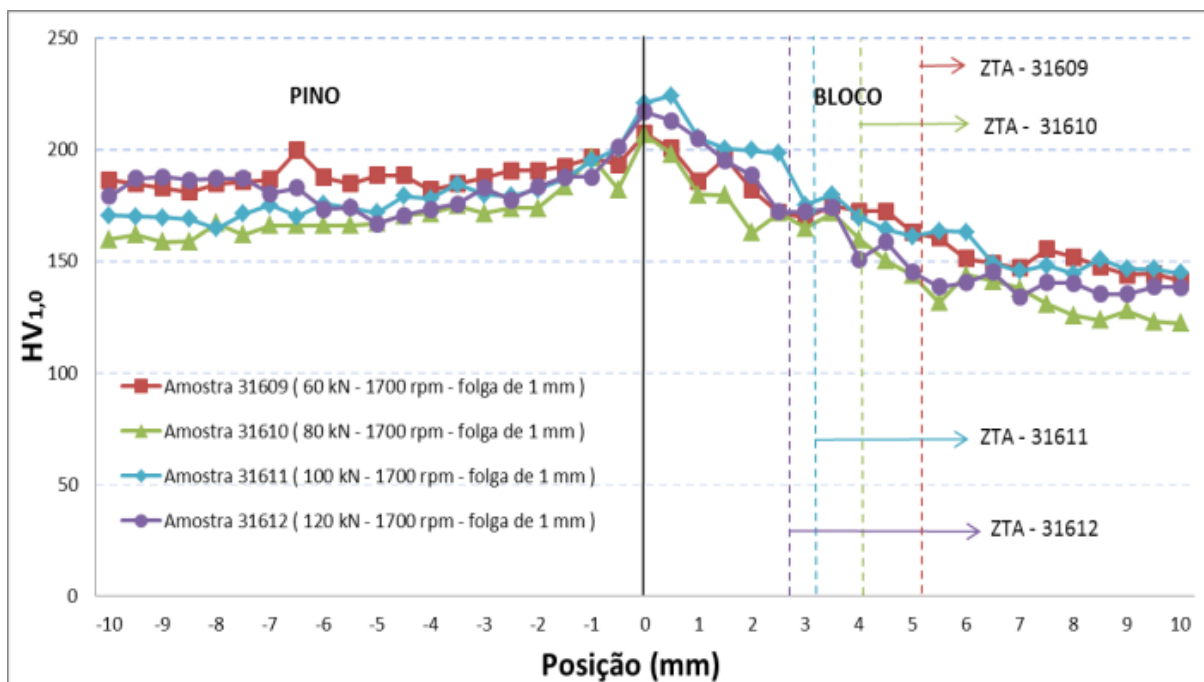


Figura 4. 39 – Perfil horizontal (a 10 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 mm de espessura

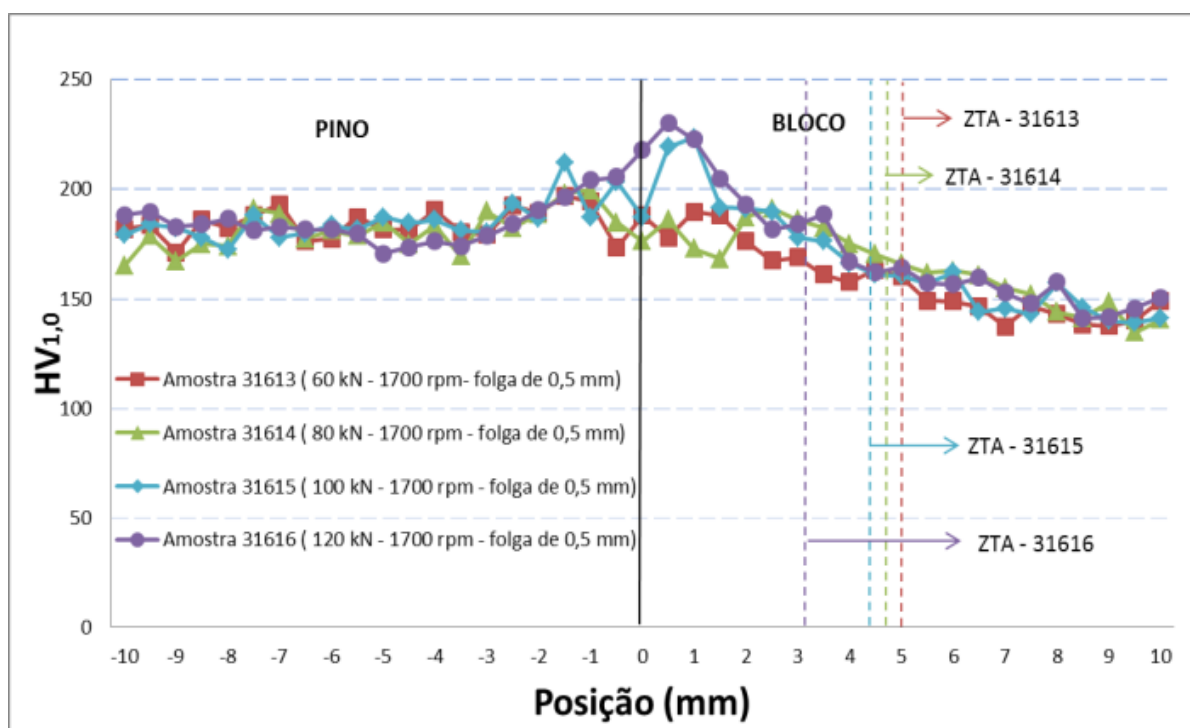


Figura 4. 40 – Perfil horizontal (a 5,0 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 0,5 mm de espessura

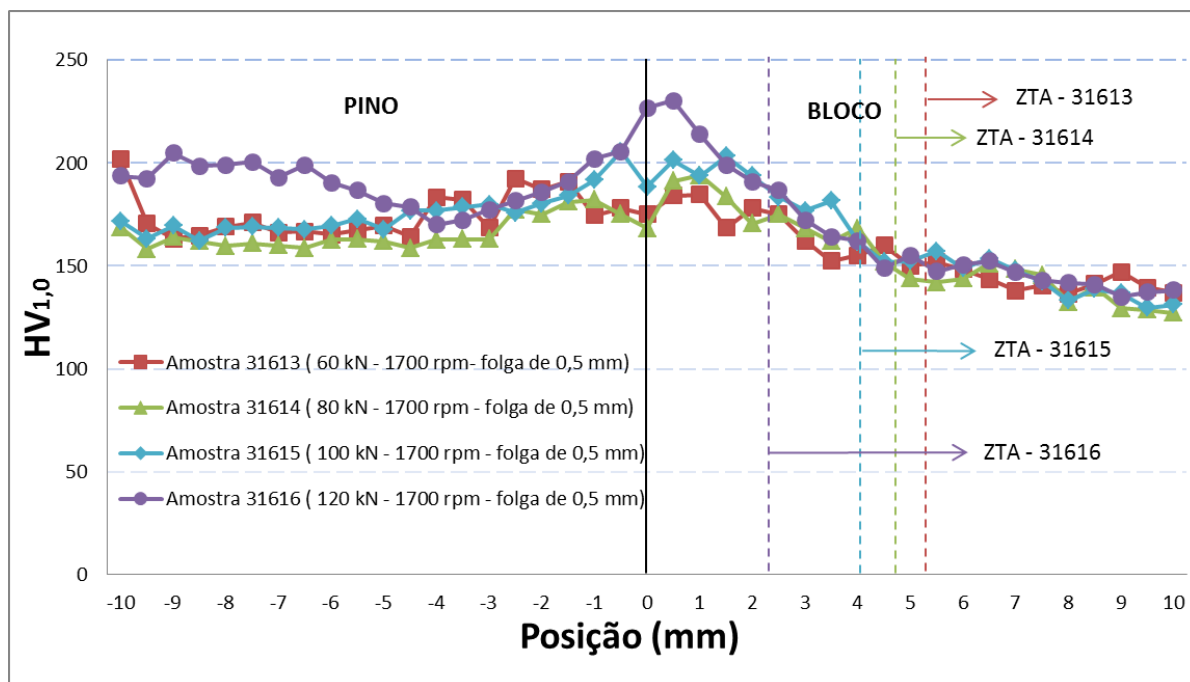


Figura 4. 41 – Perfil horizontal (a 10 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 0,5 mm de espessura e comprimento de queima de 9,0 mm

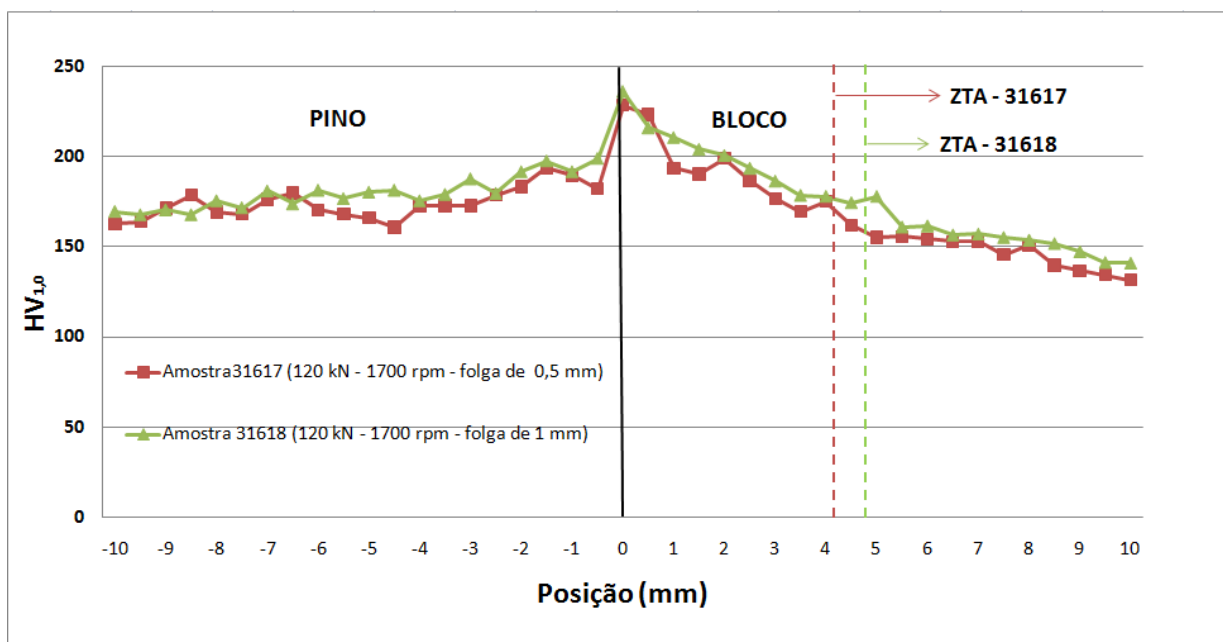


Figura 4. 42 – Perfil horizontal (a 5 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 e 0,5 mm de espessura e comprimento de queima de 9,0 mm

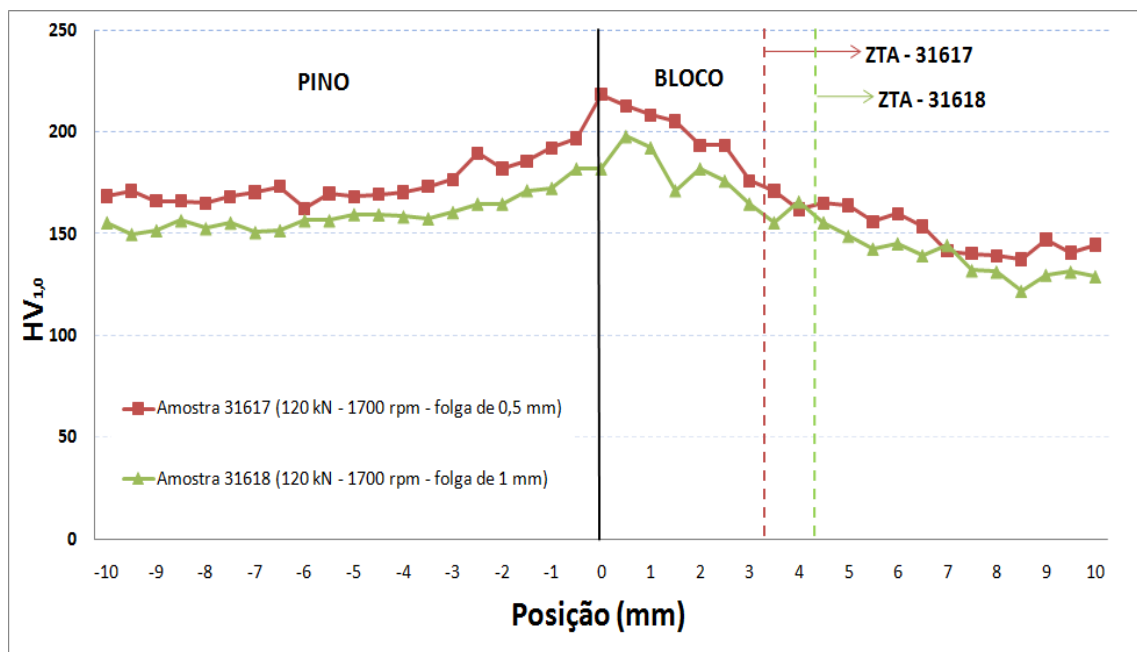


Figura 4. 43 – Perfil horizontal (a 10 mm da face inferior do bloco) das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 e 0,5 mm de espessura e comprimento de queima de 9,0 mm

É possível observar que nas proximidades da interface pino/ bloco e na zona termicamente afetada, os valores de dureza medidos para os perfis horizontais são maiores. Este aumento de dureza ocorre devido à exposição do material do pino e do bloco a altas temperaturas e altas taxas de resfriamento, as quais foram responsáveis pela formação de microestruturas aciculares já reveladas através da análise micrográfica.

De forma geral, nota-se uma tendência de diminuição da dureza após a linha da interface, na medida em que as indentações são realizadas em direção à aresta não afetada pela temperatura, até a dureza original do bloco. Nota-se também que as durezas do bloco são menores que as do pino, sugerindo um menor carbono equivalente do bloco.

Utilizando-se a fórmula de cálculo do carbono equivalente (Eq.4.1), aplicada às composições químicas mostradas na Tab.3.1 obtém-se:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Cu}{13} \quad \text{E.q (4.1)}$$

O $C_{eq \text{ bloco}} = 0,17\%$ e o $C_{eq \text{ pino}} = 0,24 \%$ comprovam a menor dureza do bloco. As observações das figuras de 4.36 a 4.43 apresentadas revelam uma transição suave de

dureza entre o pino e o bloco, não sendo notados picos de dureza consideráveis nas ZTA. Isto implica que o processo de reparo não modificou de forma severa as propriedades mecânicas da peça. O mesmo não pode ser observado nos estudos de reparo de furos cegos de PIRES (2007) e MAREGA (2011), visto que as durezas deram elevados picos, observados na região correspondente a ZTA do bloco, nos perfis a 5,0 e a 10 mm, Figs. 2.7 e 2.8

Os perfis de dureza vertical obtidos no eixo do pino e da peça de retenção são mostrados nas figuras de 4.44 a 4.47.

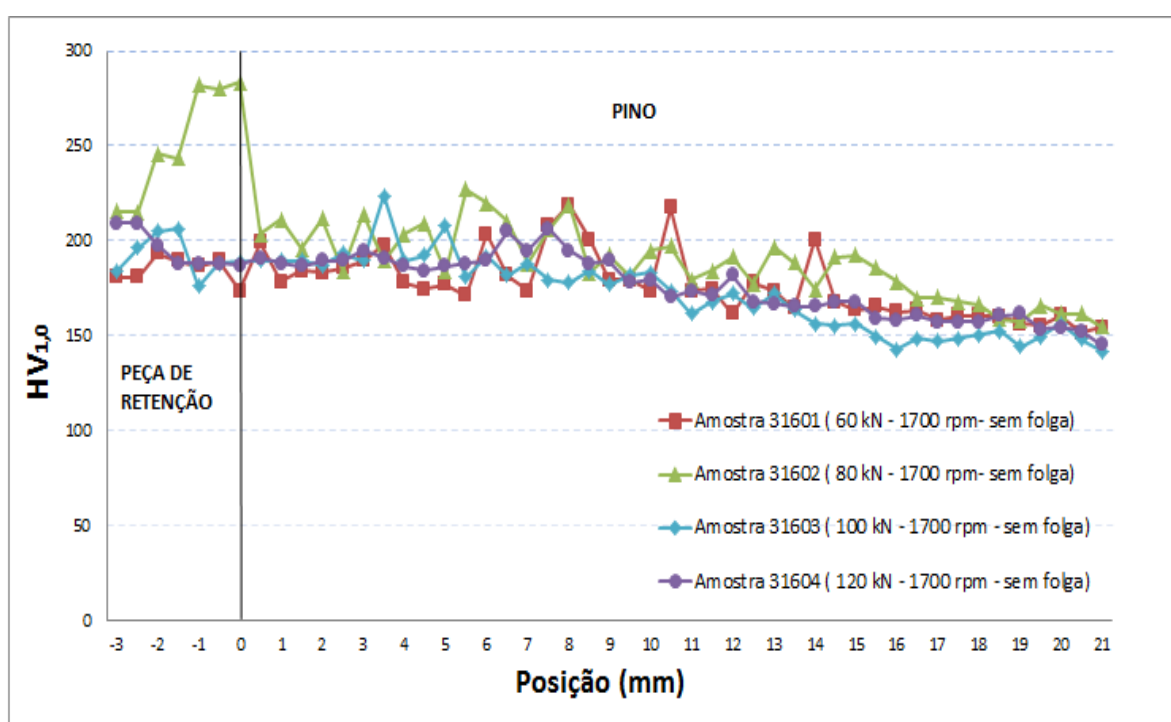


Figura 4. 44 – Perfil Vertical do Pino/ Peça de Retenção; Ensaio sem a presença de calços

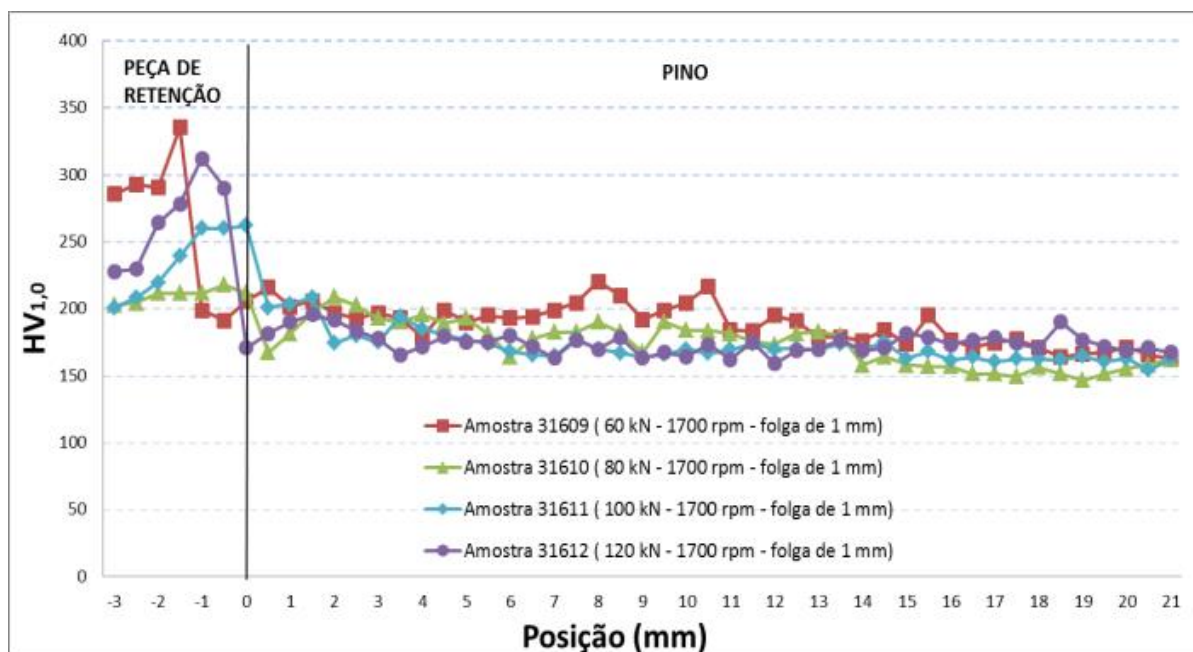


Figura 4. 45 – Perfil Vertical do Pino/ Peça de Retenção das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 mm de espessura

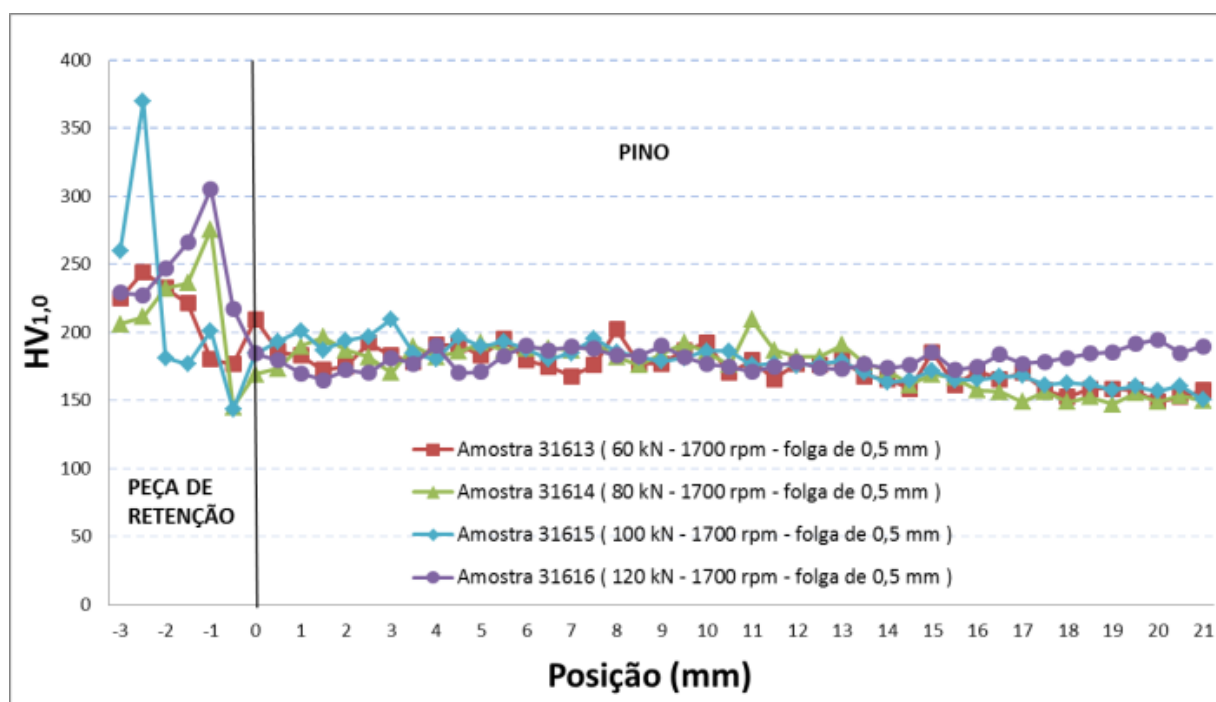


Figura 4. 46 – Perfil Vertical do Pino/ Peça de Retenção das amostras utilizadas com a presença de calços de 0,5 mm de espessura

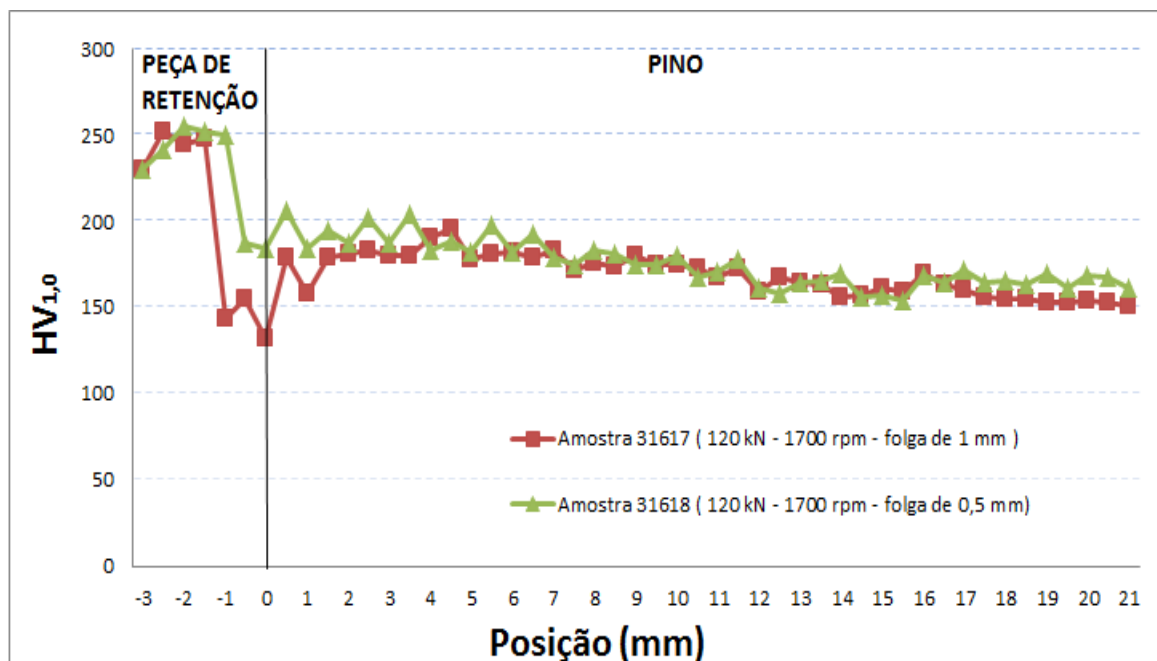


Figura 4. 47 – Perfil Vertical do Pino/ Peça de Retenção das amostras utilizadas com a presença de calços de 1,0 e 0,5 mm de espessura

Nas figuras 4.44, 4.45, 4.46 e 4.47 é possível notar um abrupto aumento da dureza localizado na peça de retenção. A figura 4.48 mostra a microestrutura acicular encontrada (podendo ser bainita e/ou martensita) na peça de retenção na região a 1,0 mm da interface pino/peça de retenção. Isso deveu certamente ao rápido resfriamento nessa região. Todavia, essa região é posteriormente removida, não representando um problema ao presente processo.

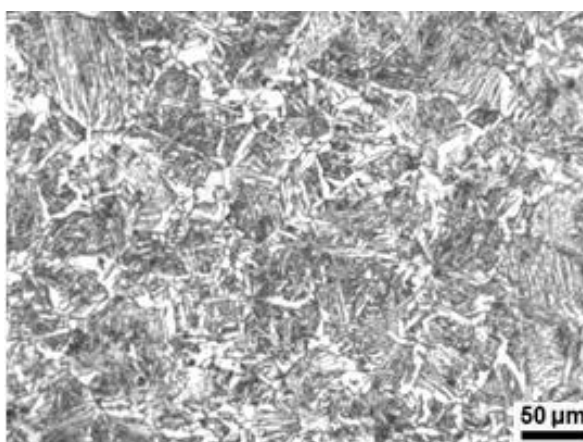


Figura 4. 48 – Microestrutura presente na interface pino/ peça de retenção utilizada no reparo da amostra 31609)

PIRES (2007) e MAREGA (2011) também observaram em seus estudos referentes a reparos de furos cegos o aumento da dureza na região interfacial entre pino e o fundo do furo usinado na peça a ser reparada (ver Figs. 2.9 e 2.10), o que seria equivalente à interface pino/peça de retenção das amostras deste trabalho. Estes estudos mostraram que o fundo do furo é susceptível a defeitos e o surgimento de picos de dureza, como aqui também observado. Neste trabalho, como visto, é utilizada uma peça de retenção que simula um furo cego que após a realização do reparo deve ser usinada, por consequência são eliminados os defeitos do fundo do furo e as regiões onde surgem os picos de dureza.

4.6 Ensaios de Dobramento

No item 3.6 foi descrito como foram feitos os reparos para a obtenção de corpos de prova de dobramento e a descrição de como é realizado o ensaio.

Na figura 4.49 é mostrado o aspecto das amostras 31605, 31606, 31607 e 31608 após o ensaio de dobramento.

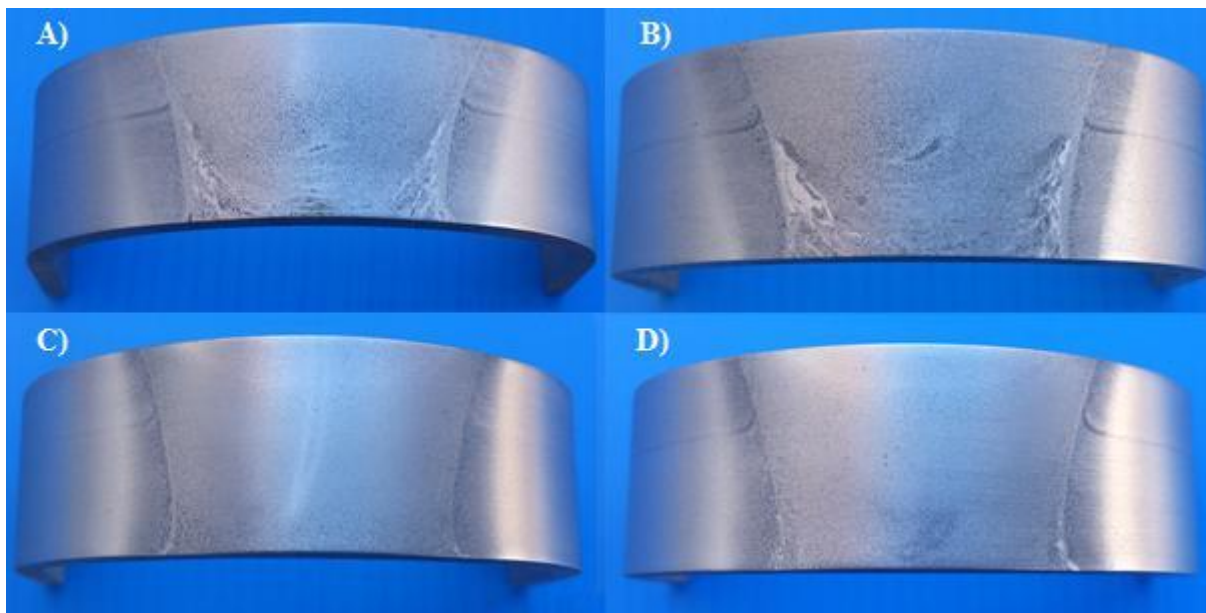


Figura 4. 49 – Amostras retiradas do bloco de reparo, imagens realizadas após ensaio de dobramento; A) Amostra 31605 (Força axial de 60 kN); B) Amostra 31606 (Força axial de 60 kN); C) Amostra 31607 (Força axial de 120 kN) e D) Amostra 31608 (Força axial de 120 kN), todos os ensaios foram realizados com 1700 rpm, Cq de 7 mm e sem a presença de calço para a geração de folga

Observa-se que todas as amostras foram dobradas a 180°, caracterizando uma junta soldada com ductilidade satisfatória, pois nenhum dos quatro corpos de prova apresentou descontinuidades e propagação de trincas. Deve ser ressaltado que durante o ensaio é feita a observação da superfície convexa com o auxílio de uma lupa e que em caso de ocorrência de uma trinca o ensaio é interrompido.

Frente aos bons resultados obtidos, foi requerido o registro de uma patente sobre o assunto com o seguinte título: Método e Sistemas de Reparo por Atrito para Furos Passantes Cônicos ou Cilíndricos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido o processo de reparo por atrito para trincas passantes usando geometrias consagradas no método do furo passante.

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

1. O processo desenvolvido não resultou em falhas de preenchimento nas peças sem folga entre o bloco de reparo e a peça de retenção;
2. Nos ensaios com forças axiais mais elevadas foram observadas folgas entre o bloco e peça de retenção devido à deformação da barra de restrição. Essas folgas resultaram em falta de preenchimento na região interfacial superior de cinco das dez amostras ensaiadas;
3. O método de reparo por atrito apresentado elimina os problemas comumente encontrados no fundo do furo no processo com furo passante. Isso se deve basicamente ao fato de que a peça de retenção ser usinada após o reparo;
4. Verificou-se uma redução no tempo de processamento dos ensaios à medida que a folga entre o bloco e a peça de retenção era aumentada. As razões para esse comportamento não foram identificadas;
5. Exceto para a primeira amostra ensaiada, o restante das fotomicrografias apresentam microestruturas análogas, evidenciando que as temperaturas aportadas nestas interfaces foram semelhantes;

6. Na região interfacial, tanto no pino quanto no bloco, são encontradas microestruturas aciculares (podendo ser bainita ou martensita), ferrita de contorno de grão e ferrita de Widmanstätten;
7. Através de análise microestrutural e química ao longo da interface pino/ bloco das duas amostras selecionadas, constatou-se não havia inclusões na amostra ensaiada com folga. O que indica que um segundo caminho para o fluxo de material escoado aumenta a limpeza da interface ;
8. Os perfis de dureza horizontais mostraram uma transição suave entre o pino e o bloco. Já as curvas referentes ao perfil de microdureza vertical no pino/ peça de retenção mostraram um abrupto aumento de dureza na região da peça de retenção, o que não representa problema pois esta é removida na sequência;
9. As amostras que passaram pelo ensaio de dobramento apresentaram boa ductilidade. Nenhuma das amostras apresentou trincas.
10. Frente aos bons resultados obtidos, foi requerido o registro de uma patente sobre o assunto com o seguinte título: Método e Sistemas de Reparo por Atrito para Furos Passantes Cônicos ou Cilíndricos.

CAPÍTULO 6

TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o conhecimento adquirido no estudo e desenvolvimento do método de reparo por atrito para furos passantes, são pertinentes algumas sugestões que poderão contribuir para o aumento do conhecimento e melhoria do método apresentado neste trabalho. As sugestões para trabalhos futuros são as seguintes:

- Em virtude de se trabalhar com elevadas forças axiais, se faz necessária a utilização de materiais mais resistentes na confecção das barras de restrição e peça suporte, ou mesmo modificações em suas dimensões, afim de que estas peças suportem os esforços empregados;
- É preciso garantir de forma segura a espessura da folga entre a peça a ser reparada (bloco) e a peça de retenção, de modo que a folga entre estas não varie durante o processo de reparo. Sugere-se, nesse caso, a utilização de barras de restrição confeccionadas em materiais mais resistentes mecanicamente, ou ainda, o uso de solda para manter as peças em íntimo contato;
- Recomenda-se para avaliação das propriedades mecânicas o emprego dos ensaios de tração e fadiga;
- Faz-se necessária investigação das causas do decréscimo do tempo de reparo nos ensaios com folga entre o bloco e a peça de retenção;

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS

ANDREWS, R. E.; MITCHELL, J. S. Underwater Repair by Friction Stitch Welding. **Metals and Materials**, p. 796-797, Dec. 1990.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. 8. ed. Miami, 1991. v. 2, (0-87171-354-3).

BEVINGTON, J.H. **Mode of Welding the ends of Wire, Rods, &c.** United States Patent Office .Patent Nº 463,134, 17 Novembro 1891.

BOUET, B. et al. **Friction plug welding method for a hole in metal part, use of a metal bar and of a bearing supporting part for implementing the method.** United States Patent. Patent Nº US 2006/ 0011708 A1, 19 janeiro 2006.

BOUET, B. et al. **Friction plug welding method for a hole in metal part, use of a restraint part and supporting part for implementing the method.** United States Patent. Patent Nº US 2006/0131364 A1, 22 junho 2006.

BLAKMORE, G. R. **Friction Stud Welding in Hazardous Areas.** Welding & Metal Fabrication, p. 428-430, Nov/Dec. 1993.

BLAKMORE, G. R. **Friction Welding – Technology for the New Millenium.** In: OFFSHORE CONFERENCE, May. 1999, Houston, Texas.

CBCA - **Centro Brasileiro da Construção em Aço.** Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>>. Acesso em 05/08/2013.

COLLETA, E. R.; CANTRELL M. A. **Friction pull plug welding: Chamfered heat sink pull plug design**. United States Patent. Patent Nº US 6.880.743 B1, 19 abril 2005.

DELANO, A. D. **Friction welding with conoids**. United States Patent. Patent Nº US 6.638.641 B2, 28 outubro 2003.

ELLIS, C.R. G. **Continuous Drive Friction Welding of Mil Steel**. Welding Journal, p 183s-197s, Apr. 1972.

FREITAS, D. S. **Instrumentação e Controle**. 2013. Relatório Interno LTAD.

PIRES, R.R. et al. 67th International Congress ABM, 2012. Rio de Janeiro. **Efeito da geometria de pinos na otimização do processo de reparo por atrito**, RJ, Brasil, <http://www.abmbrasil.com.br/congresso/2012/sessoes-tecnicas/integra.asp?t=21464>. 3 de Agosto, 2012.

GONTIJO, M.F. **O efeito da espessura da chapa sobre a qualidade do reparo por atrito**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

HATTINGH, D.G. et al. **Friction hydro pillar process as an alternative repair technology for creep evaluation sites on thick-walled 10CrMo910 creep-resistant steel structures**, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 113, nº 2, Jonnesburg Feb. 2013.

HWANG, H. F. **Desenvolvimento, projeto, construção e teste de um cilindro de reparo por atrito portátil**. 2010. 45 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

K. BEAMISH. **Friction taper plug welding of 10 mm AA6082-T6**, TWI Report 768/2003, 2003.

LOTSBERG, I.; LANDET, E. **Fatigue capacity of side longitudinals in floating structures**. Marine Structures, 18, 2005, p. 25-42.

MACIEL, F. **Friction Plug Welding Method for a Hole in Metal Part, use of a Restraint Part and Supporting Part for Implementing the Method**. World Intellectual Property Organization (WIPO). Patent Nº WO 2009/089601 A2, 19 julho 2009.

MAHONEY, W. M. et al. **Method to repair voids in aluminum alloys**. United States Patent. Patent Nº 5.975.406, 2 novembro 1999.

MAREGA, B. B. **Instrumentação, controle e operacionalização de uma unidade de reparo por atrito com capacidade de carga axial de 500 kN**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

MATTEI, F. **Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem por fricção**, 2011, 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MEYER, A. **Friction Hydro Pillar Processing – Bonding Mechanism and Properties**. 132 f, 2003. Dissertation an Der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2003.

MOAN, T.; GAO, Z.; AYALA-URAGA, E. **Uncertainty of wave-induced response of marine structures due to long-term variation of extratropical wave conditions**. Marine Structures, 18, 2005, p. 359-382.

MODENESI, P. J.; MARQUES, V. P.; SANTOS, D. B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**, 2012, Disponível em <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>, acesso em 05/08/2013.

MODENESI, P. J.; MARQUES, V. P.; SANTOS, D, B **Soldabilidade dos aços Transformáveis**, 2012, Disponível em <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf> >, acesso em 09/08/2013.

OSÉIAS, J. **Simulação de Ciclos Térmicos de Aquecimento e Resfriamento de Blocos para Reparo por Atrito**. 2011. Relatório Interno LTAD.

PAULY, D. **Process development on an experimental Friction hydro Pillar Processing syste**, GKSS Forschungszentrum, Internal Report, 1999.

PINHEIRO, G. A. et al. **Costura por Fricção: Fundamentos e Aplicações**. 1º Cobef, abr. 2001.

PIRES, R. R. **Efeitos da geometria, da força axial e da rotação no reparo por atrito**. 2007. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

RODRIGUES, F. B. **Reparo por atrito - Otimização de Parâmetros de Processamento**. 2013. Relatório interno LTAD.

SOUZA, R. J. **Desenvolvimento, projeto, construção e validação de um equipamento de reparo de trincas por atrito**. 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

TAKESHITA, R.; HIBBARD, T. L. **Friction Plug Welding**. United States Patents. Patent Nº US 6.213.379 B1, 10 abril 2001.

THOMAS, W. et al. **Friction Forming**. Patent Nº. EP 0 602 072 B1, 18 outubro 1995. TWI, Cambridge, Inglaterra.

THOMAS, W.; SMITH, P. **Friction Plug Extrusion**. United States Patents. Patent Nº.GB 2 306 365 A, 07 maio 1997. TWI, Cambridge, Inglaterra.

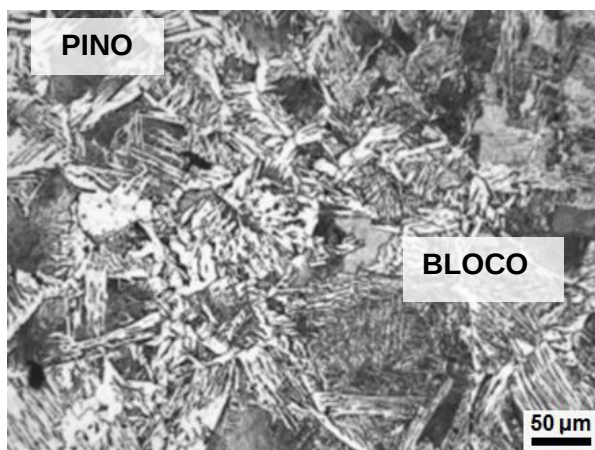
THOMAS, W.; NICHOLAS, D. **Friction Hydro Pillar Processing (FHPP)**. In: TWI, Connect, June 1992.

TWI – The Welding Institute. **Influence of hole and plate geometries on friction taper plug welding of AA6082-T6**. Disponível em: <<http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/industrial-member-reports/influence-of-hole-and-plate-geometries-on-friction-taper-plug-welding-of-aa6082-t6-868-2007/>>. Acesso em: 17/02/2013

VILL, V.I., **Friction Welding of Metals**. Ed. I.P. Baykova. New York: American Welding Society.

ANEXO A

A)



B)

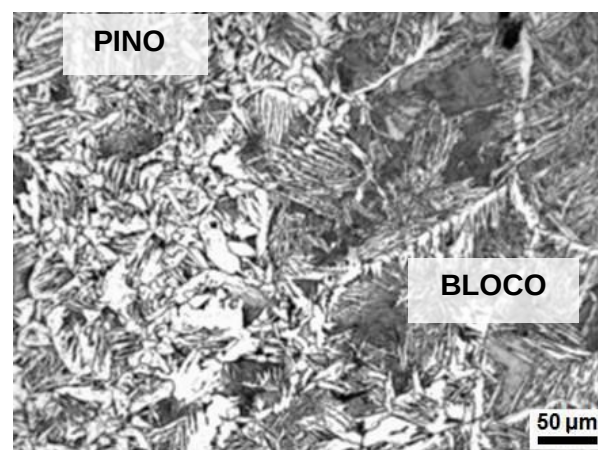
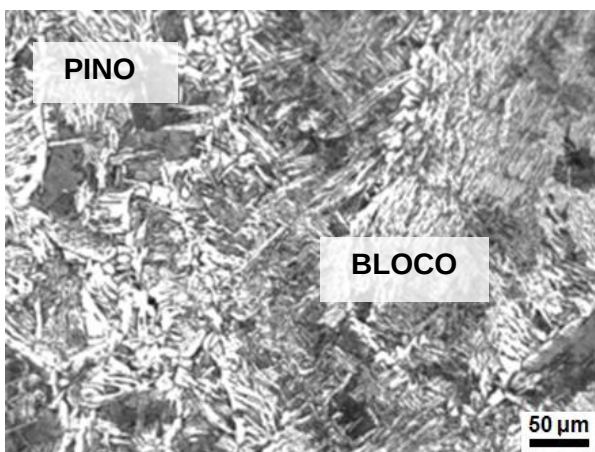


Figura 1 – Micrografias da amostra 31603 (100 kN, FN de 0,0 mm, 1700 rpm e Cq 7,0 mm).; A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)



B)



Figura 2 – Micrografias da amostra 31604 (120 kN, FN de 0,0 mm, FR de 1,9 mm e Cq 7,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

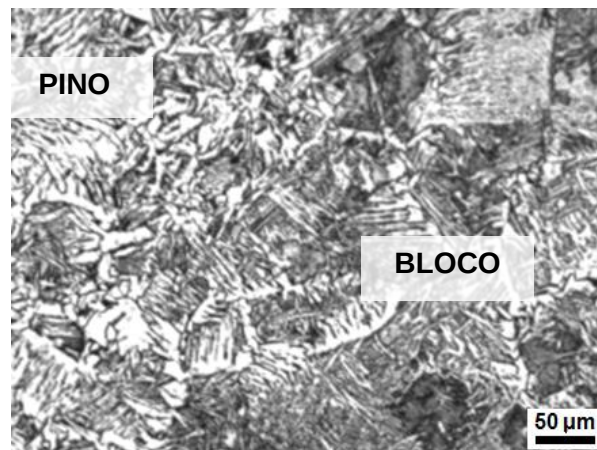
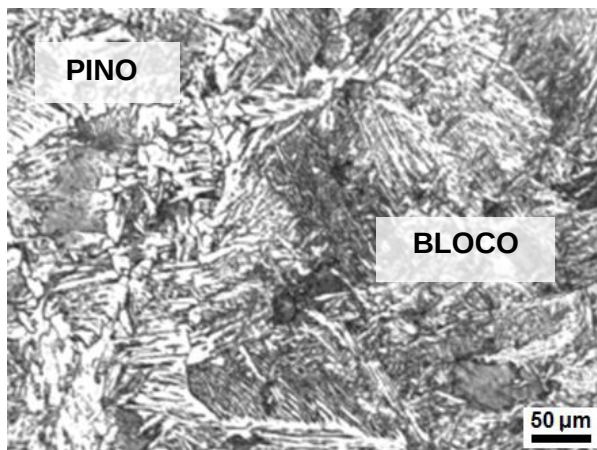


Figura 3 – Micrografias da amostra 31609 (60 kN, FN de 1,0 mm, FR de 1,9 mm, 1700 rpm e Cq de 7,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

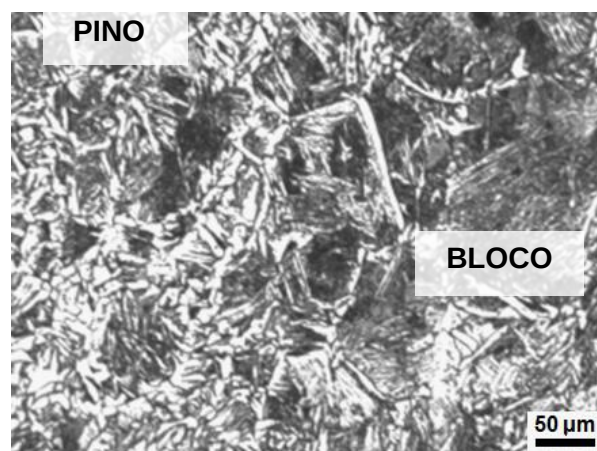
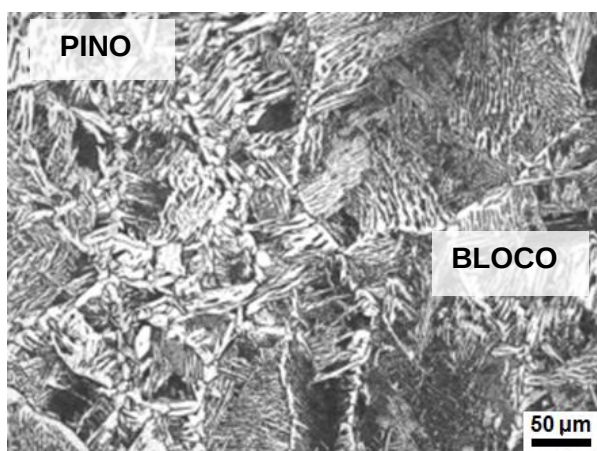


Figura 4 – Micrografias da amostra 31610 (80 kN, FN de 1,0 mm, FR de 2,7 mm, 1700 rpm e Cq de 7,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

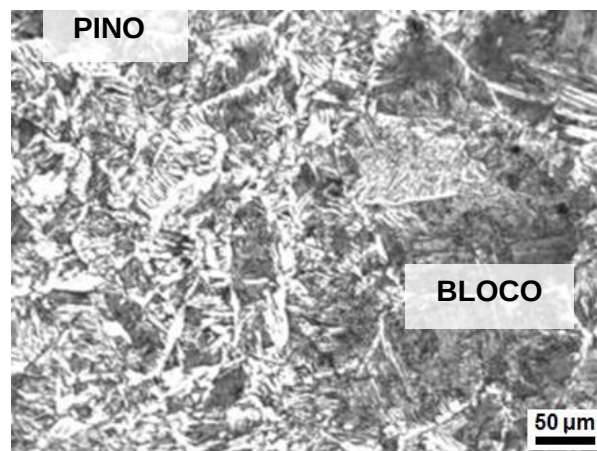
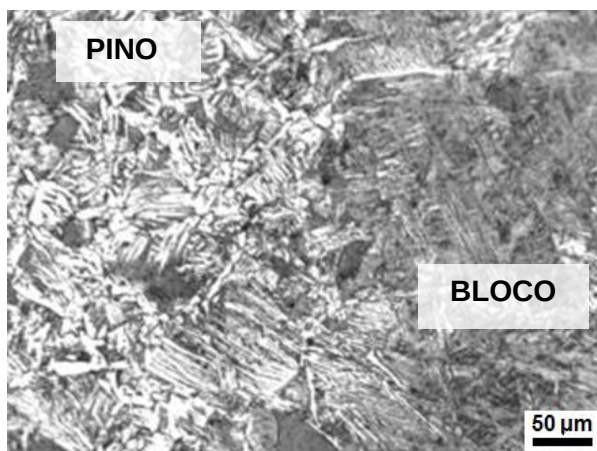


Figura 5 – Micrografias da amostra 31611 (100 kN, FN de 1,0 mm, FR de 3,0 mm, 1700 rpm e Cq de 7,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

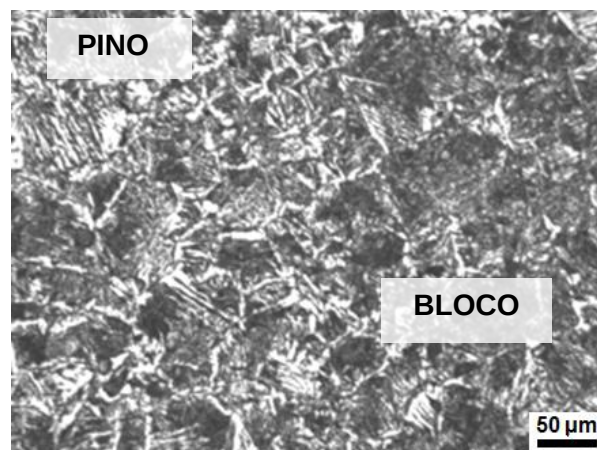
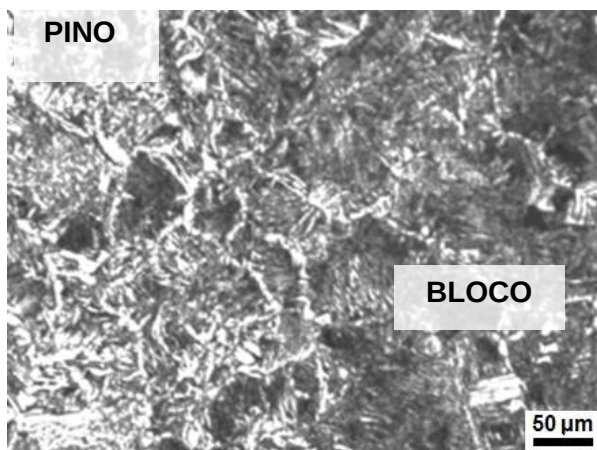


Figura 6 – Micrografias da amostra 31612 (120 kN, FN de 1,0 mm, FR 2,8 mm, 1700 rpm e Cq 7,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

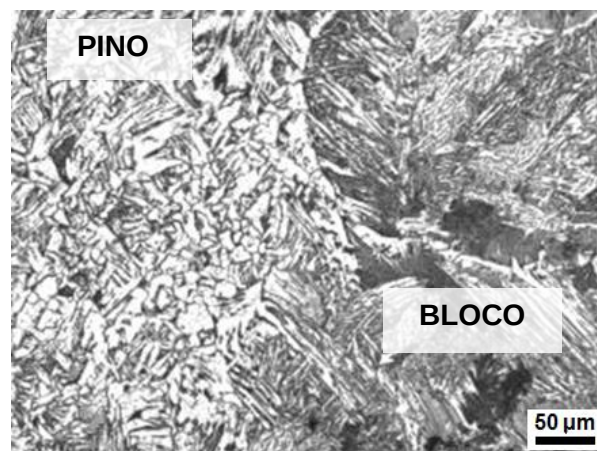
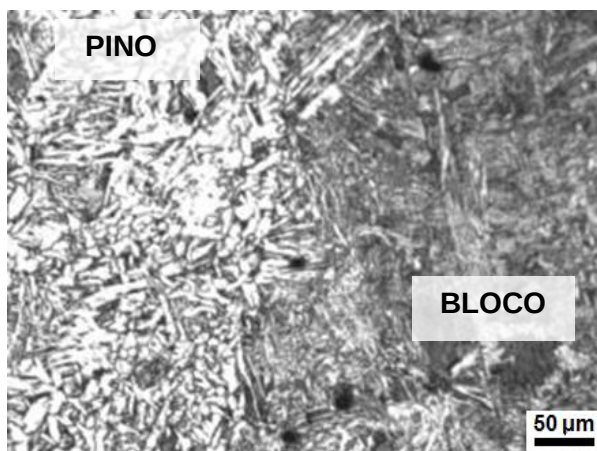


Figura 7 – Micrografias da amostra 31613 (60 kN, FN de 0,5 mm, FR de 1,0 mm, 1700 rpm e Cq de 7,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

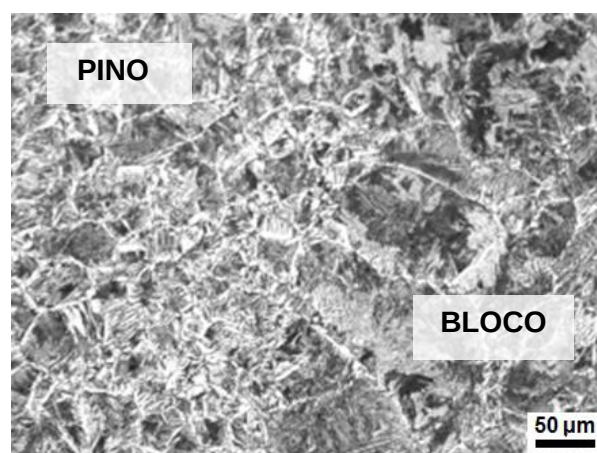
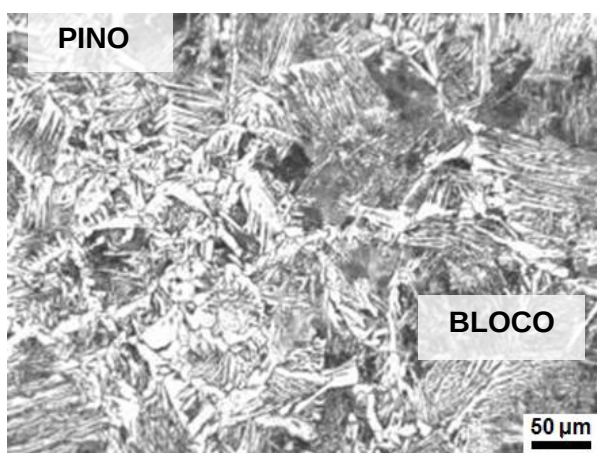


Figura 8 – Micrografias da amostra 31614 (80 kN, FN de 0,5 mm, FR de 1,9 mm , 1700 rpm, Cq de 7, mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

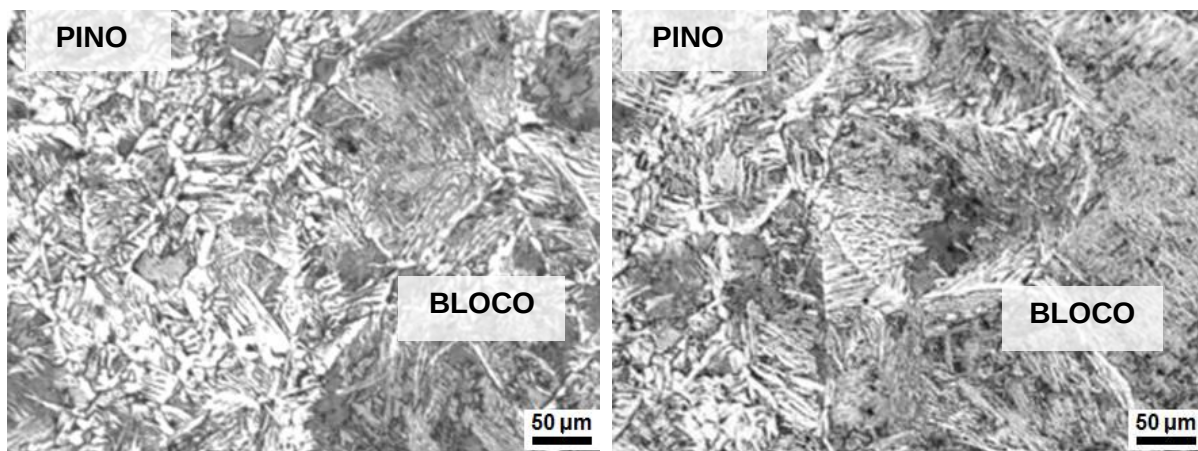


Figura 9 – Micrografias da amostra 31615 (100 kN, FN de 0,5mm, FR de 2,0 mm , 1700 rpm, Cq de 7,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

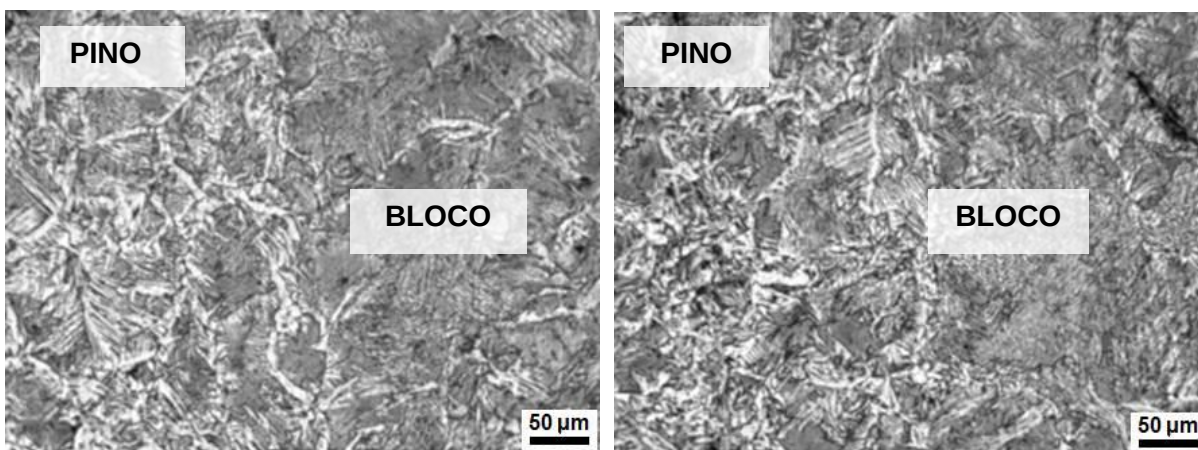


Figura 10 – Micrografias da amostra 31616 (120 kN, FN de 0,5mm, FR de 3,0 mm , 1700 rpm, Cq de 7,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

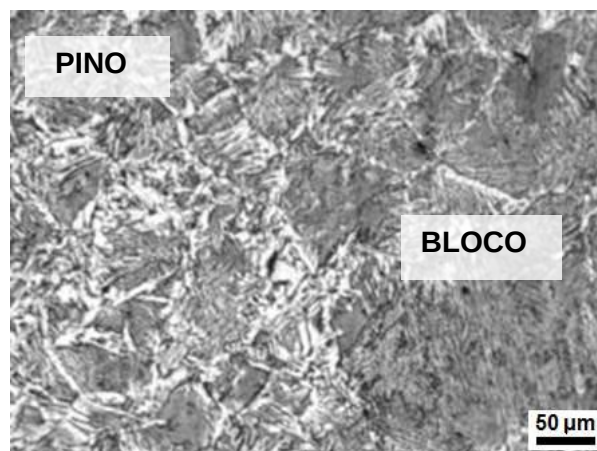
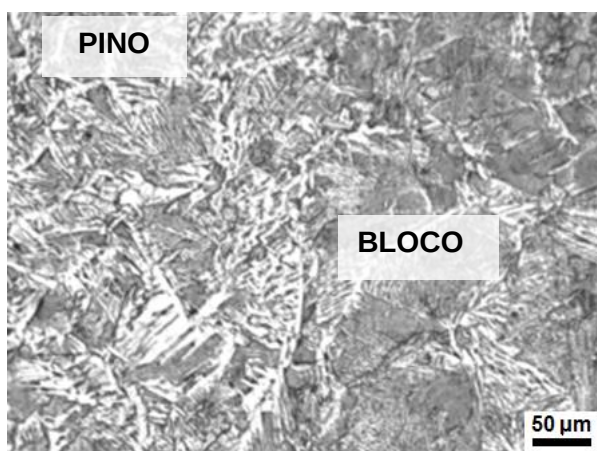


Figura 11 – Micrografias da amostra 31617 (120 kN, FN de 1,0 mm, FR de 4,8 mm, 1700 rpm e Cq de 9,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

A)

B)

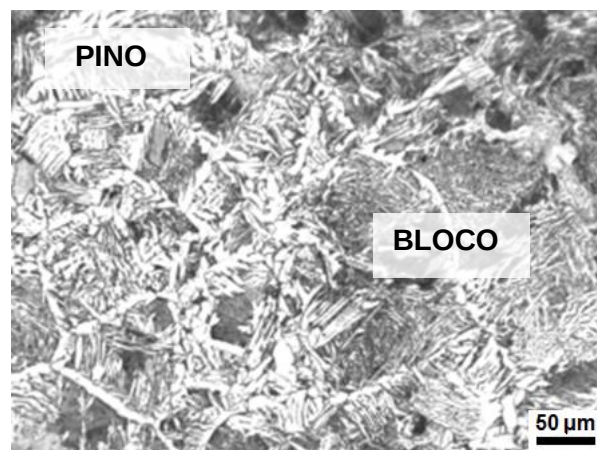
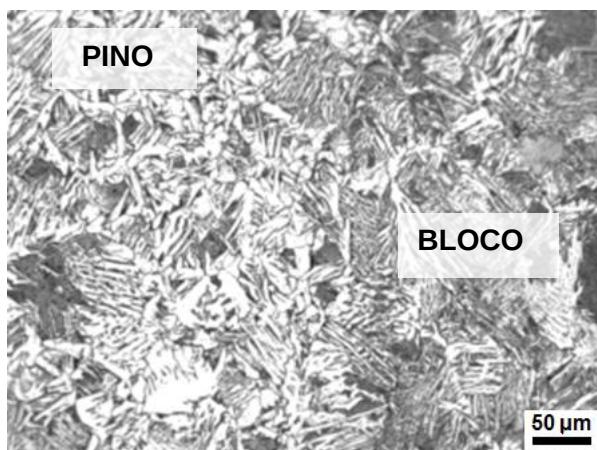


Figura 12 – Micrografias da amostra 31618 (120 kN, FN de 0,5 mm, FR de 3,5 mm, 1700 rpm e Cq de 9,0 mm); A) Mostra a interface pino/bloco a 5,0 mm da face inferior do bloco; B) Mostra a interface pino/ bloco a 10 mm da face inferior do bloco

ANEXO B

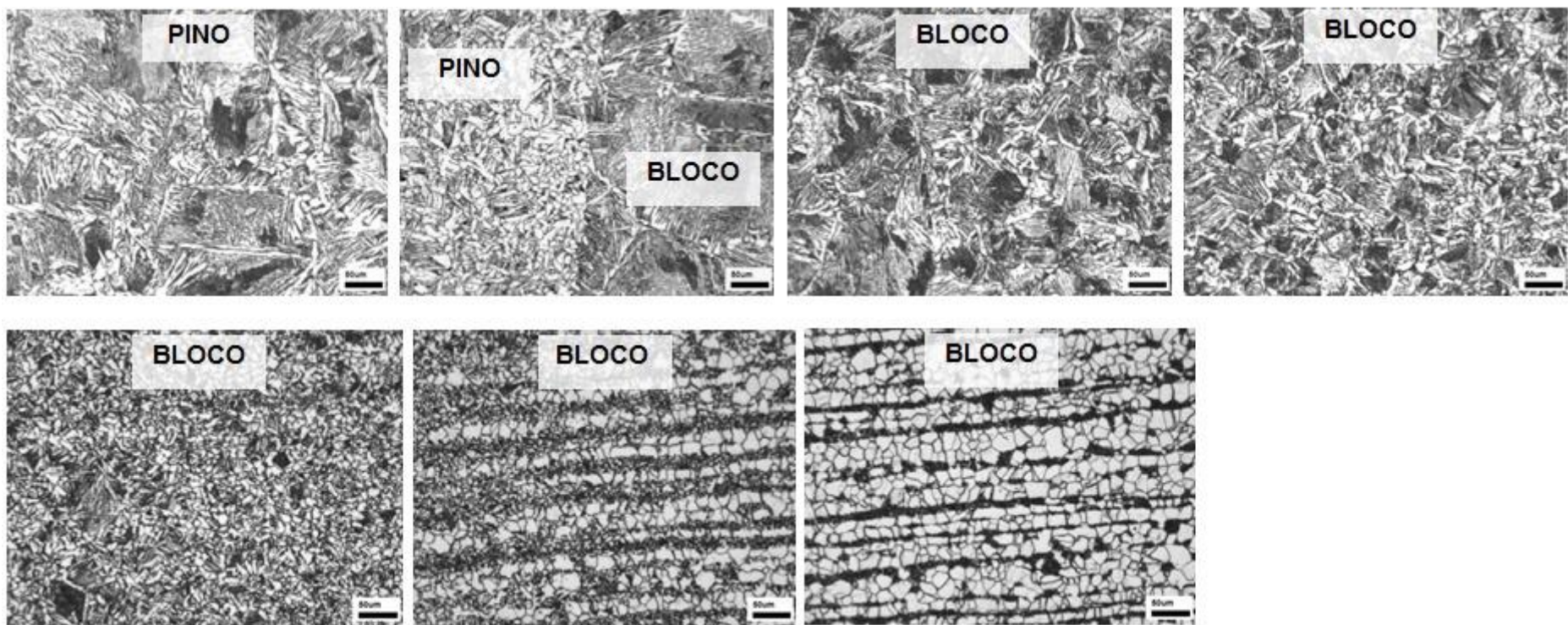


Figura 1 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31601)

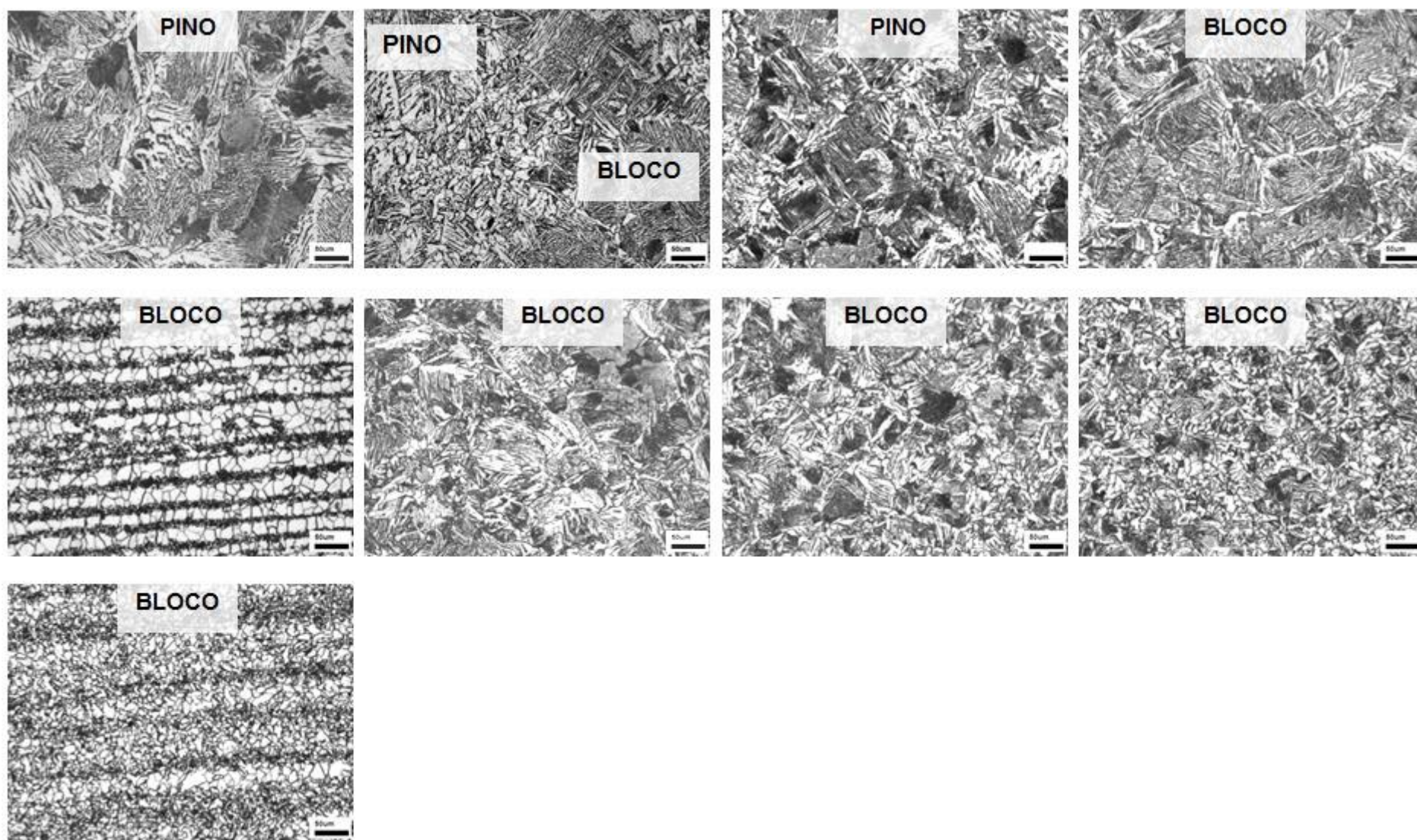


Figura 2 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31601)

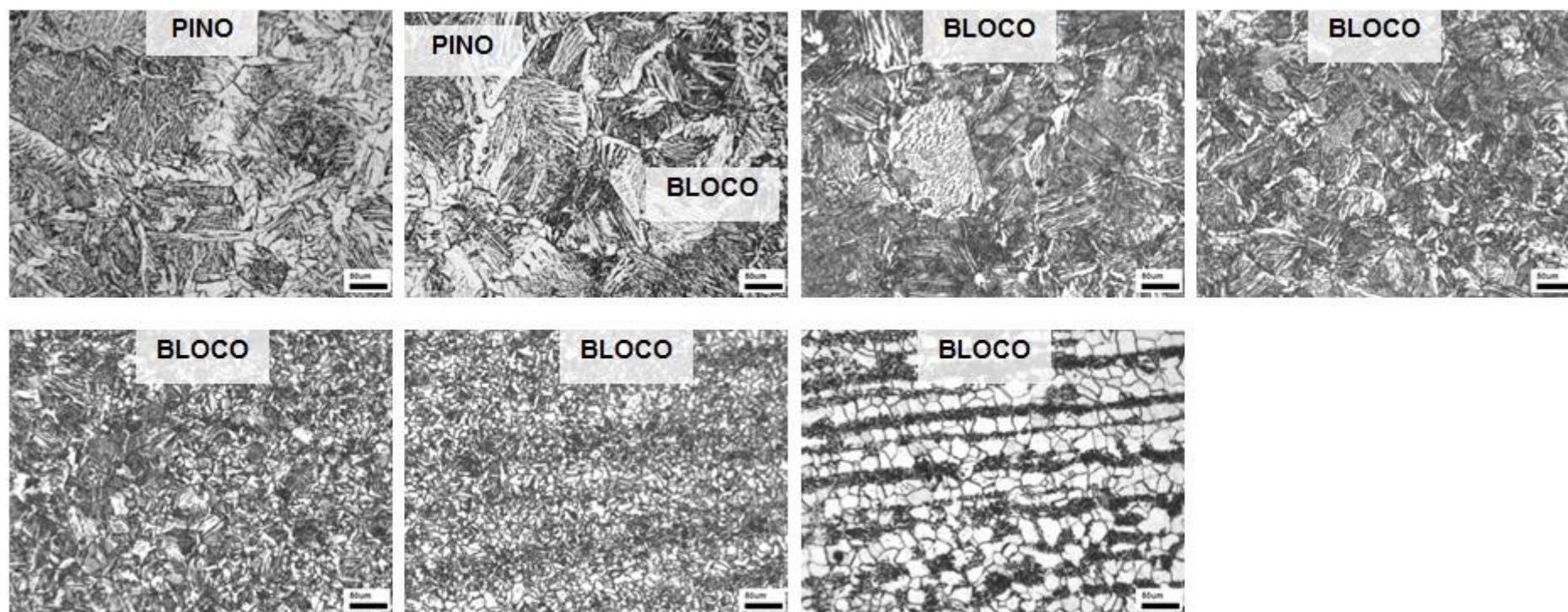


Figura 3 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31602)

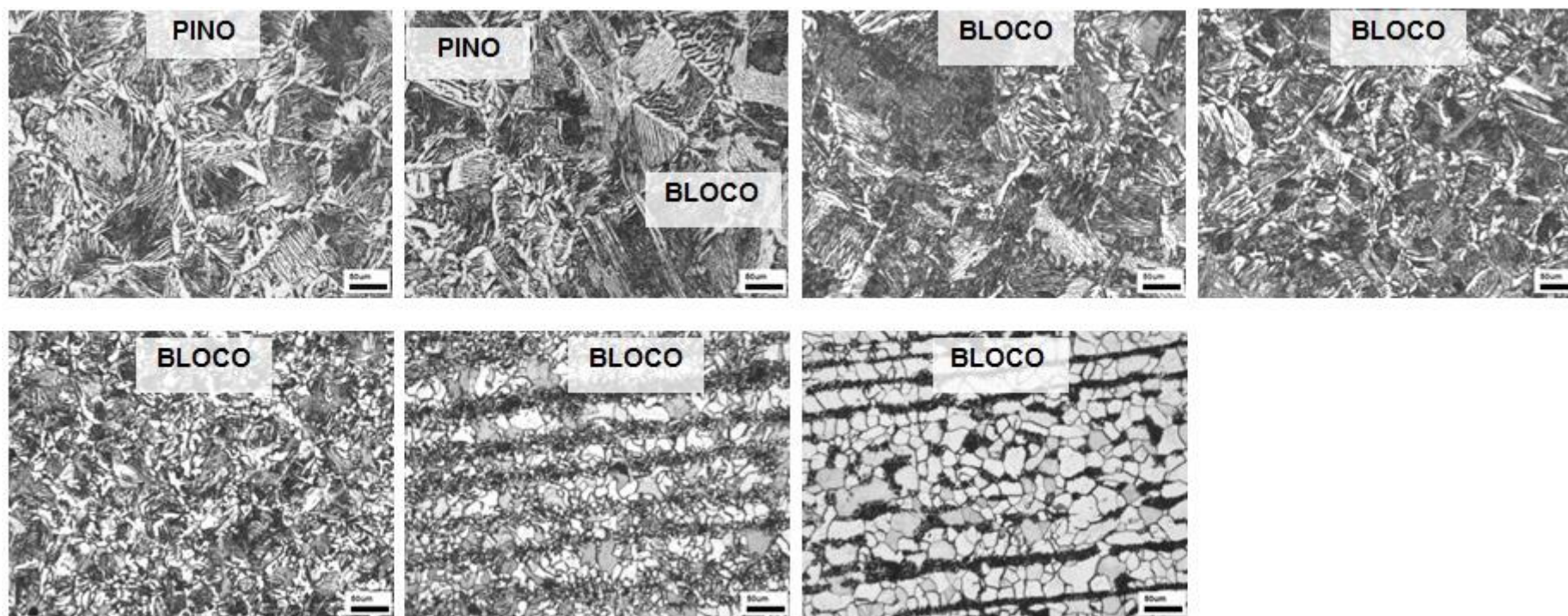


Figura 4 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31602)

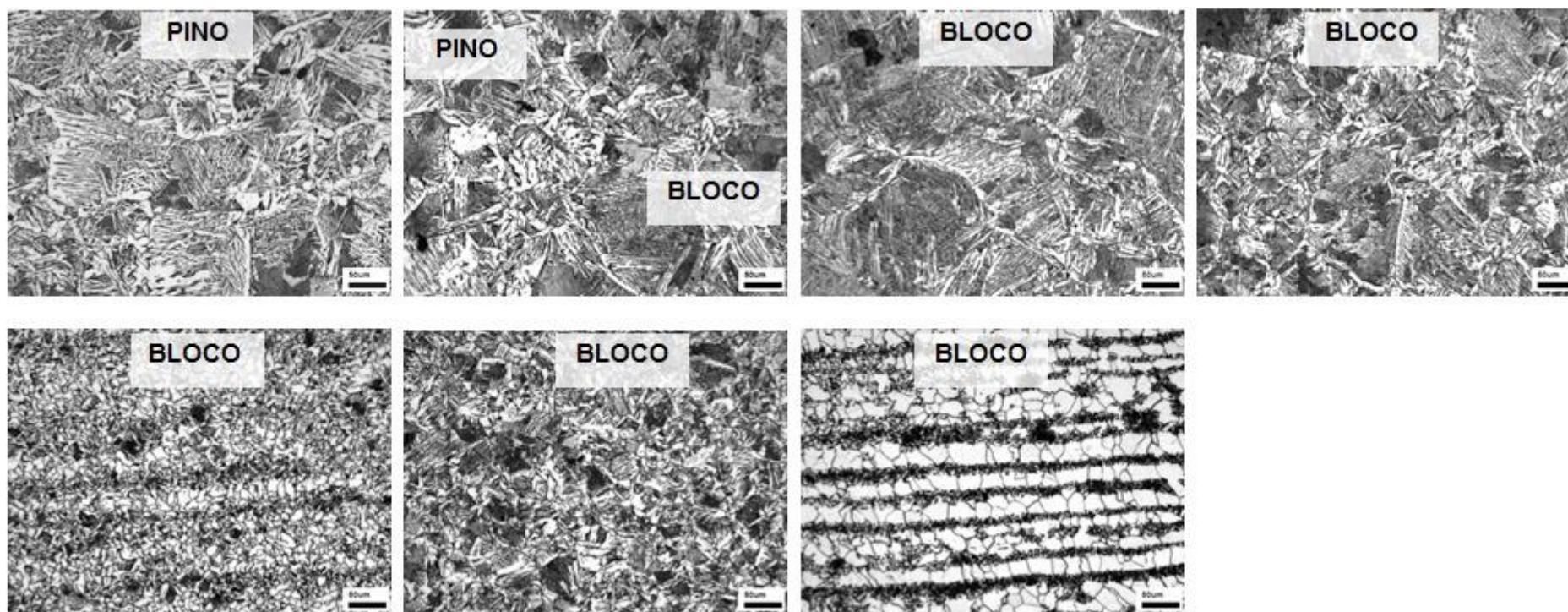


Figura 5 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31603)

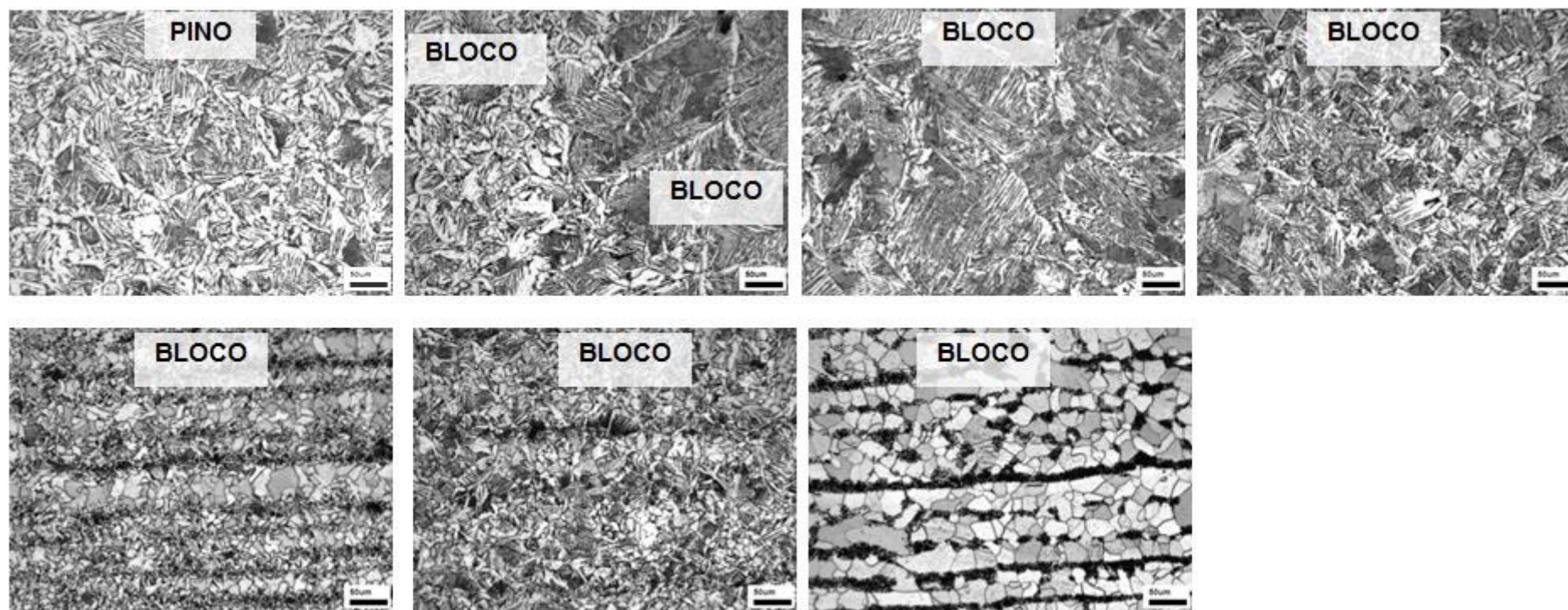


Figura 6 – Figura do perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31603)

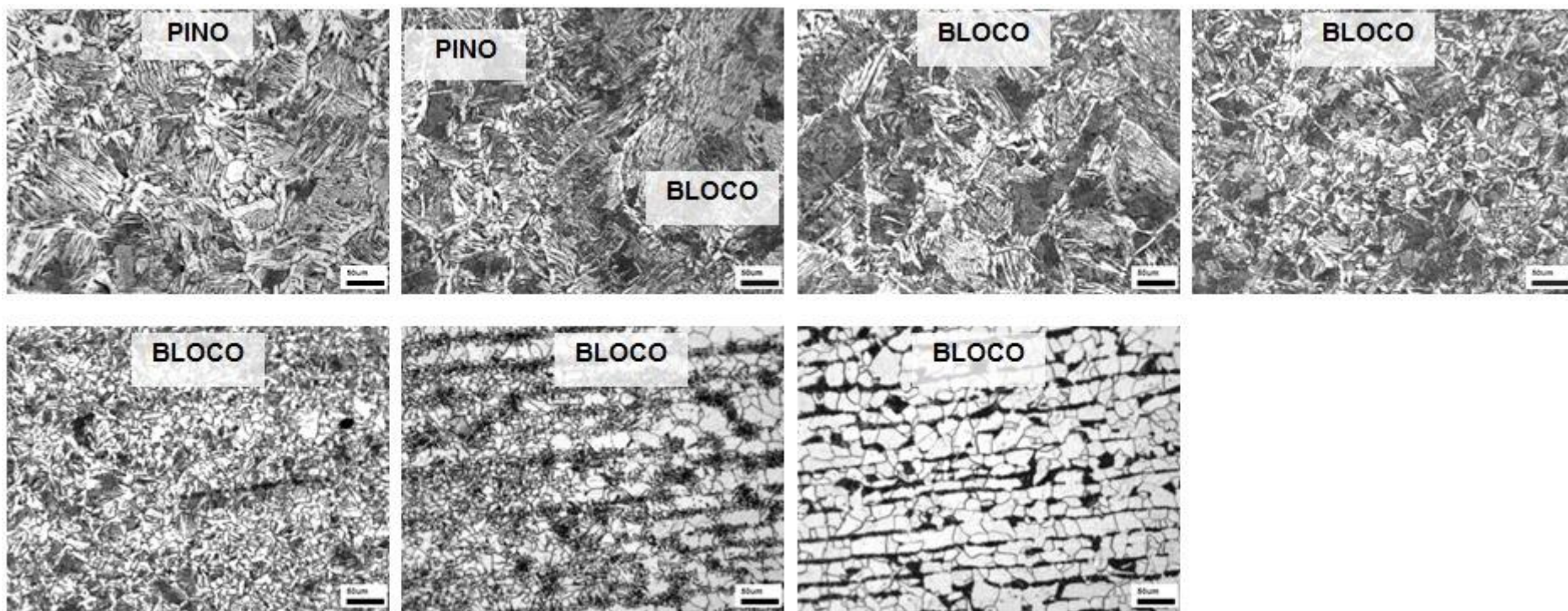


Figura 7 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31604)

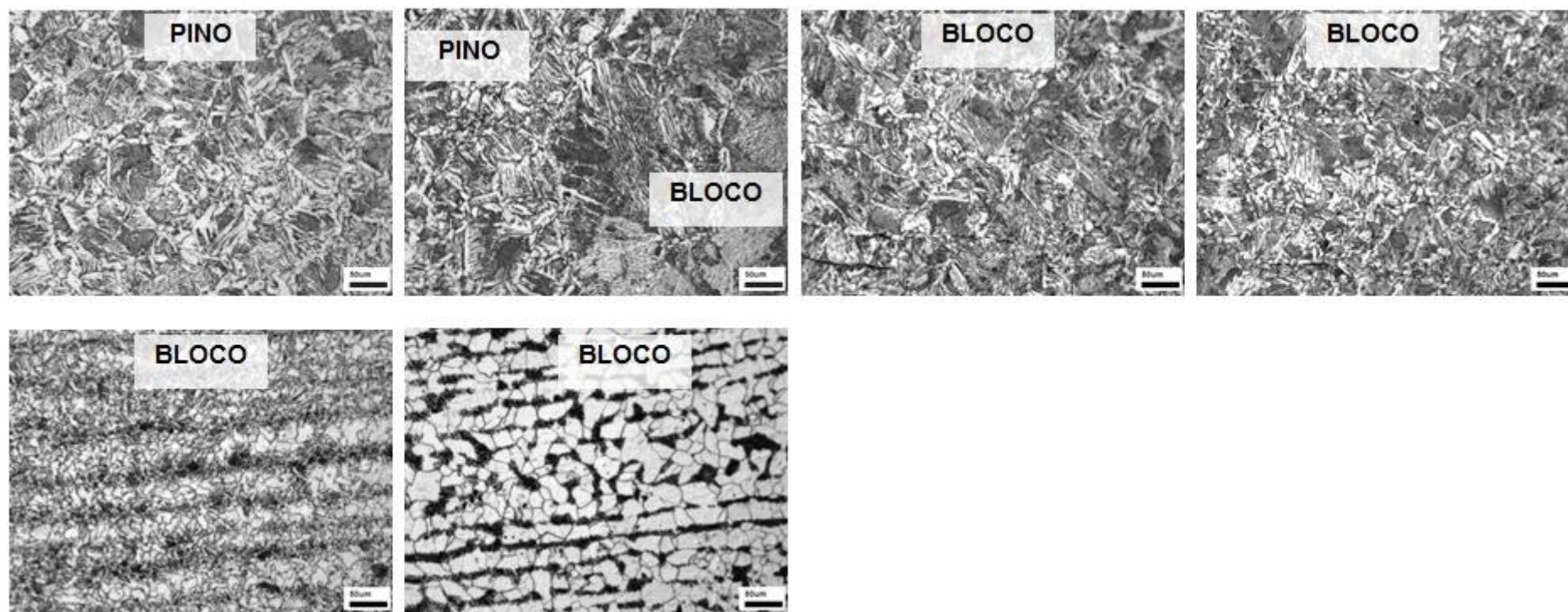


Figura 8 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31604)

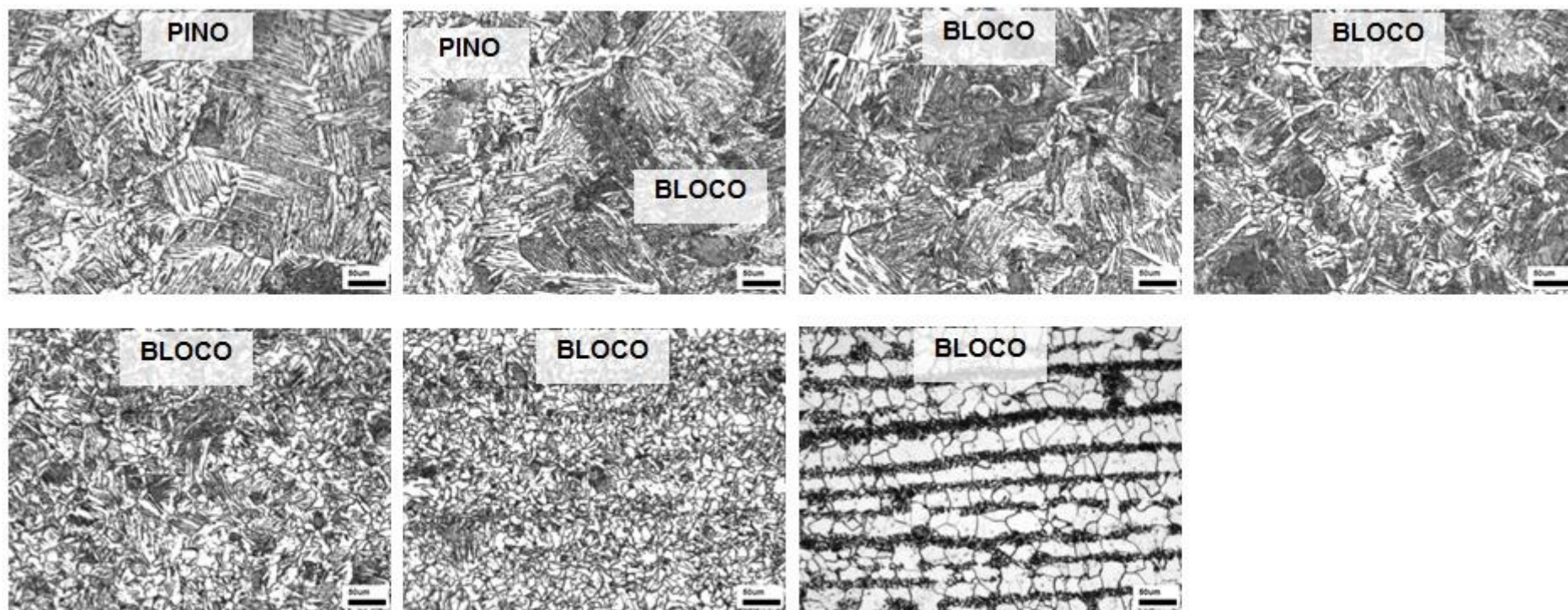


Figura 9 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31609)

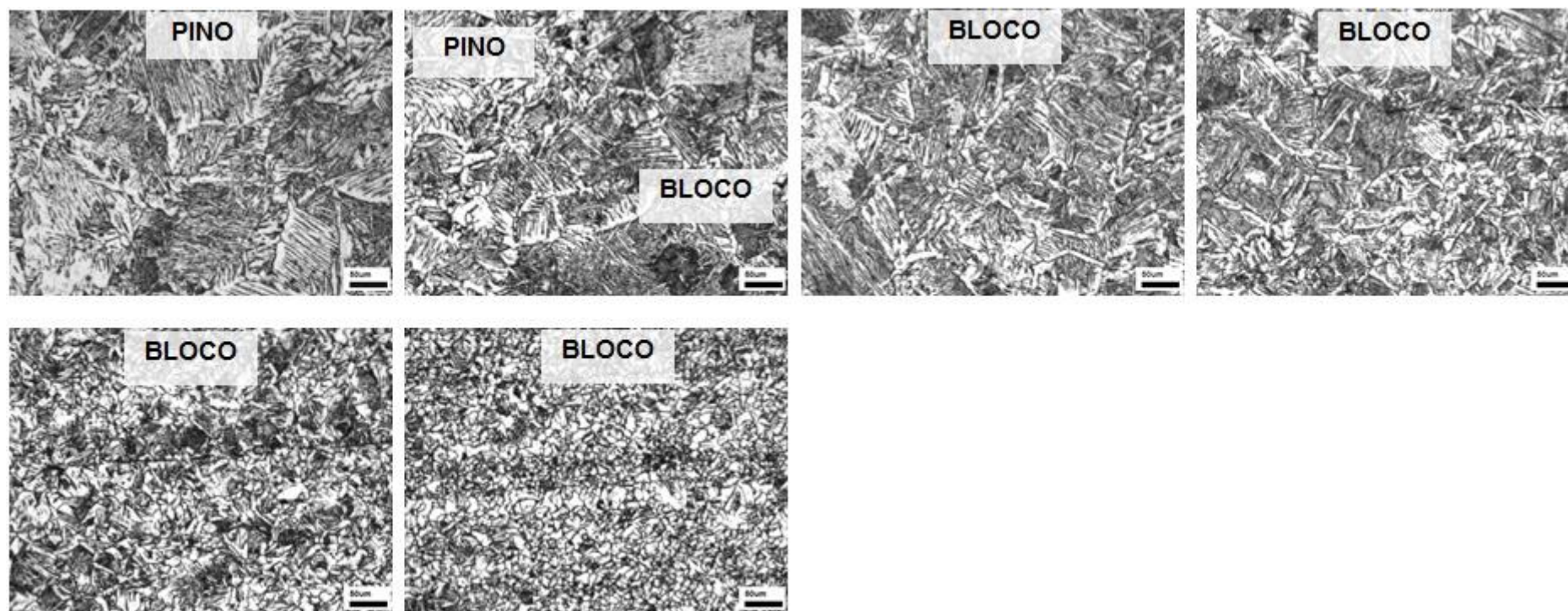


Figura 10 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31609)

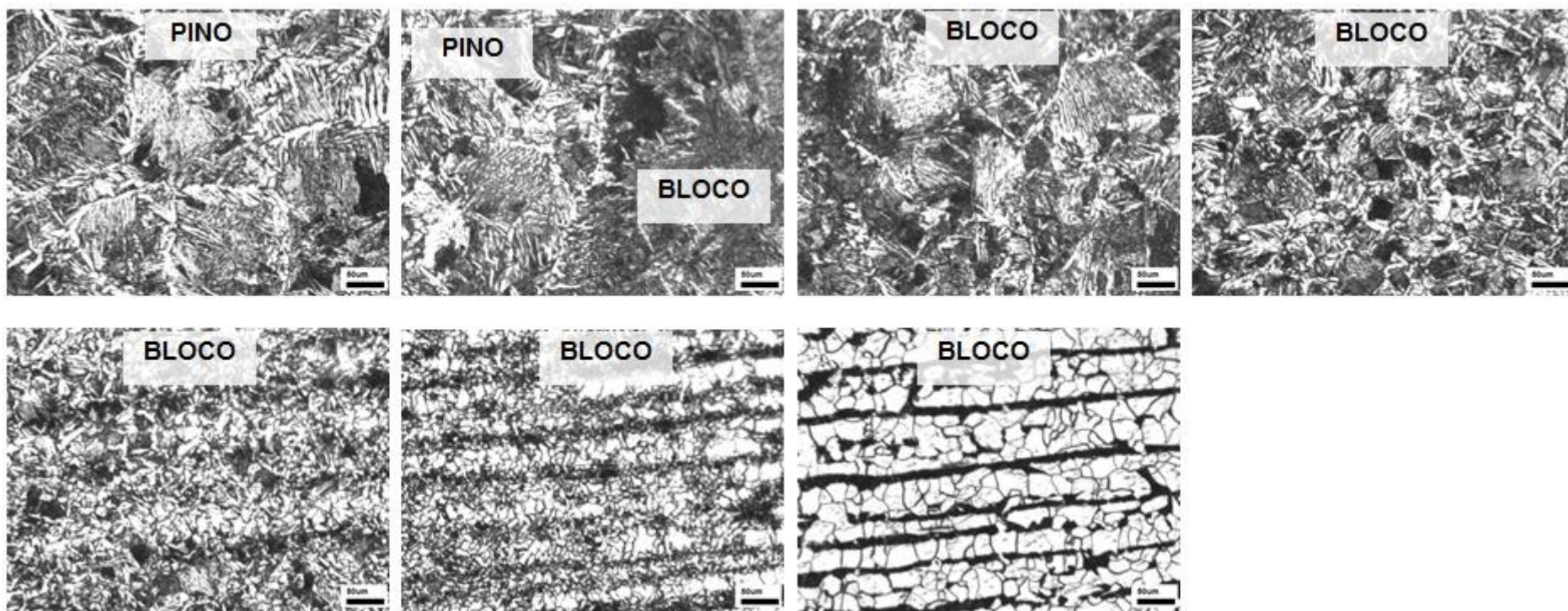


Figura 11 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31610)

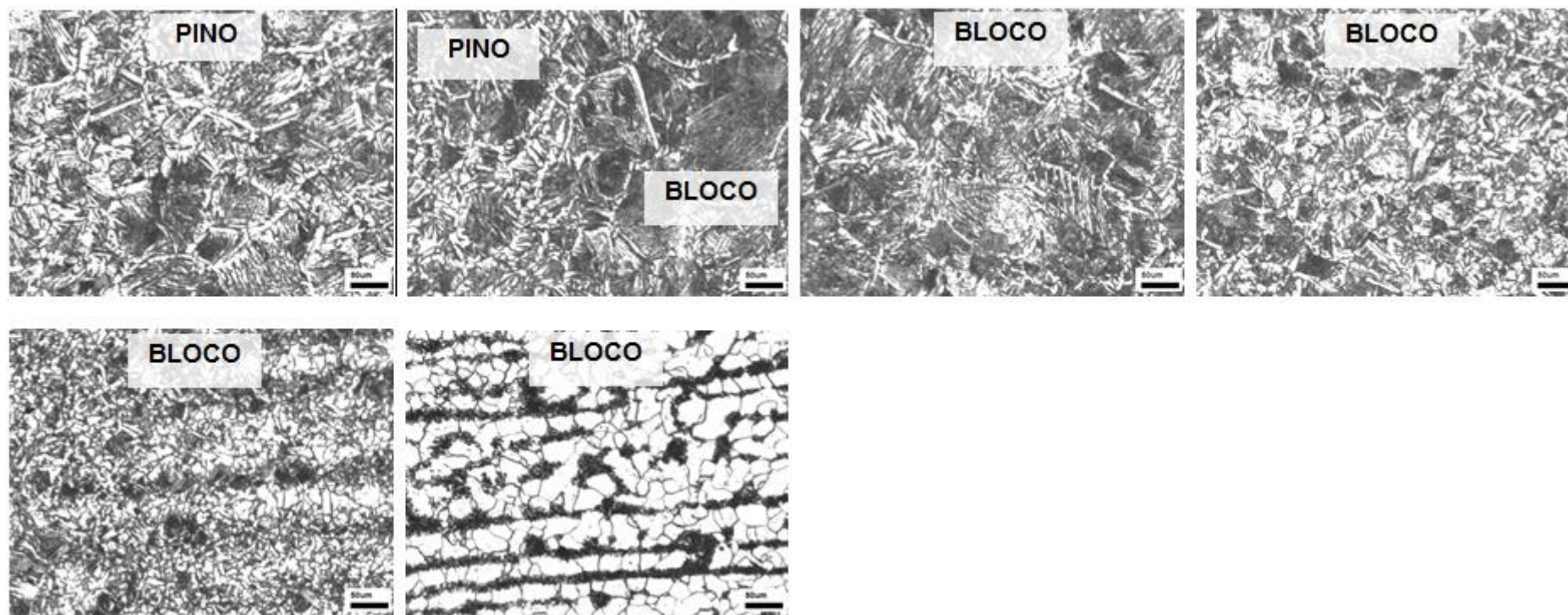


Figura 12 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31610)

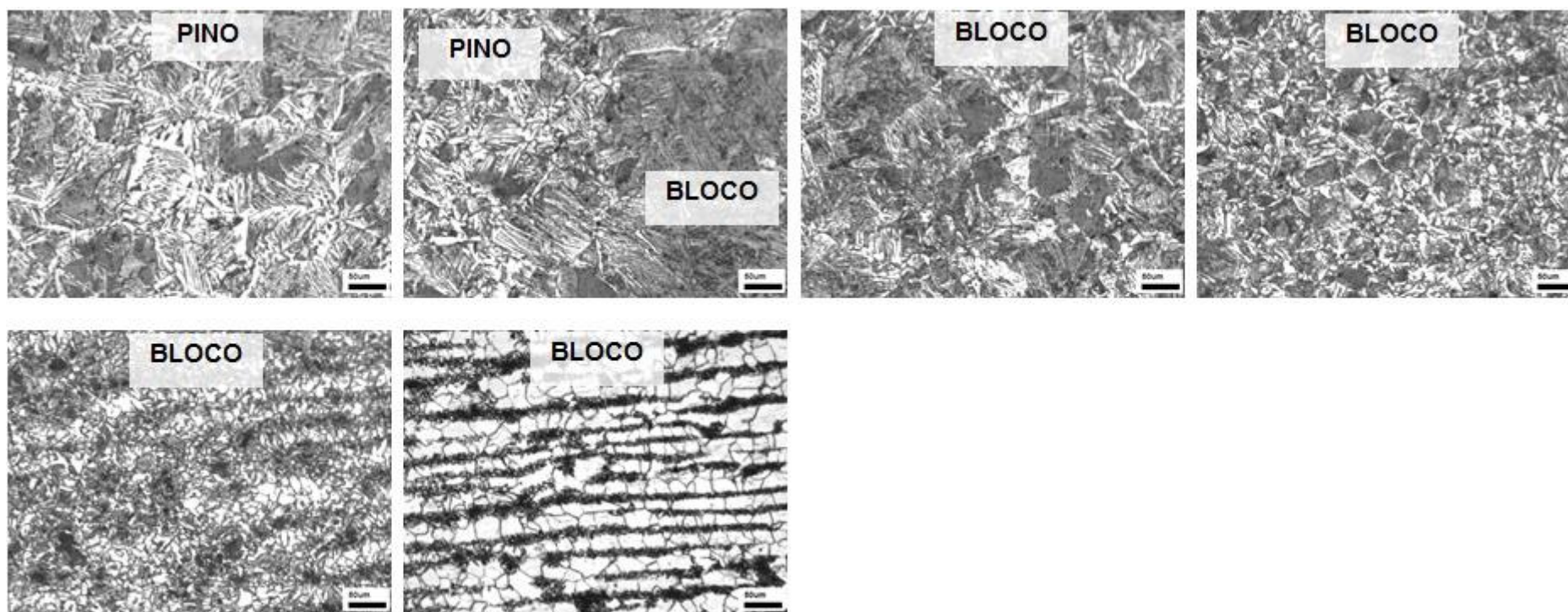


Figura 13 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31611)

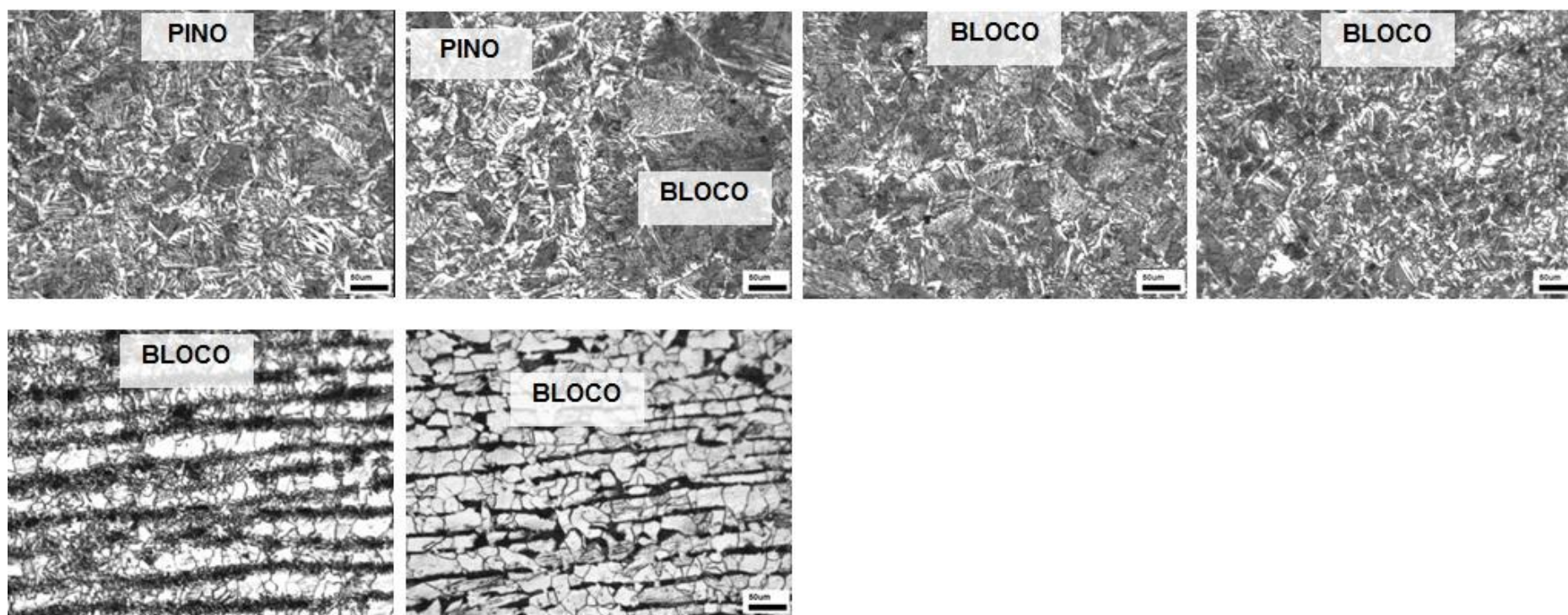


Figura 14 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31611)

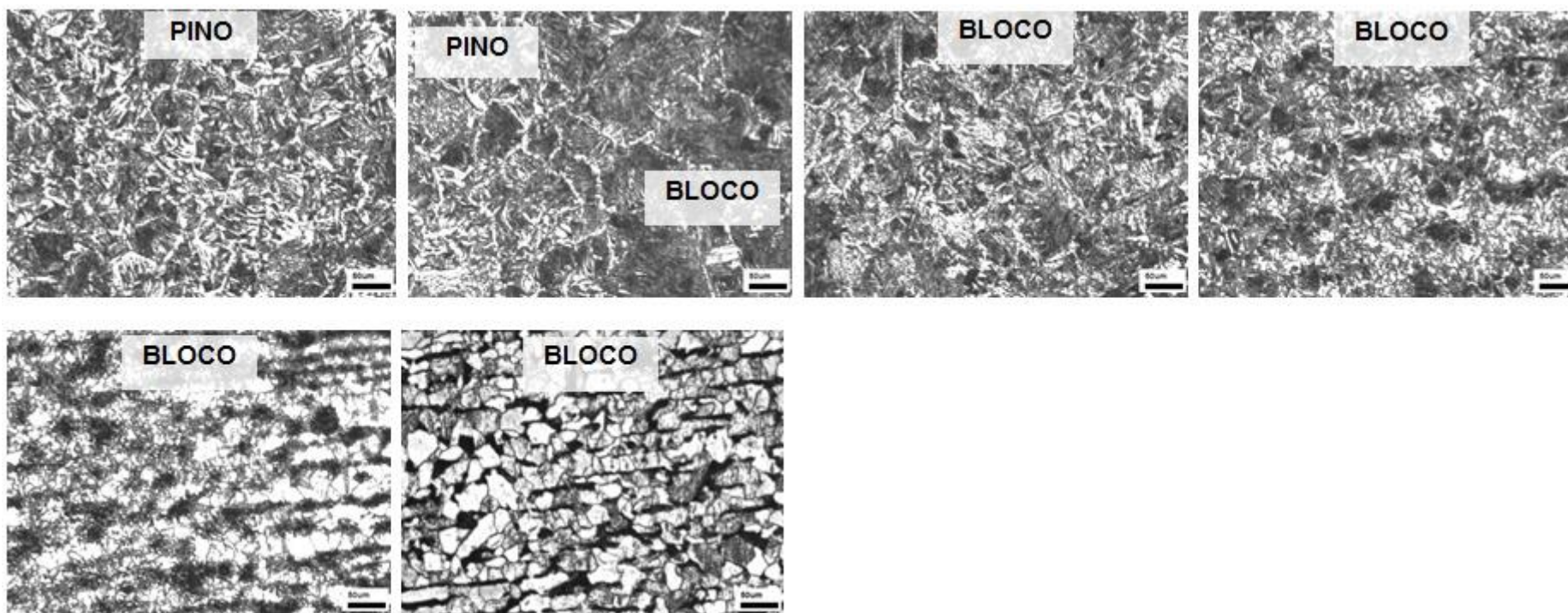


Figura 15 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31612)

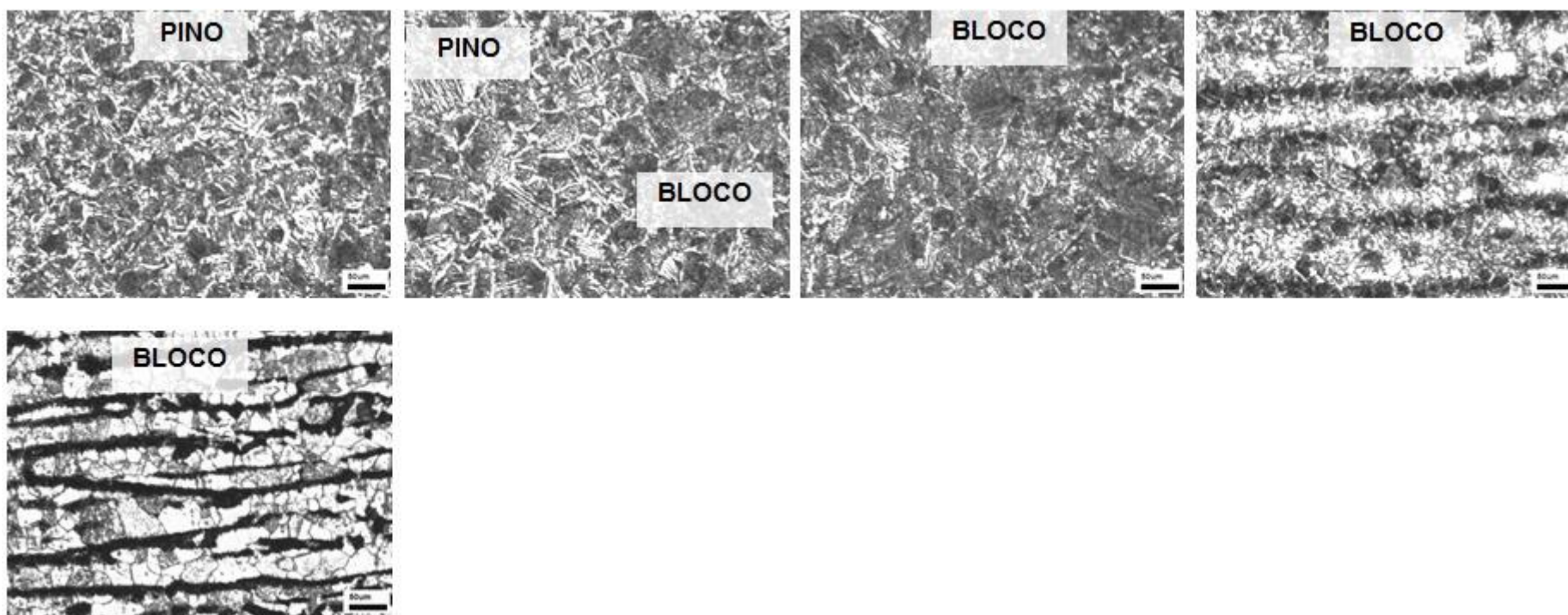


Figura 16 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31612)

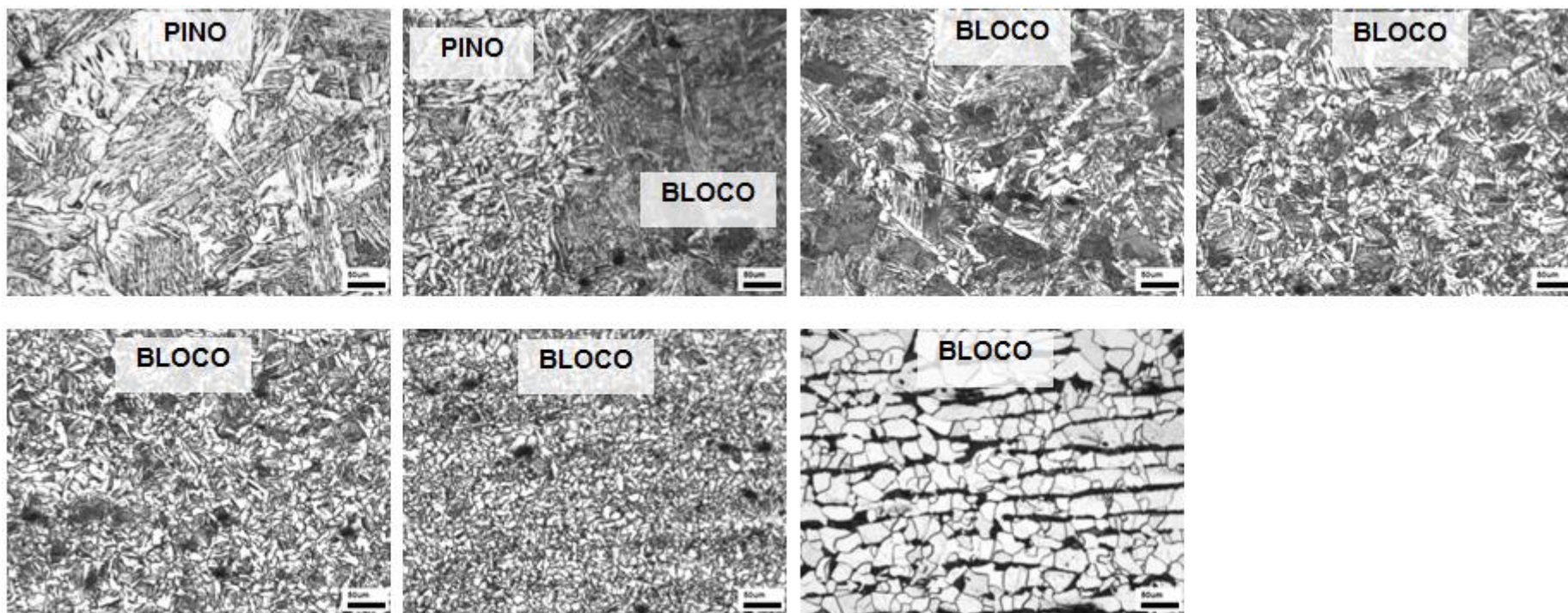


Figura 17 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31613)

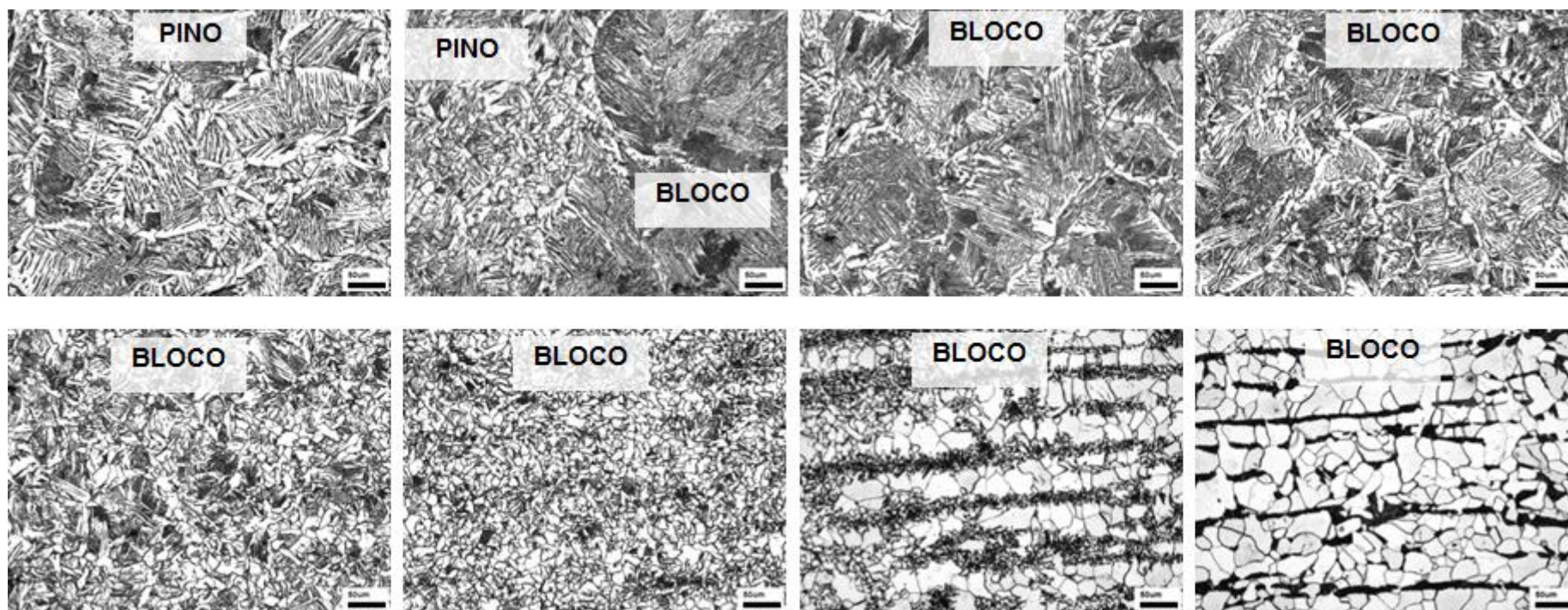


Figura 18 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31613)

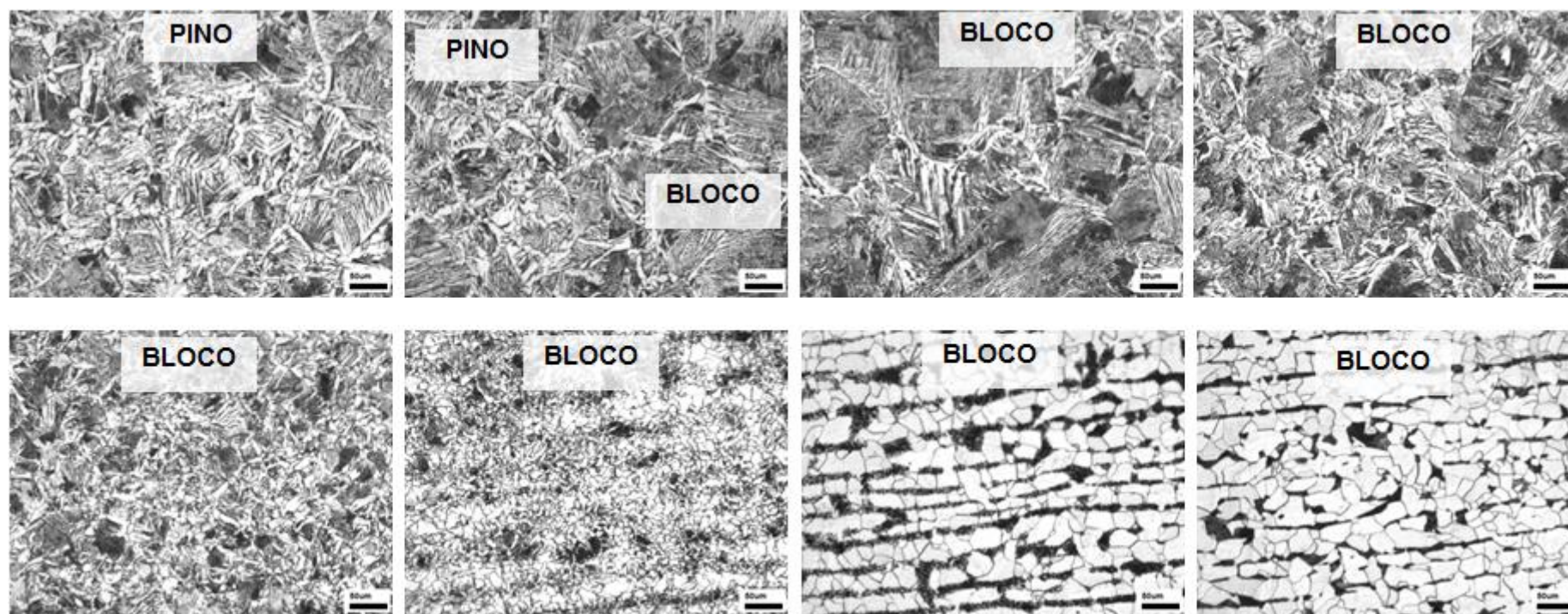


Figura 19 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31614)

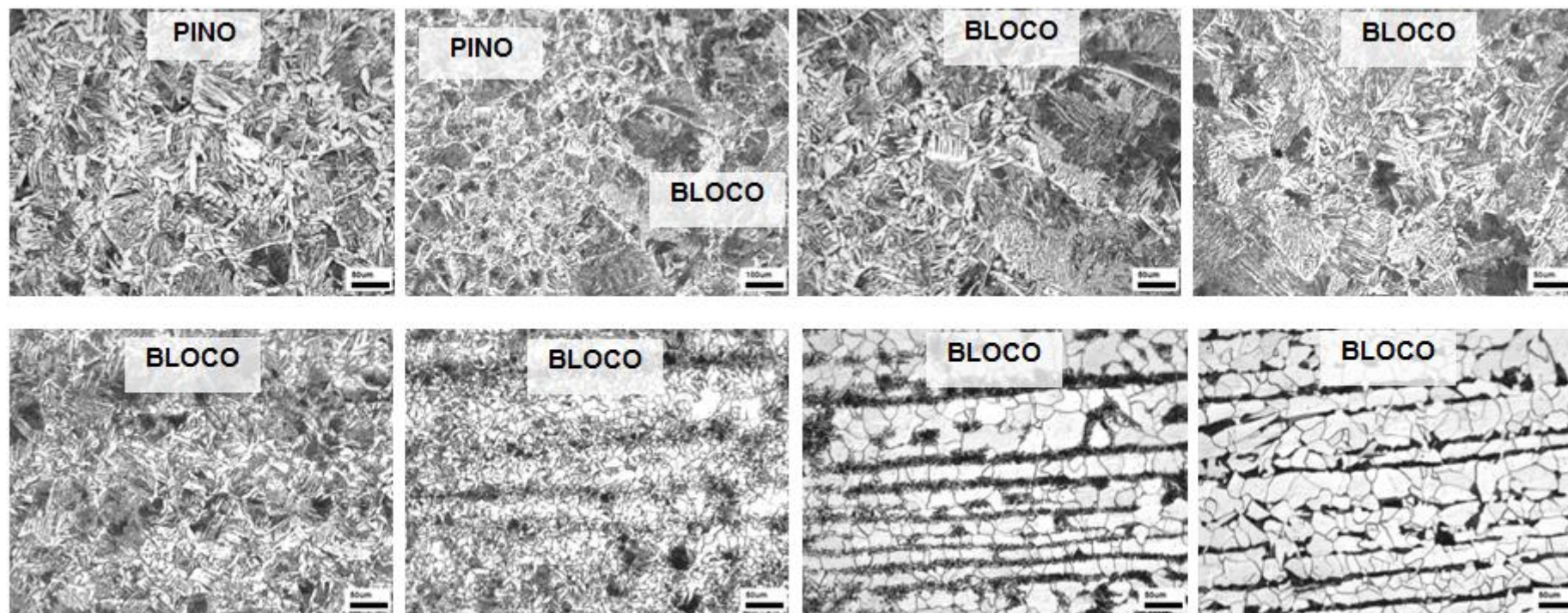


Figura 20 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31614)

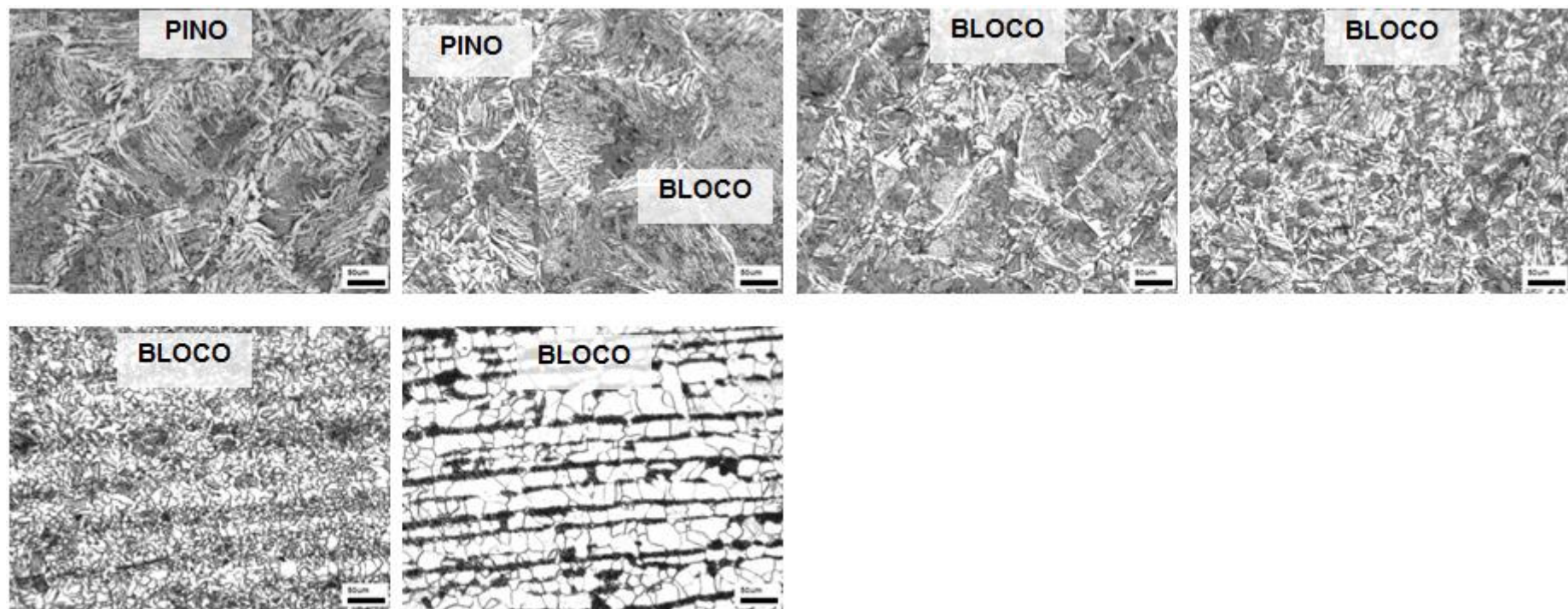


Figura 21 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31615)

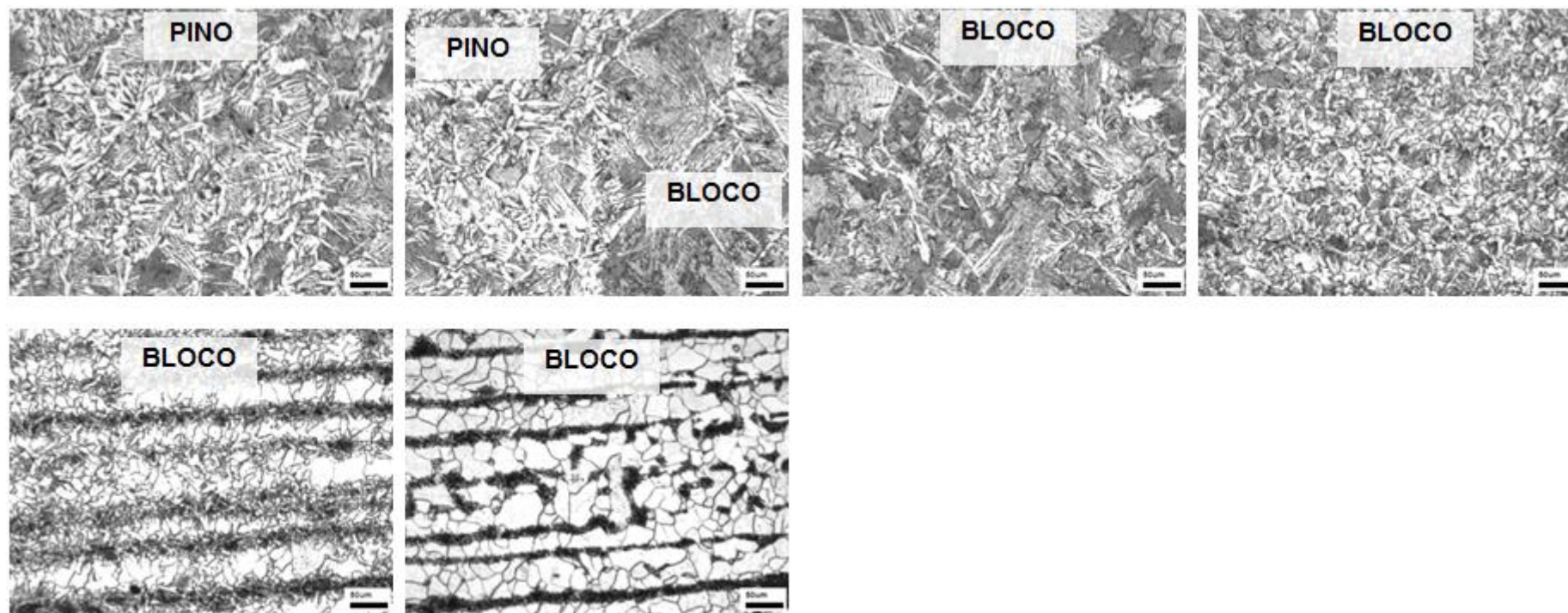


Figura 22 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31615)

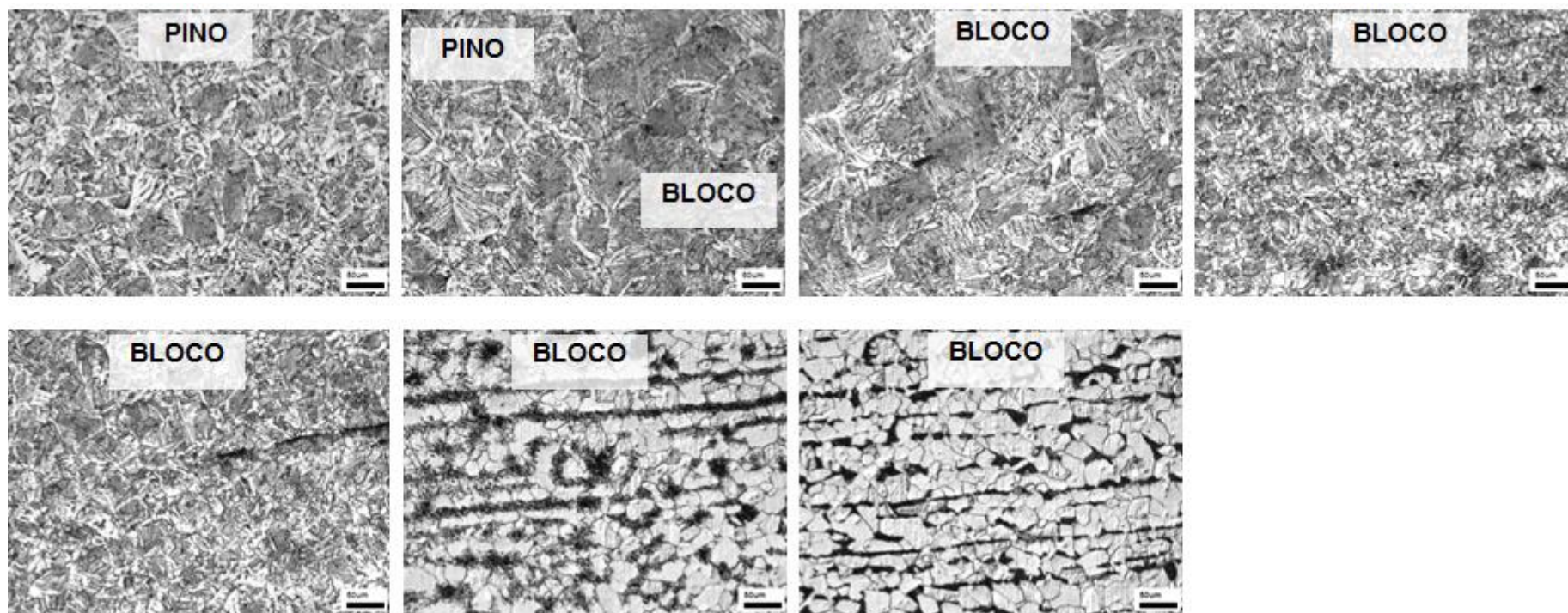


Figura 23 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31616)

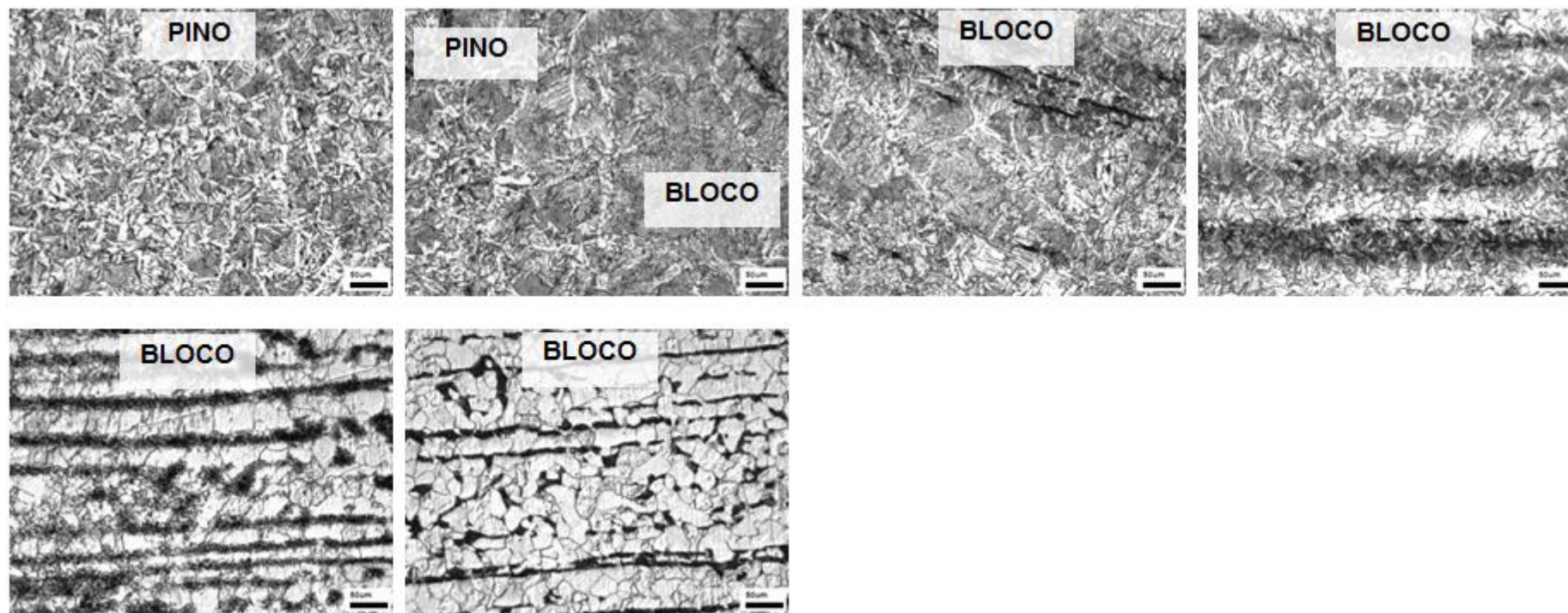


Figura 24 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31616)

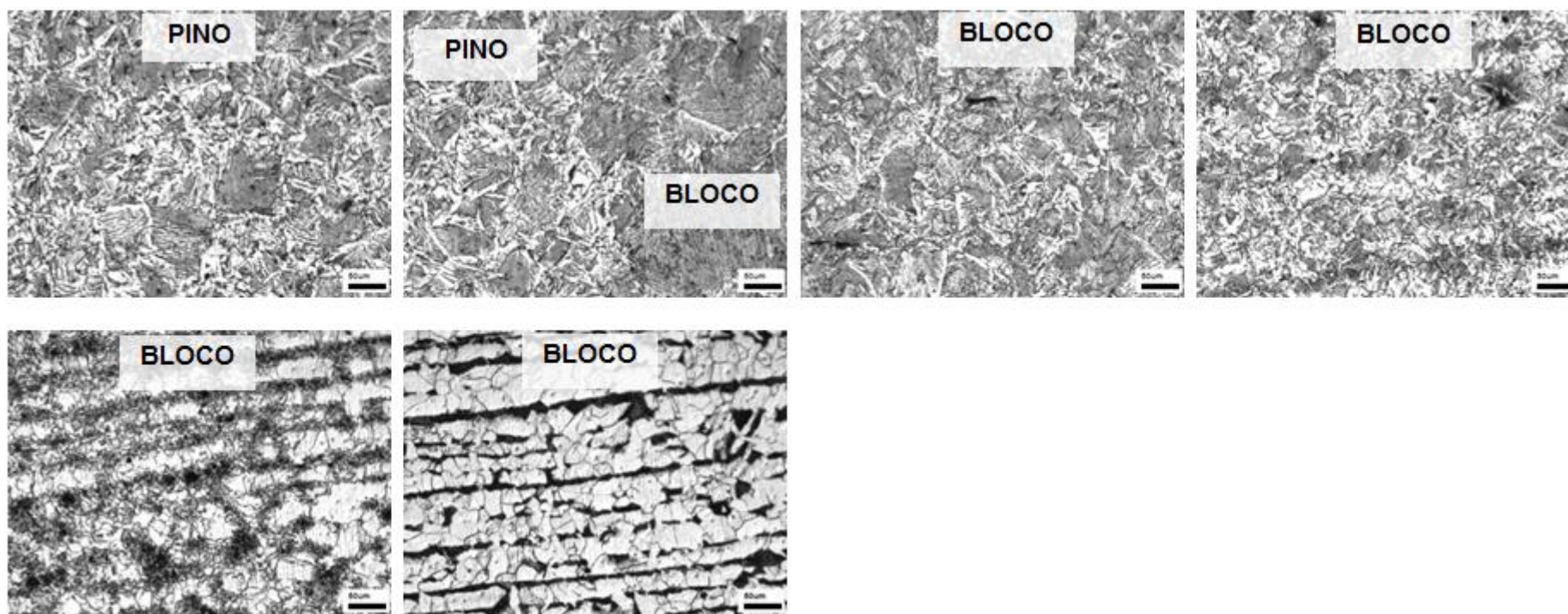


Figura 25 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31617)

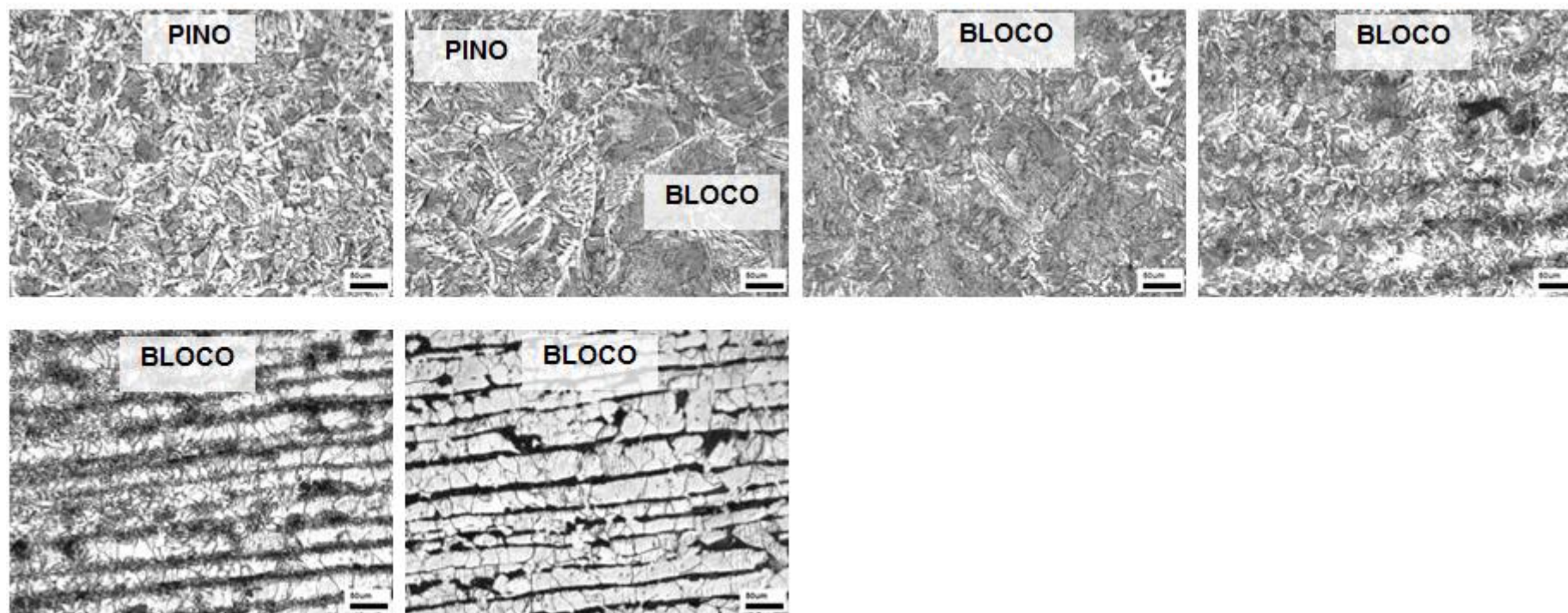


Figura 26 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31617)

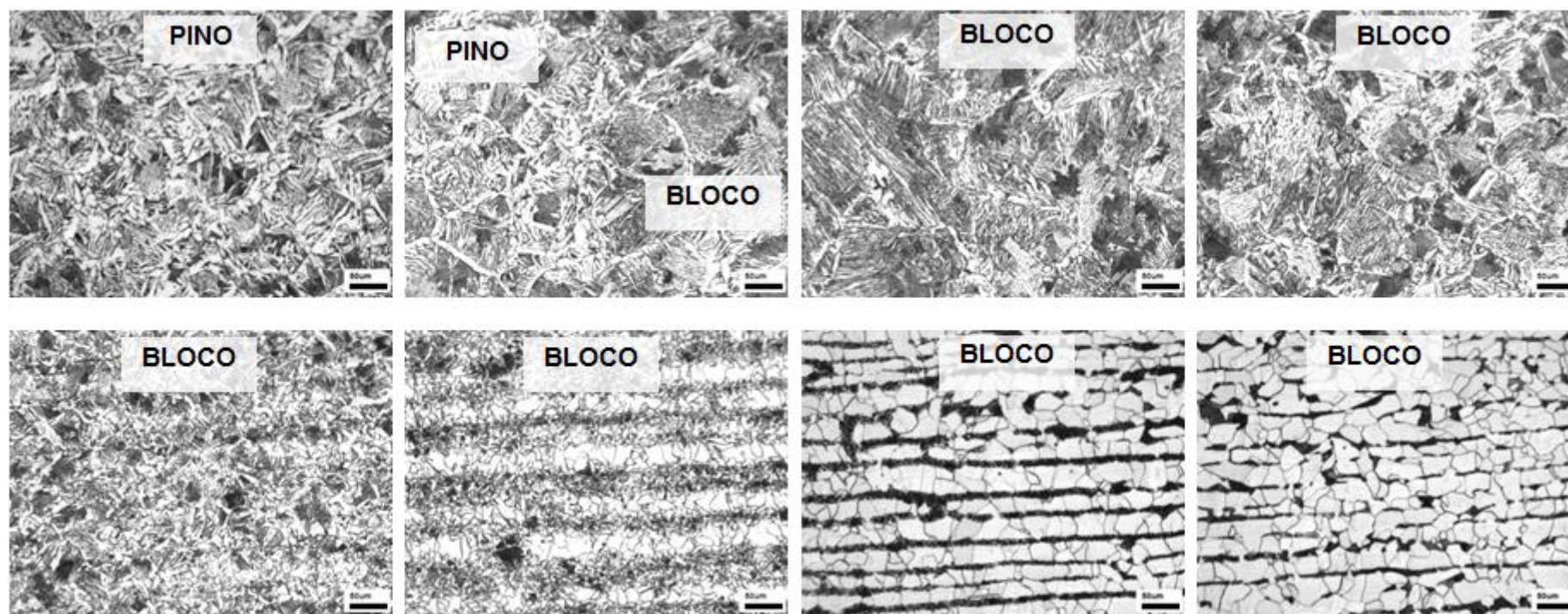


Figura 27 – Perfil horizontal a 5,0 mm da face inferior do bloco (Amostra 31618)

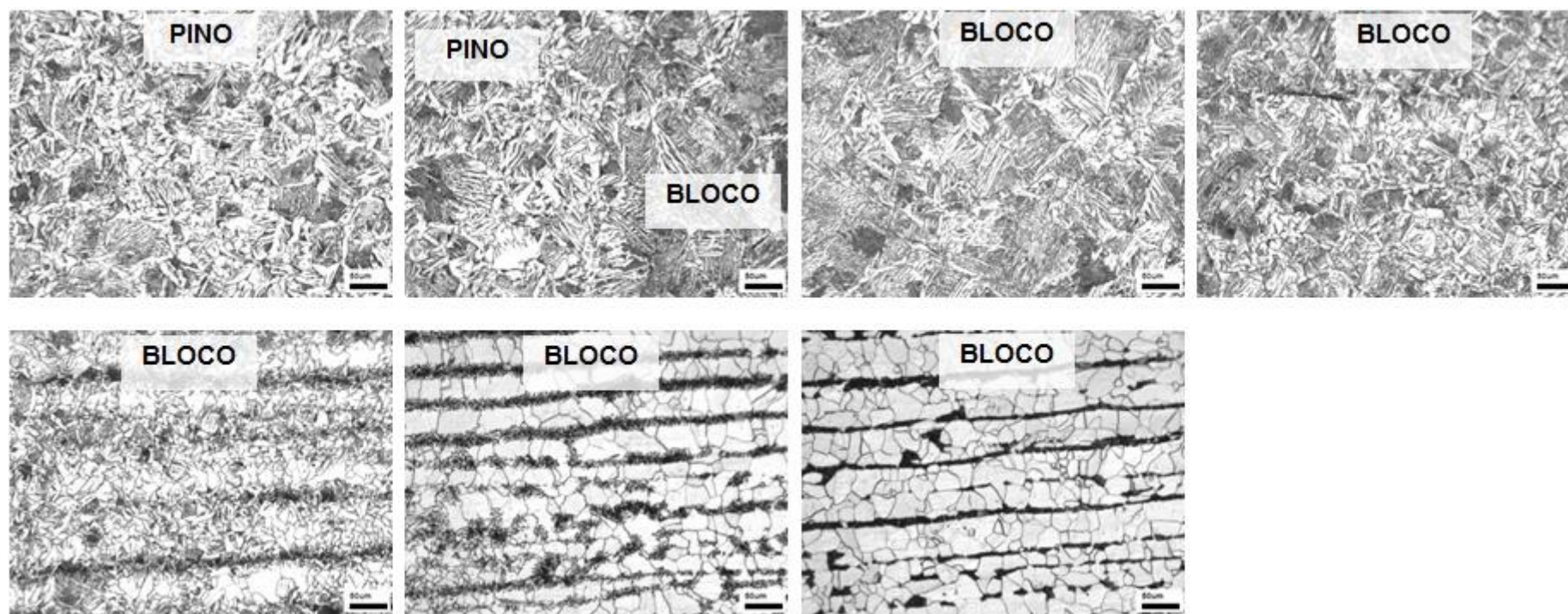


Figura 28 – Perfil horizontal a 10 mm da face inferior do bloco (Amostra 31618)