

MÁRCIO FERREIRA GONTIJO

**O EFEITO DA ESPESSURA DA CHAPA SOBRE A
QUALIDADE DO REPARO POR ATRITO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2012

MÁRCIO FERREIRA GONTIJO

**O EFEITO DA ESPESSURA DA CHAPA SOBRE A QUALIDADE DO
REPARO POR ATRITO**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como requisito
parcial para obtenção do título de
**MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Área de Concentração: Materiais e
Processos de Fabricação.

Orientador: Professor Dr. Ing. Sinésio
Domingues Franco

**Uberlândia - MG
2012**

**À minha esposa Débora e às minhas filhas,
Natália e Clarice.**

AGRADECIMENTOS

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

Ao professor Sinésio Domingues Franco, pelo apoio, compreensão e orientação durante todo o trabalho.

Aos professores Rafael Ariza Gonçalves, Alberto Arnaldo Raslan, Vera Lúcia D. S. Franco, Valério Luiz Borges pela contribuição, discussões e incentivo.

Aos engenheiros Raphael Rezende Pires, Juliano Oséias de Moraes e Fernando Buiatti Rodrigues pela disposição e parceria.

Aos alunos de iniciação científica Gabriela Vieira Lima, Jonas Ávila Cunha, Fernando Pereira Nogueira, Marina Maciel Borges e Simya Staell Rodrigues Campos pela ajuda e companheirismo.

À toda equipe do Laboratório de Tecnologia em Atrito em Desgaste pelo dedicação e eficiência.

Aos colegas da pós-graduação pela solidariedade e convivência.

À Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS, pelo apoio financeiro ao Projeto Atrit e pela oportunidade de desenvolvimento.

Aos colegas do SENAI pela ajuda e participação imprescindível na realização deste trabalho.

Aos meus pais José e Maria, minha irmã Magda e meus irmãos Maurício e José Marcelo pelo amparo e atenção. A minha esposa Débora, minhas filhas Natália e Clarice pelo amor e compreensão.

Aos amigos e familiares pelo estímulo e confiança.

À Deus que foi o maior apoio, dando força e esperança para concretizar este trabalho.

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

Resumo

O reparo por atrito (em inglês *Friction Hydro Pillar Processing* – FHPP) é um processo de soldagem no estado sólido surgido na década de 1990. Neste caso, um pino é colocado em rotação e pressionado contra um furo. Com este método é possível reparar defeitos nas estruturas através de uma sequência de pinos soldados ao longo do mesmo. Para isso deve haver uma sobreposição de reparos de modo a preencher todo o defeito. Esta técnica tem potencial para reparar estruturas de aço das indústrias *offshore*, uma vez que o processo reduz fortemente a fragilidade pelo hidrogênio e a porosidade.

Neste trabalho foram investigados os efeitos da espessura da chapa na qualidade do reparo por atrito. Para isso foram realizados ensaios em chapas de aço com três espessuras (25,4, 38,1 e 50,8 mm), duas intensidades de forças axiais (60 kN e 120 kN) e duas velocidades de rotação (1400 rpm e 1700 rpm). Os materiais utilizados foram aço ASTM A36 para os blocos e aço ABNT 1010 para os pinos.

As geometrias dos pinos e dos blocos tiveram como referência trabalhos desenvolvidos no próprio Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD). Para determinar as dimensões dos blocos foi feita simulação em elementos finitos, definindo com isso que, a única variável a influenciar na condução de calor fosse às espessuras dos blocos

O equipamento utilizado nos ensaios de reparo foi a Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA 3), desenvolvido pela equipe do LTAD. A Unidade é equipada com sistema de controle e aquisição de dados que permite trabalhar com parâmetros prefixados de ensaio, controlar todo o processo e traçar gráficos da variação dos parâmetros em tempo real de ensaio. Os parâmetros de ensaio são: força axial, rotação, comprimento de queima, força de forjamento e tempo de forjamento.

Para interpretar o efeito da espessura da chapa no processamento de pinos por atrito é necessário conhecer a temperatura durante o processamento. Para isso foram especificados termopares compatíveis com as temperaturas obtidas, construída uma placa com componentes eletrônicos para soldar o termopar no bloco, num ponto o mais próximo possível da região de aquecimento e desenvolvido pelos técnicos do LTAD um programa computacional para a aquisição de temperatura.

Após os ensaios foram feitas análises metalográficas e medição de dureza nos blocos para avaliar a qualidade dos reparos e verificar a influencia da espessura.

Não foram detectadas falhas de preenchimento indicando que os parâmetros de ensaio escolhidos foram adequados.

A verificação da influência do efeito das espessuras das chapas sobre a qualidade do reparo por atrito foi prejudicada em virtude de variações de composição química ao longo da seção transversal das chapas, mas em locais onde os carbonos equivalentes são próximos pôde-se verificar o efeito da espessura. Foi observado que nas chapas com maiores espessuras, houve maiores velocidades de resfriamento e maiores valores de dureza.

GONTIJO, M. F. **The effect of Plate Thickness on the Friction Hydro Pillar Processing Quality**. 2012. 112 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The Friction Hydro Pillar Processing is friction welding process introduced in the early 90s. It is a solid-state welding process in which a hole is drilled and filled with a consumable rod of the same material. This method is capable of repairing long structure defects by a number of studs, welded sequentially along the defect, whereby a minimum in overlapping between two consecutive studs is assumed. This is a potential technique to repair steel structures in the offshore industry, since porosity and hydrogen embrittlement are strongly reduced in this process.

In this work, the effects of the welded plate on the welding quality were studied. FHPP tests were carried out using steel plates of one, one and half and two inches. The axial stud load was 60 and 120 kN. The stud rotation was 1,400 and 1,700 rpm. Blocks studs and were machined out from ASTM A36 and AISI 1010 steels, respectively. The stud and base geometries were based on previous work conducted in the Laboratory for Friction and Wear Technology (LTAD). The block geometry was determined so that the block dimensions did not have any significant effect on the cooling rate.

The welding tests were carried out using a welding system designed and built by LTAD. The unit consists of a hydraulic unit, a welding head and a control system. The unit is able to acquire and control the whole process according to the selected welding parameters. The main welding parameters are axial force, rotation, burn-off-length, forging force and duration. In order to evaluate the effects of the steel plate thickness on the cooling rate, thermocouples were welded close to the welding interface. The temperature as function of the time during the welding process for different plate thickness was acquired. The microstructure was characterized by using conventional metallographic techniques. The mechanical properties across the interface were evaluated by means hardness profiles.

No welding defect was observed in metallographic sections for the selected welding parameters. Analysis of the effects of the welding plate thickness was complicated due to the fact that the selected welding plates showed chemical composition variations along their cross sections. Although, considering the equivalent carbon content it was possible to verify the effects of the plate thickness on the welding quality. It was observed that the higher the steel plate thickness the higher the cooling rate and the hardness.

Keywords: *Hydro Pillar Processing. Plate thickness. Axial force. Temperature.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Geometria de pino e bloco usado nos ensaios de preenchimento.....	02
Figura 2.1	Esquema de obtenção de uma solda pela aproximação das superfícies a unir (MARQUES, 1991).....	04
Figura 2.2	Soldagem por fusão (MARQUES, 1991).....	05
Figura 2.3	Soldagem por pressão (MARQUES, 1991).....	05
Figura 2.4	Processo de solda por atrito. (A) Rotação de uma das peças; (B) Início da aplicação de força; (C) Aquecimento e deformação devido ao atrito e a pressão criada pela força aplicada; (d) Rotação é cessada e é aplicada força axial adicional (força de forjamento), a solda é completada criando um colar de rebarba (flash) (< http://www.fpe.co.uk/process/friction-welding >).....	06
Figura 2.5	Solda por atrito com acionamento direto (MARQUES, 1991).....	07
Figura 2.6	Solda por atrito com acionamento por inércia (MARQUES, 1991).....	08
Figura 2.7	Fases do processo: I) Fase de atrito; II) Fase de aquecimento; III) Fase de frenagem e IV) Fase de forjamento. (MEYER, 2003).....	09
Figura 2.8	Influência dos parâmetros na solda por atrito (MEYER, 2003).....	12
Figura 2.9	Ilustração esquemática do processamento de pinos por atrito.....	14
Figura 2.10	Ilustração esquemática de reparo por atrito com pino cilíndrico (MEYER, 2003).....	15
Figura 2.11	Regiões características de um preenchimento por atrito, com a inserção de um pino de aço carbono em um substrato de aço Cr-Mo (BLAKEMORE, 1999).....	16
Figura 2.12	Macrografia de uma FPTW (BEAMISH, 2003 citado por PINHEIRO, 2008).....	17
Figura 2.13	Princípio do processo de costura por atrito (HWANG, 2010).....	18
Figura 2.14	Geometrias, cilíndrica e cônica do processo FHPP.....	19
Figura 2.15	Processamento de pinos por atrito utilizando geometria cônica (PIRES, 2007).....	19

Figura 2.16	Principais partes da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (MAREGA, 2011).....	20
Figura 2.17	Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1 (UPPA1); a) Unidade hidráulica e bloco de válvulas, b) Cabeça de reparo acoplado ao pórtico (HWANG, 2010).....	21
Figura 2.18	Pórtico, cabeça de reparo, unidade hidráulica e mangueira de 60m (UPPA 2) (HWANG, 2010).....	22
Figura 2.19	Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA 3).....	23
Figura 2.20	Ilustração da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 4 (UPPA4) (HWANG, 2010).....	23
Figura 3.1	Equipamento de reparo, composto de motor hidráulico, placa de castanhas e morsa porta blocos.....	26
Figura 3.2	Posicionamento das mangueiras de alta pressão conectadas ao motor e ao cilindro hidráulico (MAREGA, 2011).....	27
Figura 3.3	Sensor de rotação acoplado ao motor hidráulico e sensor de torque próximo ao anel de torque.....	29
Figura 3.4	Interface Homem Máquina (IHM), para configuração de processamento (MAREGA, 2011).....	29
Figura 3.5	Fixação do sensor de deslocamento (LVDT), responsável pelo controle da posição do cilindro durante o ensaio.....	30
Figura 3.6	Montagem do termopar tipo K. a) Termopar conectado ao condicionador de sinais. b) Confecção da ponta torcida do termopar e recobrimento com fita de teflon.....	31
Figura 3.7	Bloco cortado mostrando o posicionamento dos termopares dentro dos furos, onde T0 é a temperatura do fundo do furo, T1 é a temperatura intermediária 1, T2 é a temperatura intermediária 2 e T3 é a Temperatura do topo.....	32
Figura 3.8	Representação esquemática do sistema desenvolvido.....	33
Figura 3.9	Interface do programa de aquisição e monitoramento de temperatura.....	33
Figura 3.10	Sistema desenvolvido para soldar o termopar no bloco.....	35
Figura 3.11	Micrografias do bloco - aço carbono ASTM A36: a) vista geral e b) detalhe. (Nital 2%). (PIRES, 2007).....	37
Figura 3.12	Micrografias do pino - aço carbono ABNT 1010: a) vista geral e b) detalhe. (Nital 2%). (PIRES, 2007).....	37
Figura 3.13	Geometria de pino e blocos usados nos ensaios.....	38

Figura 3.14	Desenho mostrando furos para se inserir termopares no bloco 80x80x25,4 mm.....	41
Figura 3.15	Linha de corte da amostra e indicação dos locais para as micrografias.....	43
Figura 3.16	Posicionamento de perfis de dureza.....	44
Figura 4.1	Geometria utilizada na simulação.....	45
Figura 4.2	Comparativos das temperaturas máximas entre resultados da simulação e das medições de Meyer (2003).....	46
Figura 4.3	Condições de contorno inseridas no modelo.....	47
Figura 4.4	Distribuição de temperatura no conjunto após 20 segundos de simulação.....	48
Figura 4.5	Comparativo entre as temperaturas medidas por Meyer (2003) e as obtidas na simulação.....	49
Figura 4.6	Comparativo entre as linhas das temperaturas e as espessuras dos blocos de 1" (25,4 mm), 1½" (38,1 mm) e 2" (50,8 mm).....	50
Figura 4.7	Sinais adquiridos para o Ensaio 5 (Amostra 31414).....	51
Figura 4.8	Sinais adquiridos para o Ensaio 6 (Amostra 31415).....	51
Figura 4.9	Sinais adquiridos para o Ensaio 7 (Amostra 31416).....	52
Figura 4.10	Sinais adquiridos para o Ensaio 8 (Amostra 31417).....	52
Figura 4.11	Sinais adquiridos para o Ensaio 9 (Amostra 31418).....	53
Figura 4.12	Sinais adquiridos para o Ensaio 10 (Amostra 31419).....	53
Figura 4.13	Sinais adquiridos para o Ensaio 11 (Amostra 31420).....	54
Figura 4.14	Sinais adquiridos para o Ensaio 12 (Amostra 31421).....	54
Figura 4.15	Sinais adquiridos para o Ensaio 1 (Amostra 31410).....	55
Figura 4.16	Sinais adquiridos para o Ensaio 2 (Amostra 31411).....	55
Figura 4.17	Sinais adquiridos para o Ensaio 3 (Amostra 31412).....	56
Figura 4.18	Sinais adquiridos para o Ensaio 4 (Amostra 31413).....	56
Figura 4.19	Comparativo entre tempo de processamento e os blocos utilizados em cada ensaio com seus respectivos parâmetros de processamento (força e rotação).....	58
Figura 4.20	Comparativo entre energia de soldagem e blocos utilizados em cada ensaio com seus respectivos parâmetros de processamento (força e	

	rotação).....	59
Figura 4.21	Medição de temperatura Ensaio 5 (Amostra 31414).....	60
Figura 4.22	Medição de temperatura Ensaio 6 (Amostra 31415).....	60
Figura 4.23	Medição de temperatura Ensaio 7 (Amostra 31416).....	61
Figura 4.24	Medição de temperatura Ensaio 8 (Amostra 31417).....	61
Figura 4.25	Medição de temperatura Ensaio 9 (Amostra 31418).....	62
Figura 4.26	Medição de temperatura Ensaio 10 (Amostra 31419).....	62
Figura 4.27	Medição de temperatura Ensaio 11 (Amostra 31420).....	63
Figura 4.28	Medição de temperatura Ensaio 12 (Amostra 31421).....	63
Figura 4.29	Medição de temperatura Ensaio 1 (Amostra 31410).....	64
Figura 4.30	Medição de temperatura Ensaio 2 (Amostra 31411).....	64
Figura 4.31	Medição de temperatura Ensaio 3 (Amostra 31412).....	65
Figura 4.32	Medição de temperatura Ensaio 4 (Amostra 31413).....	65
Figura 4.33	Comparativo entre temperaturas máximas de cada ensaio registradas a aproximadamente a 1mm da interface entre pino e bloco.....	67
Figura 4.34	Comparativo entre temperaturas T0. Ensaio 5 (Amostra 31414), Ensaio 9 (Amostra 31418) e Ensaio 1 (Amostra 31410).....	68
Figura 4.35	Comparativo entre temperaturas T0. Ensaio 6 (Amostra 31415), Ensaio 10 (Amostra 31419) e 2 (Amostra 31411).....	68
Figura 4.36	Comparativo entre temperaturas T0. Ensaio 7 (Amostra 31416), Ensaio 11 (Amostra 31420) e Ensaio 3 (Amostra 31412).....	69
Figura 4.37	Comparativo entre temperaturas T0. Ensaio 8 (Amostra 31417), Ensaio 12 (Amostra 31421) e Ensaio 4 (Amostra 31413).....	69
Figura 4.38	Macrografias. a) Ensaio 5 (Amostra 31414 - 60 kN, 1400 rpm, 25,4 mm). b) Ensaio 6 (Amostra 31415 - 120 kN, 1400 rpm, 25,4 mm).....	70
Figura 4.39	Macrografias. a) Ensaio 7 (Amostra 31416 - 60 kN, 1700 rpm, 25,4 mm). b) Ensaio 8 (Amostra 31417 - 120 kN, 1700 rpm, 25,4 mm).....	70
Figura 4.40	Macrografias. a) Ensaio 9 (Amostra 31418 - 60 kN, 1400 rpm, 38,1 mm). b) Ensaio 10 (Amostra 31419 - 120 kN, 1400 rpm, 38,1 mm).....	71

Figura 4.41	Macrografias. a) Ensaio 11 (Amostra 31420 - 60 kN, 1700 rpm, mm). b) Ensaio 12 (Amostra 31421 - 120 kN, 1700 rpm, mm).....	38,1 38,1	72
Figura 4.42	Macrografias. a) Ensaio 1 (Amostra 31410 - 60 kN, 1400 rpm, mm). b) Ensaio 2 (Amostra 314111 - 120 kN, 1400 rpm, mm).....	50,8 50,8	72
Figura 4.43	Macrografias. a) Ensaio 3 (Amostra 31412 - 60 kN, 1700 rpm, mm). b) Ensaio 4 (Amostra 31413 - 120 kN, 1700 rpm, mm).....	50,8 50,8	73
Figura 4.44	Comparação entre larguras de ZTA. Macrografias. a) Ensaio 5 (Amostra 31414 - 60 kN, 1400 rpm, 25,4 mm). b) Ensaio 1 (Amostra 31410 - 60 kN, 1400 rpm, 50,8 mm).....		74
Figura 4.45	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31414 (25,4 mm, 60 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0...		76
Figura 4.46	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31415 (25,4 mm, 120 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.....		78
Figura 4.47	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31416 (25,4 mm, 60 kN, 1700 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.....		80
Figura 4.48	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31417 (25,4 mm, 120 kN, 1700 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.....		81
Figura 4.49	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31418 (38,1 mm, 60 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.....		83
Figura 4.50	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31419 (38,1 mm, 60 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.....		84
Figura 4.51	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31410 (50,8 mm, 60 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.....		86
Figura 4.52	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31411 (50,8 mm, 120 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.....		87
Figura 4.53	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31412 (50,8 mm, 60 kN, 1700 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.....		89
Figura 4.54	Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31411 (50,8 mm, 120 kN, 1700 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.....		90
Figura 4.55	Comparação entre os grãos originais do pino (a) com os grãos da fronteira pino/bloco na posição 2.0 (b).....		91

Figura 4.56	Comparação entre micrografia das posições 2.1 e 1.1.a) Amostra 31416 (25,4 mm, 60 kN e 1700 rpm), posição 2.1 b) Amostra 31416 (25,4 mm, 60 kN e 1700 rpm), posição 1.1 c) Amostra 31417 (25,4 mm, 120 kN e 1700 rpm), posição 2.1 d) Amostra 31417 (25,4 mm, 120 kN e 1700 rpm), posição 1.1.....	93
Figura 4.57	Deformações dos furos dos termopares causadas pelo fluxo plástico na amostra 31414, nas seguintes posições: a) T0, b) T1, c) T2 e d) T3.....	94
Figura 4.58	Comparação dos perfis de dureza verticais das amostras 31410, 31414, e 3141.....	95
Figura 4.59	Comparação dos perfis de dureza verticais das amostras 31412, 31416, e 31420.....	96
Figura 4.60	Comparação dos perfis de dureza verticais das amostras 31411, 31415, e 31419.....	96
Figura 4.61	Comparação dos perfis de dureza verticais das amostras 31413, 31417, e 31421.....	97
Figura 4.62	Comparação dos perfis de dureza verticais das amostras 31410, 31414, e 31418.....	97
Figura 4.63	Comparação dos perfis de dureza horizontais a 5 mm dos ensaios 31412, 31416 e 31420.....	98
Figura 4.64	Comparação dos perfis de dureza horizontais a 5 mm dos ensaios 31411, 31415 e 31419.....	98
Figura 4.65	Comparação dos perfis de dureza horizontais a 5 mm dos ensaios 31413, 31417 e 31421.....	99
Figura 4.66	Comparação dos perfis de dureza horizontais a 13 mm das amostras 31410, 31414, e 31418.....	99
Figura 4.67	Comparação dos perfis de dureza horizontais a 13 mm dos ensaios 31412, 31416 e 31420.....	100
Figura 4.68	Comparação dos perfis de dureza horizontais a 13 mm dos ensaios 31411, 31415 e 31419.....	100
Figura 4.69	Comparação dos perfis de dureza horizontais a 13 mm dos ensaios 31413, 31417 e 31421.....	101
Figura 4.70	Perfil vertical chapa 50,8 mm de espessura.....	103
Figura 4.71	Posicionamento dos blocos em relação ao carbono equivalente.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Parâmetros da soldagem por atrito.....	11
Tabela 3.1	Composição química dos materiais utilizados (% em peso).....	36
Tabela 3.2	Comparação entre pinos de geometria “B” e geometria “D”	39
Tabela 3.3	Parâmetros utilizados dentro da fase de ensaios de preenchimento.....	40
Tabela 4.1	Composição química da chapa de 50,8 mm – ASTM A36 (% em peso).....	102

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM	American Society of Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWG	American Wire Gauge
AWS	American Welding Society
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
CLP	Controlador Lógico Programável
FHPP	Friction Hydro Pillar Processing
FTPW	Friction Tapered Plug Welding
FTSW	Friction Taper Stitch Welding
IHM	Interface Homem Máquina
LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
LH	Linha Horizontal
LV	Linha Vertical
LVDT	Transdutor Diferencial Variável Linear
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S/A
PID	Proporcional Integral Derivativo
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
TWI	The Welding Institute
UPPA	Unidade de Processamento de Pinos por Atrito
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Carbono
C _{eq}	Carbono Equivalente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Mn	Manganês
Mo	Molibidênio
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
SiC	Carbeto de Silício

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
2.1 – SOLDAGEM POR ATRITO.....	06
2.1.1 – Energia de Processamento.....	07
2.1.2 – Fases do Processo de Solda por Atrito.....	08
2.1.3 – Parâmetros Relevantes do Processo.....	10
2.1.4 – Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito.....	13
2.2 – PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO.....	14
2.2.1 – Características do Processo.....	14
2.2.2 – Influência das Geometrias do Pino e do Furo.....	18
2.3 – UNIDADES DE PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO (UPPA).....	20
CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	25
3.1 – UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO 3 (UPPA 3).....	25
3.1.1 – Sistema Mecânico.....	25
3.1.1.1 – Equipamento de Reparo.....	25
3.1.1.2 – Sistema Hidráulico.....	26
3.1.2 – Sistema Elétrico.....	27
3.1.3 – Sistema de Instrumentação e Controle.....	28
3.1.3.1 – Sensor de Rotação e de Torque.....	28
3.1.3.2 – Sistema de Controle.....	29
3.2 – TERMOPARES.....	30
3.3 – PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA.....	32
3.4 – DISPOSITIVO DE SOLDA CAPACITIVA.....	34
3.5 – MATERIAIS ENSAIADOS.....	36

3.6 – ENSAIOS DE PREENCHIMENTO.....	37
3.7 – PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	41
3.8 – PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA.....	42
3.8.1 – Macrografia.....	42
3.8.2 – Micrografia.....	42
3.9 – ENSAIOS DE DUREZA VICKERS.....	43
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1 – DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DOS BLOCOS.....	45
4.1.1 – Considerações e condições de Contorno.....	47
4.1.2 – Resultados.....	48
4.2 – ENSAIOS DE PREENCHIMENTO.....	50
4.2.1 – Tempo de Processamento.....	57
4.2.2 – Energia de Processamento.....	58
4.3 – GRÁFICOS DE TEMPERATURA.....	59
4.4 – MACROGRAFIA	70
4.5 – MICROGRAFIA.....	75
4.6 – ENSAIOS DE DUREZA VICKERS.....	95
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	106
CAPÍTULO 6 – TRABALHOS FUTUROS.....	107
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXOS.....	111

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Dependendo das condições operacionais, componentes mecânicos estão sujeitos à formação de trincas que podem causar fraturas e em consequência disso a falha do componente, prejuízos e possíveis acidentes.

Esses defeitos, na maioria dos casos são corrigidos através da soldagem a arco elétrico. Nesses casos, como se trabalha com temperaturas elevadas, a solda apresenta alguns problemas como uma grande zona termicamente afetada (ZTA). Quando se utiliza essa técnica em local com alto risco de explosão, ela é feita em ambiente submerso, como é o caso de muitos componentes da indústria do petróleo. Trabalhando-se então com altas temperaturas num ambiente submerso, obtêm-se um resfriamento rápido, que pode causar tensões residuais e possíveis problemas, como trincas. Outros inconvenientes com a solda submersa são: porosidade, fragilização pelo hidrogênio, etc.

Um novo processo que minimiza os problemas descritos anteriormente, utilizado para o reparo de trincas é o reparo por atrito. Para a recuperação dessas trincas, pode-se utilizar o processo conhecido como *Stitch Welding*, que é a sobreposição de eventos realizados ao longo do comprimento da trinca ou falha a ser reparada, através da técnica de processamento de pinos por atrito. Segundo Pires (2007), o processo consiste na abertura de um furo no local do defeito, com uma geometria característica e o preenchimento do mesmo por intermédio da introdução coaxial de um pino (consumível), estando este submetido a uma velocidade de rotação e a esforços de compressão contra o furo.

Nesse trabalho foram analisados os parâmetros que influenciam na qualidade do reparo por atrito, tais como: rotação, força axial, comprimento de queima e tempo de soldagem, juntos com as geometrias do pino e do furo e, além disso, acrescentado mais uma variável, a espessura da chapa. Para a realização dos

testes foram utilizadas diferentes espessuras de chapas e conectado a elas, alguns termopares, para se medir a temperatura durante o processo do reparo por atrito.

O objetivo desse trabalho é avaliar a qualidade do reparo por atrito variando a espessura das chapas de aço carbono ASTM A36, e com isso avaliar também a microestrutura e as propriedades mecânicas do reparo.

O trabalho foi realizado no equipamento desenvolvido na própria Universidade Federal de Uberlândia, no Laboratório LTAD, chamado de Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA 3), (Figura 1.1).

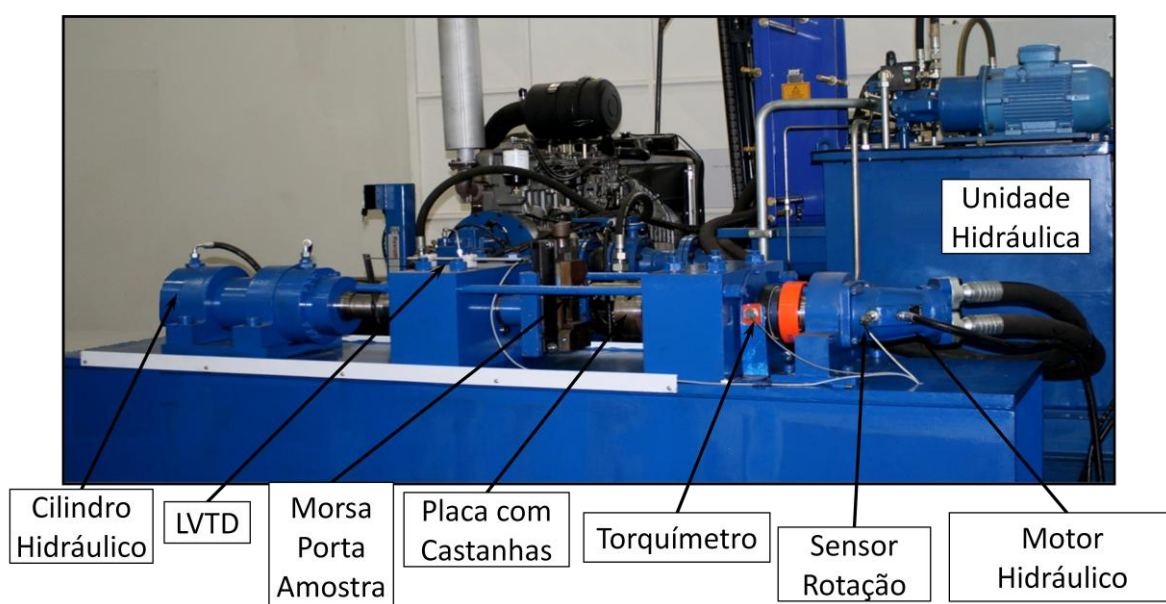


Figura 1.1 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA 3).

A Unidade de processamento de pinos por atrito (UPPA 3) é equipada com sistema de controle e aquisição de dados que permite trabalhar com parâmetros prefixados de ensaio, controlar todo o processo e traçar gráficos da variação dos parâmetros em tempo real de ensaio. Os parâmetros de ensaio são: força axial, rotação, comprimento de queima, força de forjamento e tempo de forjamento.

Para a realização dos ensaios na máquina UPPA 3, o pino é fixado através de uma placa de três castanhas e o bloco através de uma morsa. A morsa é montada na extensão de um cilindro hidráulico, sendo este alimentado por uma motobomba que permite aplicação de forças axiais até 500 kN e a placa de castanhas acionada por motor de pistão axial que permite rotações até 1700 rpm. O comprimento de queima é a distancia de avanço do pino contra o bloco a partir do momento em que

ocorre o toque do pino no fundo do furo. Completado o comprimento de queima, cessa a rotação e inicia-se a aplicação da força de forjamento, sendo a intensidade desta, pré-determinada.

A máquina (UPPA 3) permite também a realização de ensaios com aplicação de forças axiais em estágios e por tempos prefixados.

Para facilitar a compreensão do trabalho, os assuntos abordados estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica sobre soldagem por atrito e processamento de pinos por atrito ou reparo por atrito.
- Capítulo 3: apresenta os procedimentos experimentais para a realização dos ensaios, mostra os materiais, softwares, dispositivos e procedimentos usados na aquisição dos dados relacionados à temperatura,
- Capítulo 4: mostra os resultados obtidos e suas respectivas discussões.
- Capítulo 5: apresenta as principais conclusões.
- Capítulo 6: sugestões para trabalhos futuros.
- Capítulo 7: referências bibliográficas citadas neste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A soldagem é um método muito importante na união de materiais a nível atômico e de acordo com a AWS (*American Welding Society*) é definida como: “Processo de união de materiais, onde se obtém coalescência localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento a temperaturas adequadas, com ou sem a utilização de pressão e ou de material de adição”.

São muitos os processos de soldagem utilizados nos dias atuais. E para que ocorram essas ligações, é necessário haver aproximação dos átomos superficiais das peças a serem soldadas. Isso ocorre porque os átomos superficiais têm um nível de energia maior do que os átomos do interior da peças. Esse nível maior de energia ocorre por causa da menor quantidade de vizinhos que os átomos da superfície têm em comparação com os átomos do interior da peça metálica. Quando duas peças metálicas são aproximadas numa distância suficientemente pequena, os átomos das superfícies podem em princípio, se ligarem, levando à formação da solda entre as peças (Figura 2.1)

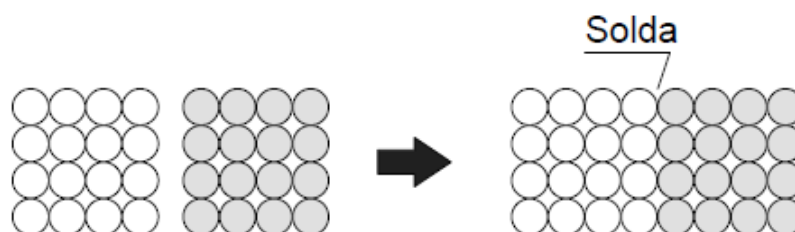


Figura 2.1 – Esquema de obtenção de uma solda pela aproximação das superfícies a unir (MARQUES, 1991).

Entretanto, para serem criadas as ligações metal/metal as superfícies têm de se aproximar a distâncias suficientes para que as ligações químicas aconteçam, o

que pode ser dificultado pela rugosidade, camadas de óxidos, umidade, gordura, poeira ou outros contaminantes que existam nas superfícies a serem soldadas.

Estes obstáculos são superados por dois modos principais, que originam dois grandes grupos de processos de soldagem: soldagem por fusão e soldagem por pressão.

Os processos de soldagem por fusão são aqueles que envolvem aplicação localizada de calor na região a ser soldada provocando a sua fusão e do metal de adição, caso seja usado, produzindo a solda com a solidificação do metal fundido (Figura 2.2).

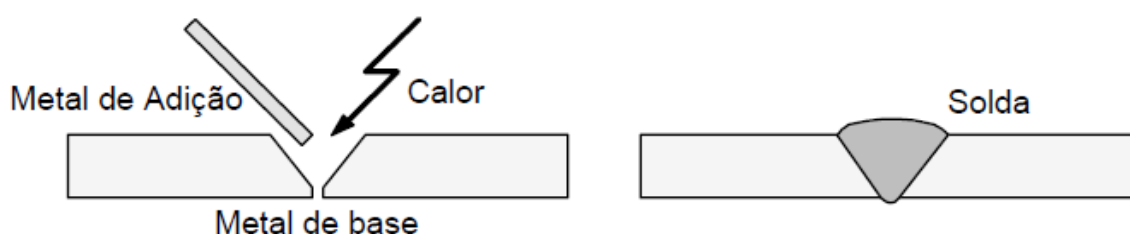


Figura 2.2 – Soldagem por fusão (MARQUES, 1991).

Os processos de soldagem por pressão consistem na aplicação de pressões que deformam as superfícies em contato, rompendo as camadas de contaminantes e permitindo uma aproximação suficiente para que ocorram as ligações químicas. O aquecimento gerado pelo atrito é um meio para facilitar a deformação dos metais (Figura 2.3).

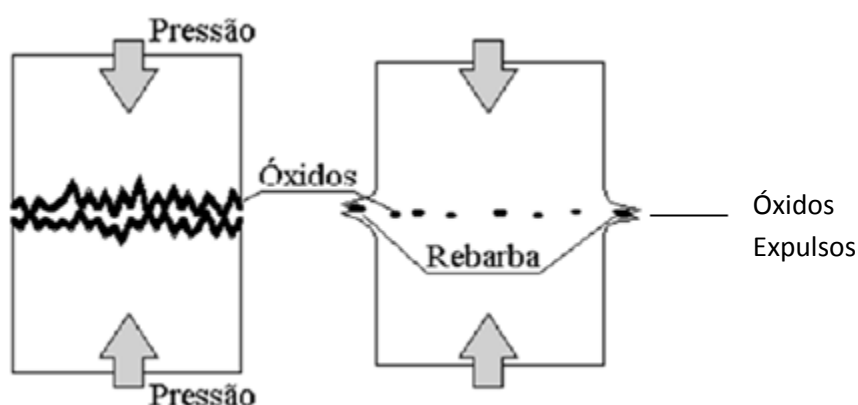


Figura 2.3 – Soldagem por pressão (MARQUES, 1991).

Entre os processos de soldagem por pressão se incluem os processos de soldagem por: atrito, resistência elétrica, explosão, ultrassom, difusão, laminação, etc.

2.1 – Soldagem por Atrito

É um processo de soldagem por pressão que produz soldas pela rotação ou movimento relativo entre as superfícies de duas peças sob a ação de forças de compressão. Em consequência disso, calor é gerado mediante a atuação das forças de atrito, e um deslocamento plástico de material, nas superfícies em contato, é obtido; desse modo é formada uma união metalúrgica entre as peças (AWS, 1991) (Figura 2.4).

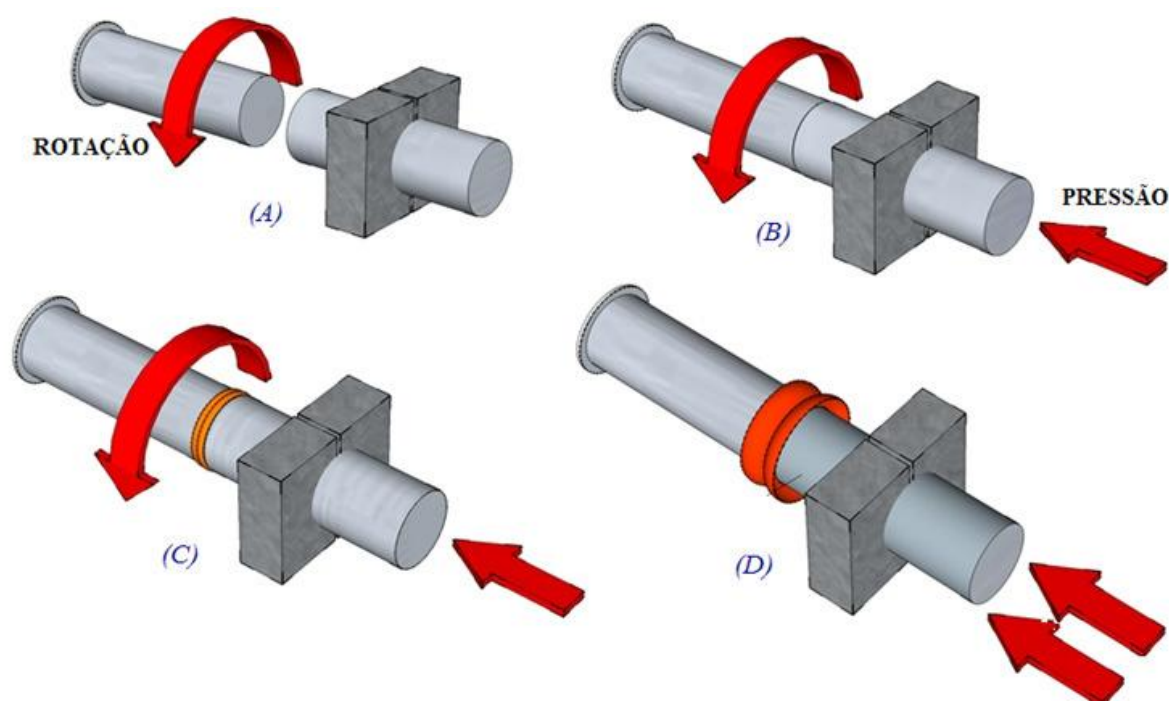


Figura 2.4 – Processo de solda por atrito. (A) Rotação de uma das peças; (B) Início da aplicação de força; (C) Aquecimento e deformação devido ao atrito e a pressão criada pela força aplicada; (d) Rotação é cessada e é aplicada força axial adicional (força de forjamento), a solda é completada criando um colar de rebarba (*flash*). (<http://www.fpe.co.uk/process/friction-welding>).

O processo de soldagem por atrito permite uma quantidade de combinações de materiais muito maior que qualquer outro processo de soldagem, não só para as ligações comuns como aço com aço, mas também para os processos críticos com as ligas de magnésio, alumínio e aços com alto teor de carbono (MEYER, 2003).

2.1.1 – Energia de Processamento

De acordo com AWS (1991), existem dois métodos para geração de energia: soldagem por atrito com acionamento direto e soldagem por atrito com acionamento por inércia.

Soldagem por atrito com acionamento direto, consiste em acoplar uma das peças a serem soldadas a uma unidade motora, enquanto a outra peça é fixa. O motor é acionado e a peça gira a uma rotação pré-determinada. As peças são pressionadas uma contra a outra e é aplicada uma força necessária para o processo de soldagem. Calor é gerado nas superfícies em contato, por causa do atrito. Depois de um tempo pré-determinado ou de determinado deslocamento das peças a rotação é cessada e uma força igual ou superior a anterior é mantida por um tempo também pré-estabelecido, isso para se fazer o forjamento. Completado o estágio de forjamento é finalizado o processo de soldagem (Figura 2.5).

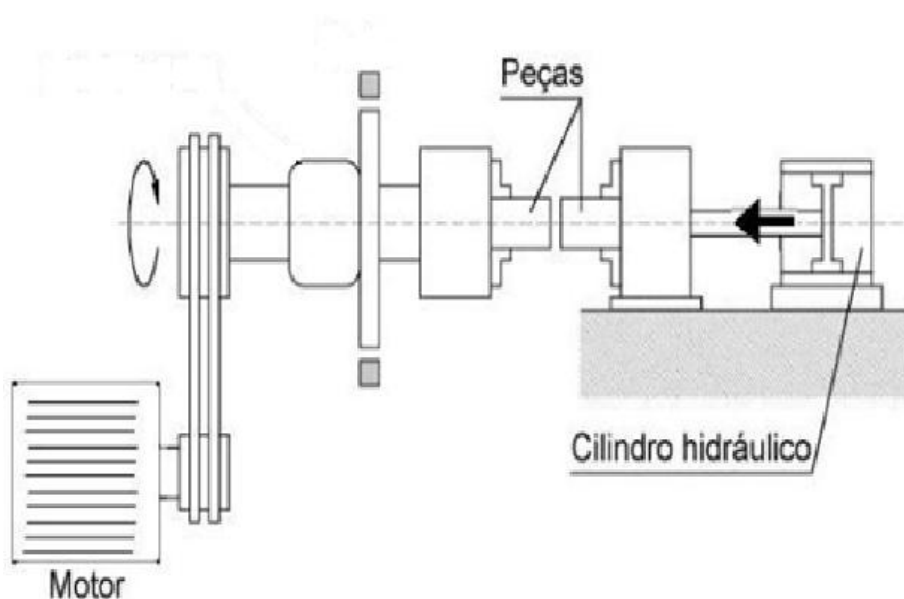


Figura 2.5 – Solda por atrito com acionamento direto (MARQUES, 1991).

Soldagem por atrito com acionamento por inércia, neste método a peça que gira é acoplada a um volante de inércia. O volante é acelerado a uma velocidade pré-determinada, armazenando a energia requerida. O volante é então desacoplado da unidade propulsora e as peças são colocadas em contato. A energia cinética armazenada no volante é dissipada durante a execução da solda, enquanto a

velocidade diminui. Após a rotação cessar é aplicada a força de forjamento. A solda é então finalizada (Figura 2.6).

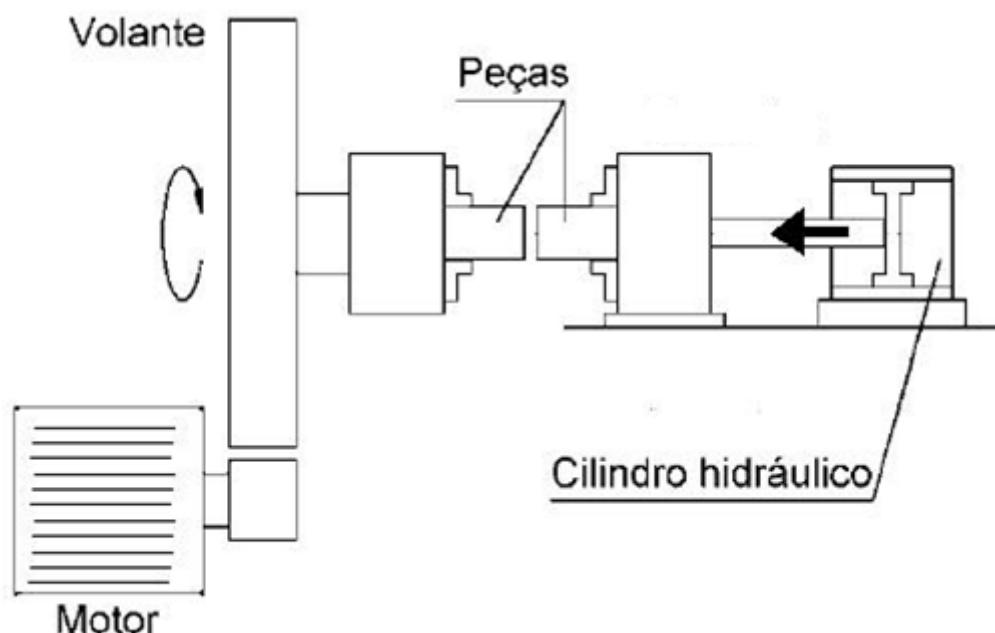


Figura 2.6 – Solda por atrito com acionamento por inércia (MARQUES, 1991).

Ambos os métodos produzem excelentes soldas no estado sólido. As diferenças entre eles é que o método de soldagem por atrito com acionamento direto utiliza uma quantidade menor de componentes e um motor com maior potência. Já o método de soldagem com acionamento por inércia é formado por uma quantidade maior de componentes, gerando com isso a necessidade de um controle maior do processo, mas em contrapartida utiliza um motor com potência menor.

2.1.2 – Fases do Processo de Solda por Atrito

A divisão do processo em diferentes fases tem por objetivo explicar o ciclo da solda e os mecanismos relacionados ao processo de soldagem por atrito. De acordo com Meyer (2003), vários autores dividem o ciclo em quatro fases. A AWS (1991) e a ASM (1993) dividem o processo em duas fases enquanto Vill (1962) e Crossland (1971) utilizam três fases. Ellis (1972) propôs a divisão em cinco fases. Lebedev e Chernenko (1992) que dividem o processo em seis fases. A divisão em quatro fases

é a usada pela maioria dos autores e se mostra mais adequada a presente revisão (Figura 2.7).

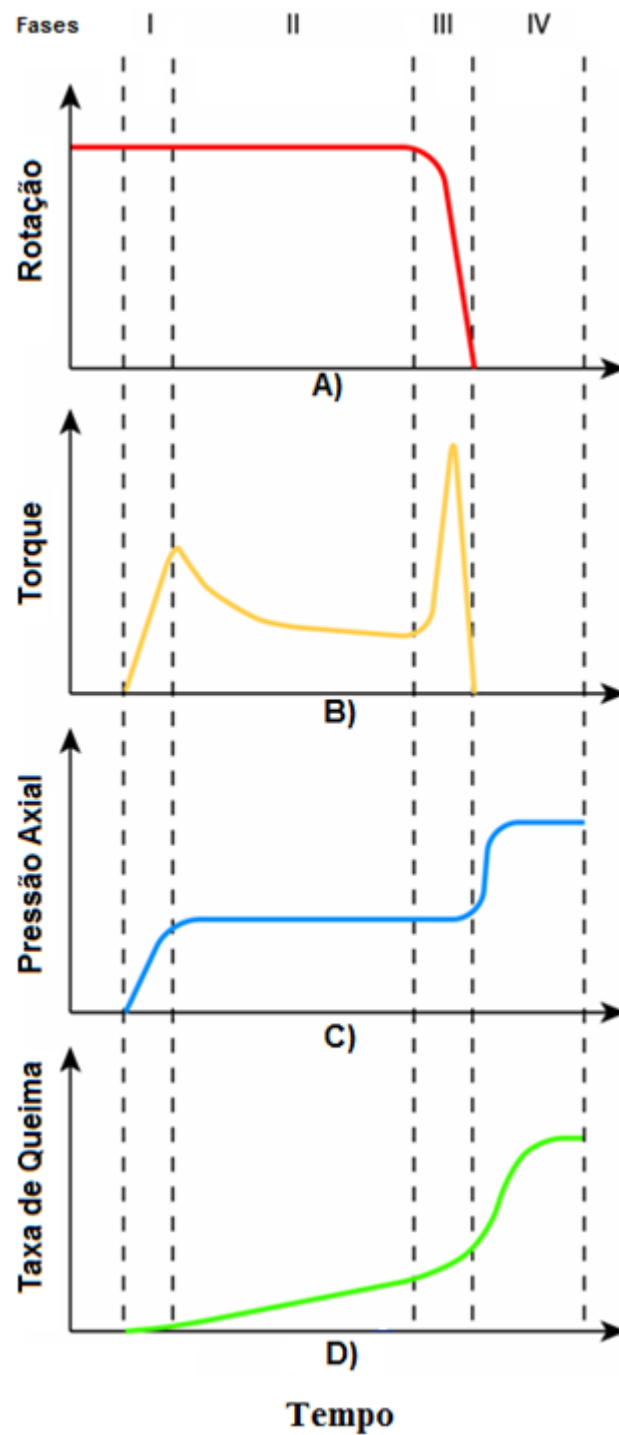


Figura 2.7 – Fases do processo: I) Fase de atrito; II) Fase de aquecimento; III) Fase de frenagem e IV) Fase de forjamento. (MEYER, 2003).

A fase de atrito ou de polimento, fase 1, ocorre durante os primeiros instantes de contato entre as duas superfícies e faz com que a película de contaminantes seja removida e ocasione o contato dos metais (faces). Com isso o atrito atinge o seu nível mais elevado, gerando aumento da temperatura e deformação plástica em pelo menos uma das superfícies em contato. O primeiro valor máximo de torque acontece no final desta fase.

Terminada a fase 1, regiões mais frias recebem o fluxo de material plastificado, ao mesmo tempo em que um novo atrito ocorre devido ao resfriamento imediato desse mesmo material plastificado. A transferência de calor se estende por toda a área de contato, chegando ao equilíbrio da temperatura. Nesse momento, a taxa de queima passa a ser quase constante. Por causa da deformação plástica, o material é pressionado para fora da superfície de atrito formando a rebarba (*flash*). A segunda fase, ou fase de aquecimento, termina com a diminuição do torque.

Durante a fase de frenagem, fase 3, a rotação diminui até cessar completamente, isso faz com que a resistência ao cisalhamento aumente, gerando mais atrito e aumentando um pouco mais a temperatura e levando o torque ao seu segundo valor máximo. Ocorre o estabelecimento da ligação metálica e união permanente da junção.

O estágio final é a fase de forjamento, fase 4, onde a rotação do pino é interrompida e se estabelece uma pressão maior para o forjamento. Esta pressão provoca uma homogeneização da ligação na seção transversal, aumento abrupto da taxa de queima e assim, as superfícies de soldagem são colocadas em contato mais íntimo e particularmente as partes de materiais de regiões mais externas são aproximados a distâncias atômicas para produzir as ligações metálicas. A etapa de forjamento melhora as propriedades mecânicas do material soldado, além de aliviar as tensões (MEYER, 2003).

2.1.3 – Parâmetros Relevantes do Processo

Existe um número importante de parâmetros (relacionados diretamente com o processo) e variáveis (relacionadas com o material) na soldagem por atrito (Tabela

2.1). Embora todos sejam relevantes na qualidade final da solda, os quatro primeiros parâmetros são os mais importantes e serão considerados com mais detalhes.

Tabela 2.1 – Parâmetros da soldagem por atrito.

Parâmetros do Processo	Variáveis do Processo
1. Força axial sobre a área de contato	1. Temperaturas das superfícies
2. Rotação – Velocidade entre superfícies	2. Natureza do material
3. Tempo de aquecimento	3. Presença de filmes na superfície
4. Taxa de queima	4. Rigidez e elasticidade superficial
5. Tempo requerido para parar	
6. Força de forjamento - duração e magnitude	

1) Força Axial: é um parâmetro de grande relevância no processo de soldagem por atrito. Quanto maior for esse parâmetro, menor será o tempo de processamento, gerando com isso, menor aquecimento das superfícies em contato e consequentemente, uma zona termicamente afetada (ZTA) mais estreita, obtendo assim uma microestrutura mais refinada o que melhora a tenacidade da estrutura final (AWS, 1991). Apesar de forças mais elevadas necessitarem de um aumento da potência requerida para o processo, propiciam também, uma diminuição da energia total de soldagem, devido ao menor tempo de processamento (MAREGA, 2011).

2) Rotação: a velocidade de rotação é um parâmetro que não tem grande influência na qualidade da solda (AWS, 1991). No entanto, existe uma velocidade ótima para cada tipo de material ou combinações de materiais (VILL, 1962). Altas velocidades vão gerar uma menor taxa de resfriamento, maior ZTA, ocasionando queda nas propriedades mecânicas, como por exemplo, dureza e resistência à tração (ELLIS, 1972). Entretanto, a redução da velocidade de rotação irá elevar a interação entre as superfícies em contato, aumentando assim o torque e exigindo uma unidade com maior potência.

3) Tempo de Aquecimento: é o período compreendido entre o contato inicial das superfícies e o instante em que a rotação é nula. 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).

4) Taxa de Queima: representa o quantidade de material consumida durante um intervalo de tempo. Sofre influência da força axial e da velocidade de rotação, sendo que o aumento da força aumenta a taxa de queima, enquanto o aumento da velocidade reduz a taxa de queima (MEYER, 2003).

O comprimento de queima, que é influenciado pela taxa de queima, é utilizado para controlar o início e o fim do processo de soldagem e tem grande importância na qualidade da união (PIRES, 2007).

Um resumo das influências e interações dos parâmetros básicos de soldagem é mostrado na Figura 2.8.

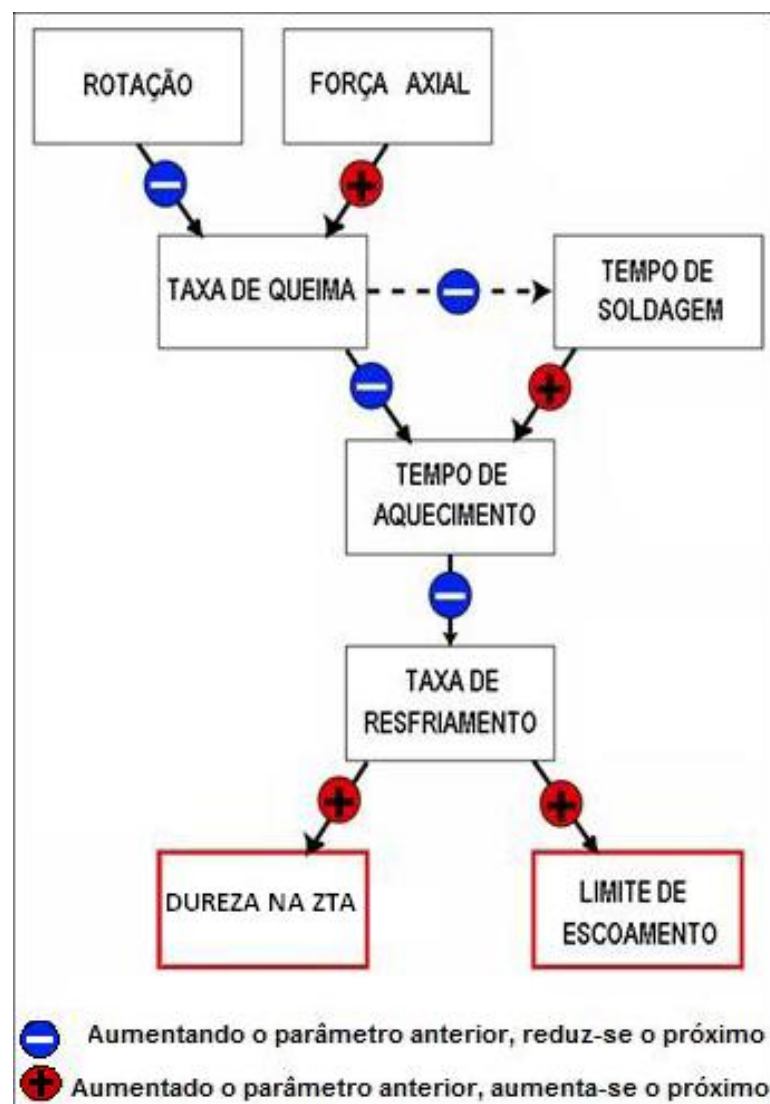


Figura 2.8 – Influência dos parâmetros na solda por atrito (MEYER, 2003).

2.1.4 – Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito

As vantagens e desvantagens da soldagem por atrito são apresentadas abaixo, com base nas descrições apresentadas por: Ellis (1972), Nicholas (1984), Blakemore (1993 e 1999), Pinheiro (2001), Meyer (2003) e Pires (2007).

Vantagens do Processo:

- Não é necessária a limpeza das superfícies a serem unidas, pois o processo tende a eliminar as impurezas através da rebarba (*flash*).
- Não é necessário o uso de metal de enchimento e gás protetor.
- Por ser um processo no estado sólido, os defeitos associados com solidificação do metal, como porosidade, segregação e adsorção de hidrogênio não ocorrem.
- Permite a união de metais dissimilares, que são difíceis ou impossíveis de serem soldados em outros processos.
- Formação de estreita ZTA.
- Baixo consumo de energia, simplicidade operacional e curto ciclo de soldagem, fazem com que o custo efetivo do processo seja baixo.
- O processo pode ser facilmente automatizado.
- Os operadores não necessitam de habilidades manuais específicas para a soldagem.
- É mais seguro para o operador, pois não tem radiação, fumos e riscos elétricos.

Limitações do Processo:

- Uma das peças deve girar sobre o eixo do plano de soldagem.
- Pelo menos um dos materiais a ser soldado deve se deformar plasticamente.
- O processo é normalmente limitado para se fazer juntas de topo planas ou angulares (cônicas).
- A preparação e o alinhamento das peças podem ser críticas para o desenvolvimento do atrito e aquecimento.
- Custo inicial elevado com equipamento e ferramentas.

2.2 – Processamento de Pinos por Atrito

Um dos processos de soldagem por atrito é o processamento de pinos por atrito, também denominado FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*), ou reparo por atrito, desenvolvido pelo TWI (*The Welding Institute*) na década de 90, o qual apresentou pedido de patente em 1993 (THOMAS e NICHOLAS, 1992). Este consiste em se fazer um furo, cilíndrico ou cônico, sobre um defeito e posteriormente preenchê-lo com um pino consumível através da aplicação de força axial e rotação. O atrito entre o pino e a base do furo gera calor e plastifica o metal. Este por sua vez flui ao longo dos planos de cisalhamento na base do pino (Figura 2.9). Em determinadas combinações de forças e rotações, estes planos podem ser induzidos a se movimentar ascendentemente. Ao tocar a superfície interna da cavidade, devido o aquecimento gerado pelo atrito ocorre deformação plástica, o que resulta em um preenchimento do orifício. A presença desse pino consumível é a principal diferença entre o reparo por atrito e a solda por atrito (SOUZA, 2006).

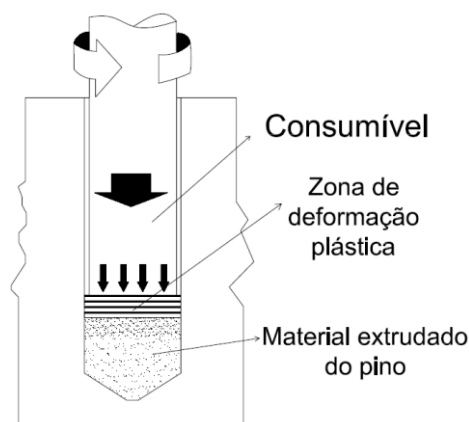


Figura 2.9 - Ilustração esquemática do processamento de pinos por atrito.

2.2.1 – Características do Processo

O processamento de pinos por atrito pode ser dividido em duas etapas:

- a.** abertura de um furo cego (não passante), com implemento de geometrias tanto cilíndricas, quanto cônicas;
- b.** preenchimento deste furo por meio de um pino (consumível), rotacionado e posteriormente introduzido coaxialmente ao furo, sendo então, submetido a um esforço normal de compressão (PIRES, 2007).

O calor é gerado pelo atrito entre as superfícies e com o aquecimento a resistência mecânica diminui e o material se deforma plasticamente. Com a formação de um fluxo plástico causado pelo efeito térmico, o material, com suficiente viscosidade e forças hidrostáticas, se propaga ao longo da seção do pino, onde ocorre o preenchimento do furo (THOMAS; NICHOLAS, citado por MEYER, 2003). Uma ilustração é encontrada na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Ilustração esquemática de reparo por atrito com pino cilíndrico (MEYER, 2003).

As transformações metalúrgicas ocorridas durante o processamento de pinos por atrito em um aço Cr-Mo podem ser observadas na Figura 2.11, onde se tem microestruturas com diferentes propriedades mecânicas e com características próprias.

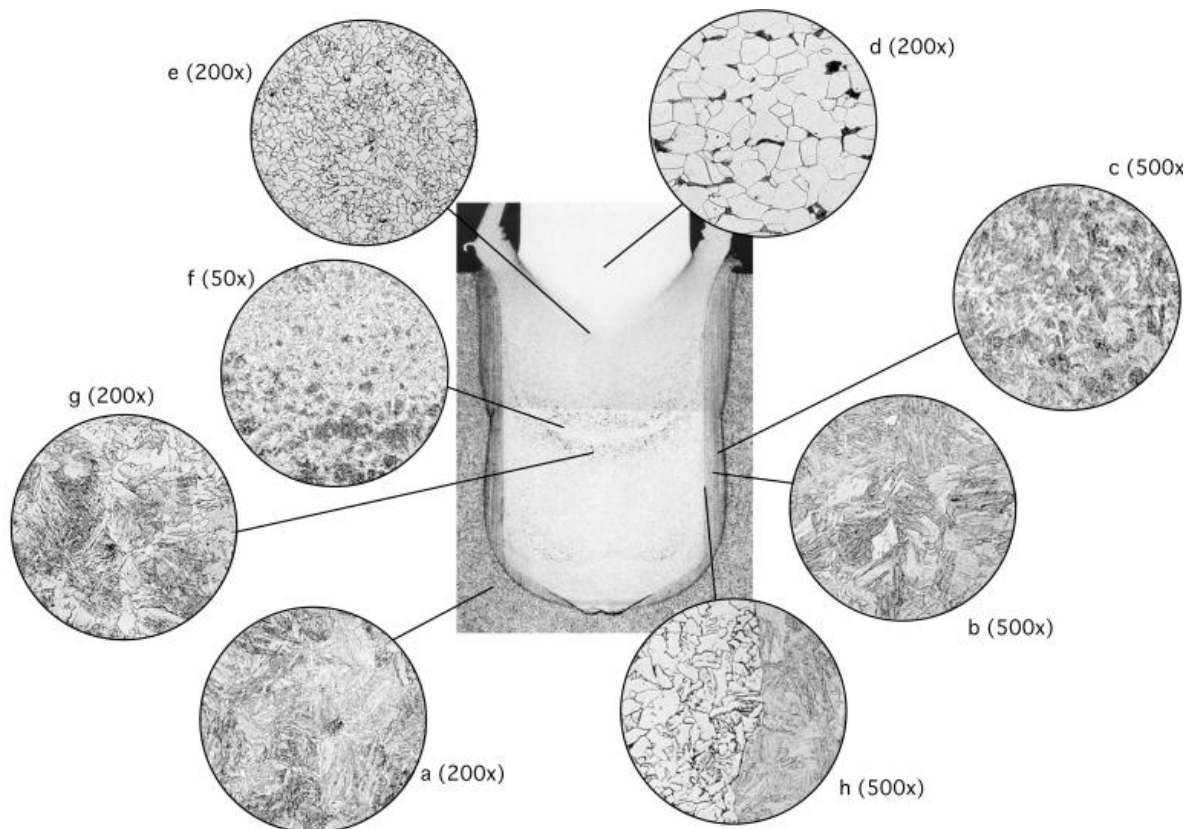


Figura 2.11 – Regiões características de um preenchimento por atrito, com a inserção de um pino de aço carbono em um substrato de aço Cr-Mo (BLAKEMORE, 1999).

As regiões mostradas na Figura 2.11 são identificadas como:

- (a) Material base do substrato (bloco);
- (b) Zona Termicamente Afetada (ZTA), adjacente à linha da junção;
- (c) ZTA do material base;
- (d) Material do pino;
- (e) Material forjado com grão fino na região de transformação;
- (f) e (g) Material forjado com grão fino completamente transformado;
- (h) Linha da junção entre o consumível e o material base.

O processamento de pinos por atrito é derivado da técnica denominada “*Friction Tapered Plug Welding*” (FTPW). Este processo foi apresentado por Andrews e Mitchell (1990), com o objetivo de reparar estruturas *offshore*, em condições subaquáticas. O “*Friction Tapered Plug Welding*” (Figura 2.12) difere do processamento de pinos, por trabalhar com orifícios passantes, onde a maior

concentração de deformação plástica se encontra nas paredes laterais e não ao longo da grande parte da seção transversal do pino, como se observa no processamento de pinos por atrito (PIRES, 2007).

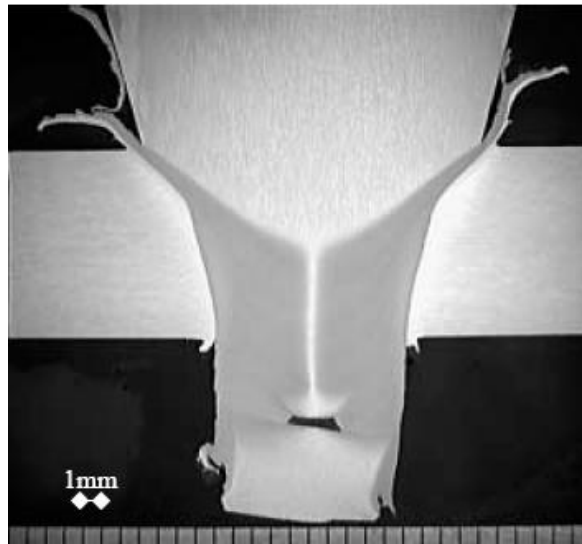


Figura 2.12 – Macrografia de uma FPTW (BEAMISH, 2003 citado por PINHEIRO, 2008).

Outras técnicas também foram desenvolvidas para reparos por atrito. Citam-se, como exemplos o processo de costura por atrito ou *Friction Taper Stitch Welding* (FTSW) e o revestimento por atrito ou *Friction Surfacing* (FS).

O processo conhecido como costura por atrito ou *Friction Taper Stitch Welding*, tem como característica a sobreposição de vários preenchimentos por atrito ao longo do defeito (Figura 2.13). Foi apresentado inicialmente por ANDREWS e MITCHEL (1990). Posteriormente foi testado por MEYER (2001) utilizando o processamento de pinos por atrito, sendo operado por um sistema robotizado, visando à aplicação em estruturas submersas (HWANG, 2010).

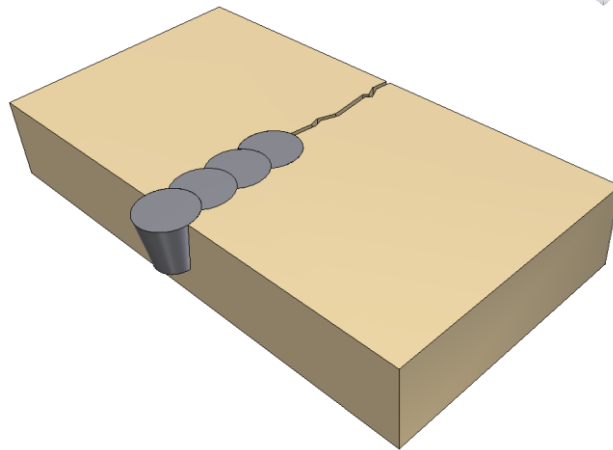


Figura 2.13 – Princípio do processo de costura por atrito (HWANG, 2010).

O revestimento por atrito ou *Friction Surfacing* consiste também na rotação de um pino e aplicação de força axial. Neste caso, porém, não há preenchimento de furo, mas sim, a deposição do material do pino sobre a chapa ou substrato. Com esta técnica, podem-se depositar diferentes tipos de materiais sobre os substratos, gerando assim superfícies com elevada resistência ao desgaste e ou a corrosão (MAREGA, 2011).

A técnica de processamento por atrito possui as mesmas vantagens que a soldagem por atrito. Por ser realizado no estado sólido, o processo não é influenciado pela pressão ambiente (NIXON, 1986), evidenciando com isso a sua aplicação em ambientes subaquáticos, a grandes profundidades.

2.2.2 – Influência das Geometrias do Pino e do Furo

De acordo com Pires (2007) as geometrias dos pinos e dos furos podem ser de duas formas, para o processamento de pinos por atrito, que são geometrias de forma cilíndrica ou cônica (Figura 2.14).

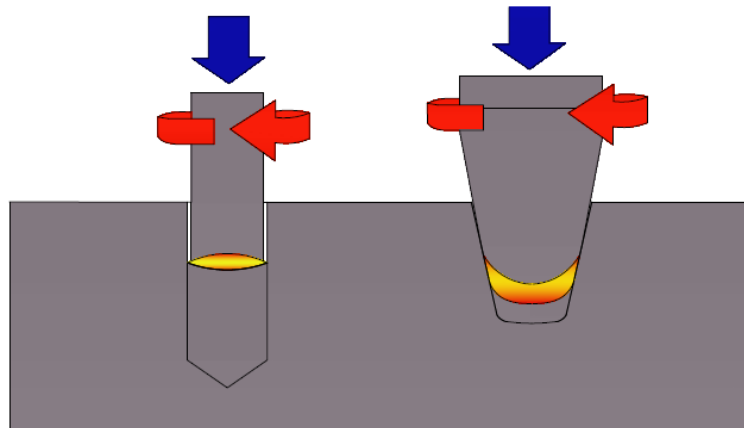


Figura 2.14 – Geometrias, cilíndrica e cônica do processo FHPP.

A geometria cilíndrica é indicada para estruturas com espessura maior, e a geometria cônica é usada para estruturas com espessuras menores. Isso se justifica pelo fato de que em grandes espessuras, caso fosse usar geometria cônica, deveria ser usado um pino de diâmetro excessivamente grande, o que resultaria na utilização de equipamentos robustos e com motores de elevada potência, tornando o processo inviável para certas aplicações práticas (NICHOLAS; PINHEIRO et. al., 2001). De acordo com Meyer (2003) a profundidade máxima para furo cônico deve ser de 20 mm (Figura 2.15).

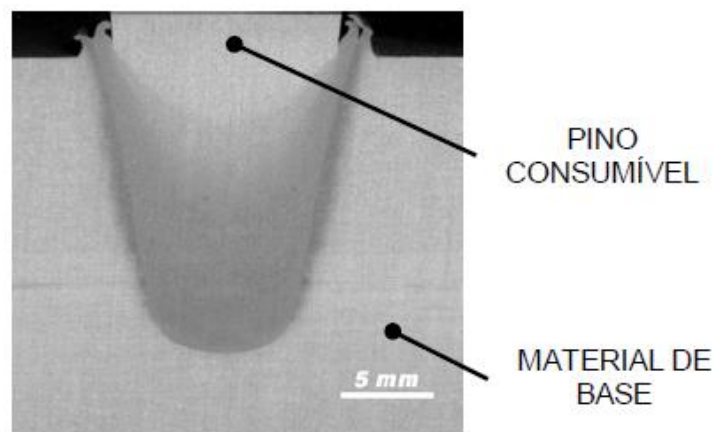


Figura 2.15 – Processamento de pinos por atrito utilizando geometria cônica (PIRES, 2007).

2.3 – Unidades de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA)

Por causa das vantagens do processo, principalmente para a indústria de extração do petróleo, foram concebidos, projetados e construídos protótipos de unidades de processamento por atrito no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia. Os sistemas desenvolvidos são constituídos basicamente por cinco partes principais, que são: unidade hidráulica, bloco de válvulas, cabeça de reparo ou cilindro de reparo, sistema de controle integrado e aquisição de dados (Figura 2.16).

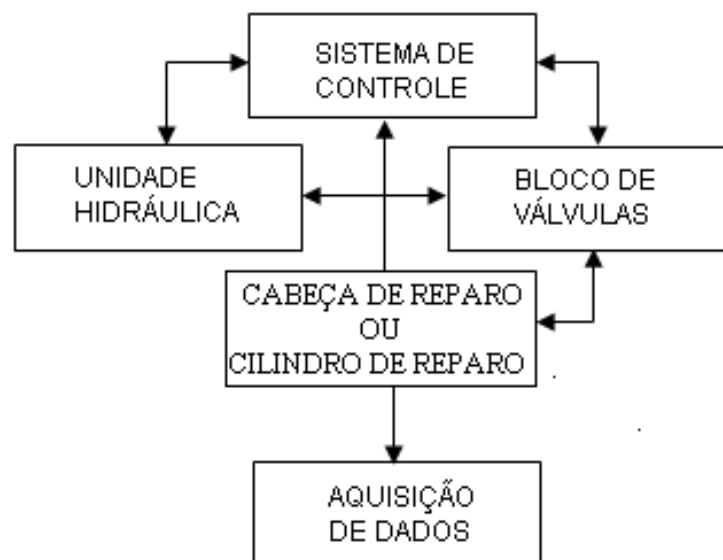


Figura 2.16 – Principais partes da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (MAREGA, 2011).

As Unidades de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA) serão citadas a seguir:

- UPPA1: A primeira Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (Figura 2.17) foi concluída em 2006 e tem a capacidade de realizar ensaios com forças axiais até 50 kN e rotações até 8000 rpm. PIRES (2007) realizou ensaios neste equipamento, onde otimizou parâmetros como geometria, rotação e força axial para a obtenção de informações importantes para o desenvolvimento do processo.

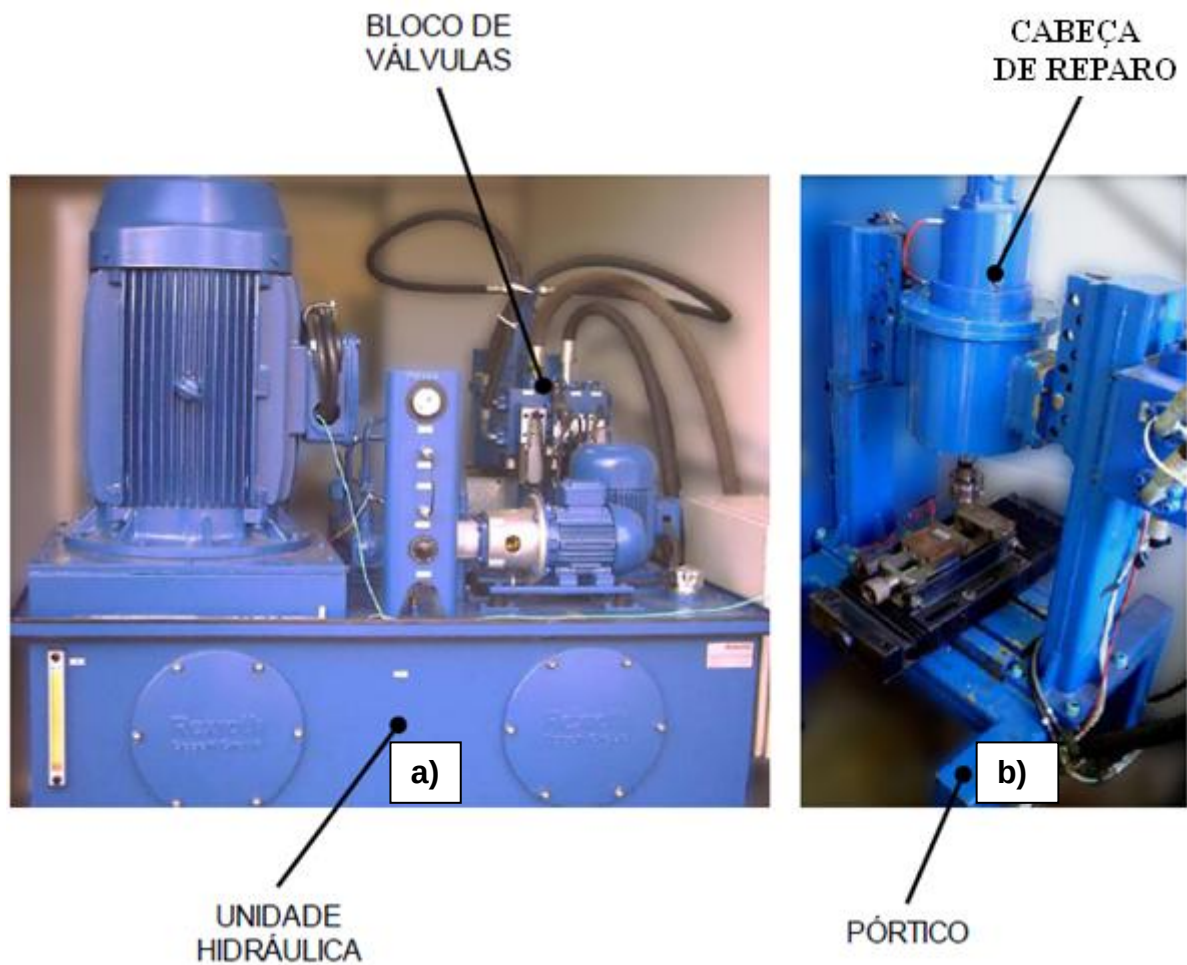


Figura 2.17 - Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1 (UPPA1); a) Unidade hidráulica e bloco de válvulas, b) Cabeça de reparo acoplado ao pórtico (HWANG, 2010).

- UPPA 2: Com o objetivo de trabalhar em outra faixa de operação utilizando o processamento de pinos por atrito, foi construída uma segunda versão (UPPA 2) com capacidade de realizar ensaios com forças axiais até 245 kN e rotações até 3000 rpm (CAIXETA, 2011). Foram instalados 60 metros de mangueira hidráulica, com o intuito de simular condições de campo, onde a unidade hidráulica trabalha a determinadas distâncias do local do processamento (Figura 2.18).

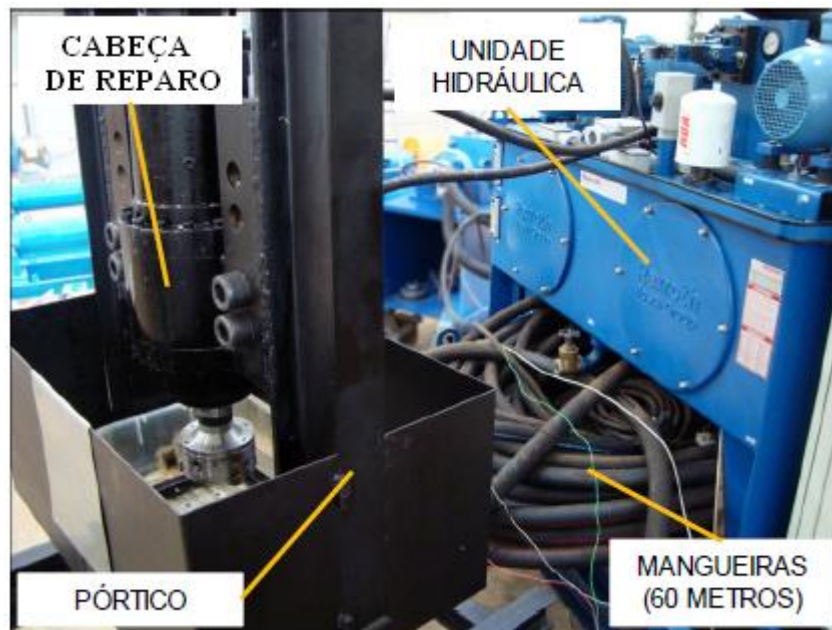


Figura 2.18 – Pórtico, cabeça de reparo, unidade hidráulica e mangueira de 60m (UPPA 2) (HWANG, 2010).

Os equipamentos (UPPA 1) e UPPA 2 foram desenvolvidos de tal forma que o contato entre pino e bloco aconteça 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 uma bomba acionada por um motor diesel de 158 kW (215 CV).

- UPPA 3: A versão 3 é uma unidade que permite realizar reparos com forças axiais até 500 kN e rotações entre 1400 e 1700 rpm. Como já foi descrito anteriormente, a unidade hidráulica desse equipamento é a mesma da versão 2, porém com cabeça de reparo diferente, que nesse caso, por trabalhar na posição horizontal, será chamado de equipamento de reparo. Pelo fato dos ensaios terem sido realizados nessa unidade, a mesma será descrita posteriormente, no Capítulo 3, com mais detalhes (Figura 2.19).



Figura 2.19 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA 3).

- UPPA 4: Com o objetivo de se trabalhar submerso em água, numa profundidade de até 30 metros, foi projetado e construído a versão 4 (Figura 2.20). As faixas de operações são forças axiais até 40 kN e rotações até 5000 rpm. A patente da concepção do cilindro de reparo foi requerida em 2007 (HWANG, 2010).

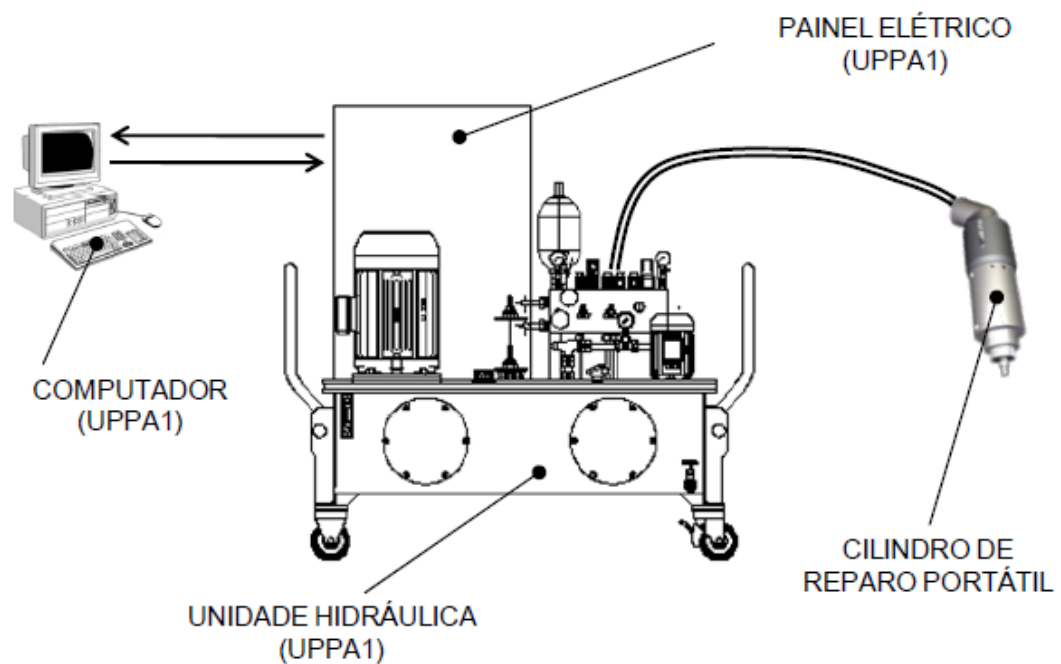


Figura 2.20 – Ilustração da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 4 (UPPA4) (HWANG, 2010).

Em pesquisa feita por unidades de processamento de pinos por atrito, foram encontradas unidades no Brasil e em outras partes mundo, mostrando a atualidade desses equipamentos.

Algumas unidades e seus respectivos locais são citados a seguir:

- No Brasil, em Porto Alegre, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
- Na África do Sul, em Porto Elizabeth, na Universidade Metropolitana Nelson Mandela.
- Na Alemanha, em *Geesthacht*, no Instituto de Pesquisas Alemão HZG (*Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material und Küstenforschung GmbH ex-GKSS*).
- Na Inglaterra, em Cambridge, no Instituto de Soldagem TWI (*The Welding Institute*).

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA 3)

Para melhor compreensão do funcionamento da terceira versão da unidade de reparo por atrito, a descrição da mesma é subdividida em três partes: parte mecânica, parte elétrica e sistema de controle.

3.1.1 – Sistema Mecânico

A unidade foi construída com o objetivo de se aplicar força axial e rotação, assim como as outras versões, mas com a diferença de se trabalhar com uma maior força aplicada, tendo também outro diferencial que o sistema de medição de torque durante os ensaios. Para que se tenha uma descrição mais completa, este sistema mecânico será subdividido em outras duas partes: equipamento de reparo e sistema hidráulico, Caixeta (2011) e Marega (2011).

3.1.1.1 – Equipamento de Reparo

O UPPA 3 possui um modelo exclusivo de equipamento de reparo, onde além da aplicar força axial e rotação, possui também um torquímetro acoplado para a aquisição de dados que serão utilizados para o cálculo da energia gasta nos ensaios. Neste equipamento os ensaios são realizados na posição horizontal (Figura 3.1).

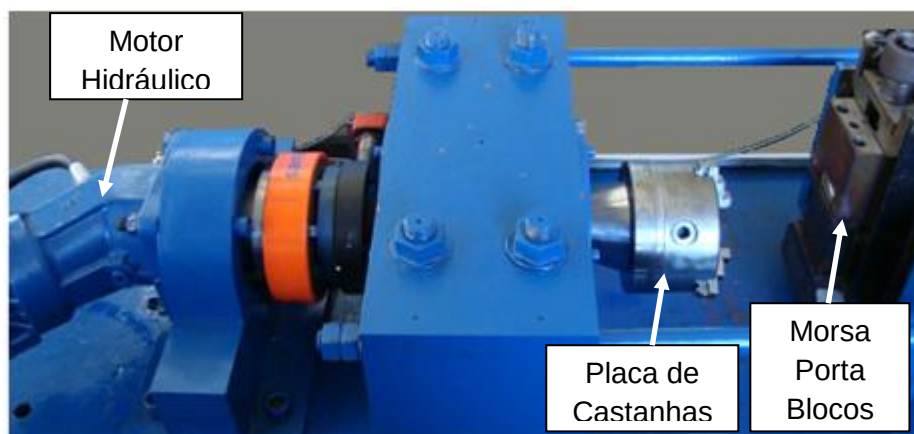


Figura 3.1 – Equipamento de reparo, composto de motor hidráulico, placa de três castanhas e morsa porta blocos.

O pino é fixado na placa de três castanhas, onde o mesmo é submetido a uma força axial aplicada por um cilindro hidráulico. O bloco é fixado na morsa porta blocos. A força, o sentido e a velocidade de deslocamento horizontal são controlados por uma válvula proporcional pilotada. A força máxima aplicada por este equipamento é de 500 kN. O cilindro hidráulico tem curso máximo de 200 mm.

A rotação do eixo do cilindro é gerada por um 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 consequentemente pela rotação do motor hidráulico. A rotação máxima atingida pelo motor hidráulico é de 2800 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, que é medido por um torquímetro fabricado pela Autogard®, modelo Monitorq™, acoplado ao sistema, isso para uma pressão de trabalho de 400 bar.

3.1.1.2 – Sistema Hidráulico

O sistema hidráulico é composto por dois motores elétricos, um motor diesel, um reservatório de óleo hidráulico com capacidade para 630 litros, válvulas proporcionais servocontroladas, mangueiras hidráulicas, transdutores de pressão, bomba, motor e cilíndrico hidráulico.

Para que a força axial seja aplicada é necessária uma pressão atuando sobre a haste do cilindro hidráulico. Uma bomba acionada por um motor elétrico com

potência de 7,5 kW (10 CV) proporciona essa pressão. Nesse conjunto a pressão máxima é de 290 bar e a vazão máxima é de 12 l/min. Caso a unidade esteja funcionando sem a realização de ensaios, um segundo motor de 5,5 kW (7,5 CV) entra em funcionamento para promover a recirculação e filtragem do óleo.

O terceiro motor é um motor diesel com potência 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. É esse conjunto que irá fornecer óleo ao motor hidráulico, para que ocorra a rotação do sistema (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Posicionamento 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 servocontroladas, sensores e um painel elétrico. Os dois motores elétricos com

potência de 7,5 CV e 10 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..

3.1.3 – Sistema de Instrumentação e Controle

Vários sensores são usados para o controle e monitoramento de variáveis importantes para o processamento de pinos por atrito. Os sensores medem a pressão no cilindro e no motor hidráulico, a rotação do motor hidráulico, o torque que o eixo da placa de castanhas está submetido e o deslocamento do eixo do cilindro hidráulico.

3.1.3.1 – Sensor de Rotação e de Torque

O sensor de rotação é acoplado em uma entrada própria do motor hidráulico, onde, dentro desse motor, gera um sinal pulsado de acordo com o movimento de uma roda dentada. O sensor de torque foi posicionado a aproximadamente 5 mm do anel de torque. O anel de torque é responsável por medir o torque no instante considerado e transmitir as informações através de ondas de rádio para o sensor de torque. O sinal adquirido é transferido para um conversor de sinal de frequência e tensão elétrica (Figura 3.3). Em seguida, as informações são coletadas por uma placa de aquisição de dados em um computador (MAREGA, 2011).



Figura 3.3 – Sensor de rotação acoplado ao motor hidráulico e sensor de torque próximo ao anel de torque.

3.1.3.2 – Sistema de Controle

O sistema de controle permite controlar os parâmetros do processo, dando condições para aquisição dos dados em tempo real. É composto de vários componentes que são: Controlador Lógico Programável (CLP), cartões PID (Proporcional Integral Derivativo), conversor de frequência/tensão, sensores e válvulas. As sequências de comandos e operações lógicas para tomada de decisões estão no CLP, fazendo com que ele seja o principal elemento de controle do processo. Outro dispositivo importante para a parametrização do processo é a Interface Homem Máquina (IHM) (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Interface Homem Máquina (IHM), para configuração de processamento (MAREGA, 2011).

O responsável pelo controle da posição do cilindro durante o ensaio é um sensor de deslocamento conhecido como LVDT (Transdutor Diferencial Variável Linear), que está acoplado ao eixo que se desloca horizontalmente. Através de comparação entre o valor medido e o valor pré-determinado é feito o controle do deslocamento do eixo do cilindro que é o próprio valor do comprimento de queima, usado como parâmetro para a execução do ensaio de reparo por atrito (Figura 3.5).

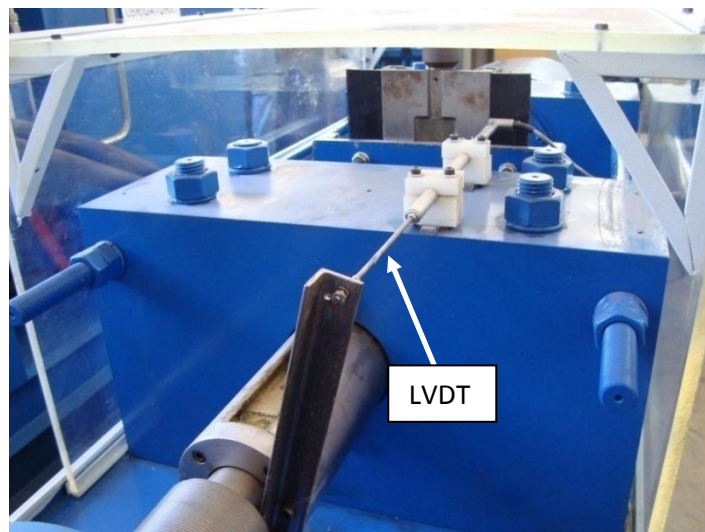


Figura 3.5 – Fixação do sensor de deslocamento (LVDT), responsável pelo controle da posição do cilindro durante o ensaio.

3.2 – Termopares

Neste trabalho adotou-se o mesmo tipo de termopar usado por Meyer em seu trabalho em 2003, isso pelo fato das condições de trabalho serem similares. Foram adquiridos trinta metros de fio de extensão para se construir os termopares a serem utilizados. O termopar é um tipo K com as seguintes características:

- Composição: Níquel – Cromo (+) / Níquel – Alumínio (-). O fio positivo níquel – cromo é conhecido comercialmente como Cromel e o negativo níquel – alumínio é conhecido como Alumel.
- Faixa de utilização: -200 a 1200 °C.
- Isolamento: fibra de vidro
- Diâmetro de cada fio: 0,255 mm (30 AWG)

A Figura 3.6 (a) mostra a montagem do termopar tipo K, usado nos ensaios de FHPP. Em uma extremidade o termopar está conectado ao condicionador de sinais, na outra extremidade a ponta dos fios é torcida, e uma pequena parte do termopar é recoberta com fita de teflon (fita veda rosca), estando assim, esta extremidade preparada para ser soldada nos furos do bloco. A torção da ponta dos fios (positivo e negativo) é fundamental para a confecção da junção quente. O recobrimento com fita de teflon auxilia na inserção da ponta do termopar dentro dos furos do bloco e também reforça o isolamento térmico do termopar (Figura 3.6.b).

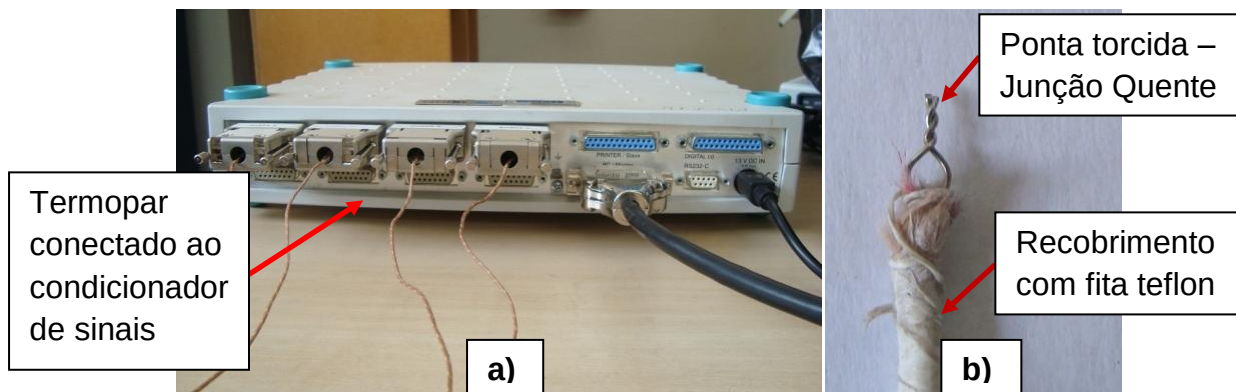


Figura 3.6 – Montagem do termopar tipo K. a) Termopar conectado ao condicionador de sinais. b) Confecção da ponta torcida do termopar e recobrimento com fita de teflon.

A Figura 3.7 mostra um bloco cortado e o posicionamento dos termopares.



Figura 3.7 – Bloco cortado mostrando o posicionamento dos termopares dentro dos furos, onde T0 é a temperatura do fundo do furo, T1 é a temperatura intermediária 1, T2 é a temperatura intermediária 2 e T3 é a temperatura do topo.

O corte apresentado na Figura 3.7 permitiu medir as espessuras reais das paredes dos furos dos termopares/furo cônico, apresentando os seguintes valores: Furo T0 = 704,8 μm , Furo T1 = 628,6 μm , Furo T2 = 908,9 μm e Furo T3 = 961,6 μm . As diferenças em relação à espessura da parede programada (1000 μm) podem causar distorções nas aquisições das temperaturas.

3.3 – Programa Computacional para Aquisição de Temperatura

Para monitorar os valores de temperatura foi desenvolvido um programa computacional para aquisição dos sinais dos quatro termopares soldados ao bloco submetido ao ensaio de processamento de pinos por atrito. O programa computacional de aquisição e monitoramento das temperaturas foi desenvolvido em LabVIEW®, versão 8.5. Para a aquisição de sinais advindos dos quatro termopares, tipo K, utilizou-se um condicionador de sinais, da marca HBM, modelo *Spider8*. O condicionador de sinais é responsável pela aquisição, amplificação, filtragem e conversão analógico-digital dos sinais vindos dos termopares (Figura 3.8).

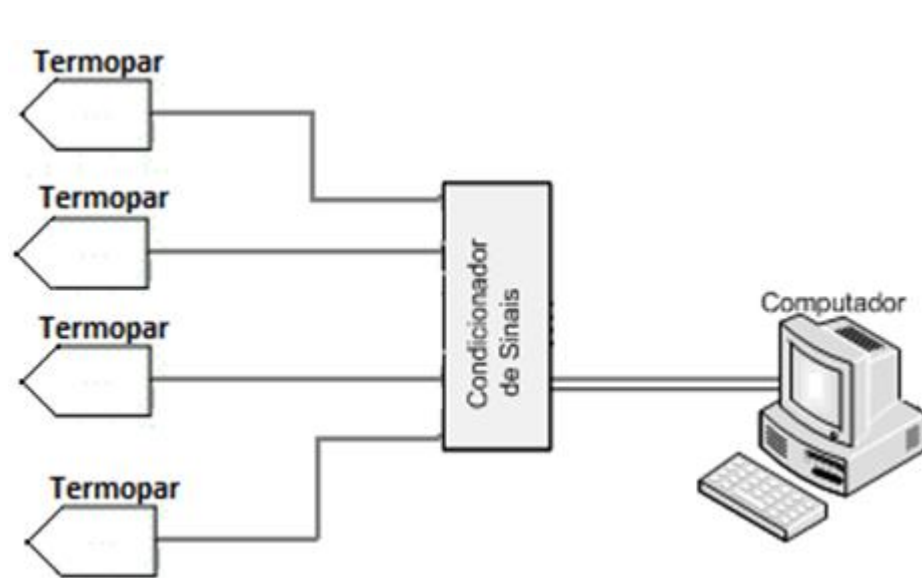


Figura 3.8 – Representação esquemática do sistema desenvolvido.

O programa desenvolvido permite acompanhar a medição da temperatura em tempo real, através de indicadores numéricos e gráficos. Esta visualização é feita através de sua interface (Figura 3.9).

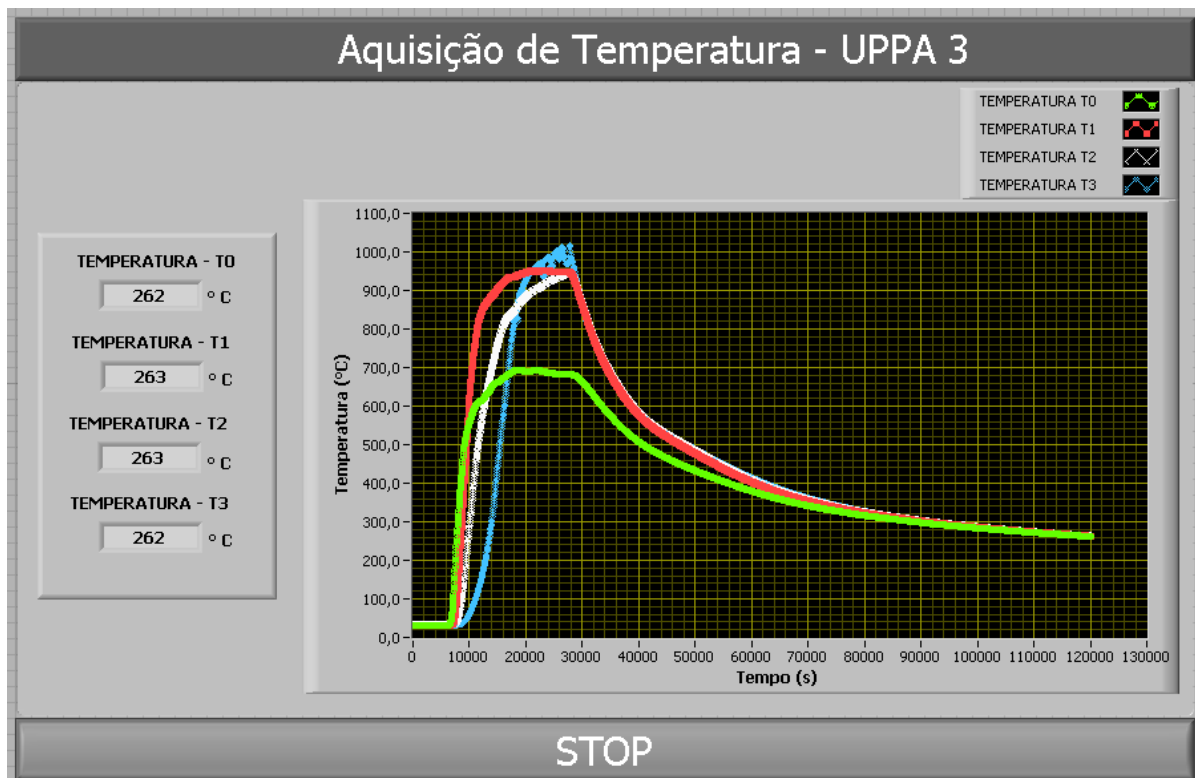


Figura 3.9 – Interface do programa de aquisição e monitoramento de temperatura.

Foram realizados ensaios de preenchimento por atrito na UPPA 3, para validar o programa de aquisição e monitoramento desenvolvido. Após testes pôde-se perceber que o programa, permite com eficácia, a aquisição dos sinais, o monitoramento em tempo real da temperatura e o salvamento dos dados.

A avaliação da exatidão e precisão dos sinais dos termopares baseou-se no método de comparação com um termopar associado a um multímetro de precisão (6 dígitos).

Os testes de comparação dos termopares foram realizados à temperatura ambiente e seguiram o seguinte procedimento: a aquisição dos dados foi realizada por um tempo determinado de dois minutos, para possibilitar a estabilização dos termopares. Em seguida, foi realizado o salvamento dos dados do termopar associado ao multímetro de precisão e dos quatro termopares construídos. Este procedimento foi realizado três vezes, para assegurar a reprodutibilidade dos resultados.

O fluxograma do programa de aquisição e monitoramento de temperatura desenvolvido se encontra no Anexo I.

3.4 – Dispositivo de Solda Capacitiva

Para medir a temperatura durante os ensaios de processamentos de pinos por atrito, o termopar deve estar conectado ao bloco a ser ensaiado. Uma das formas de se fazer essa conexão é soldar a ponta do termopar (junção quente) no bloco.

Para a execução dessa solda foi construída uma placa com componentes eletrônicos denominada de “Dispositivo de Solda Capacitiva”, que é composto de uma placa de circuito impresso, capacitores eletrolíticos, ponte retificadora, resistor e uma fonte de alimentação externa. A fonte de alimentação externa carrega os capacitores com energia em corrente contínua. Após o carregamento dos capacitores, a placa é desconectada da fonte e os dois cabos de saída são conectados, um cabo ao termopar construído e outro ao bloco de ensaio. Quando a ponta torcida (junção quente) do termopar construído toca o fundo do furo feito no bloco, ocorre um curto circuito e a energia armazenada nos capacitores é

descarregada. Nesse instante acontece a soldagem entre a ponta do termopar construído e o bloco (Figura 3.10).

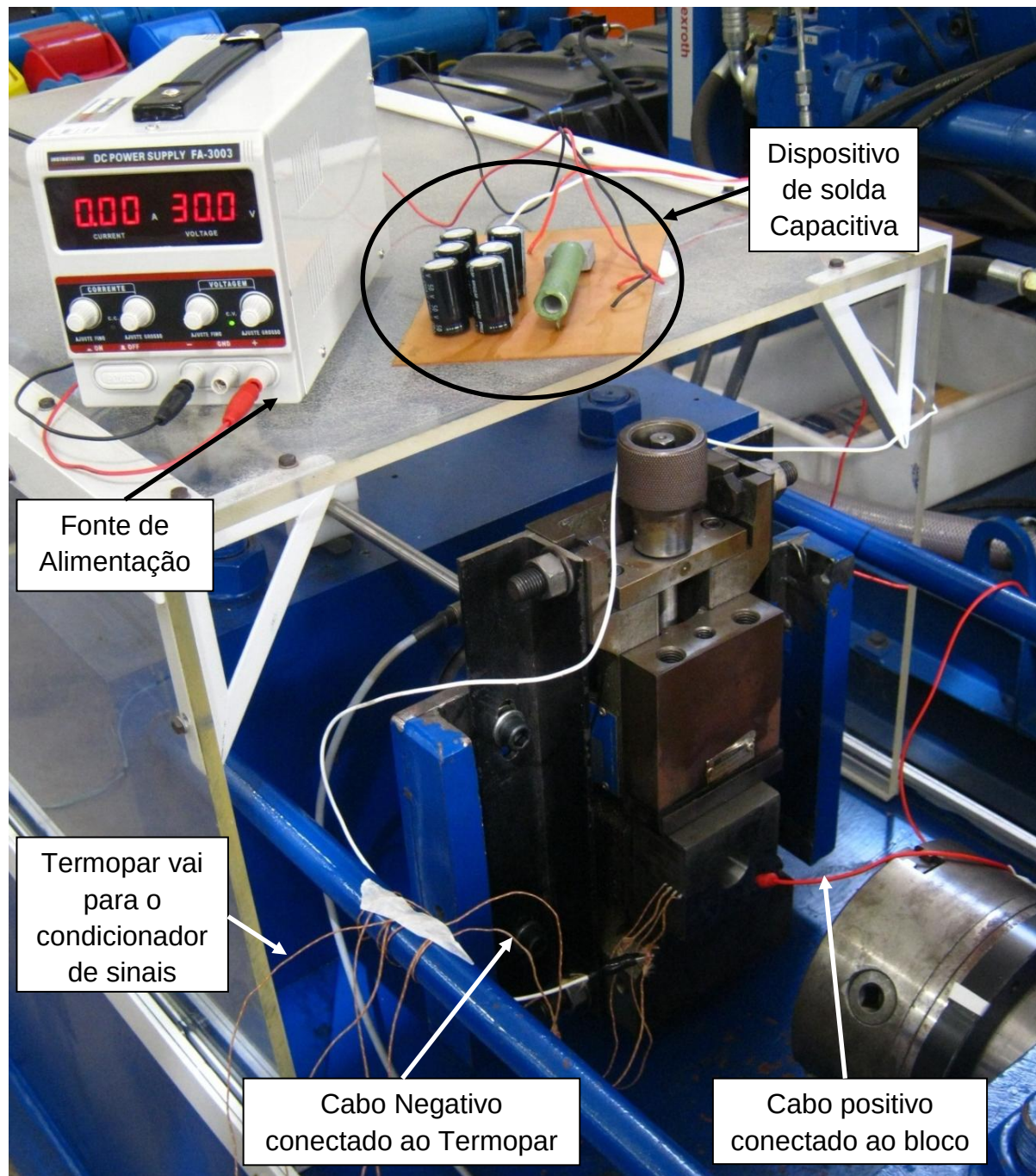


Figura 3.10 – Sistema desenvolvido para soldar o termopar no bloco e em destaque (dentro do círculo) o dispositivo de solda capacitiva.

O esquema elétrico do dispositivo de solda capacitiva é mostrado no Anexo II.

3.5 – Materiais Ensaçados

Como mencionado no Capítulo 2, a natureza do material é uma das variáveis importantes do processo de soldagem por atrito e tem grande influência nos parâmetros do processo como força axial e rotação que são aplicadas na execução do reparo.

O material dos pinos utilizados nos ensaios foi o aço ABNT 1010, fornecido em barras com 2 m de comprimento e diâmetro de 31,75 mm. Para os blocos foi empregado o aço ASTM A36, tendo como matéria prima uma chapa laminada, na espessura de 50,8 mm. Os blocos de 25,4 e 38,1mm foram usinados até as medidas desejadas utilizando-se a mesma chapa de 50,8 mm; isso para garantir que todos os blocos tivessem a mesma composição química.

A Tabela 3.1 mostra a composição química desses materiais, sendo esta determinada através da técnica de espectrometria de emissão ótica, realizada pela PETROBRAS, em seu centro de pesquisas (CENPES).

Tabela 3.1 – Composição química dos materiais utilizados (% em peso).

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
Bloco ASTM A36	0,179	0,279	0,938	0,025	0,023	0,126	0,006	0,320	0,102
Pino ABNT 1010	0,120	0,160	0,690	0,044	0,027	-	0,010	0,030	0,00

O aço carbono ASTM A36 têm uma microestrutura típica com bandejamento de ferrita e perlita, devido o seu maior grau de impurezas (Figura 3.11).

A Figura 3.12 mostra uma microestrutura típica de aço ABNT 1010 constituída de ferrita e perlita.

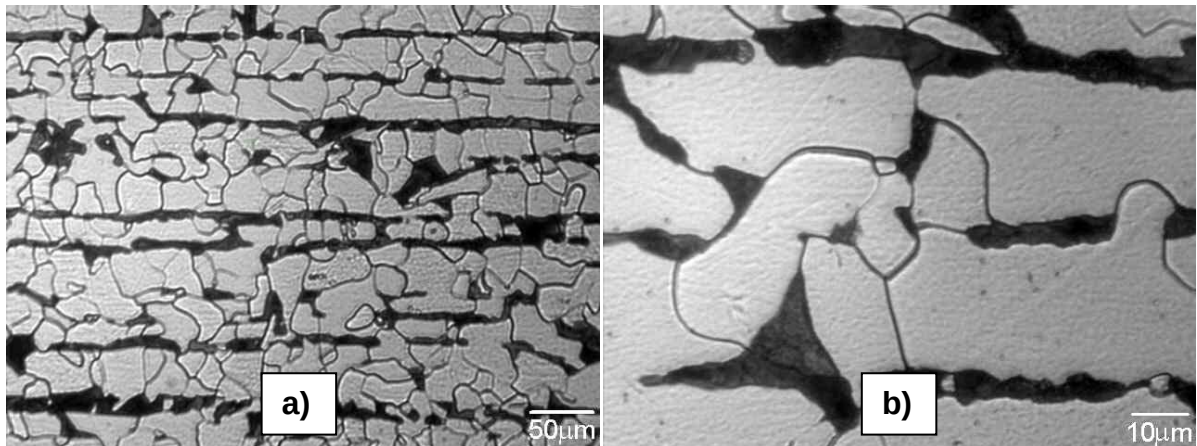


Figura 3.11 – Micrografias do bloco. Aço carbono ASTM A36, (seção longitudinal). Microestrutura: ferrita (grãos claros) e perlita (grãos escuros) orientados. a) vista geral e b) detalhe. (Ataque Nital 2%. (PIRES, 2007).

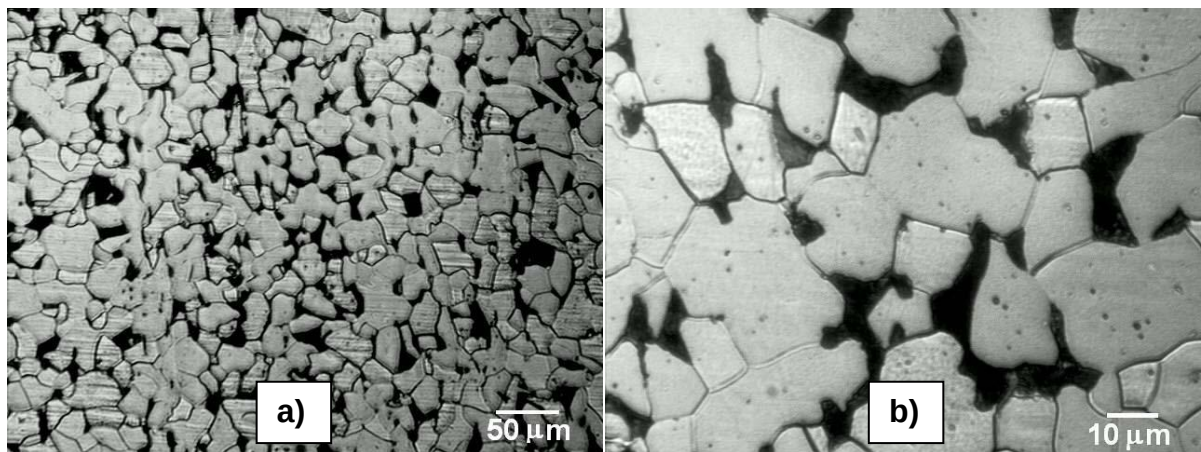


Figura 3.12 – Micrografias do pino. Aço carbono ABNT 1010, (seção transversal). Microestrutura: ferrita (grãos claros) e perlita (grãos escuros) orientados. a) vista geral e b) detalhe. Ataque Nital 2%. (PIRES, 2007).

3.6 – Ensaio de Preenchimento

Como parâmetros geométricos foram avaliados um tipo de pino e três tipos de blocos, todos com geometria cônica (Figura 3.13).

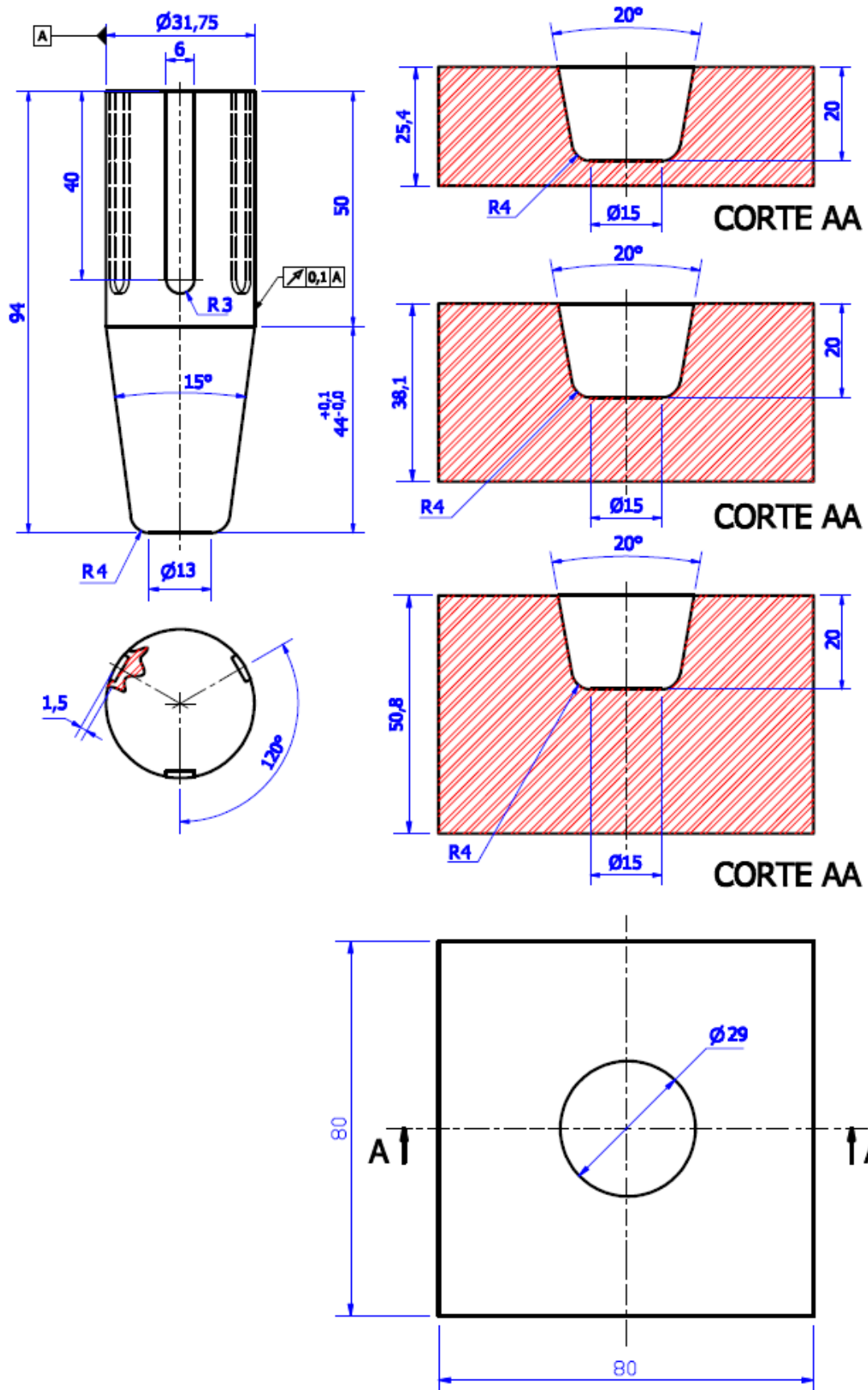


Figura 3.13 – Geometria de pino e blocos usados nos ensaios.

Todos os blocos foram fabricados em seções quadradas de 80 x 80 mm e com espessuras de 25,4, 38,1 e 50,8 mm. As razões para a seleção das dimensões de 80 x 80 mm são apresentadas no Capítulo seguinte. Os parâmetros geométricos como profundidade de furo, raio de concordância no fundo do furo e ângulo de tronco de cone têm como referência a geometria “B” (MAREGA, 2011), que por sua vez, se baseou no trabalho de PIRES (2007). A partir de uma análise sobre os resultados obtidos por MAREGA (2011) com a geometria “B”, verificou-se uma folga excessiva entre pino e bloco, então surgiu uma nova geometria, com diâmetro e comprimentos menores. Essas modificações além de não alterarem a qualidade do reparo, trouxeram mais economia ao processo. A nova geometria foi denominada de geometria “D”. A Tabela 3.2 mostra uma comparação entre as duas geometrias.

Tabela 3.2 – Comparação entre pinos de geometria “B” e geometria “D”.

	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Forma de fixar na placa de castanhas
Geometria “B”	34,00	106,90	Corpo do pino tem ponto de solda
Geometria “D”	31,75	94,00	Corpo do pino é fresado

Os parâmetros de força axial, rotação foram definidos a partir de trabalhos anteriores. De acordo com MAREGA (2011), a força axial mínima deve ser igual a 60 kN, pois abaixo disso o equipamento pode travar. A força axial máxima foi definida como sendo o dobro da força axial mínima, portanto igual a 120 kN. A rotação mínima é igual a 1400 rpm e rotação máxima é igual a 1700 rpm (MOURA, 2011). O comprimento de queima é a distância que o cilindro deve se deslocar, depois que o pino toca o fundo do furo, para que haja o total preenchimento do furo. O furo cônico, em estudo, com profundidade de 20 mm, necessita de um volume de $9,8\text{cm}^3$ de material para ser preenchido. Com um comprimento de 26 mm, ou seja, 6 mm a mais que a profundidade do furo, o pino cônico tem um volume de $12,5\text{cm}^3$, que é suficiente para preencher completamente o furo cônico e formar a rebarba (*flash*), onde são eliminados os óxidos. Definindo-se assim um comprimento de queima igual a 6 mm. A força de forjamento foi definida como sendo igual à força axial.

Sobre o tempo de forjamento, MAREGA (2011) recomenda em seu trabalho utilizar um tempo de forjamento superior a 3 segundos, pois este pequeno tempo mostrou-se insuficiente para o forjamento adequado. O tempo de forjamento definido foi então de 10 segundos. Os parâmetros utilizados neste trabalho são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados dentro da fase de ensaios de preenchimento.

Ensaio	Amostra	Força Axial (kN)	Rotação (rpm)	Espessura do bloco (mm)
1	31410	60	1400	50,8
2	31411	120	1400	50,8
3	31412	60	1700	50,8
4	31413	120	1700	50,8
5	31414	60	1400	25,4
6	31415	120	1400	25,4
7	31416	60	1700	25,4
8	31417	120	1700	25,4
9	31418	60	1400	38,1
10	31419	120	1400	38,1
11	31420	60	1700	38,1
12	31421	120	1700	38,1

Para se medir a temperatura, os blocos tiveram que ser furados para que fossem inseridos os termopares construídos. Os diâmetros dos furos foram determinados como sendo suficientes para se introduzir os termopares e interferir o mínimo possível na dissipação de calor do bloco. A profundidade dos furos aproximou-se a 1 mm da interface com o furo cônico do bloco usado no processamento de pinos por atrito (Figura 3.14).

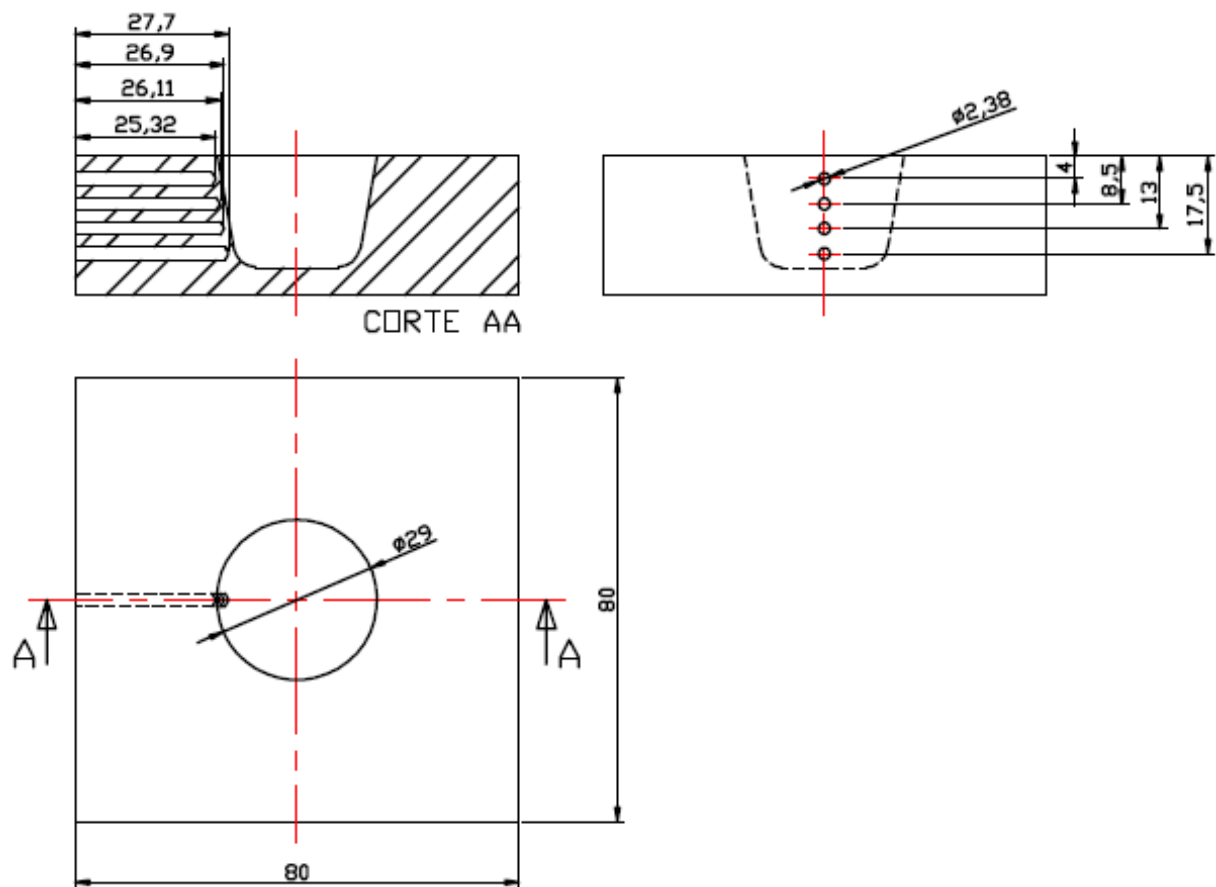


Figura 3.14 – Desenho mostrando furos para se inserir termopares no bloco 80x80x25,4 mm.

3.7 – Procedimentos para Realização dos Ensaio

A preparação de limpeza dos pinos e blocos foi realizada com utilização de querosene para retirada de óleo e sujeira presentes após a usinagem. Dentro dos furos feitos para os termopares, foram removidas possíveis rebarbas e conferidas as profundidades dos mesmos. Posteriormente, executou-se a limpeza por banho ultra-sônico com acetona, para a limpeza final, principalmente dos furos feitos para os termopares.

3.8 – Preparação Metalográfica

A análise metalográfica é um recurso importante onde se pode estudar a estrutura do material. É realizada após os ensaios de preenchimento.

A metalografia pode ser dividida em duas partes: macrografia e micrografia. A primeira visa caracterizar a macroestrutura, onde as observações são feitas a olho nu e a segunda, tem como objetivo, mostrar as características da microestrutura, através da microscopia ótica.

3.8.1 – Macrografia

Primeiramente foi realizado um corte longitudinal, dividindo o bloco quadrado em dois retângulos, passando pelo centro do pino. Todos os cortes foram executados com serra de fita horizontal e resfriados com fluido refrigerante para minimizar o efeito térmico sobre a microestrutura.

Após os cortes, foram retificadas as faces das amostras. Em seguida cada seção a ser analisada foi lixada com lixas de SiC (carbeto de silício), de granulometrias 220, 320, 400 e 600 *mesh*.

Depois da limpeza por banho ultra-sônico, as amostras foram atacadas com Nital 6%. Na sequência ao ataque, foram realizadas inspeções visuais da amostra, para verificar a existência de algum tipo de defeito, por exemplo, a falta de preenchimento entre o pino e o bloco. Foi avaliada também a extensão da ZTA. Utilizou-se um *scanner* para digitalizar as imagens de todas as amostras.

3.8.2 – Micrografia

Após a realização das macrografias, as amostras foram cortadas novamente. A linha de corte é representada pela linha contínua vermelha, como pode ser observado na Figura 3.15, eliminando-se assim o excesso de material e facilitando as operações de lixamento e polimento.

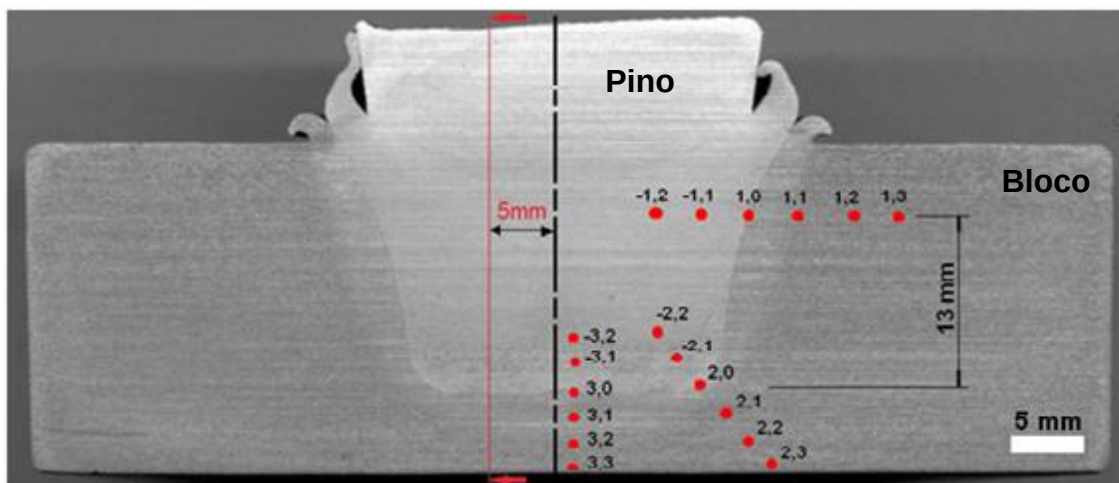


Figura 3.15 – Linha de corte da amostra e indicação dos locais para as micrografias.

Para iniciar as análises das micrografia, as amostras foram lixadas novamente com lixa de SiC (carbeto de silício) de granulometrias 600 e 1200 *mesh* e a seguir foram polidas com pasta de diamante de granulometrias 6, 3 e 1 μm , utilizadas nesta sequência. Terminado o polimento as amostras foram atacadas com Nital 2%.

A seguir as amostras foram analisadas através de microscópio ótico. Fotomicrografias foram realizadas nos locais marcados com os seguintes números, -3,2, -3,1, 3,0, 3,1, 3,2 e 3,3 na posição vertical, -2,2, -2,1, 2,0, 2,1, 2,2 e 2,3 na posição diagonal e -1,2, -1,1, 1,0, 1,1, 1,2 e 1,3 na posição horizontal, todos partindo do pino na direção do bloco, como mostra a Figura 3.15, analisando assim a microestrutura formada após a união metalúrgica. Para cada posição foram feitas fotomicrografias com ampliação menor (objetiva de 20 vezes) e ampliação maior (objetiva de 50 vezes) o que gerou 12 imagens por posição e um total de 36 imagens por amostra.

3.9 – Ensaios de Dureza Vickers

As mesmas superfícies usadas para as micrografias também foram utilizadas para os ensaios de dureza Vickers. O levantamento destes perfis visou abranger as regiões de interface entre pino e bloco, na ZTA e regiões do pino e do bloco

próximas à ZTA. Foram traçados três perfis de dureza sendo um vertical e dois horizontais. Os perfis foram executados conforme o posicionamento mostrado na Figura 3.16, sendo utilizado um durômetro marca REICHESTER STIEFELMAYER. Todos os perfis se iniciam a 1,5 mm da interface, dentro do pino, continuando até se obter valores de dureza do metal de base (bloco).

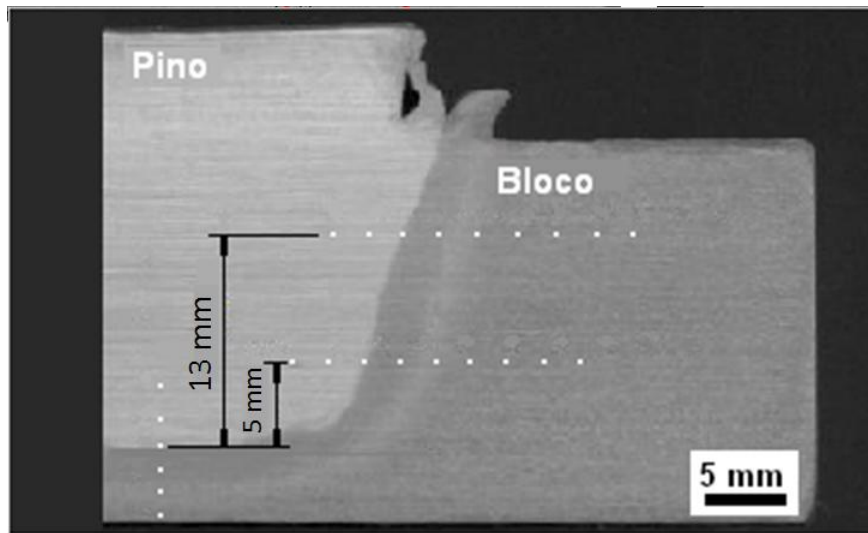


Figura 3.16 – Posicionamento de perfis de dureza.

O espaçamento entre as indentações foi de 0,5 mm e a carga aplicada de 1,0 kgf. O tempo de aplicação da carga foi de 30 segundos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Definição das Dimensões dos Blocos

Para definir as seções quadradas dos blocos foi feita simulação em elementos finitos (OSÉIAS, 2011). A figura 4.1 indica o modelo geométrico utilizado, um bloco 40x40x25,4mm, sendo o furo cônico com profundidade do furo 16 mm.

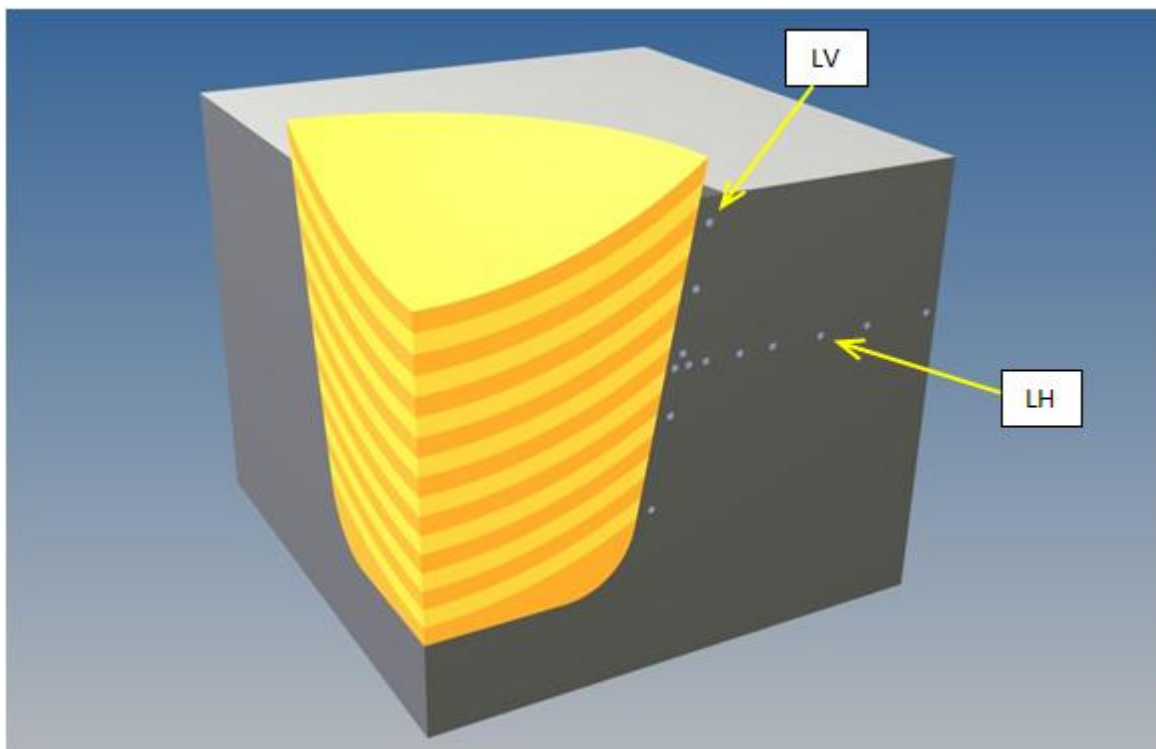


Figura 4.1 – Geometria utilizada na simulação.

A 0,5 mm da interface entre pino e bloco foram inseridos pontos, separados de 3,3 mm entre si, simulando a presença de termopares (linha vertical – LV). Pode ser observada também, uma linha de pontos horizontal (LH), que se estende até a

aresta do bloco. Esses pontos foram inseridos para o monitoramento da temperatura ao longo do bloco até a superfície lateral.

Destes pontos foram retiradas as informações que foram comparadas com o gráfico medido por Meyer (2003) como validação da simulação (Figura 4.2). As linhas contínuas são os dados coletados por Meyer e as linhas tracejadas expressam as temperaturas nos pontos durante a simulação.

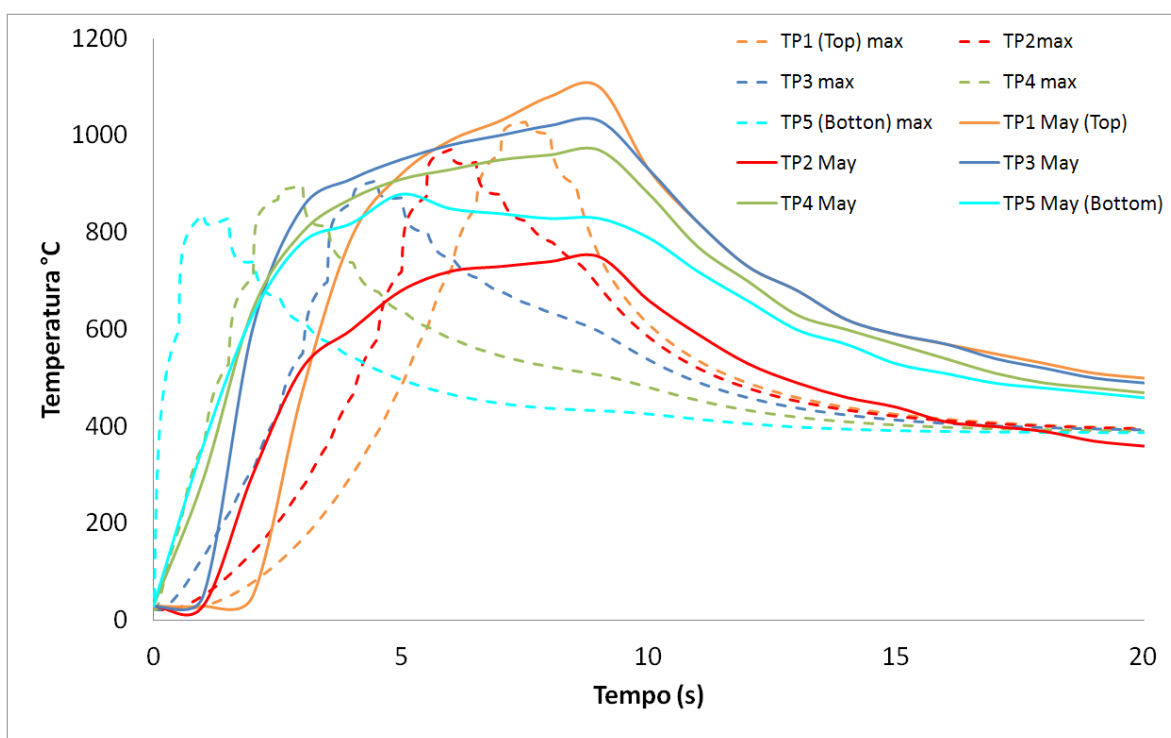


Figura 4.2 – Comparativos das temperaturas máximas entre resultados da simulação e das medições de Meyer (2003).

Após a comparação dos resultados de temperaturas máximas foram realizadas várias simulações para configurações diferentes de tamanho de bloco e espessura de chapa. Primeiramente, fixando a espessura da chapa em 1" (25,4 mm), foi simulado o aquecimento para blocos de 40, 60, 80 e 120 mm de aresta.

E posteriormente, fixando o valor da aresta em 60 mm, foi simulado o fluxo térmico para as espessuras de 1" (25,4 mm), 1½" (38,1 mm) e 2" (50,8 mm). O resultado analisado foi a temperatura máxima em cada ponto da LH durante o processo.

4.1.1 – Considerações e condições de Contorno

Considerou-se que a temperatura na zona de processamento do pino é de 1200°C, e que esta zona caminha na velocidade de 2 mm/s. Desta forma, o tempo de queima total do pino é de 8 segundos. Introduzindo essa lógica na simulação, cada segmento é colocado a uma temperatura de 1200°C durante meio segundo, seguindo o caminho de baixo para cima. O tempo total da simulação foi de 20 segundos, dentre os quais 12 segundos são assumidos como resfriamento sob condições de convecção natural. Os dados de materiais são de um aço carbono comum semelhante ao ASTM A36. A Figura 4.3 mostra a configuração das condições de contorno aplicadas.

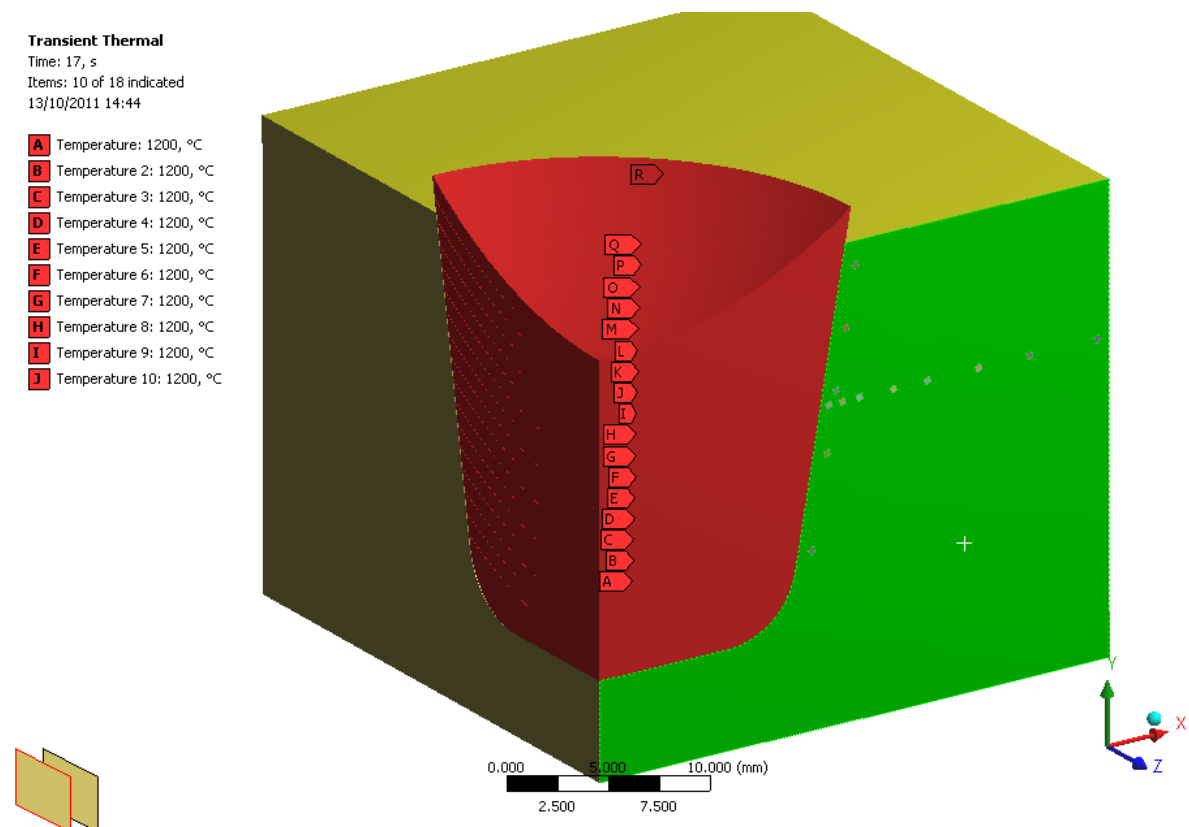


Figura 4.3 – Condições de contorno inseridas no modelo.

4.1.2 – Resultados

Entre os resultados apresentados, a Figura 4.4 mostra a distribuição de temperatura no conjunto após os 20 segundos.

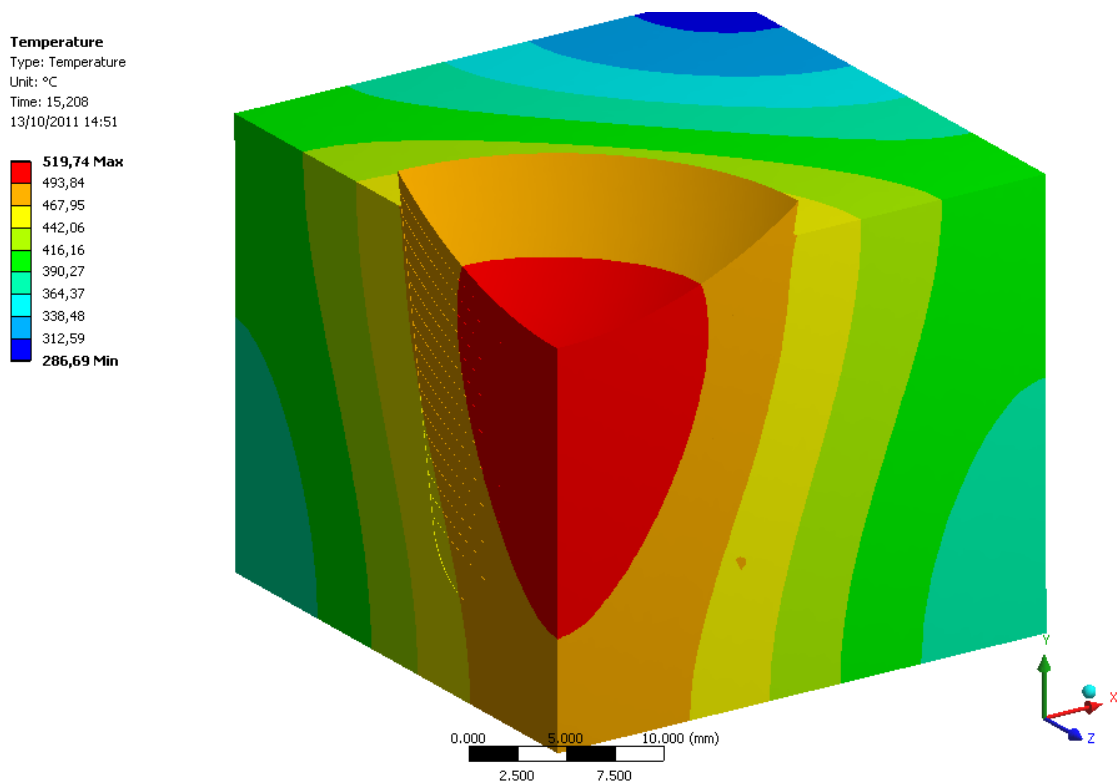


Figura 4.4 – Distribuição de temperatura no conjunto após 20 segundos de simulação.

Outro compilado de dados compreende uma avaliação da temperatura máxima nos pontos da LH. A Figura 4.5 mostra o resultado das simulações para as várias dimensões de aresta em blocos de 1" (25,4 mm) de espessura. Observa-se que para blocos com comprimento de aresta de 40 mm a temperatura na borda lateral do bloco chega a valores acima da linha de transformação do aço, indicada na linha tracejada em amarelo. Para blocos com aresta acima de 60 mm as temperaturas na superfície lateral são menores que a temperatura de transformação (linha A₁ do diagrama Ferro-Carbono).

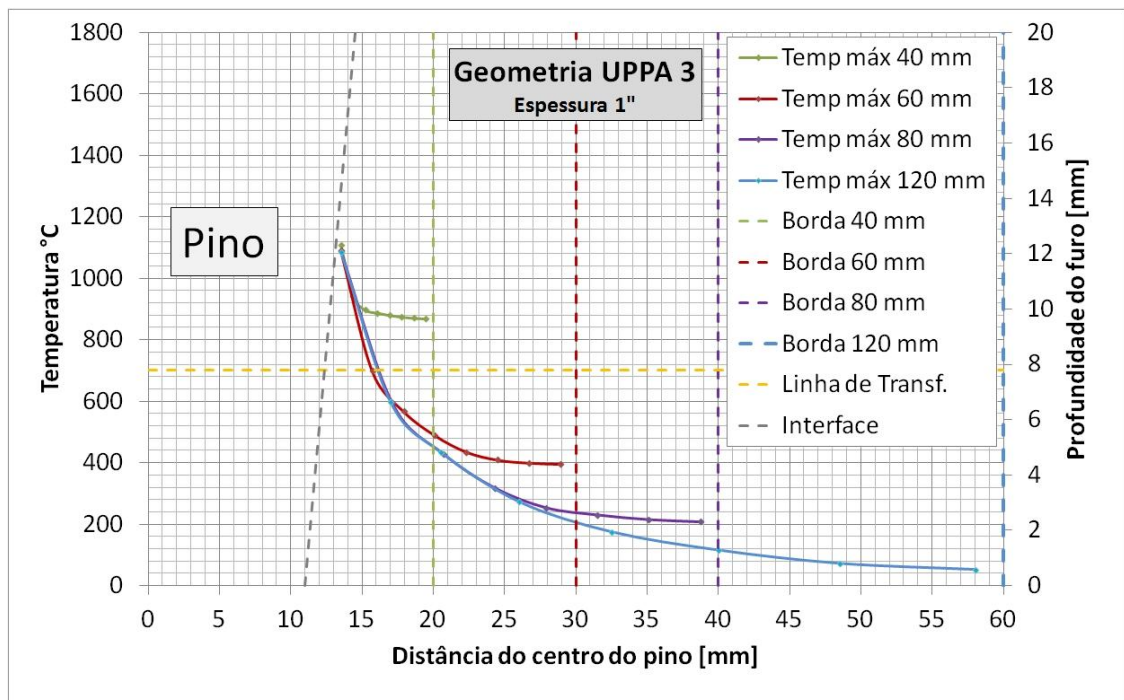


Figura 4.5 – Comparativo entre as temperaturas obtidas na simulação.

A Figura 4.6 mostra as linhas das temperaturas para um bloco com aresta de 60 mm e espessuras de 1" (25,4 mm), 1½" (38,1 mm) e 2" (50,8 mm).

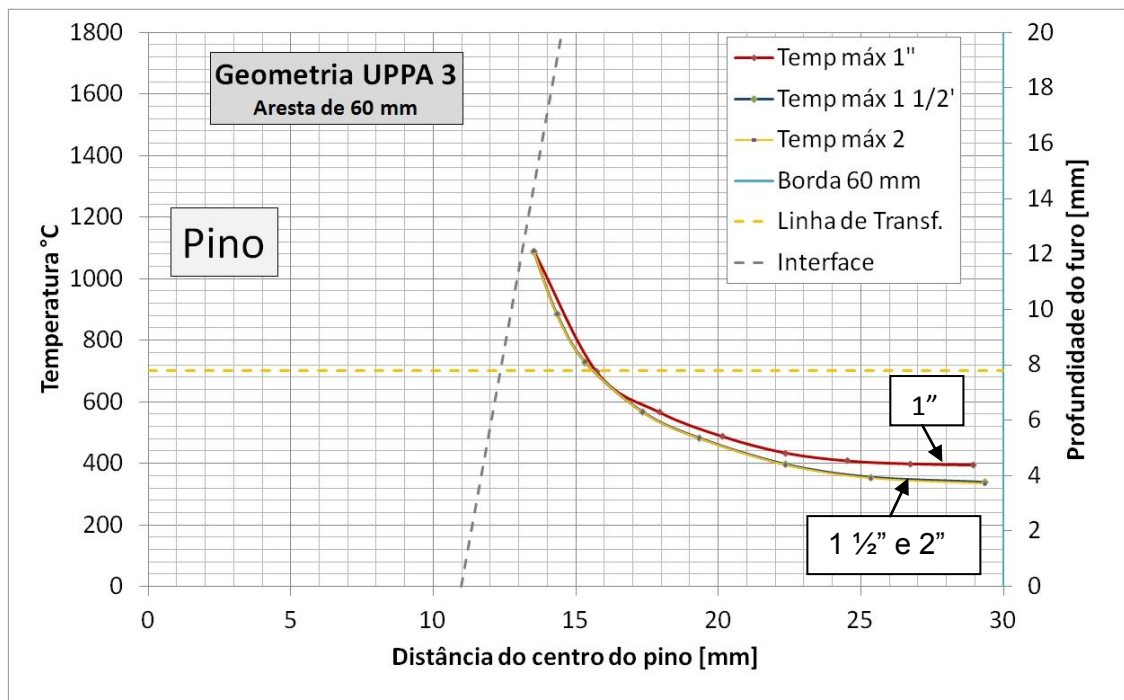


Figura 4.6 – Comparativo entre as linhas das temperaturas e as espessuras dos blocos de 1" (25,4 mm), 1 1/2" (38,1 mm) e 2" (50,8 mm).

Como na pode ser observado na simulação (Figura 4.6), a temperatura na aresta do bloco com 60 mm ficou próxima a 400 °C, optou-se então por um bloco com dimensões um pouco maiores (80 x 80 mm), para que a espessura influenciasse mais na condução do calor do que as outras dimensões do bloco.

Depois de passar por todos os procedimentos, realizar todos os ensaios com as aquisições de dados são discutidos os respectivos resultados referentes aos gráficos do processo de preenchimento, tempo de processamento, de energia aportada e de temperatura, as análises metalográficas, macrografia e micrografia e os ensaios de dureza Vickers.

4.2 – Ensaios de Preenchimento

Com a aquisição dos sinais de força axial, comprimento de queima, torque, potência e rotação, todos em função do tempo, foram construídos gráficos que são mostrados nas Figuras de 4.7 a 4.18.

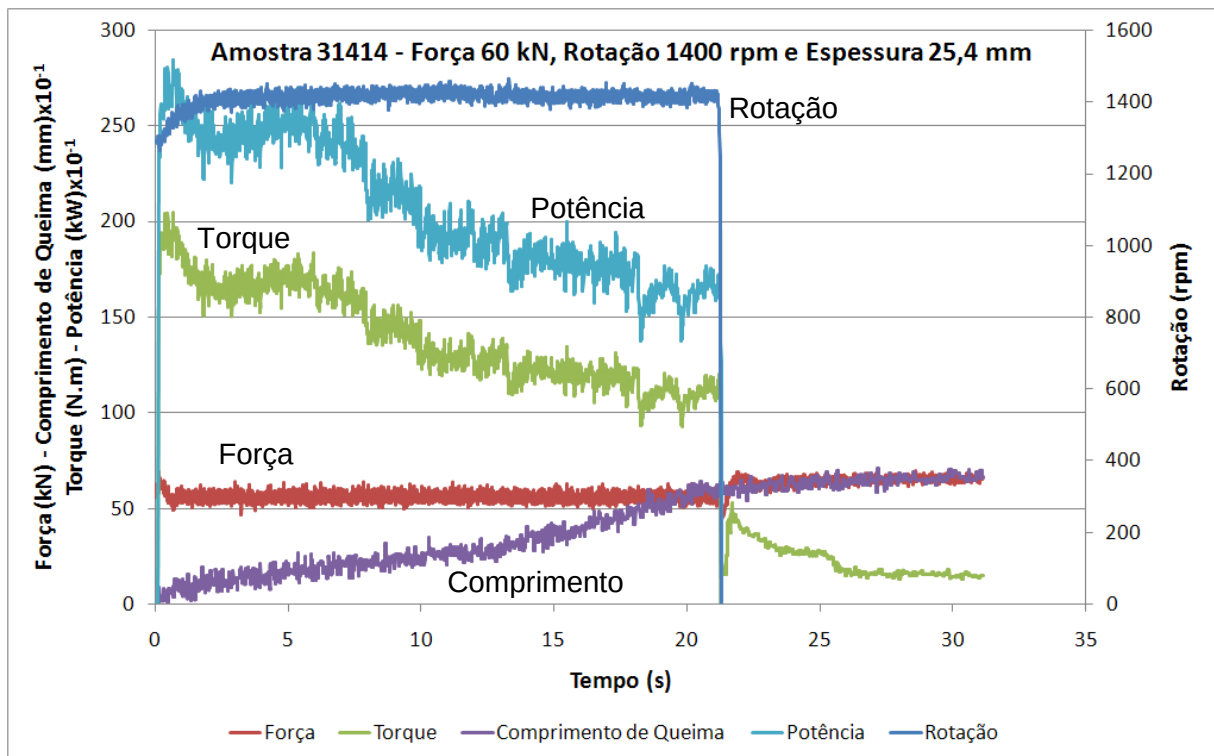


Figura 4.7 – Sinais adquiridos. Amostra 31414, 25,4 mm, 60 kN, 1400 rpm.

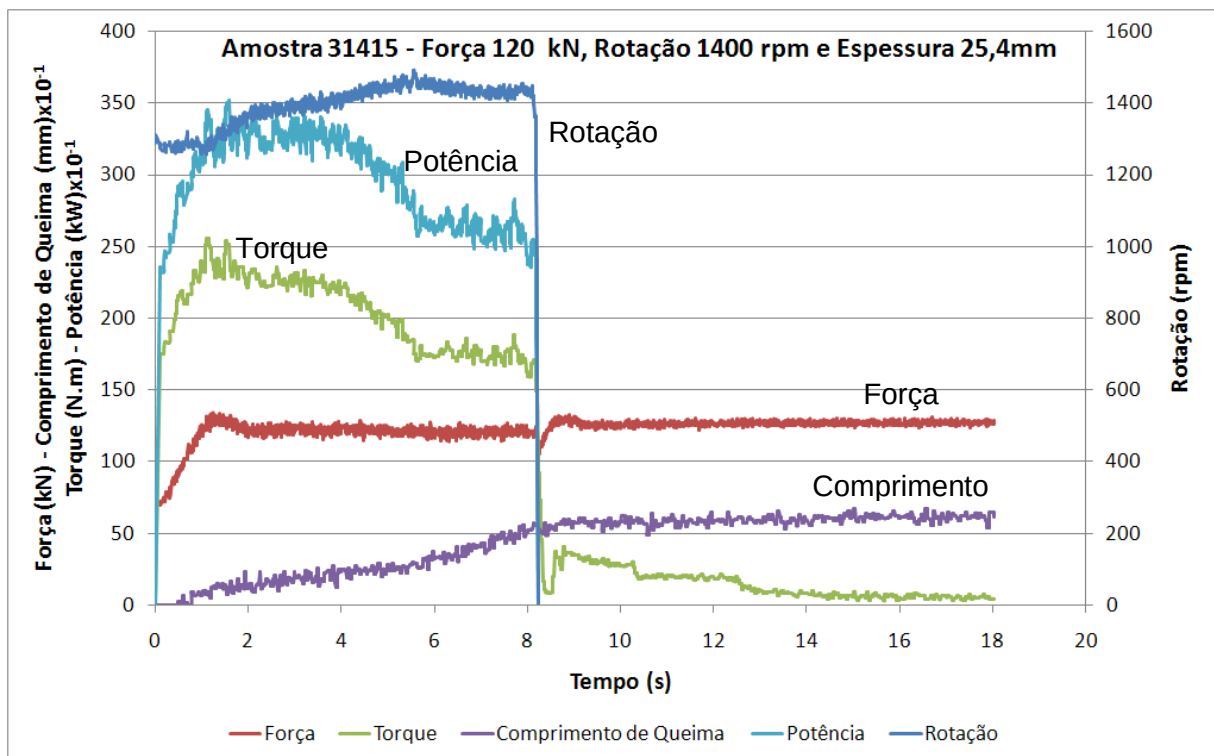


Figura 4.8 – Sinais adquiridos. Amostra 31415, 25,4 mm, 120 kN, 1400 rpm.

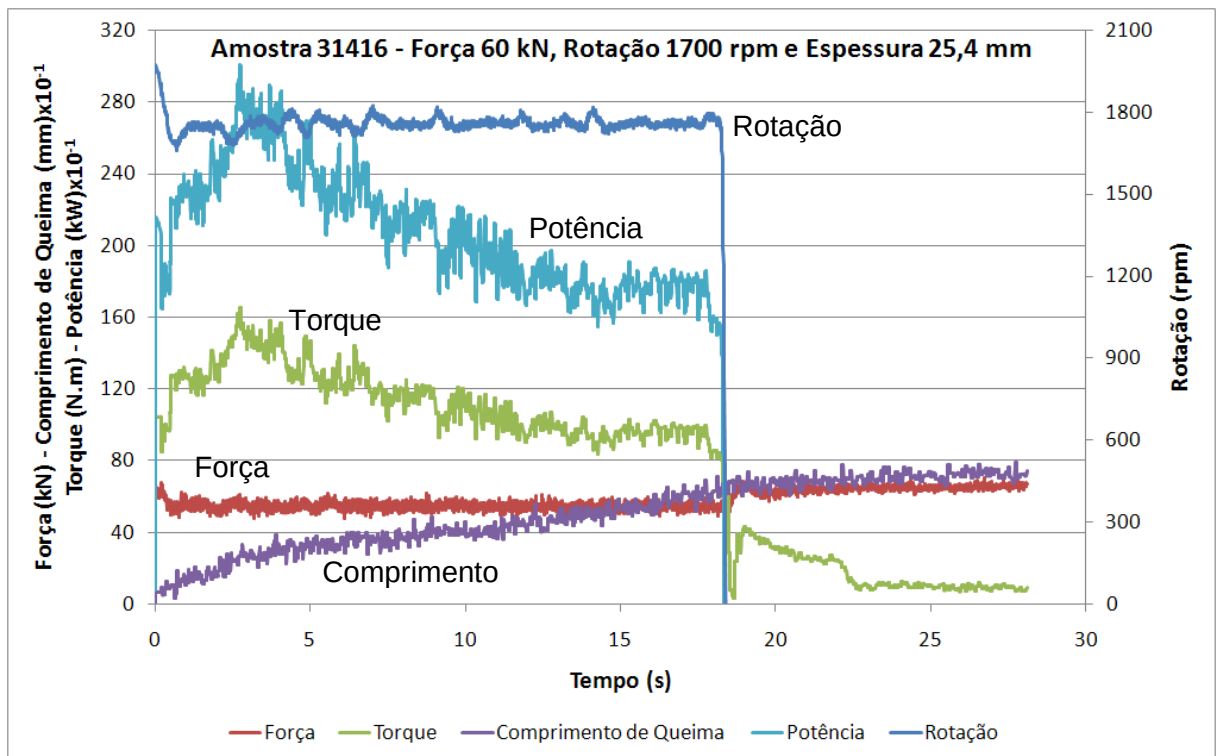


Figura 4.9 – Sinais adquiridos. Amostra 31416, 25,4 mm, 60 kN, 1700 rpm.

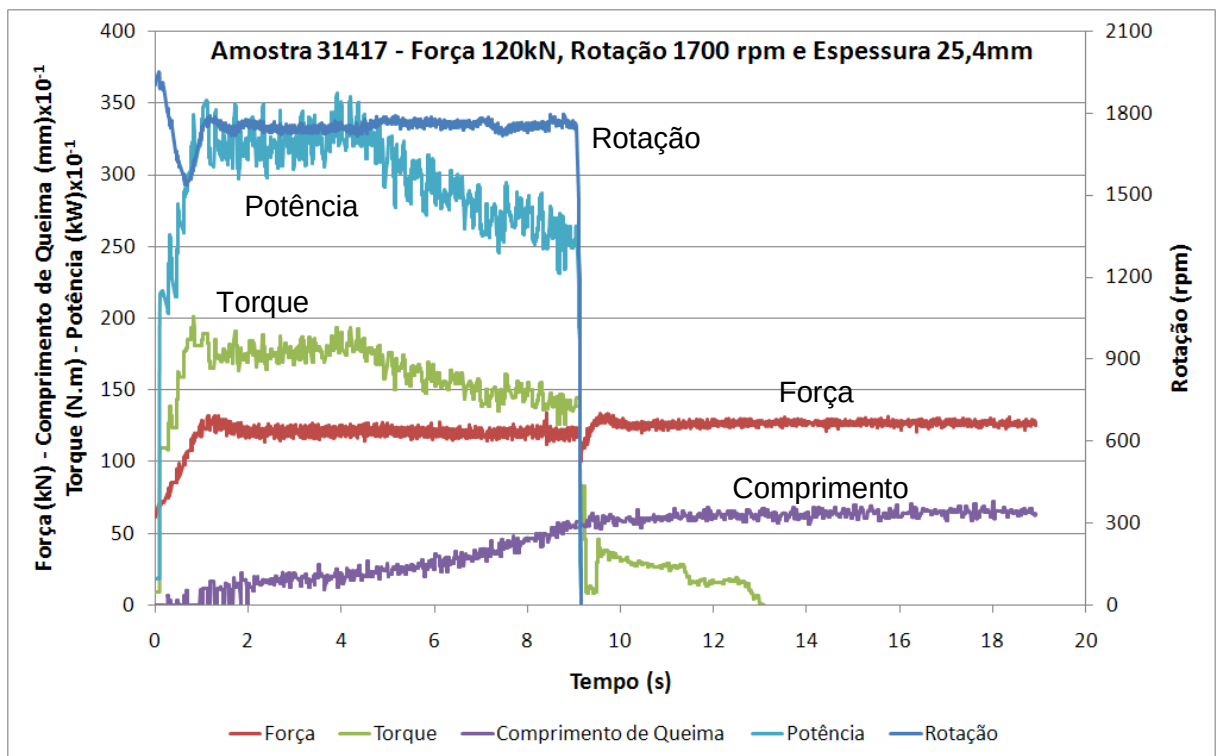


Figura 4.10 – Sinais adquiridos. Amostra 31417, 25,4 mm, 120 kN, 1700 rpm.

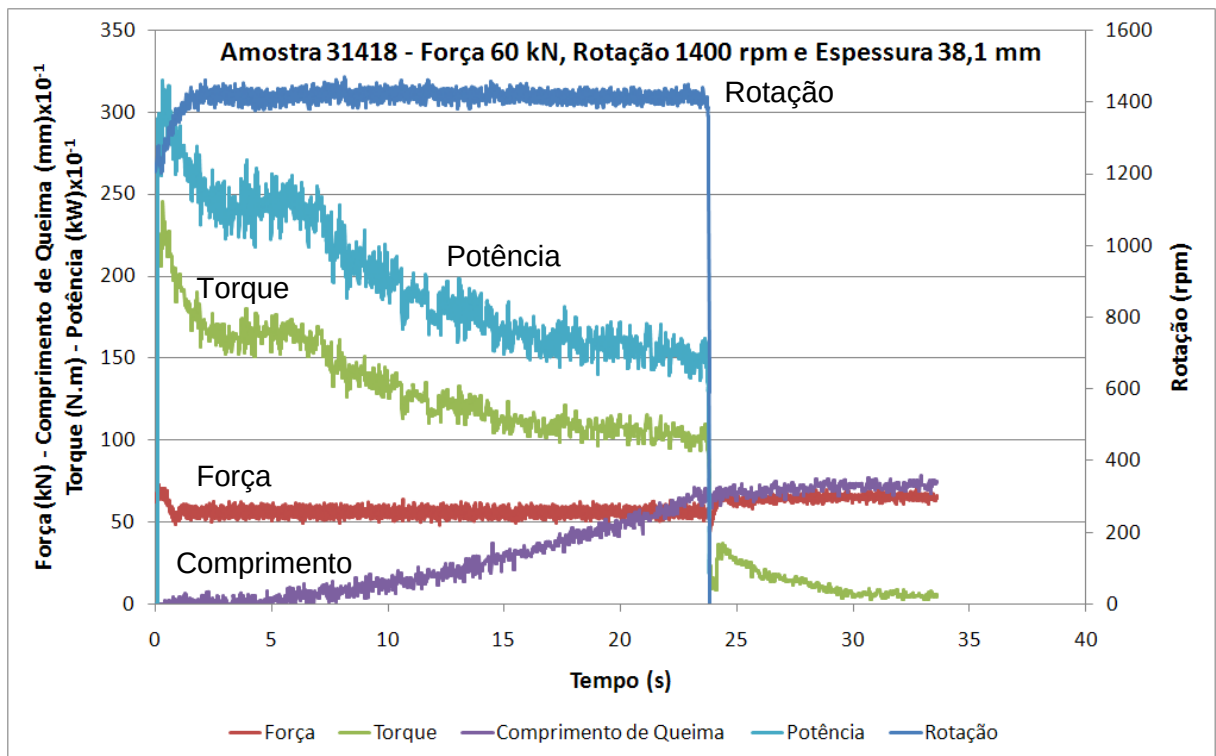


Figura 4.11– Sinais adquiridos. Amostra 31418, 38,1 mm, 60 kN, 1400 rpm.

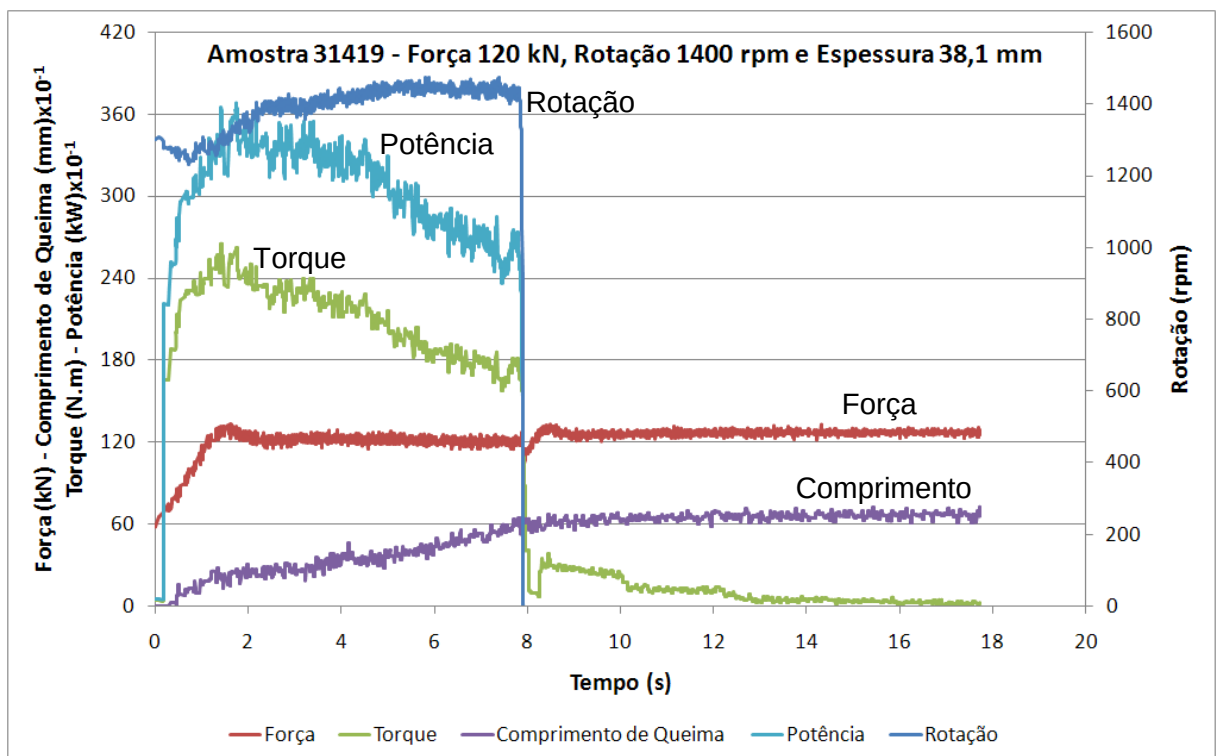


Figura 4.12 – Sinais adquiridos. Amostra 31419, 38,1mm, 120 kN, 1400 rpm.

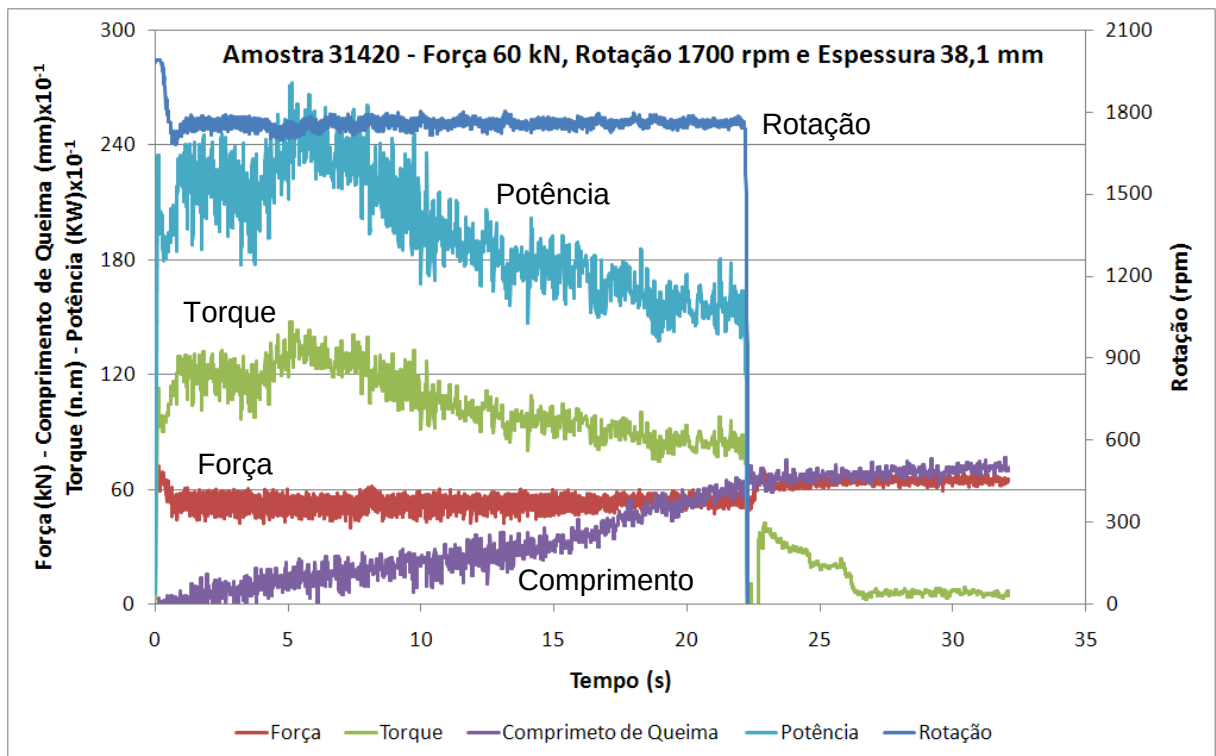


Figura 4.13 – Sinais adquiridos. Amostra 31420, 38,1 mm, 60 kN, 1700 rpm.

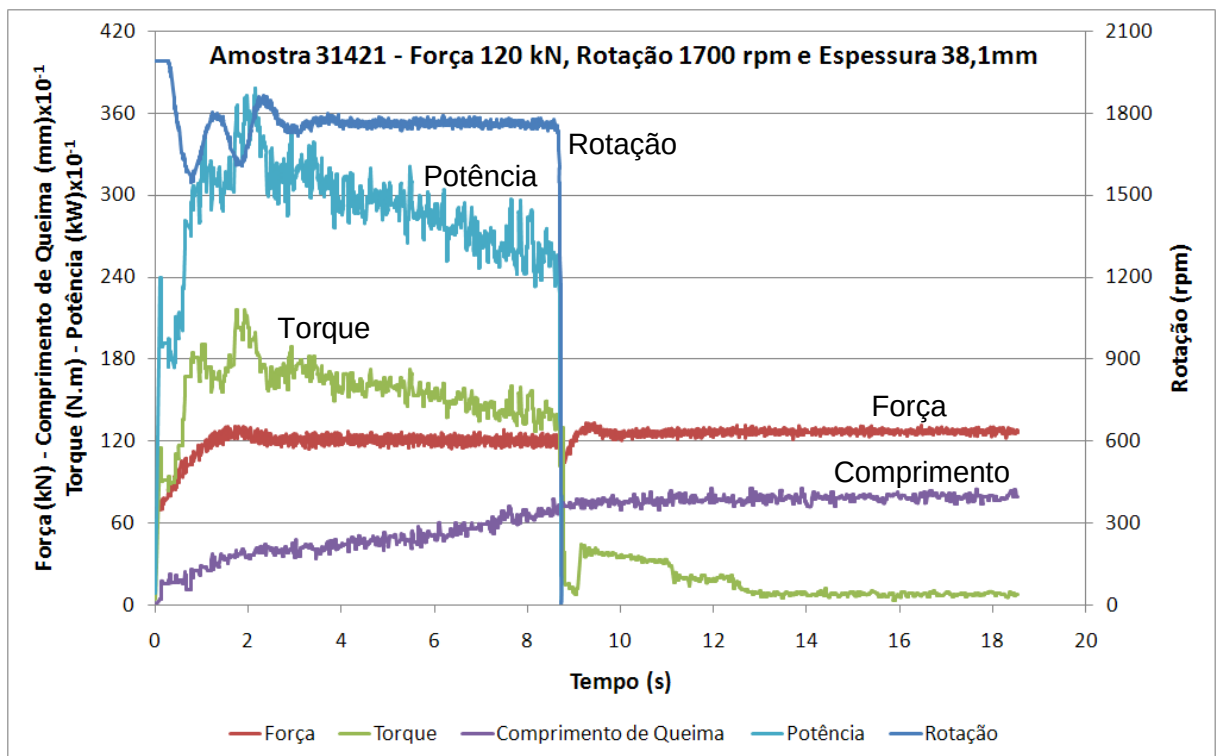


Figura 4.14 – Sinais adquiridos. Amostra 31421, 38,1 mm, 120 kN, 1700 rpm.

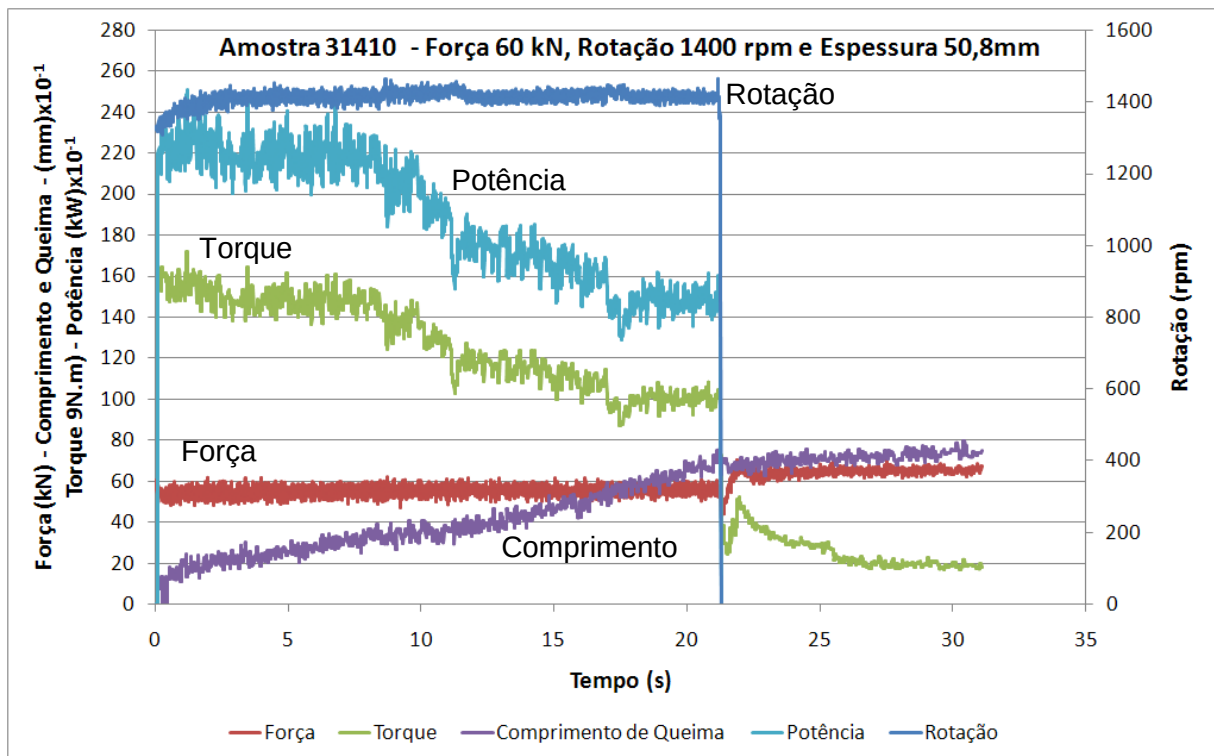


Figura 4.15 – Sinais adquiridos. Amostra 31410, 50,8 mm, 60 kN, 1400 rpm.

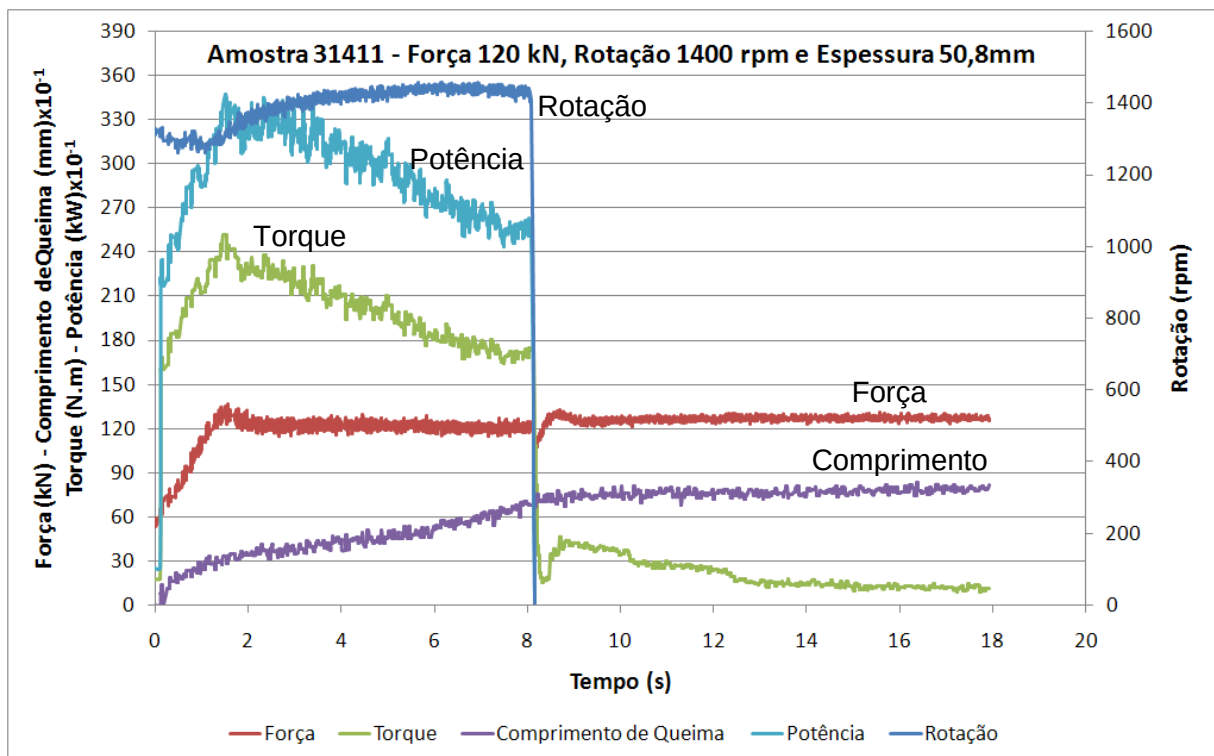


Figura 4.16 – Sinais adquiridos. Amostra 31411, 50,8 mm, 120 kN, 1400 rpm.

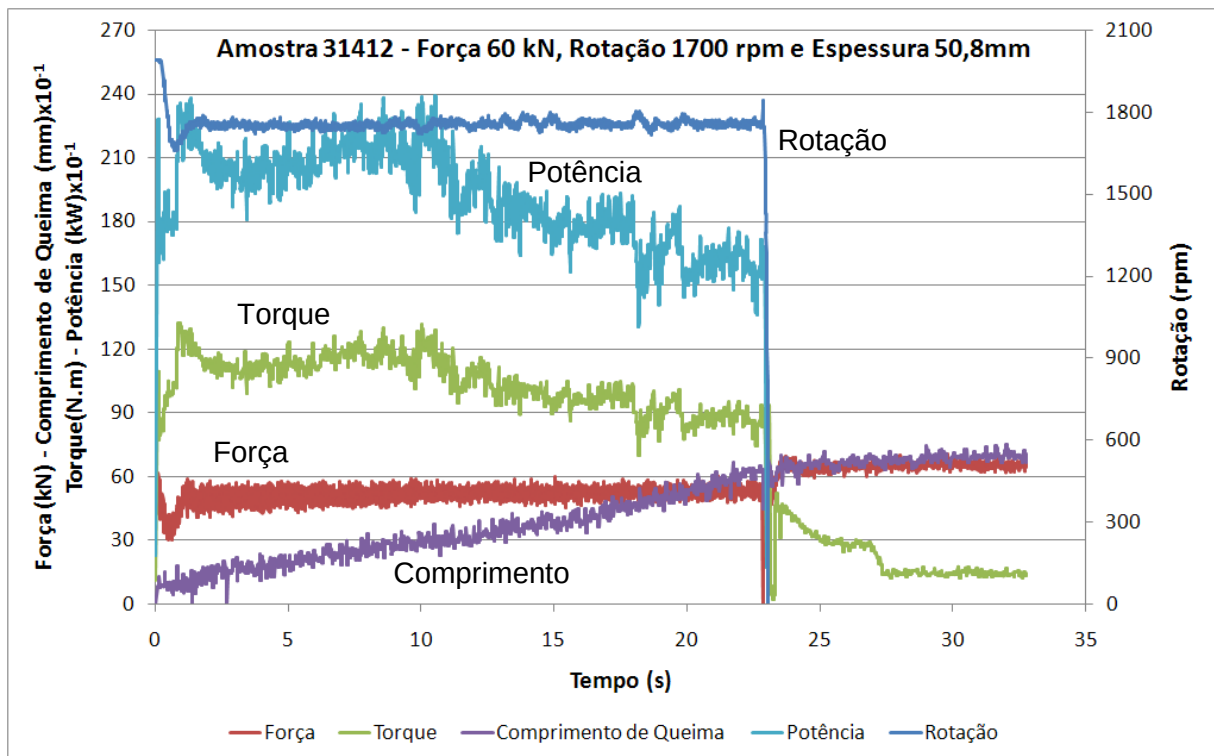


Figura 4.17 – Sinais adquiridos. Amostra 31412, 50,8 mm, 60 kN, 1700 rpm.

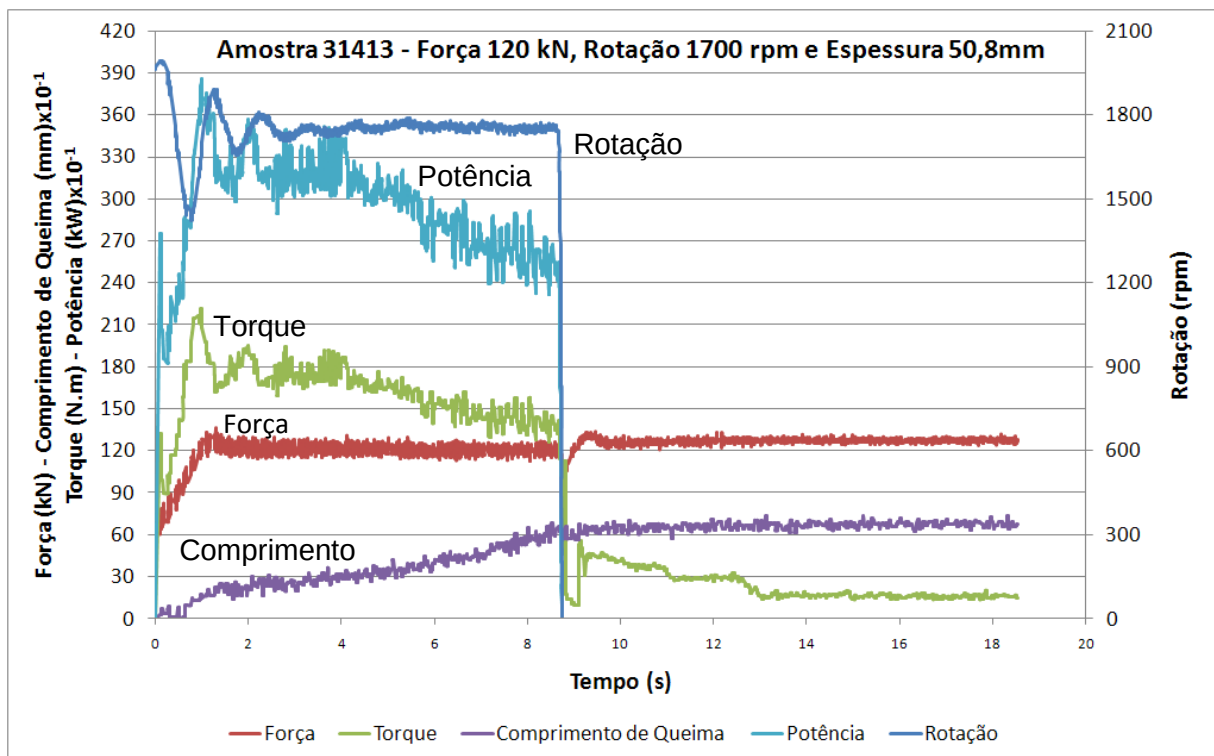


Figura 4.18 – Sinais adquiridos. Amostra 31413, 50,8 mm, 120 kN, 1700 rpm.

O parâmetro que mais influencia no processamento de pinos por atrito é a força aplicada. Com o aumento da força, o torque aumenta e a potência também aumenta, a velocidade de queima aumenta e o material é consumido mais rapidamente, com isso o tempo de soldagem diminui (Figuras 4.7 a 4.18). Com a diminuição da força ocorre o contrário com esses parâmetros.

A velocidade de rotação é um parâmetro que não influencia tanto quanto a força, mas analisando os gráficos, Figuras 4.7 a 4.18, observa-se que com o aumento da rotação o torque diminui (LEBEDEV e CHERNENKO, 1992). Como exemplo pode-se citar os gráficos dos ensaios 1 e 3 (Figuras 4.15 e 4.17). Ambos com mesma força (60 kN) e mesma espessura (50,8 mm), mas com rotações diferentes, 1400 rpm e 1700 rpm, respectivamente cada um. Observa-se que com rotação de 1400 rpm, o torque é aproximadamente de 160 N.m e para rotação de 1700 rpm o torque fica próximo de 120 kN.m.

O comprimento de queima é um parâmetro pré-estabelecido do processo, então não muda, mas como foi dito, a velocidade de queima aumenta com o aumento da força aplicada, fazendo com o processamento seja mais rápido.

A potência está associada ao torque, quanto maior o torque, maior a potência.

Nota-se também em todos os gráficos, que mesmo após a interrupção da rotação, ainda são registrados pequenos valores do torque. Esses valores são devidos à pressão hidráulica ainda existente no sistema, que gera esses valores de torque.

4.2.1 – Tempo de Processamento

Analisando os ensaios realizados pode-se ainda observar que com o aumento da força axial o tempo de processamento diminuiu. Com a força aplicada de 60 kN o tempo de processamento é em torno de 23 segundos, aumentando-se essa força para 120 kN, o tempo de processamento foi reduzido para um valor próximo de 9 segundos (Figura 4.19). Isso ocorre devido ao aumento do atrito entre as superfícies, quanto maior a força de contato entre dois corpos, maior a força de atrito, maior o aquecimento e menor o tempo de soldagem entre estas superfícies (MEYER, 2003).

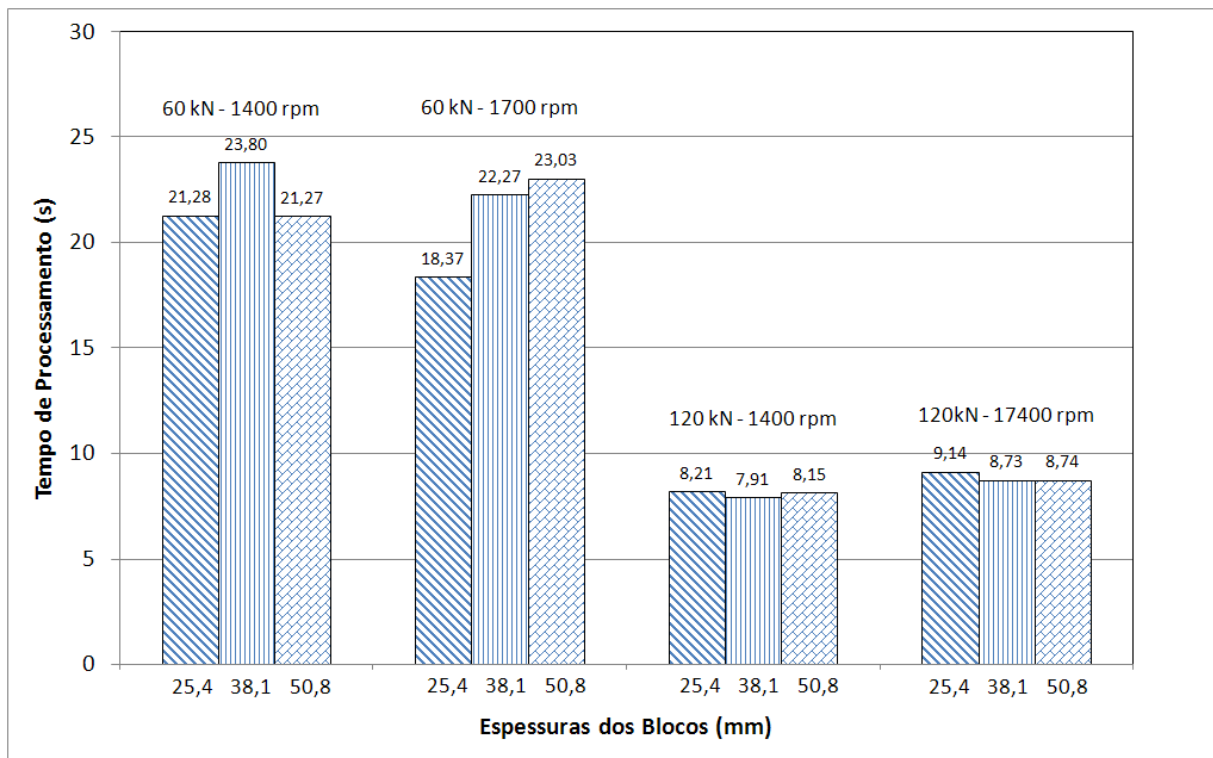


Figura 4.19 – Comparativo entre tempo de processamento e os blocos utilizados em cada ensaio com seus respectivos parâmetros de processamento (força e rotação).

4.2.2 – Energia de Processamento

Com o objetivo de se conhecer a energia aportada durante os ensaios de processamento de pinos por atrito, foi necessário calcular a área abaixo da curva de potência, sendo esta área a própria energia aportada nos ensaios. Foi utilizada nesse caso, uma das fórmulas da “Regra do Trapézio” (Franco, 2006), que é mostrado na Eq. (4.1):

$$A = \int_a^b f(x).dx \quad (4.1)$$

Onde a , b são finitos e $f(x)$ é uma função contínua em $[a, b]$.

Transformando a integral em um somatório e adotando $dx = dt$, Eq. (4.2), tem-se:

$$A = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{[y(i) + y(i+1)]}{2} \cdot [t(i+1) - t(i)] \quad (4.2)$$

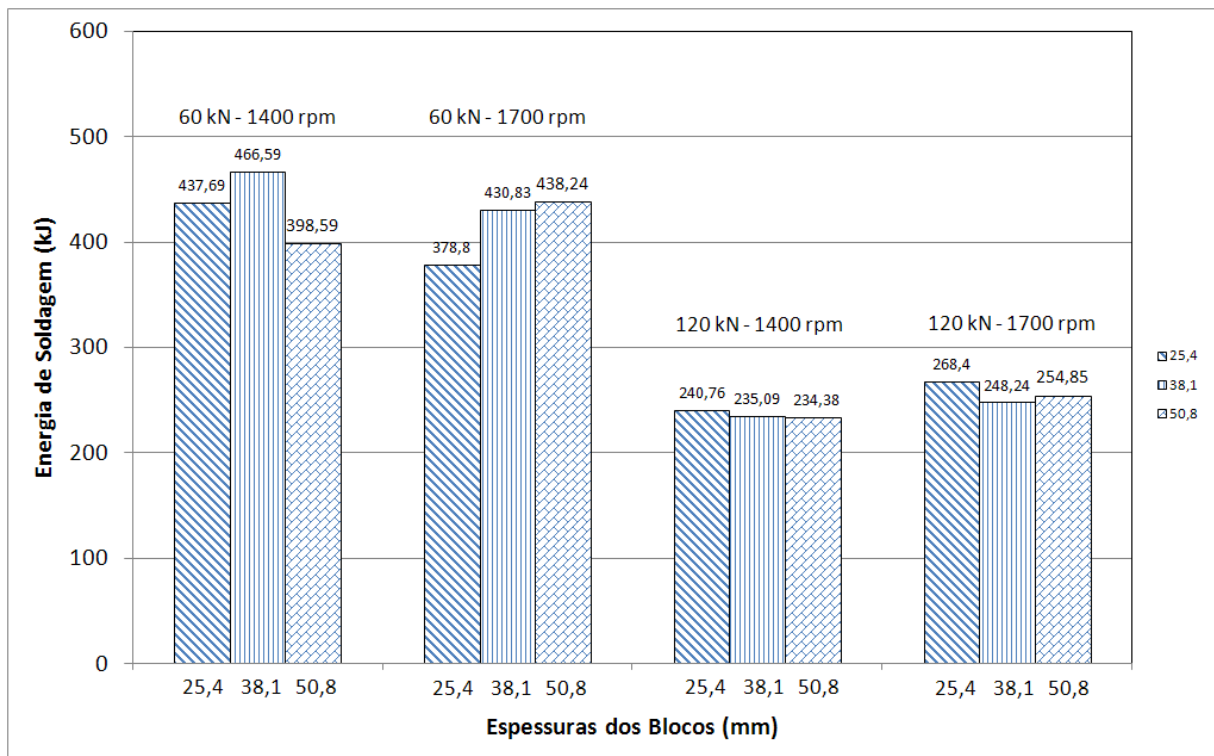


Figura 4.20 – Comparativo entre energia de soldagem e blocos utilizados em cada ensaio com seus respectivos parâmetros de processamento (força e rotação).

Como se pode observar, a energia de soldagem é diretamente proporcional ao tempo de processamento, que por sua vez está ligado à força aplicada, ou seja, quanto maior a força aplicada menor o tempo de processamento e consequentemente menor a energia necessária para a realização do processo de soldagem.

4.3 – Gráficos de Temperatura

Nos gráficos abaixo, Figuras 4.21 a 4.32, observam-se as variações da temperatura durante o processamento de pinos por atrito. Nos quatro locais onde se inseriu os termopares (T0, T1, T2 e T3), Figuras 3.7 e 3.14, foram obtidos os respectivos sinais onde se identificou as temperaturas correspondentes. Através dos gráficos pode-se verificar as temperaturas durante o aquecimento e o resfriamento do bloco.

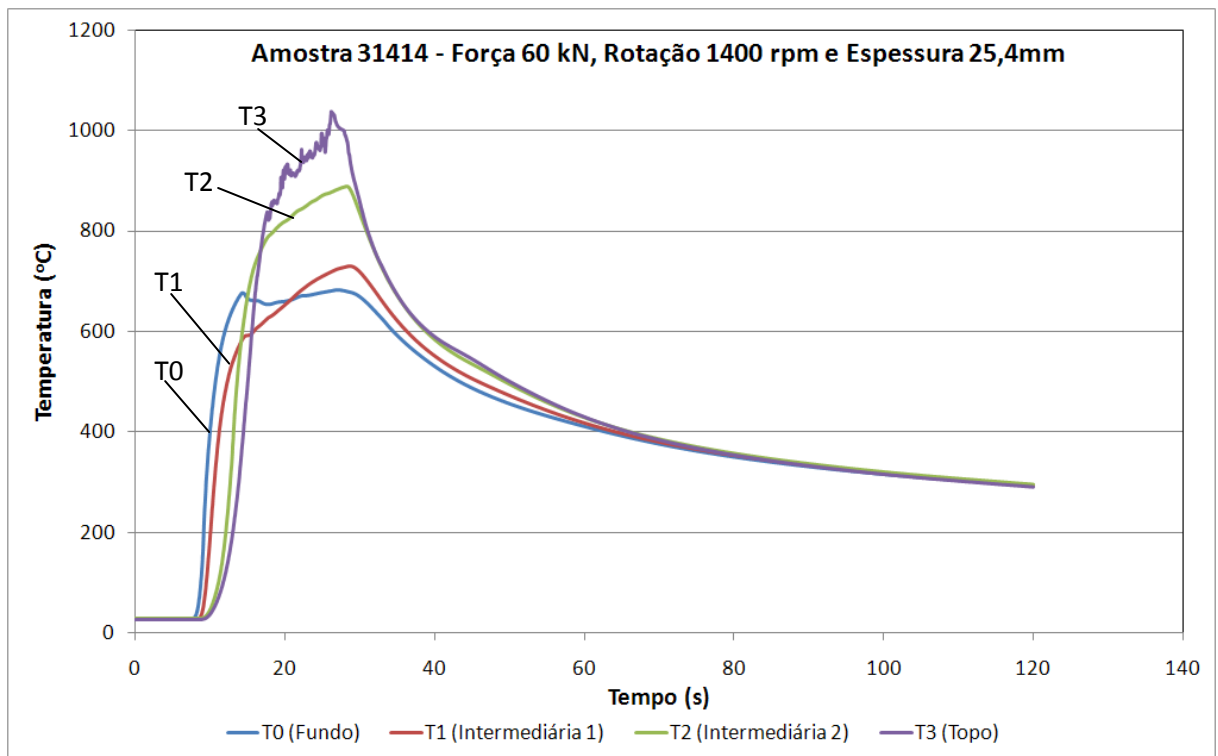


Figura 4.21 – Medição de temperatura. Amostra 31414, 25,4 mm, 60 kN, 1400 rpm.

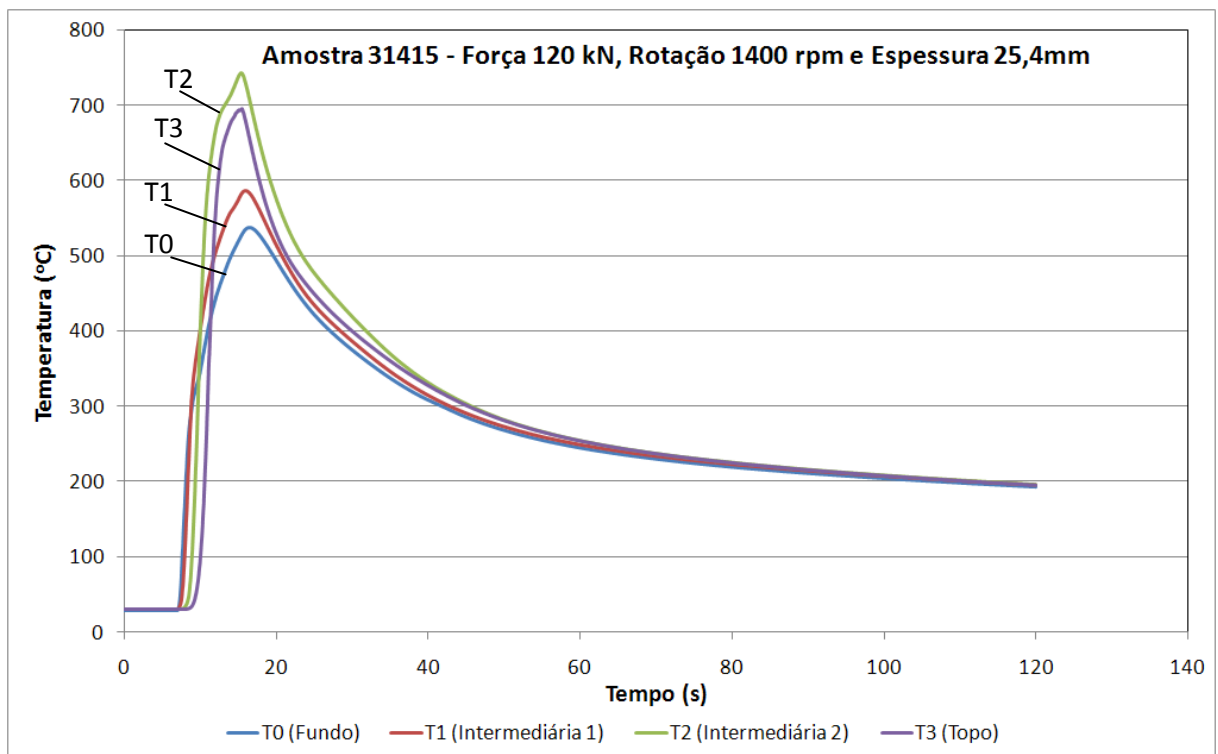


Figura 4.22 – Medição de temperatura. Amostra 31415, 25,4mm, 120 kN, 1400 rpm.

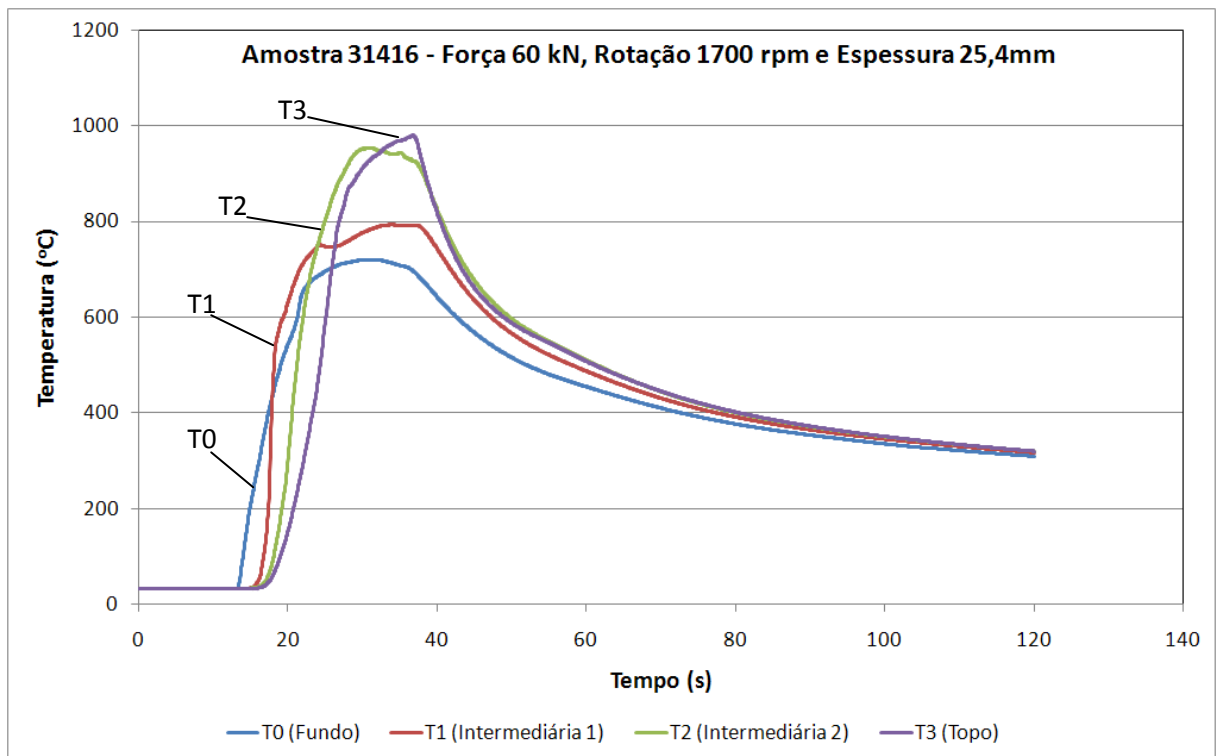


Figura 4.23 – Medição de temperatura. Amostra 31416, 25,4 mm, 60 kN, 1700 rpm.

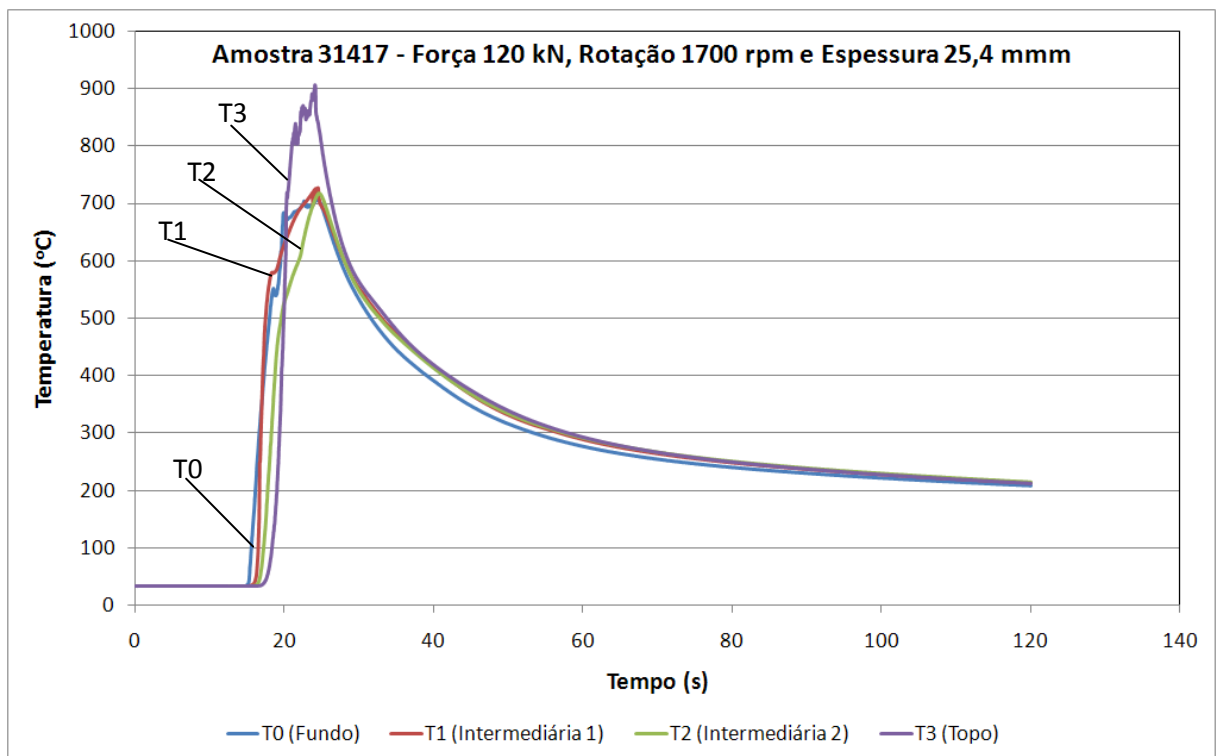


Figura 4.24 – Medição de temperatura. Amostra 31417, 25,4mm, 120 kN, 1700 rpm.

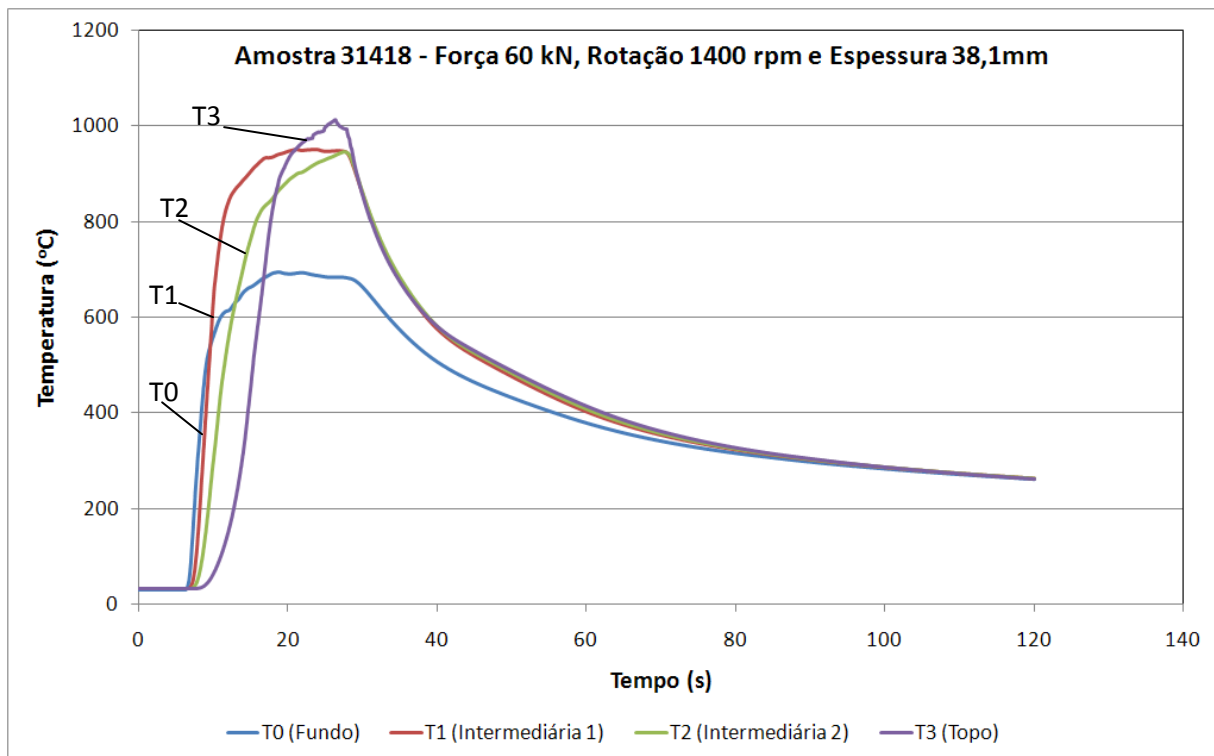


Figura 4.25 – Medição de temperatura. Amostra 31418, 38,1 mm, 60 kN, 1400 rpm.

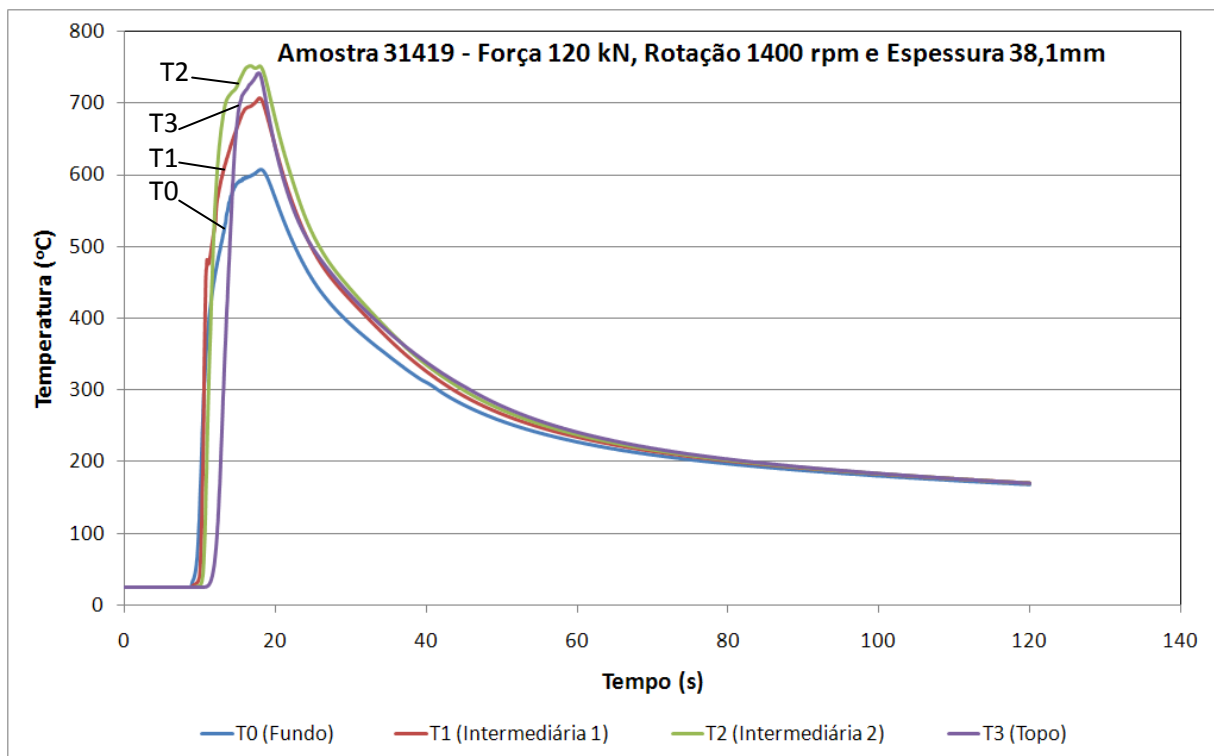


Figura 4.26 – Medição de temperatura. Amostra 31419, 38,1mm, 120 kN, 1400 rpm.

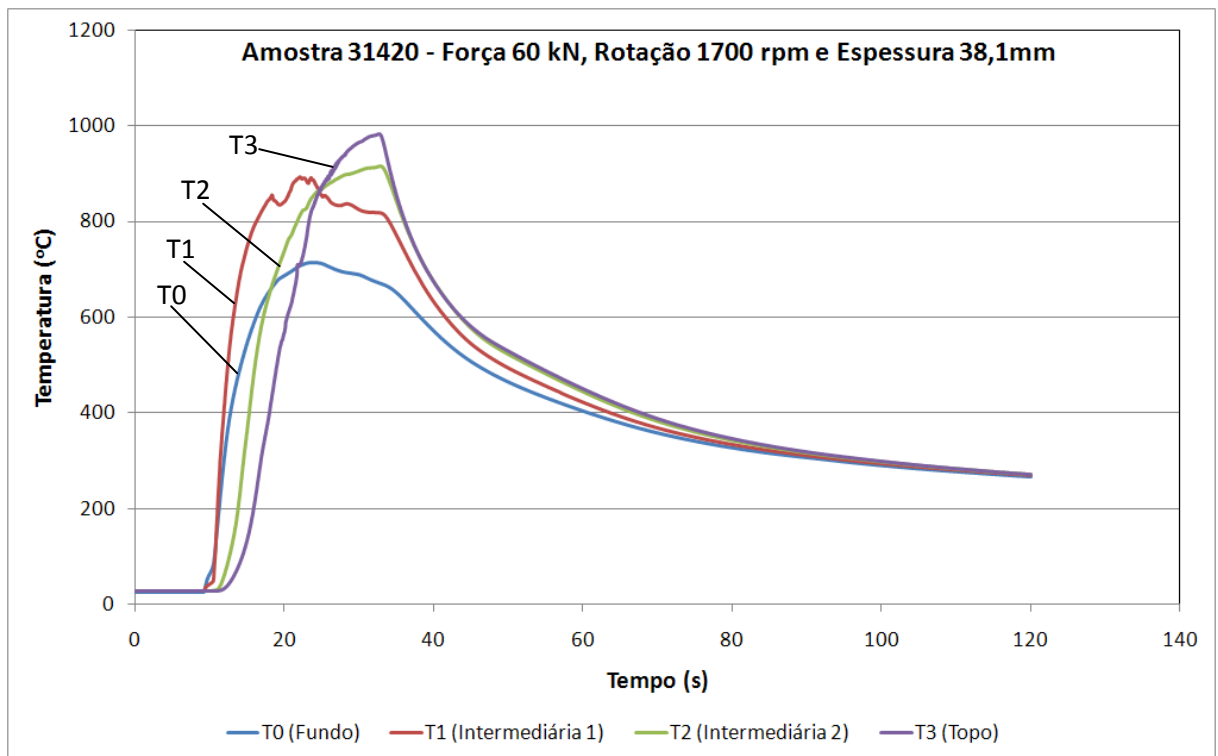


Figura 4.27 – Medição de temperatura. Amostra 31420, 38,1 mm, 60 kN, 1700 rpm.

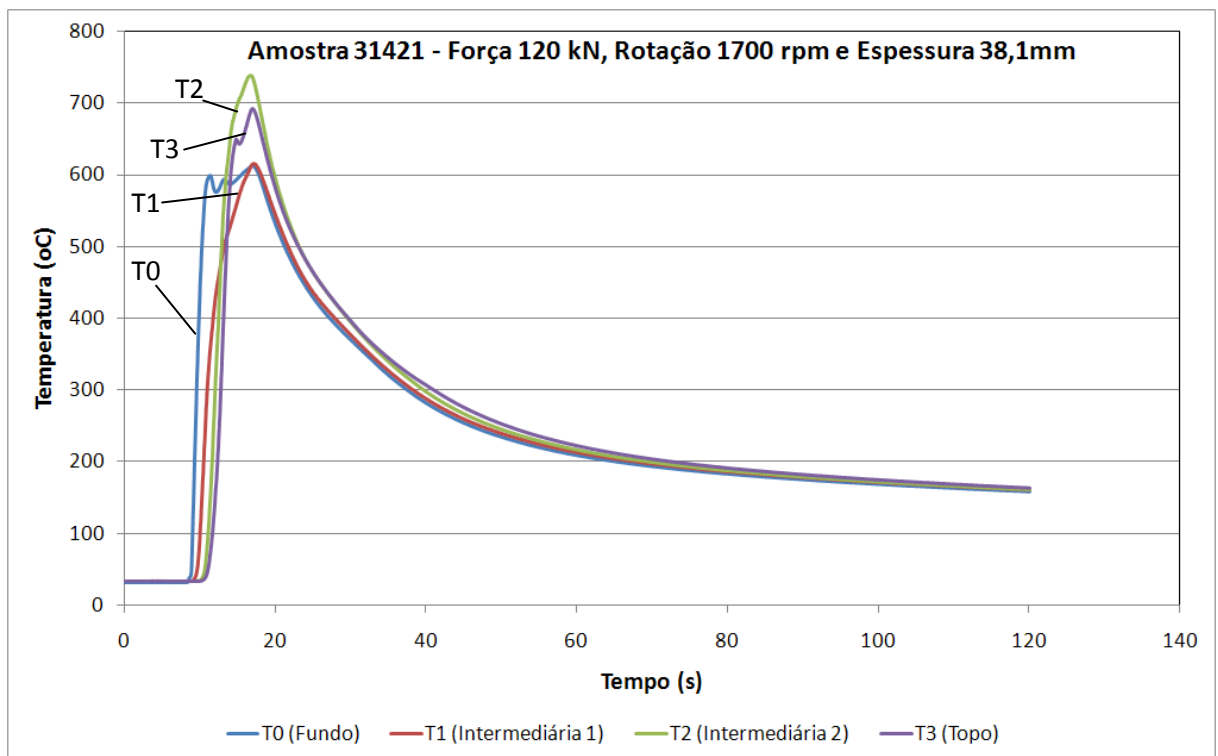


Figura 4.28 – Medição de temperatura. Amostra 31421, 38,1mm, 120 kN, 1700 rpm.

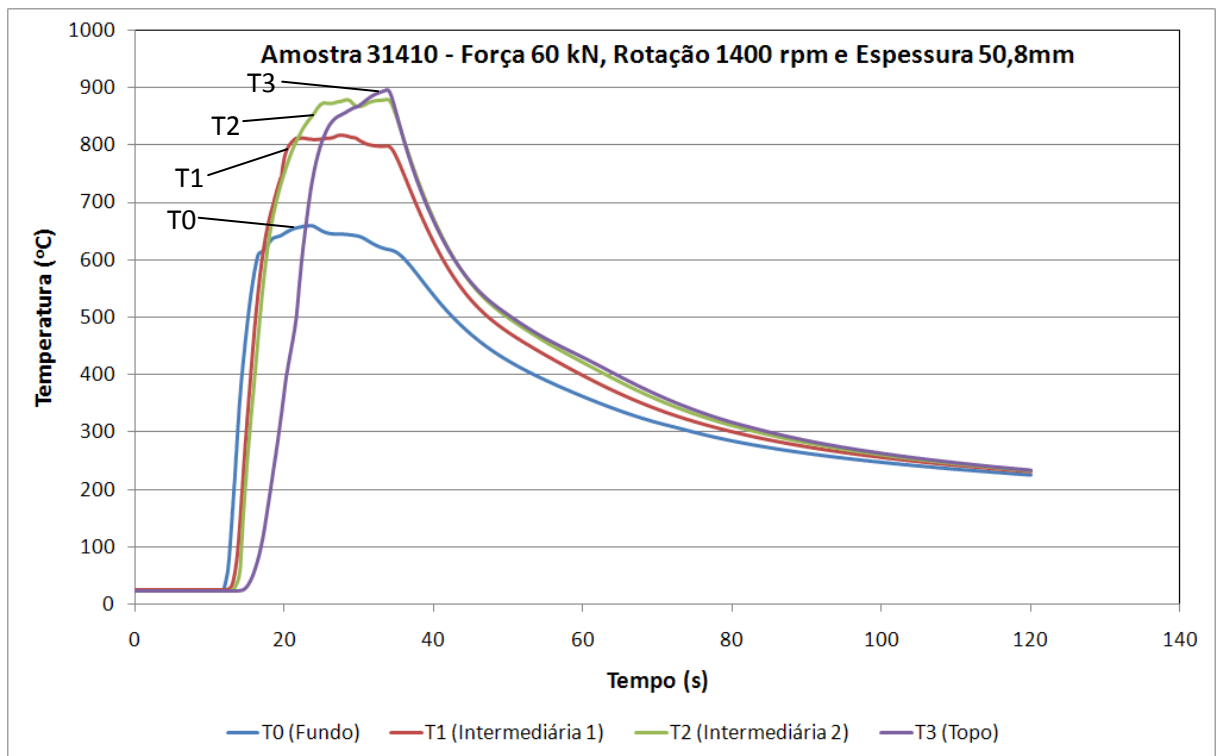


Figura 4.29 – Medição de temperatura. Amostra 31410, 50,8 mm, 60 kN, 1400 rpm.

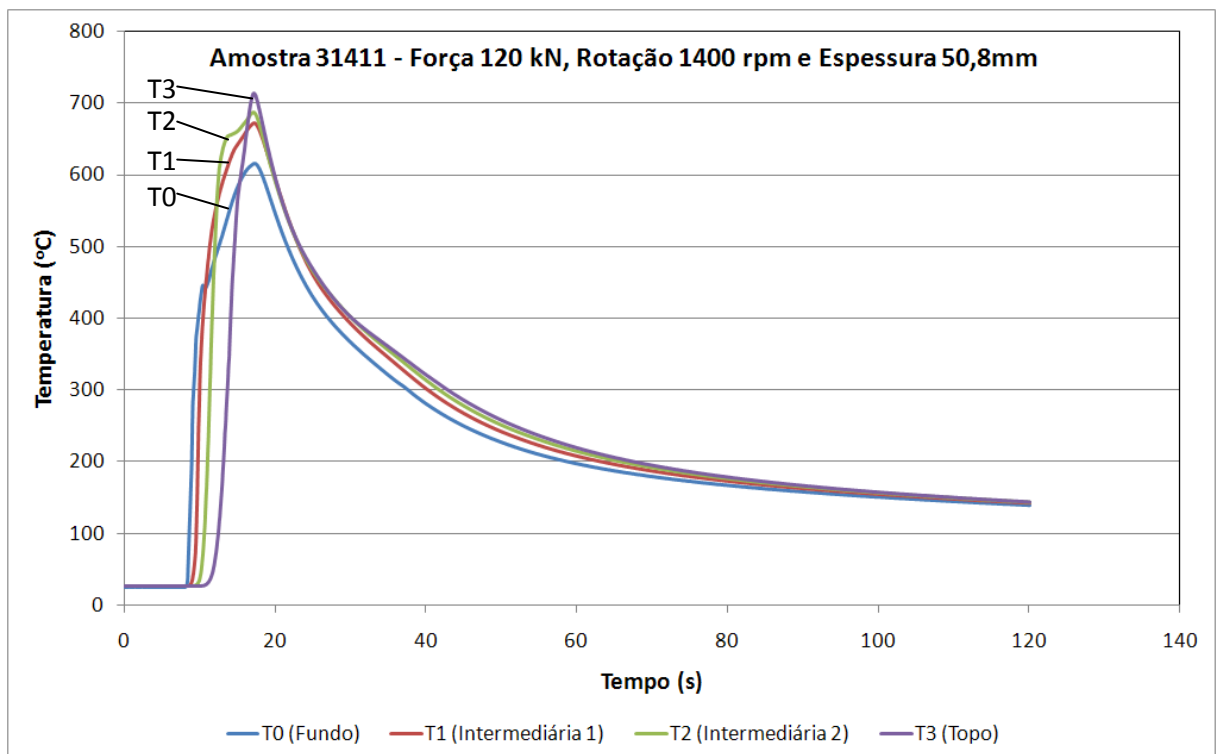


Figura 4.30 – Medição de temperatura. Amostra 31411, 50,8mm, 120 kN, 1400 rpm.

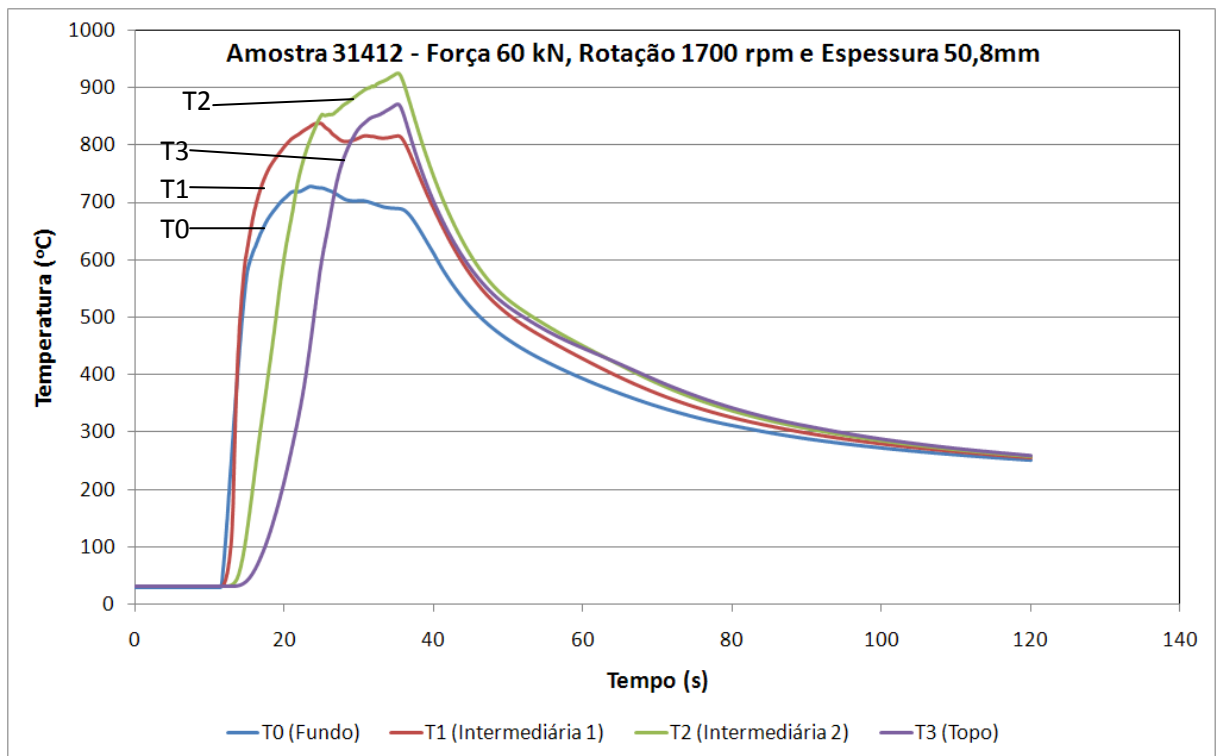


Figura 4.31 – Medição de temperatura. Amostra 31412, 50,8 mm, 60 kN, 1700 rpm.

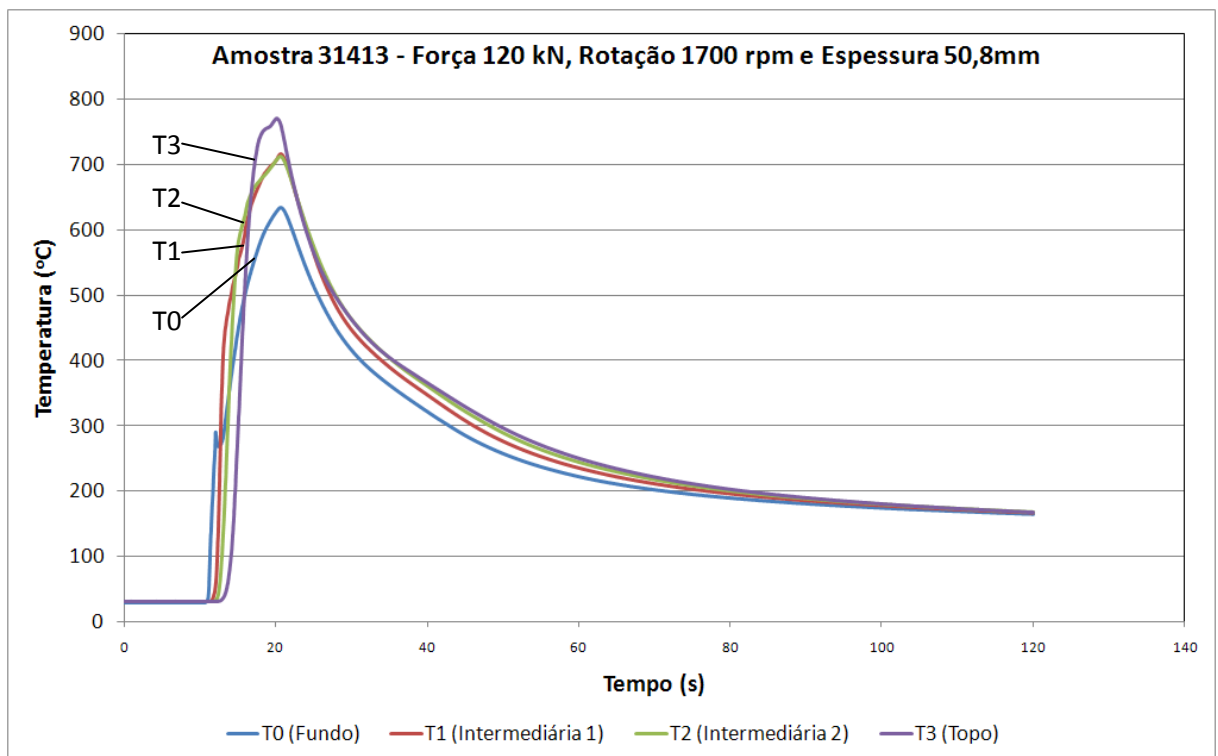


Figura 4.32 – Medição de temperatura. Amostra 31413, 50,8mm, 120 kN, 1700 rpm.

O atrito gerado pelo contato das superfícies do pino e do bloco produz calor. Esse aquecimento ocasiona a soldagem das superfícies em contato e se propaga pelos próprios componentes soldados.

Analisando os gráficos, observou-se que a temperatura, na maioria dos casos, aumenta gradativamente, da posição T0 até a posição T3. A justificativa é que no início do processo de soldagem, o corpo de prova está na temperatura ambiente e sendo T0 o primeiro ponto a se aquecer, este não recebe calor vindo de outras partes do bloco. O que não ocorre nas outras posições onde T1 recebe calor vindo de T0, T2 recebe calor de T1 e a posição T3 recebe calor vindo de T2. E assim sucessivamente, as temperaturas obtidas mais distantes do fundo do furo deverão ser cada vez maiores. De forma geral, verifica-se então que $T3 > T2 > T1 > T0$.

Em alguns gráficos (Figuras 4.22, 4.26, 4.28 e 4.31), a temperatura T2 é maior do que a temperatura T3. Provavelmente, nesses locais, onde T3 foi menor, o termopar foi soldado antes da posição adequada dentro do furo de diâmetro de 2,38 mm (furo de inserção do termopar), ficando mais distante da interface e registrando uma temperatura menor. O fundo do furo para a posição T2 pode ter ficado mais próximo da interface que o da posição T3, ocasionando também uma leitura de temperatura um pouco mais baixa para o termopar T3, por estar o termopar T3 mais distante do ponto de geração de calor, que é a interface entre pino e bloco. Outra possibilidade é o fato do termopar T3 ter se desprendido durante o processo de soldagem e registrado uma temperatura menor, isso por causa da vibração da máquina ou por deformação plástica do material durante o processamento do pino.

Como foi mostrado nas Figuras 4.19 e 4.20, o tempo de processamento e a energia de soldagem são inversamente proporcionais à força aplicada. Na Figura 4.33, foi feita uma comparação entre as temperaturas máximas atingidas em cada ensaio. Verifica-se que com forças maiores tem-se um aquecimento menor do corpo de prova. Isso pode ser explicado pelo fato do termopar estar aproximadamente a 1 mm da interface entre pino e bloco e essa pequena espessura funciona como uma barreira para a propagação do calor. Com um maior tempo de processamento, menor será o efeito dessa barreira na medição da temperatura da interface pino/bloco. É o caso dos ensaios com tempos de processamento maiores e forças aplicadas menores. Para os ensaios com menores tempos de processamento ou

com maiores forças aplicadas, o efeito de isolamento da barreira de 1 mm é mais elevado, portando, nesses casos, as temperaturas registradas pelos termopares são menores.

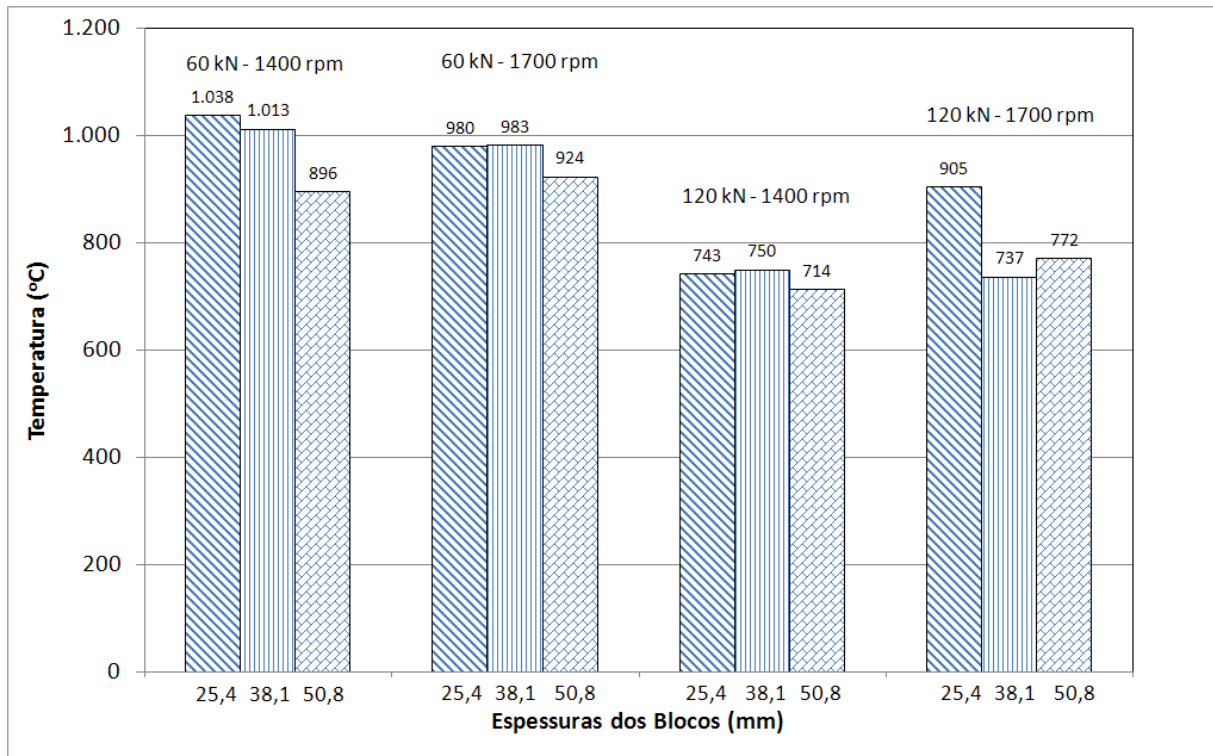


Figura 4.33 – Comparativo entre temperaturas máximas (termopar T3) de cada ensaio, registradas a aproximadamente 1mm da interface entre pino e bloco.

Nos gráficos a seguir (Figuras 4.34 a 4.37), foram feitas a comparações entre as temperaturas T0 (temperatura do fundo do furo) dos blocos utilizados nos ensaios. Para essa análise, em cada gráfico, foram utilizadas a mesma força, a mesma rotação e três espessuras de blocos (25,4 mm, 38,1 mm e 50,8 mm). Verificou-se que na maioria dos casos (Figuras 4.34, 4.35 e 4.36), no bloco com maior espessura (50,8 mm), teve-se a menor temperatura registrada no final do ensaio. Isso se deve ao fato do bloco de 50,8 mm de espessura ter maior volume de material, o que predomina numa maior transmissão de calor pelo modo de condução (KREITH, 1965). Tendo-se então velocidades de resfriamento maiores, o que determinaria nas microestruturas finais e as suas respectivas durezas.

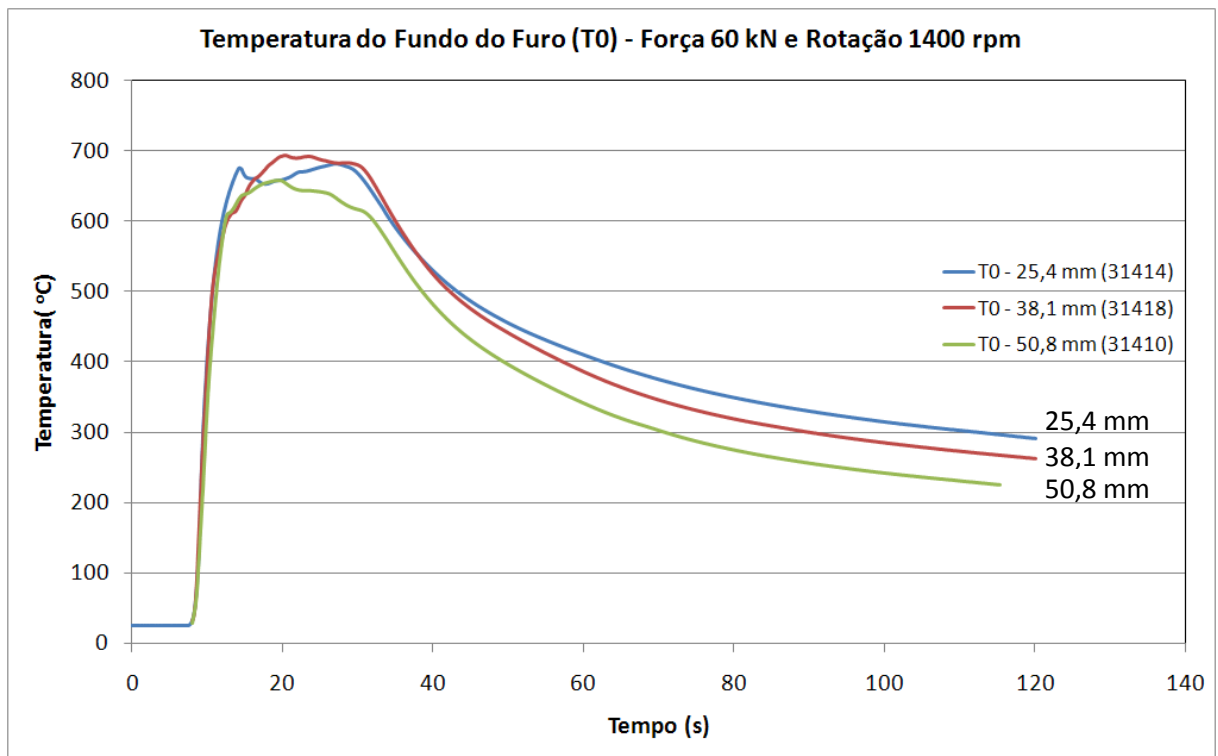


Figura 4.34 – Comparativo entre temperaturas T0. Força 60 kN, Rotação 1400 rpm. Amostras 31414, 25,4 mm; 31418, 38,1mm e 31410, 50,8 mm.

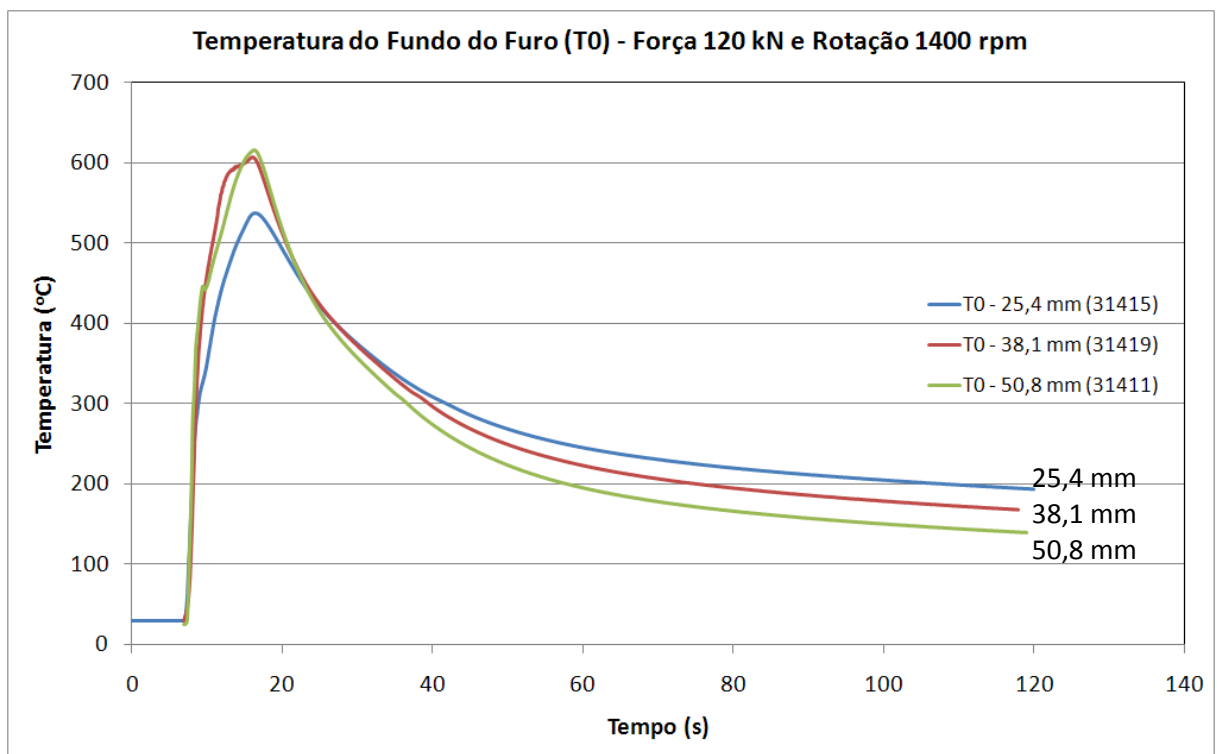


Figura 4.35 – Comparativo entre temperaturas T0. Força 120 kN, Rotação 1700 rpm. Amostras 31415, 25,4 mm; 31419, 38,1 mm e 31411, 50,8 mm.

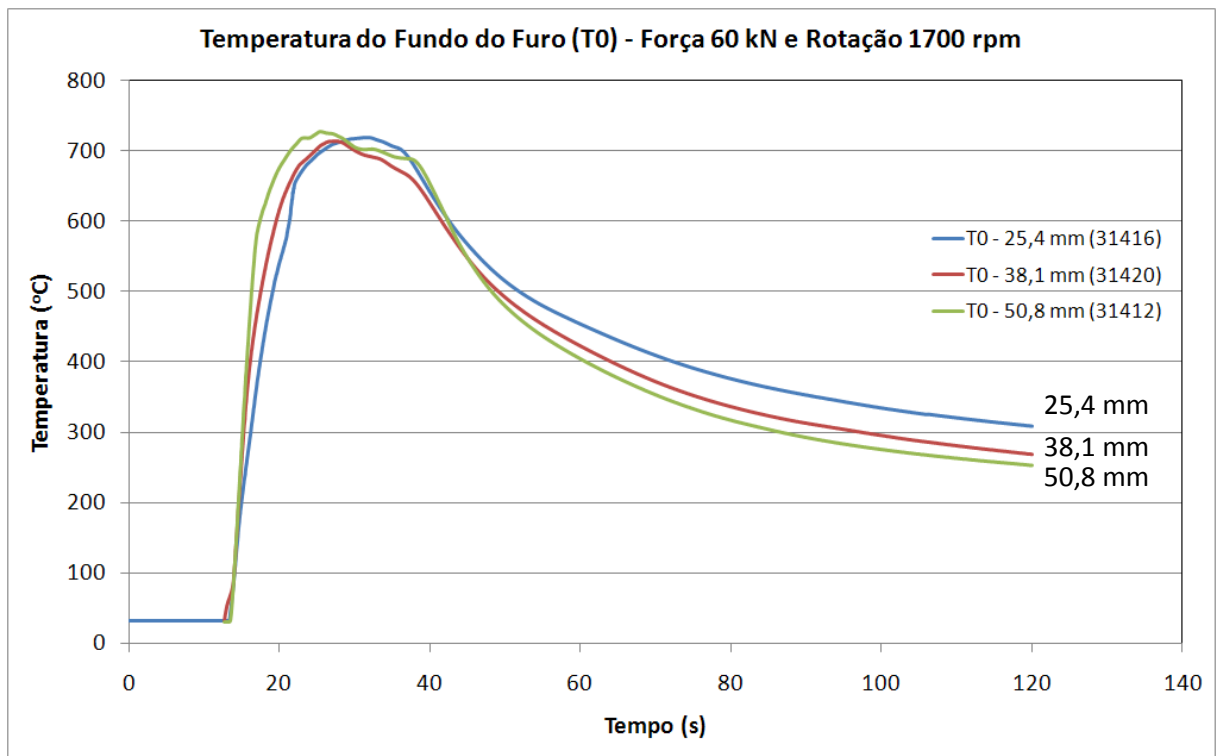


Figura 4.36 – Comparativo entre temperaturas T0. Força 60 kN, Rotação 1700 rpm. Amostras 31416, 25,4 mm; 31420, 38,1 mm e 31412, 50,8 mm.

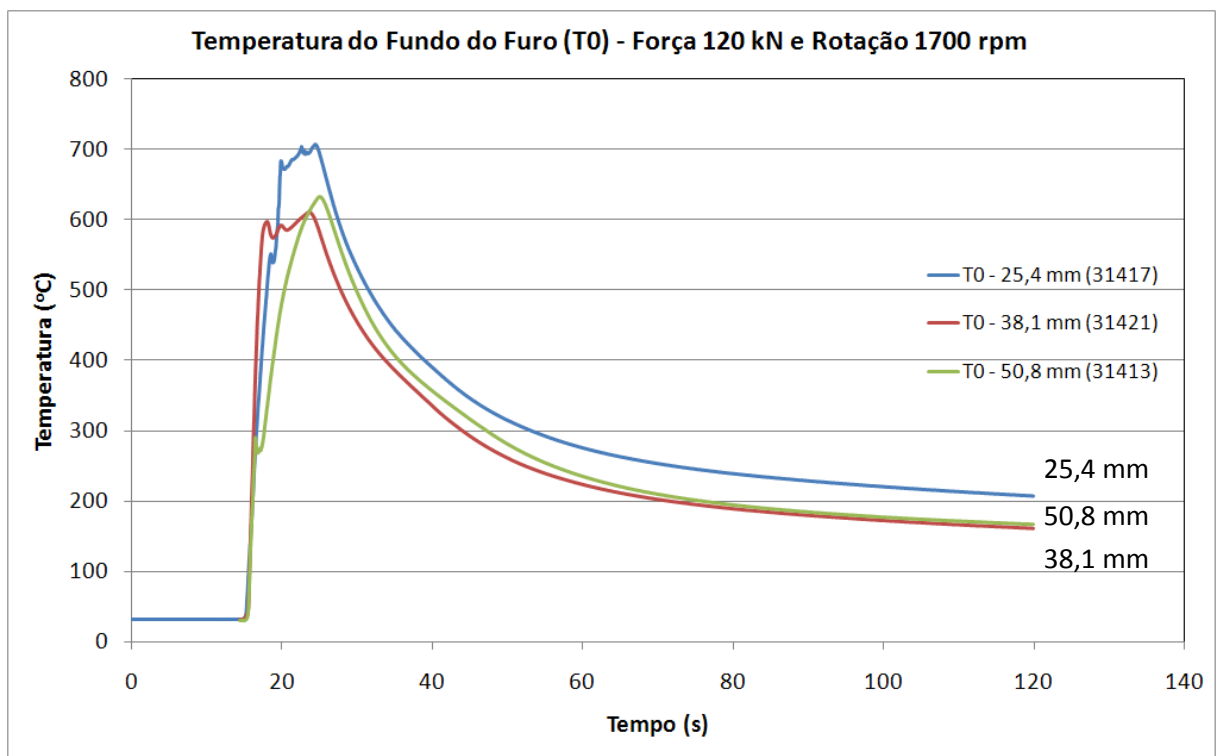


Figura 4.37 – Comparativo entre temperaturas T0. Força 120 kN, Rotação 1700 rpm. Amostras 31417, 25,4 mm; 31421, 38,1 mm e 31413, 50,8 mm.

4.3 – Macrografia

As figuras 4.38 a 4.43 mostram as macrografias obtidas ao longo da seção transversal dos corpos de prova processados. Nessas macrografias pode-se observar a união entre os pinos e seus respectivos blocos e a formação de uma pequena ZTA.

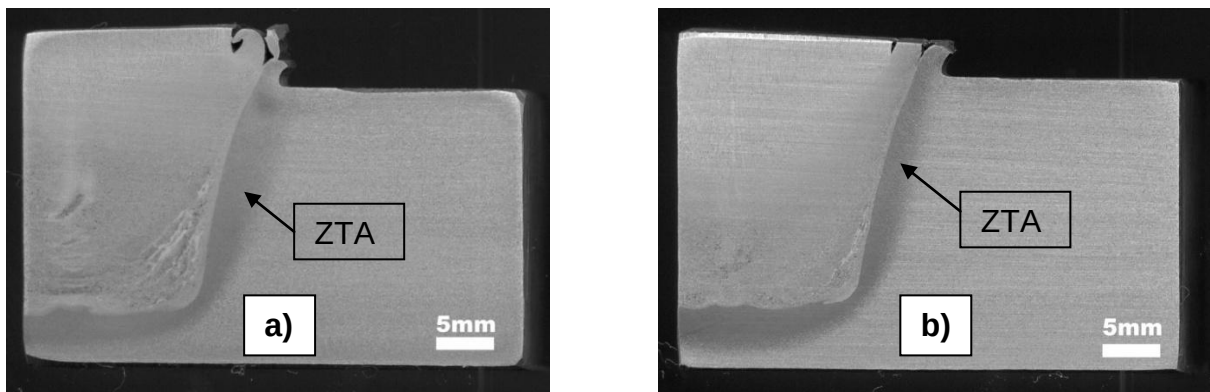


Figura 4.38 – Macrografias. a) Amostra 31414, 25,4 mm, 60 kN, 1400 rpm.

b) Amostra 31415, 25,4 mm, 120 kN, 1400 rpm.

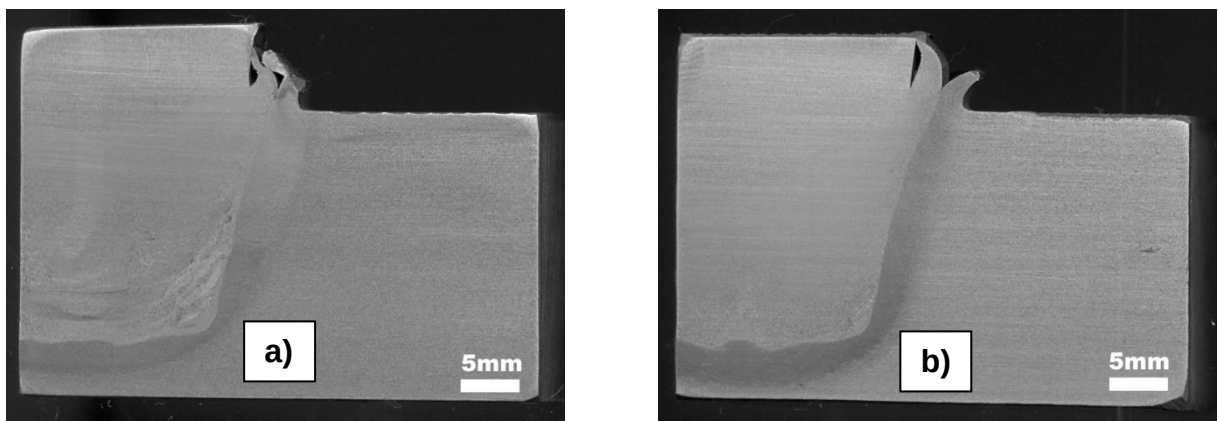


Figura 4.39 – Macrografias. a) Amostra 31416, 25,4 mm, 60 kN, 1700 rpm.

b) Amostra 31417, 25,4 mm, 120 kN, 1700 rpm.

Observa-se nas Figuras 4.38 e 4.39 uma ZTA maior nas amostras onde foram aplicadas forças de 60 kN. Isso porque como foi mostrado na Figura 4.19, para as forças aplicadas de 60 kN, o tempo de processamento é maior do que para as forças aplicadas de 120 kN, ocasionando um maior aquecimento e, conseqüentemente, uma maior ZTA. O gráfico da Figura 4.33 também confirma esta observação,

mostrando que forças menores geram temperaturas maiores e também uma ZTA maior.

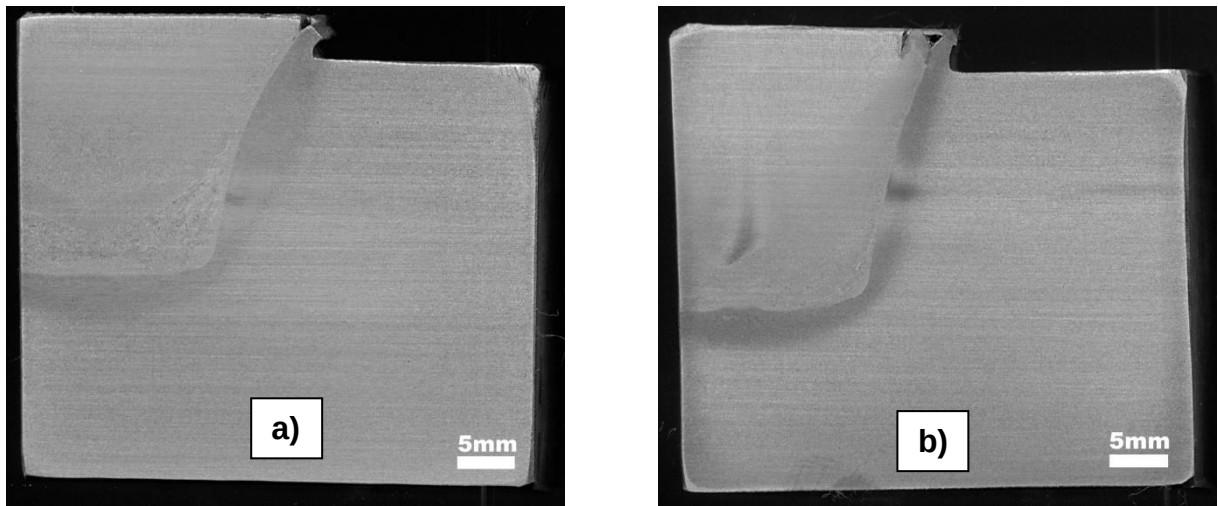


Figura 4.40 – Macrografias. a) Amostra 31418, 38,1 mm, 60 kN, 1400 rpm.
b) Amostra 31419, 38,1 mm, 120 kN, 1400 rpm.

Foram observadas algumas variações metalúrgicas nas macrografias (Figura 4.41), sendo estas, em maior quantidade nas amostras onde ocorreram temperaturas mais elevadas. De acordo com Pires (2007) essas modificações são linhas de cisalhamento constituídas de regiões com uma concentração de micro-vazios semelhantes a uma região fundida, sendo que esses micro-vazios foram formados pela presença de enxofre presente na composição química do pino (aço ABNT 1010). E ocorrem quando o material é submetido a temperaturas mais elevadas e sofre deformação plástica. Este enxofre pode combinar com o manganês, presente neste mesmo aço formando sulfeto de manganês. Sulfetos podem ter problemas com fragilização a quente, mas não é caso do sulfeto de manganês que tem um ponto de fusão próximo a 1600 °C.

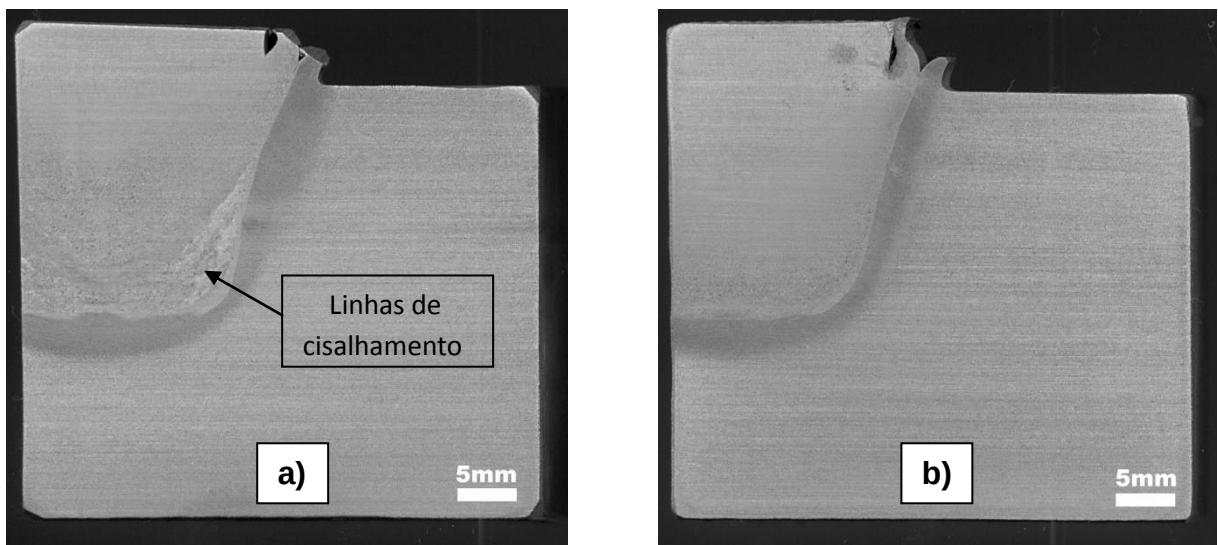


Figura 4.41 – Macrografias. a) Amostra 31420, 38,1 mm, 60 kN, 1700 rpm.
b) Amostra 31421, 38,1 mm, 120 kN, 1700 rpm.

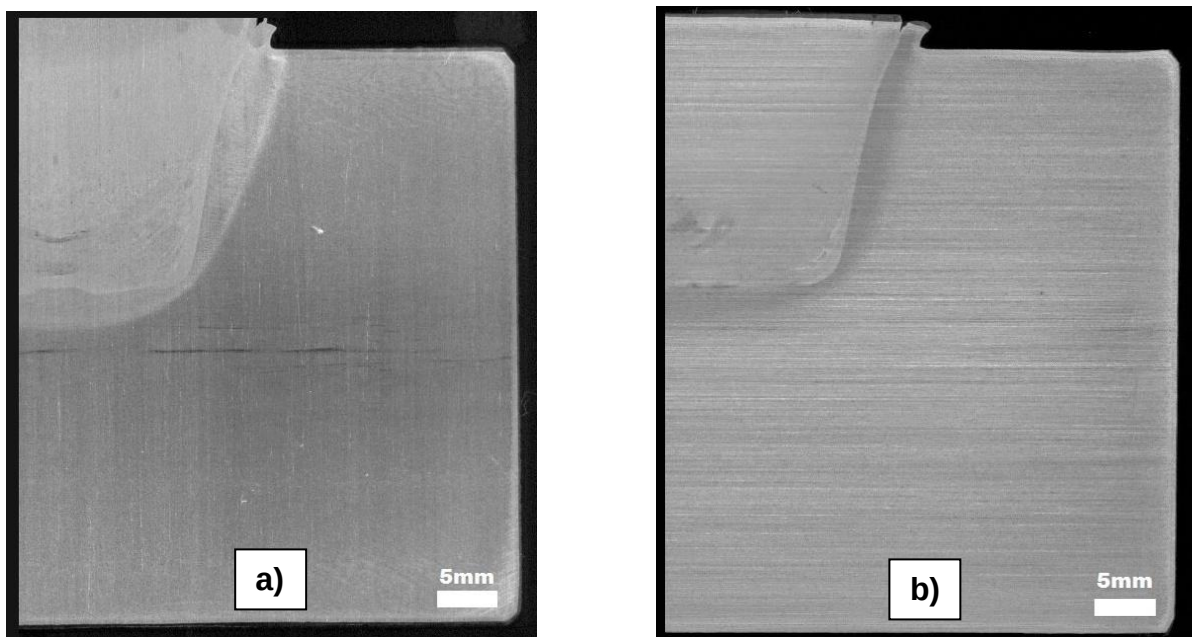


Figura 4.42 – Macrografias. a) Amostra 31410, 50,8 mm, 60 kN, 1400 rpm.
b) Amostra 314111, 50,8 mm, 120 kN, 1400 rpm.

Em algumas macrografias (Figura 4.43) é possível ver uma linha horizontal que atravessa todo o material do bloco. Trata-se da região de segregação do aço, região onde as impurezas do metal se concentram. Este defeito teve origem no processo de fabricação das chapas, que é o processo de laminação a quente.

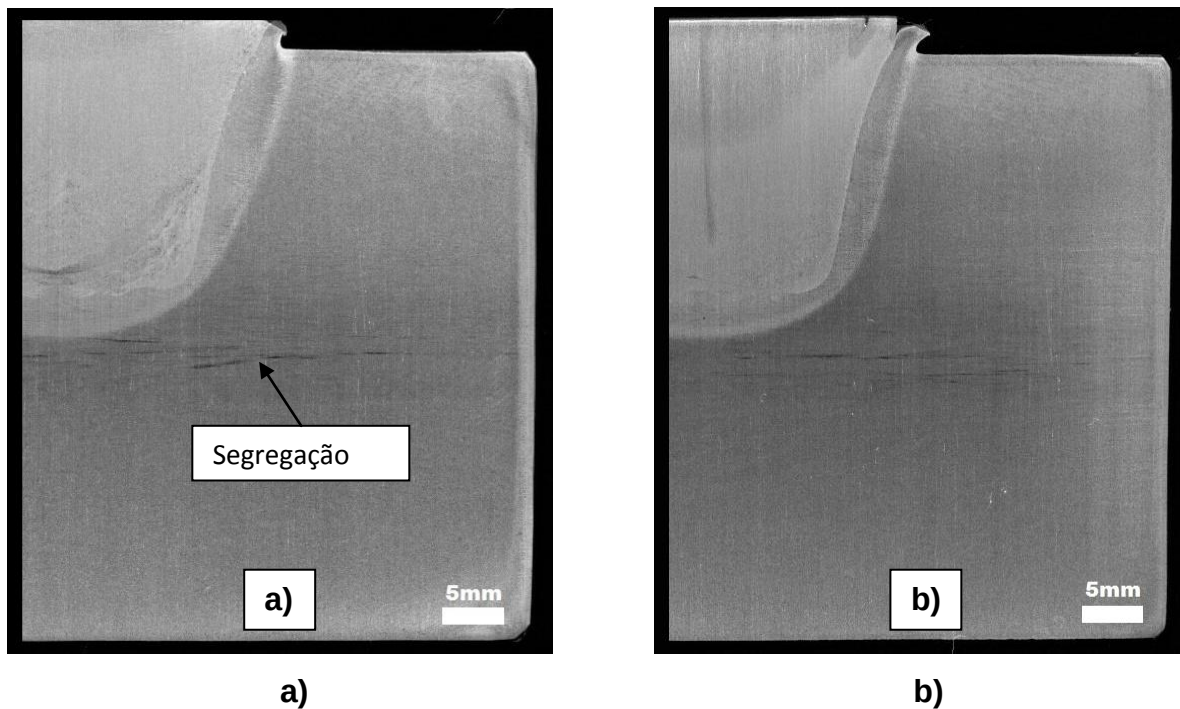


Figura 4.43 – Macrografias. a) Amostra 31412, 50,8 mm, 60 kN, 1700 rpm.

b) Amostra 31413, 50,8 mm, 120 kN, 1700 rpm.

No gráfico entre temperaturas T_0 , com mesma força e mesma rotação, mas com espessuras diferentes (Figuras 4.34, 4.35 e 4.36), se constatou uma menor temperatura no final de ensaio para o bloco de 50,8 mm em comparação com as outras espessuras (25,4 e 38,1 mm).

Comparando-se duas macrografias de amostras processadas com mesma força, mesma rotação e espessuras diferentes (25,4mm e 50,8 mm), constatou-se que a ZTA da amostra com 50,8 mm de espessura é um pouco menor do que a ZTA da amostra com 25,4 mm de espessura (Figura 4.44). Isso acontece por causa da transmissão de calor ocorrer com mais intensidade no bloco com espessura maior (50,8 mm), mostrando assim a influência da espessura da chapa no processamento de pinos por atrito.

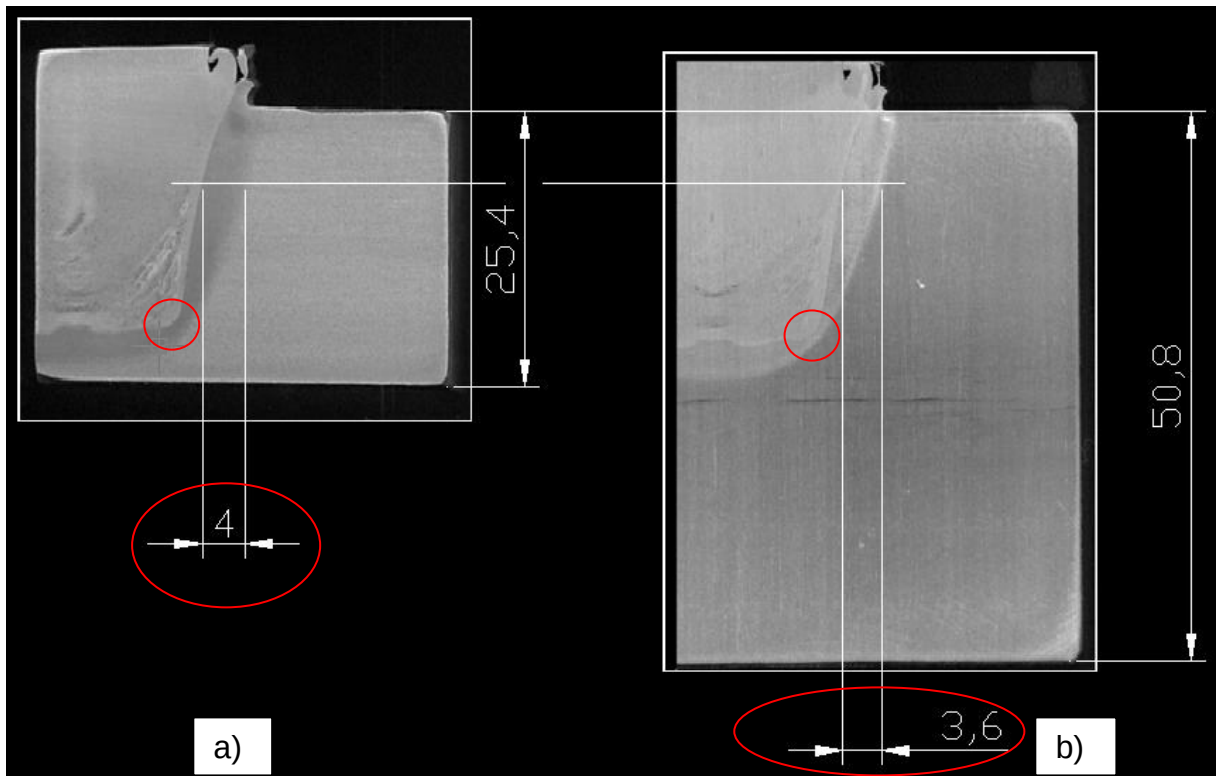


Figura 4.44 – Comparação entre larguras de ZTAs. Força 60 kN e Rotação 1400 rpm. Macrografias: a) Amostra 31414, 25,4 mm. b) Amostra 31410, 50,8 mm.

A mesma pode também ser vista na simulação (Figura 4.6) onde o bloco com 50,8 mm de espessura apresenta uma temperatura menor no final do ensaio em comparação com o bloco com 25,4 mm de espessura.

4.4 – Micrografia

Através da técnica micrográfica foi feita uma análise mais refinada da qualidade dos reparos e também das variações microestruturais causadas pelos diferentes aportes térmicos gerados. Para avaliação da qualidade das soldas são comparadas as micrografias das interfaces pino/bloco nos posicionamentos 3.0, 2.0 e 1.0, como mostrado na Figura 3.15. Posteriormente são feitas comparações das micrografias relativas às posições 2.1 e 1.1, por serem estas regiões dentro das ZTAs e também porque são equivalentes às posições dos termopares T0 e T2 respectivamente.

A Figura 4.45 mostra as micrografias das posições 3.0, 2.0 e 1.0 da amostra 31414 (25,4 mm, 60 kN e 1400 rpm).

A Figura 4.45 mostra que na interface pino/bloco não houve quaisquer tipos de defeitos na posição 3.0 (ponto de contato da ponta do pino com o bloco), mas revela uma possível falha de junção metalúrgica nas posições 2.0 (posição diagonal) e 1.0 (posição horizontal). A negativa dessa possível falha é apresentada na Figura 4.55 (b). A microestrutura mostrada na Figura 4.45 (a) mostra que houve a formação de estrutura acicular tanto no pino quanto no bloco indicando que houve intenso aquecimento nesta região.

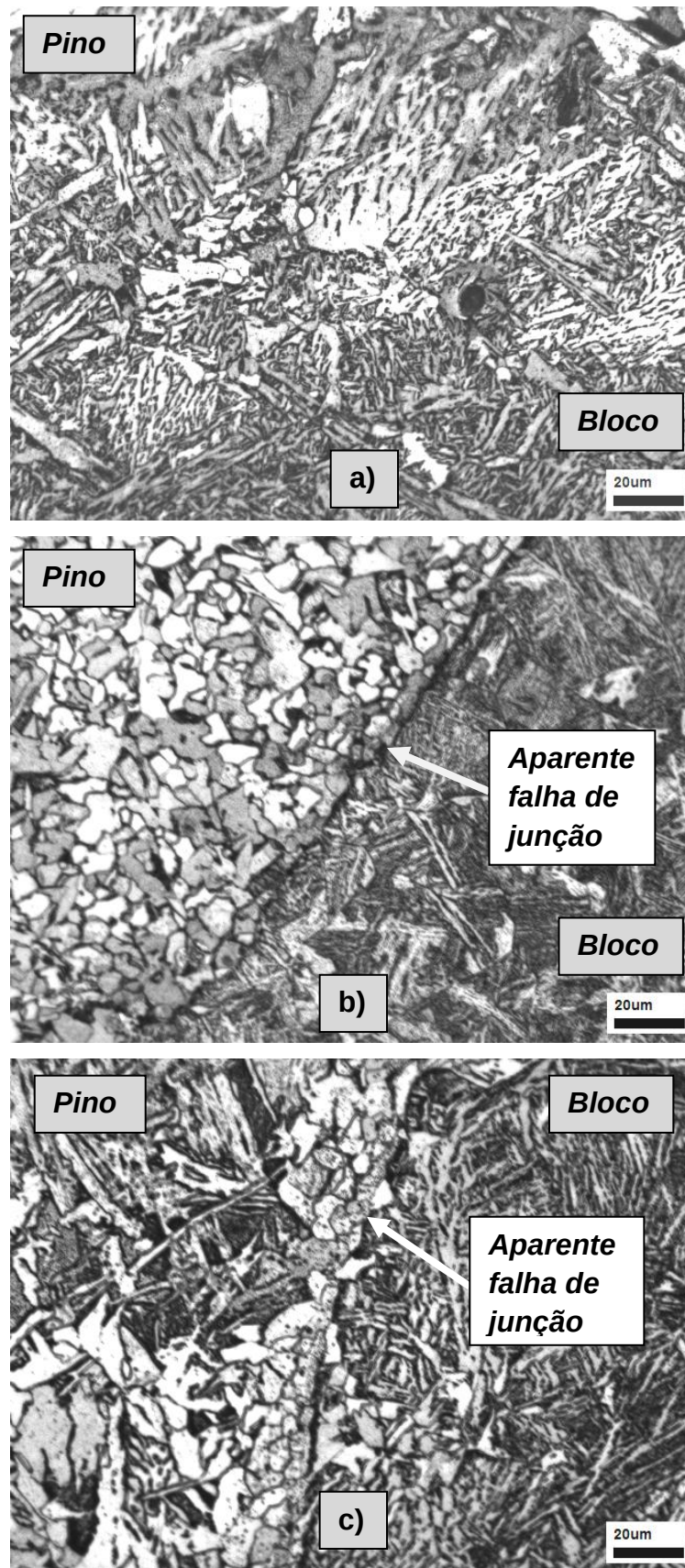


Figura 4.45 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31414 (25,4 mm, 60 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

A Figura 4.45 (b) revela que a estrutura do pino se apresenta com grãos equiaxiais como na estrutura original mostrada na Figura 3.12 (a), mas que houve um refinamento desses indicando que o aquecimento gerado não foi suficiente para gerar uma textura acicular característica de superaquecimentos. O registro das temperaturas através dos termopares indica que aqueles designados por T0 registraram as menores temperaturas máximas obtidas (ver Figuras 4.21 a 4.32). A localização dos termopares T0 está exatamente em posições na proximidade de 2.0 que corresponde à micrografia em questão. A análise macrográfica também revela uma menor temperatura na região por demonstrar um estreitamento das ZTAs nessa região (ver Figuras 4.38 a 4.43). A parte relativa ao bloco, no entanto apresenta uma textura acicular indicando que houve intenso aquecimento, o que modificou sua estrutura original mostrada na Figura 3.11 (a).

A Figura 4.45 (c) mostra uma textura acicular na região do bloco e modificação da região do pino com refino parcial dos grãos convivendo com textura acicular no mesmo.

Do ponto de vista das microestruturas apresentadas na Figura 4.45 pode-se concluir que a temperatura na interface 3.0 (posição vertical ou inferior) foi maior que a temperatura na interface 1.0 (posição horizontal ou superior), sendo por sua vez foi maior que a temperatura na interface 2.0 (posição diagonal ou intermediária).

A figura 4.46 mostra as micrografias das posições 3.0, 2.0 e 1.0. da amostra 31415 (25,4 mm, 120 kN e 1400 rpm).

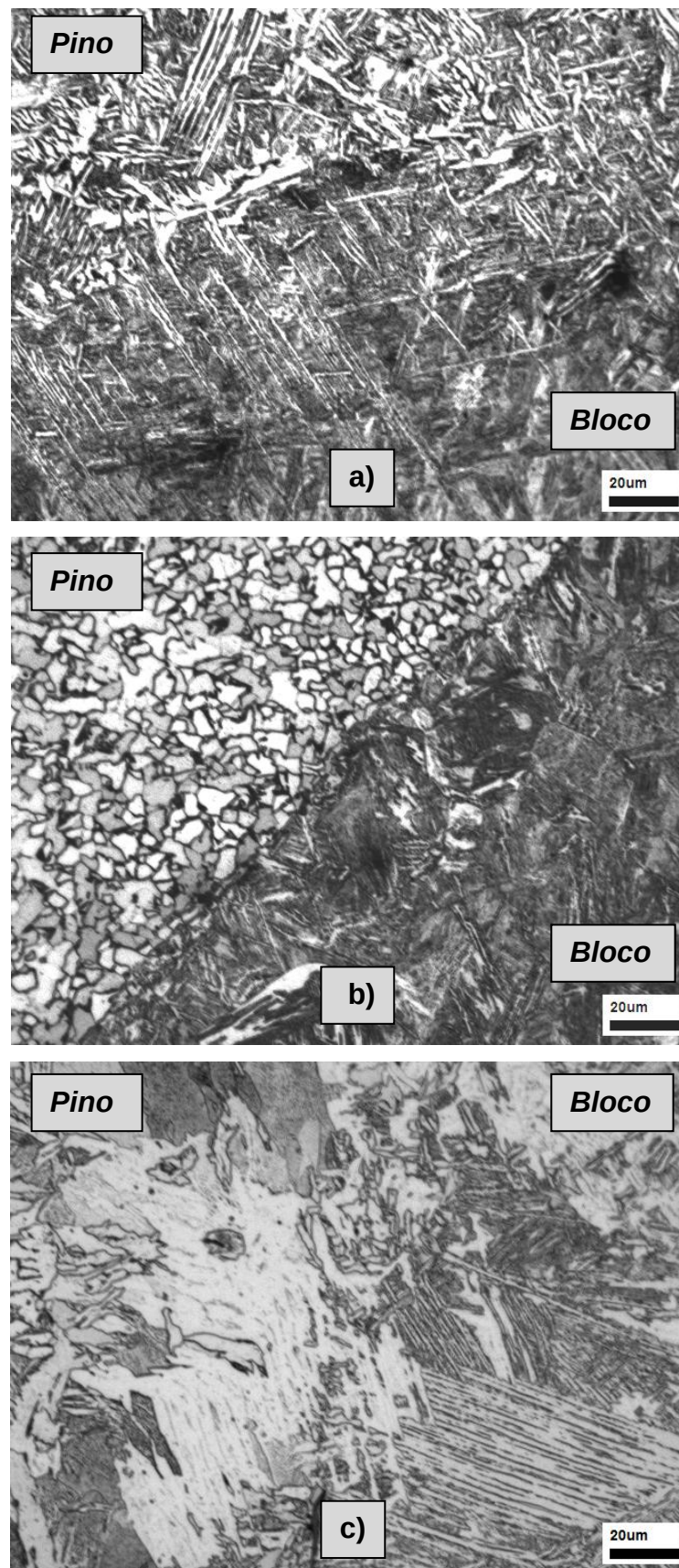


Figura 4.46 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31415 (25,4 mm, 120 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

As micrografias da amostra 31415 (25,4 mm, 120 kN, 1400 rpm), revelam um comportamento análogo ao apresentado pela amostra 31414, com textura acicular tanto no pino quanto no bloco na posição 3.0, refino dos grãos do pino na posição 2.0 mas com textura acicular na parte relativa ao bloco e revela também possível falha de junção metalúrgica (ver Figura 4.55b). A micrografia da posição 1.0 revela que houve modificação das microestruturas do pino e do bloco apresentando uma textura acicular. Do ponto de vista das temperaturas alcançadas nessas regiões, vale a mesma conclusão anterior.

As micrografias das amostras 31416 (25,4 mm, 60 kN e 1700 rpm) e 31417 (25,4 mm, 120 kN e 1700 rpm) revelaram as microestruturas geradas e são mostradas nas Figuras 4.47 e 4.48.

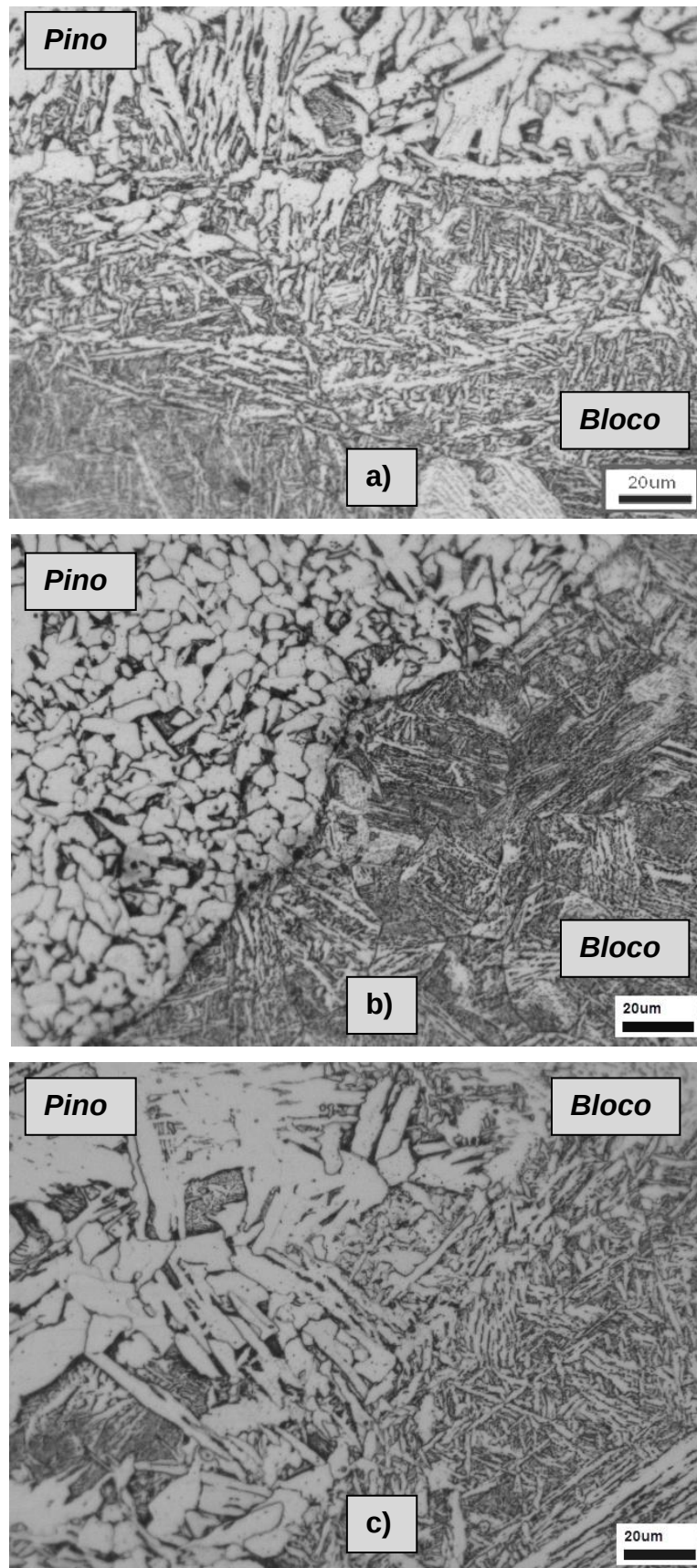


Figura 4.47 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31416 (25,4 mm, 60 kN, 1700 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

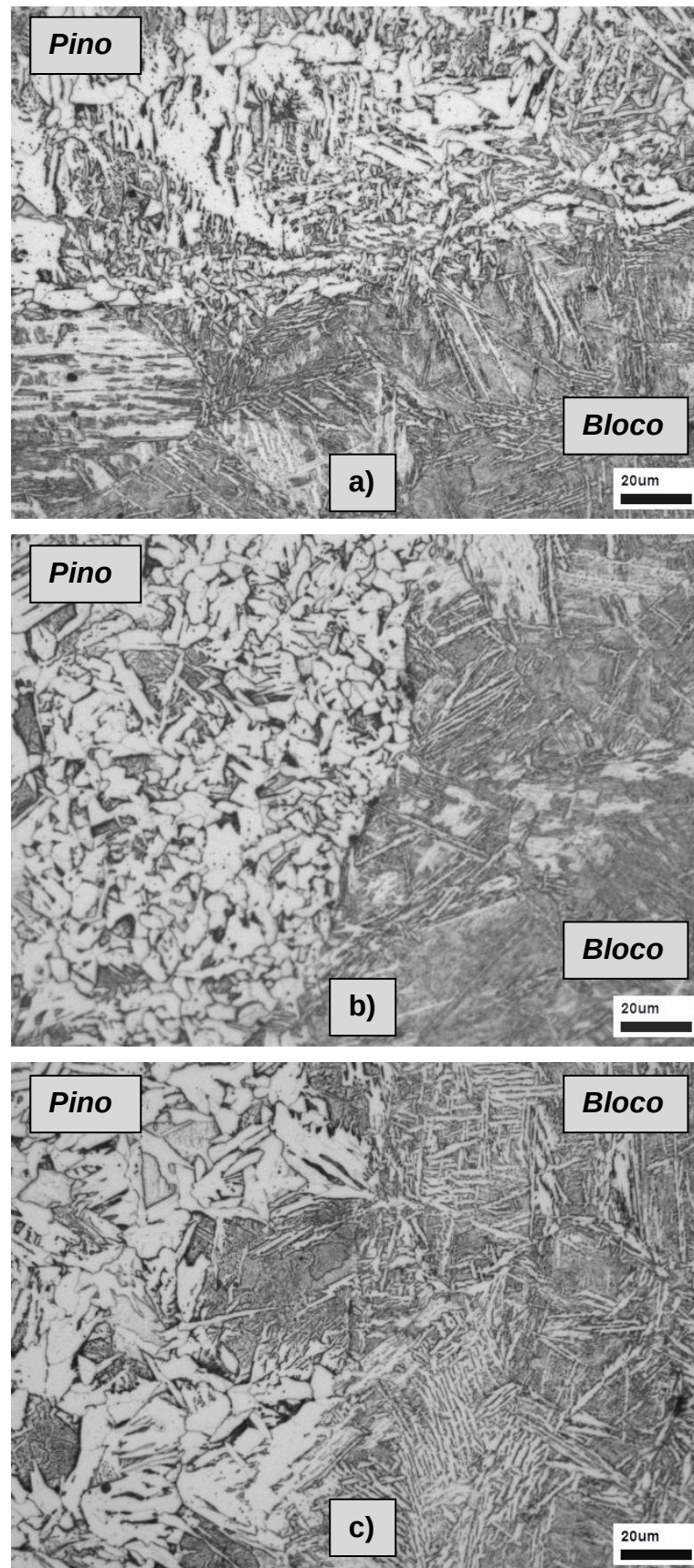


Figura 4.48 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31417 (25,4 mm, 120 kN, 1700 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

As micrografias apresentadas nas Figuras 4.47 revelam, comparativamente com a Figura 4.45 (25,4 mm, 60 kN e 1400 rpm) que não houve efeito da velocidade de rotação nas microestruturas. A Figura 4.48 (b) revela uma acicularização do pino maior do que a apresentada na Figura 4.47 (b), indicando que a força axial aplicada tem um maior efeito no refino da microestrutura.

Para as amostras de 38,1 mm de espessura, as Figuras 4.49 e 4.60 mostram as micrografias obtidas nas mesmas posições das amostras de 25,4 mm.

A Figura 4.49 mostra as micrografias da amostra 31418 (38,1 mm, 60 kN e 1400 rpm).

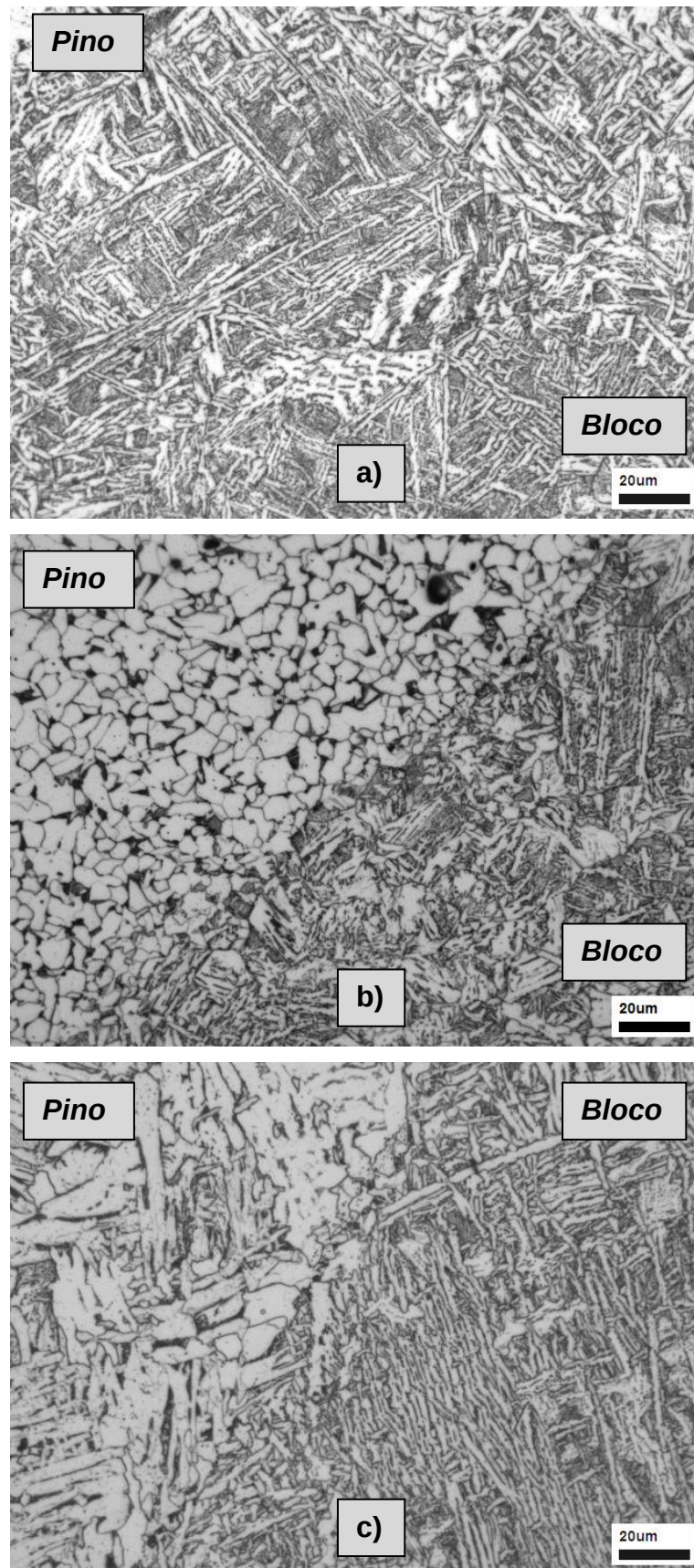


Figura 4.49 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31418 (38,1 mm, 60 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

A Figura 4.50 mostra as micrografias da amostra 31419 (38,1 mm, 120 kN e 1400 rpm).

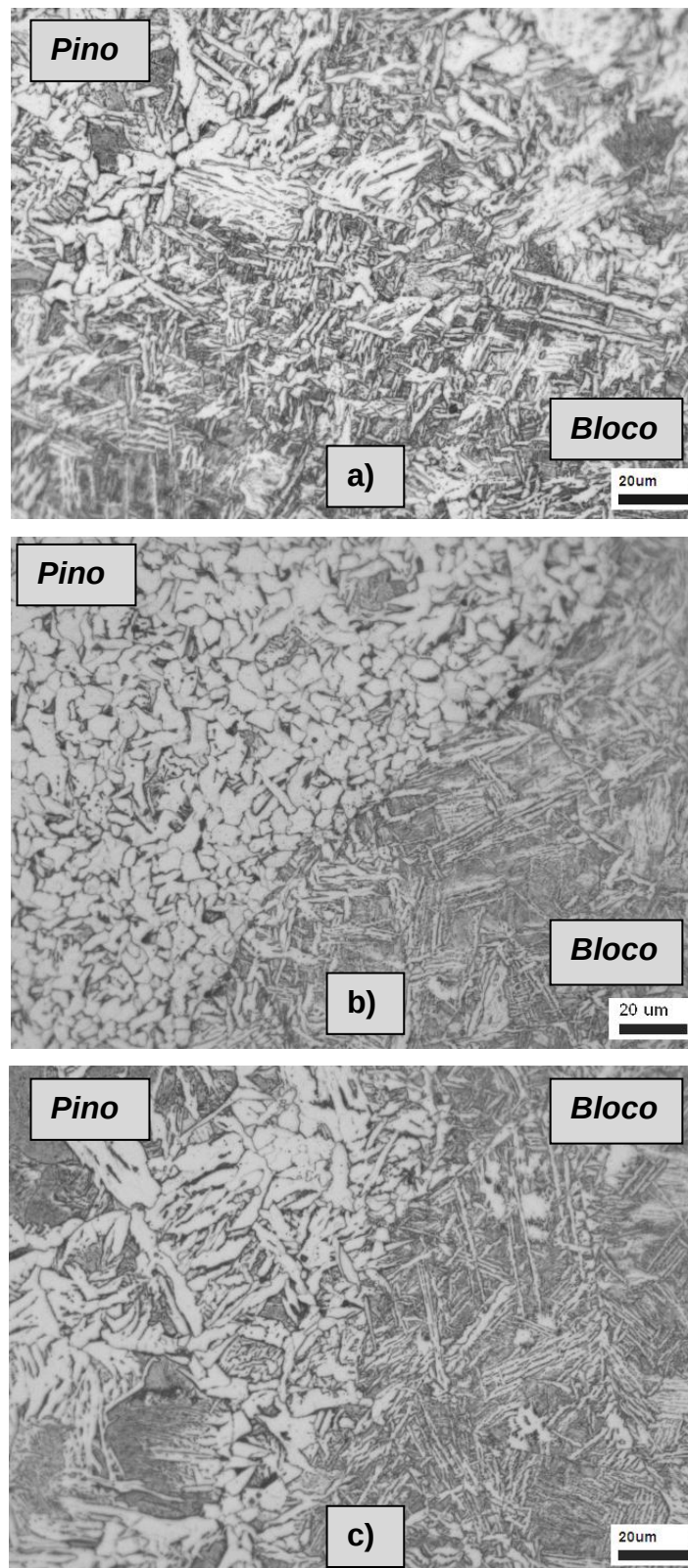


Figura 4.50 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31419 (38,1 mm, 120 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

A análise das micrografias das Figuras 4.49 e 4.50 revelam microestruturas similares às apresentadas pelas amostras de 25,4 mm, indicando que do ponto de vista microestrutural, não houve influência sensível da espessura da chapa.

As micrografias das amostras 31420 (38,1 mm, 60 kN e 1700 rpm) e 31421 (38,1 mm, 120 kN e 1700 rpm) revelaram comportamentos análogos e valem as mesmas interpretações das amostras 31418 e 31419.

São apresentadas a seguir as micrografias das amostras de 50,8 mm.

A Figura 4.51 mostra as micrografias da amostra 31410 (50,8 mm, 60 kN e 1400 rpm), nas posições 3.0 (posição vertical ou inferior), 2.0 (posição diagonal ou intermediária) e 1.0 (posição horizontal ou superior). Essa figura revela que as microestruturas apresentadas pelas amostras de 50,8 mm são similares as microestruturas das amostras de 25,4 e 38,1 mm, mas que houve um refino parcial de grãos na posição 2.0

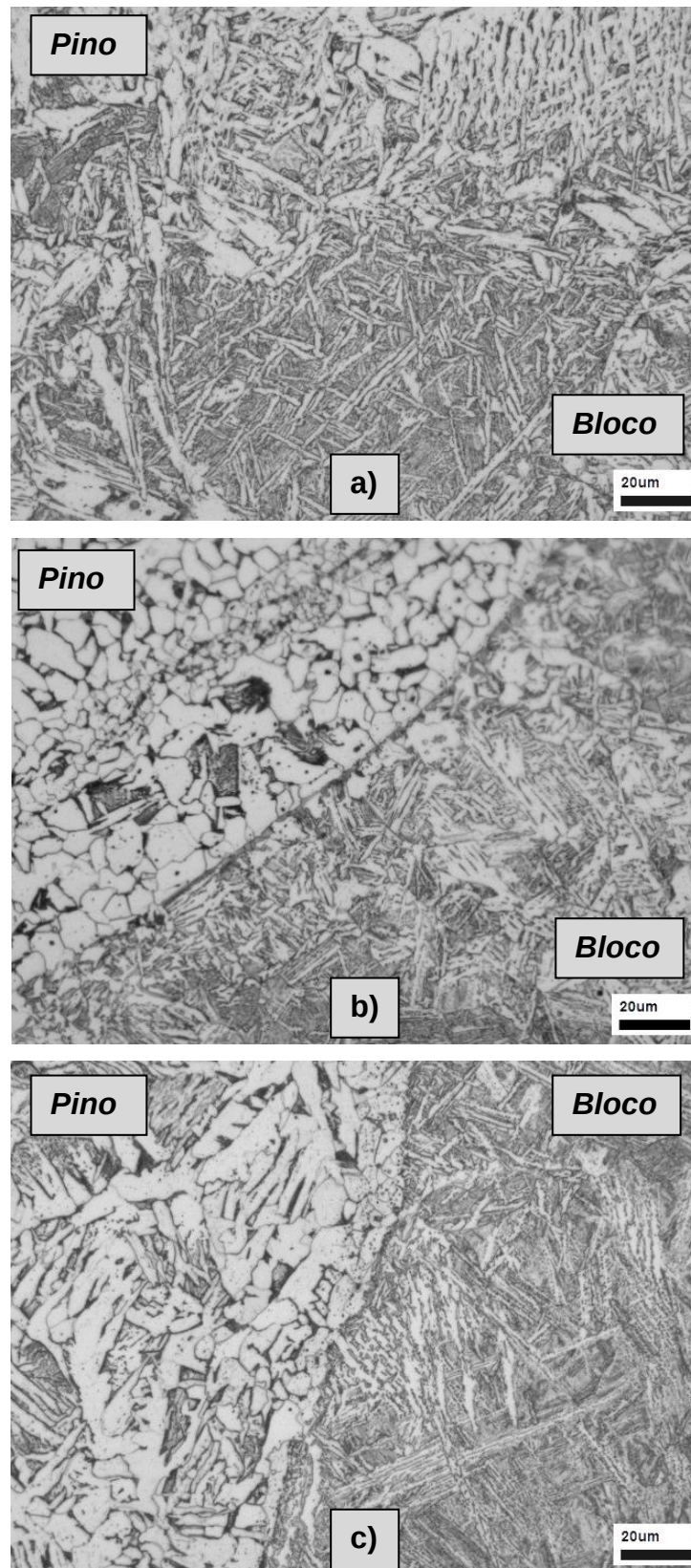


Figura 4.51 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31410 (50,8 mm, 60 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

A Figura 4.52 mostra as micrografias da amostra 31411 (50,8 mm, 120 kN, 1400 rpm).

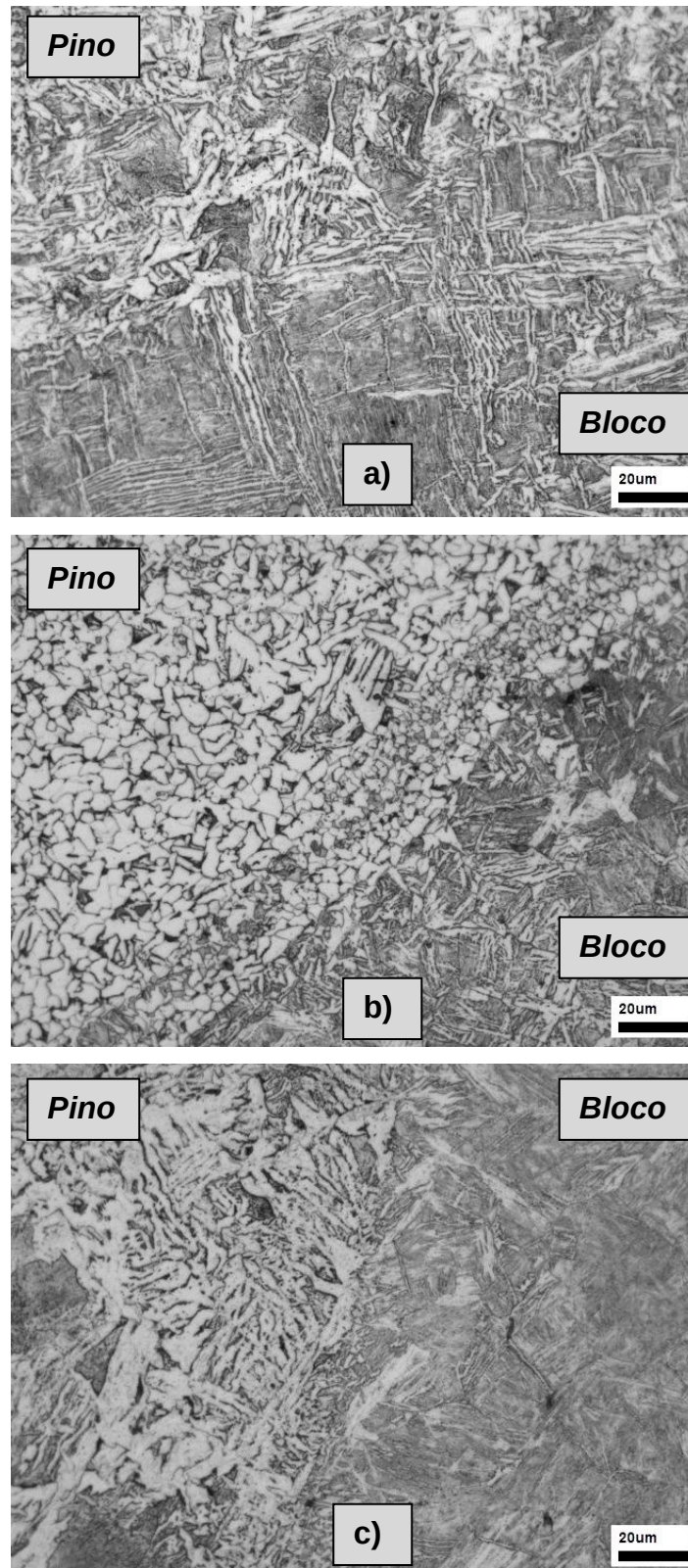


Figura 4.52 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31411 (50,8 mm, 120 kN, 1400 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

A análise das micrografias da amostra 31411 mostra uma similaridade muito grande com as micrografias apresentadas pela amostra 31410, mas com uma área de refino de grão maior, evidenciando que houve um maior refino da microestrutura causado pela maior força axial aplicada.

Na comparação entre as amostras 31415 (Figura 4.46 b) e 31411 (Figura 4.52 b), observa-se também, um maior refino dos grãos para ensaios com mesma força, mesma rotação, mas com espessuras diferentes. Mostrando com isso a influência da espessura da chapa na qualidade do reparo por atrito, que é o objetivo da presente pesquisa.

As micrografias das amostras 31412 (50,8 mm, 60 kN e 1700 rpm) e 31413 (50,8 mm, 120 kN e 1700 rpm) revelam que, analogamente ao que aconteceu com as amostras de 25,4 e 38,1 mm, o aumento da rotação de 1400 para 1700 rpm, não evidenciou alterações sensíveis na microestrutura das posições 3.0, 2.0 e 1.0.

As Figuras 4.53 e 4.54 evidenciam o relato anterior.

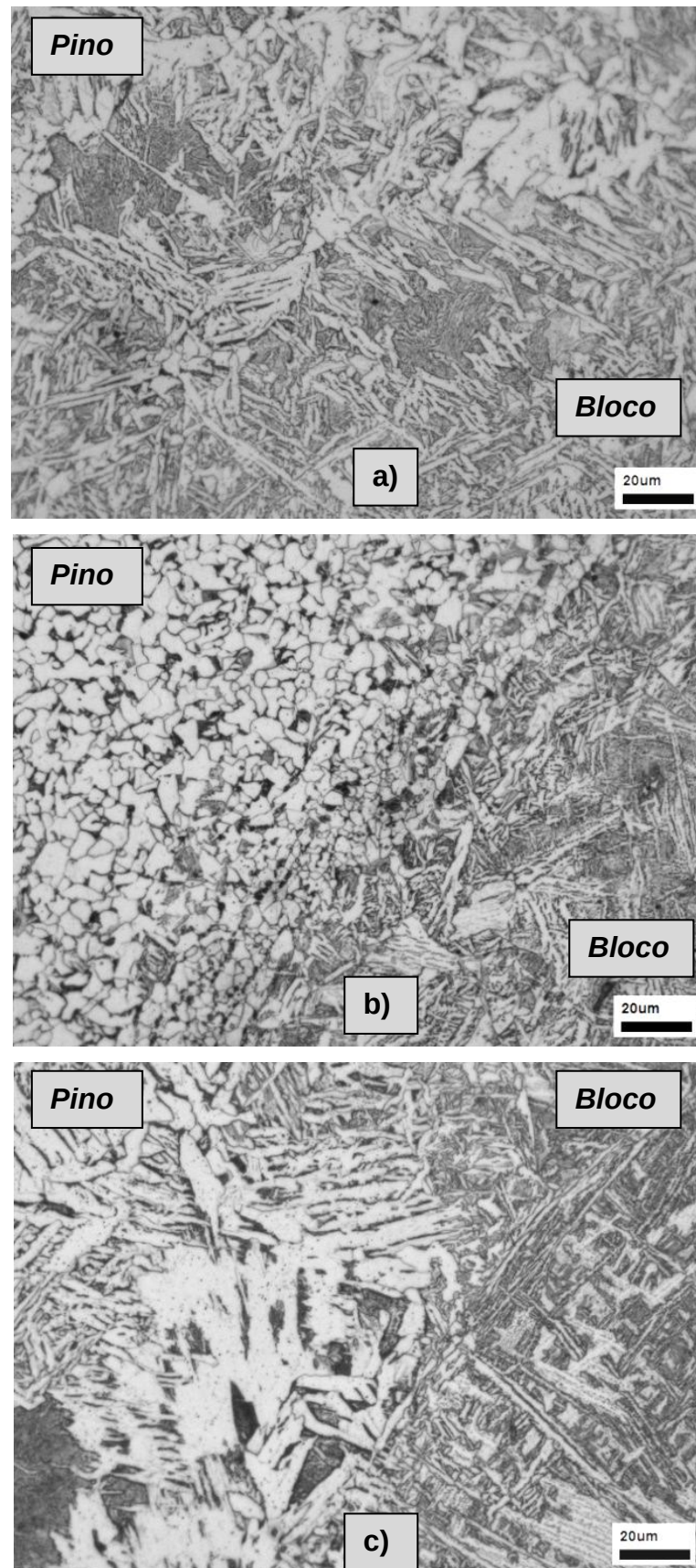


Figura 4.53 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31412 (50,8 mm, 60 kN, 1700 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

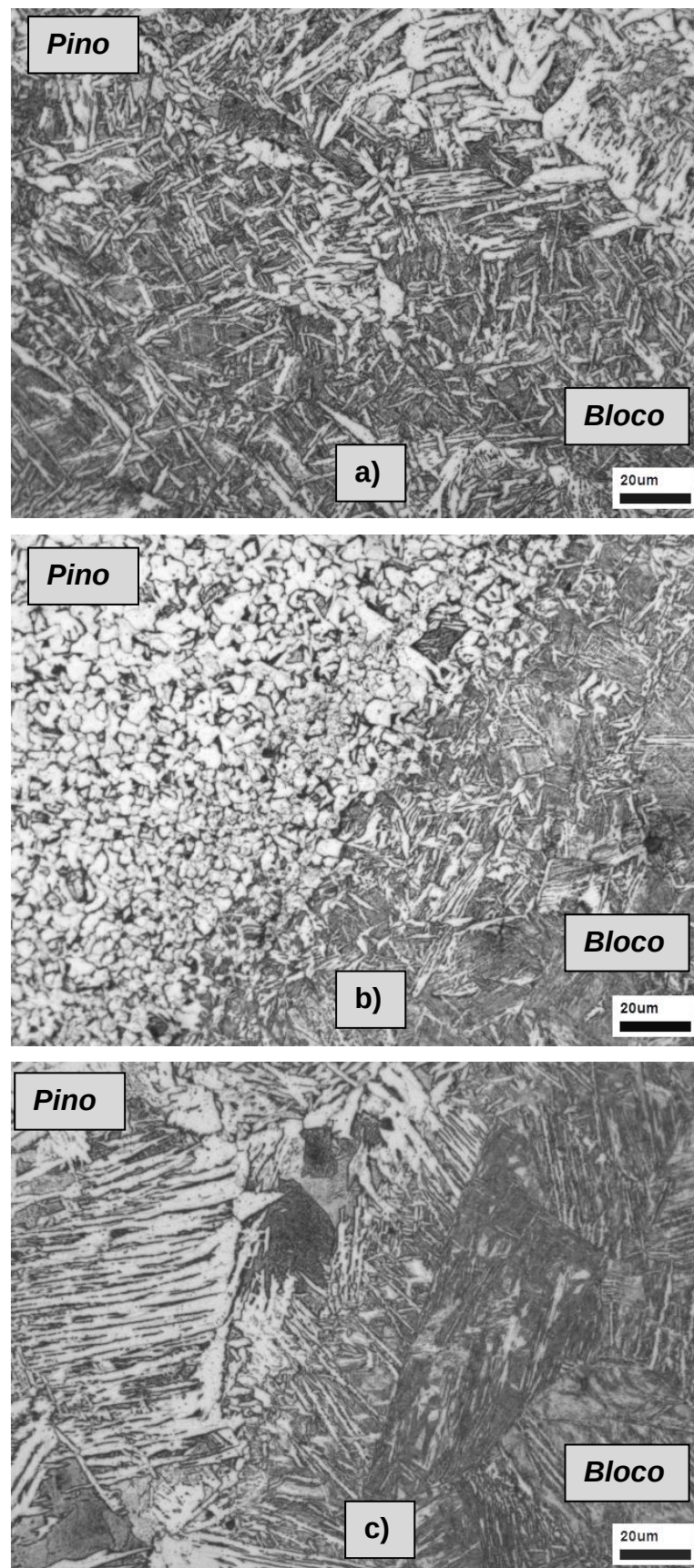


Figura 4.54 – Micrografias da interface pino/bloco da amostra 31411 (50,8 mm, 120 kN, 1700 rpm). a) posição 3.0, b) posição 2.0 e c) posição 1.0.

Para efeito de comprovação do refino de grão citados anteriormente, é apresentada a Figura 4.55 que mostra a microestrutura original do pino e uma microestrutura da posição 2.0 da amostra 31414.

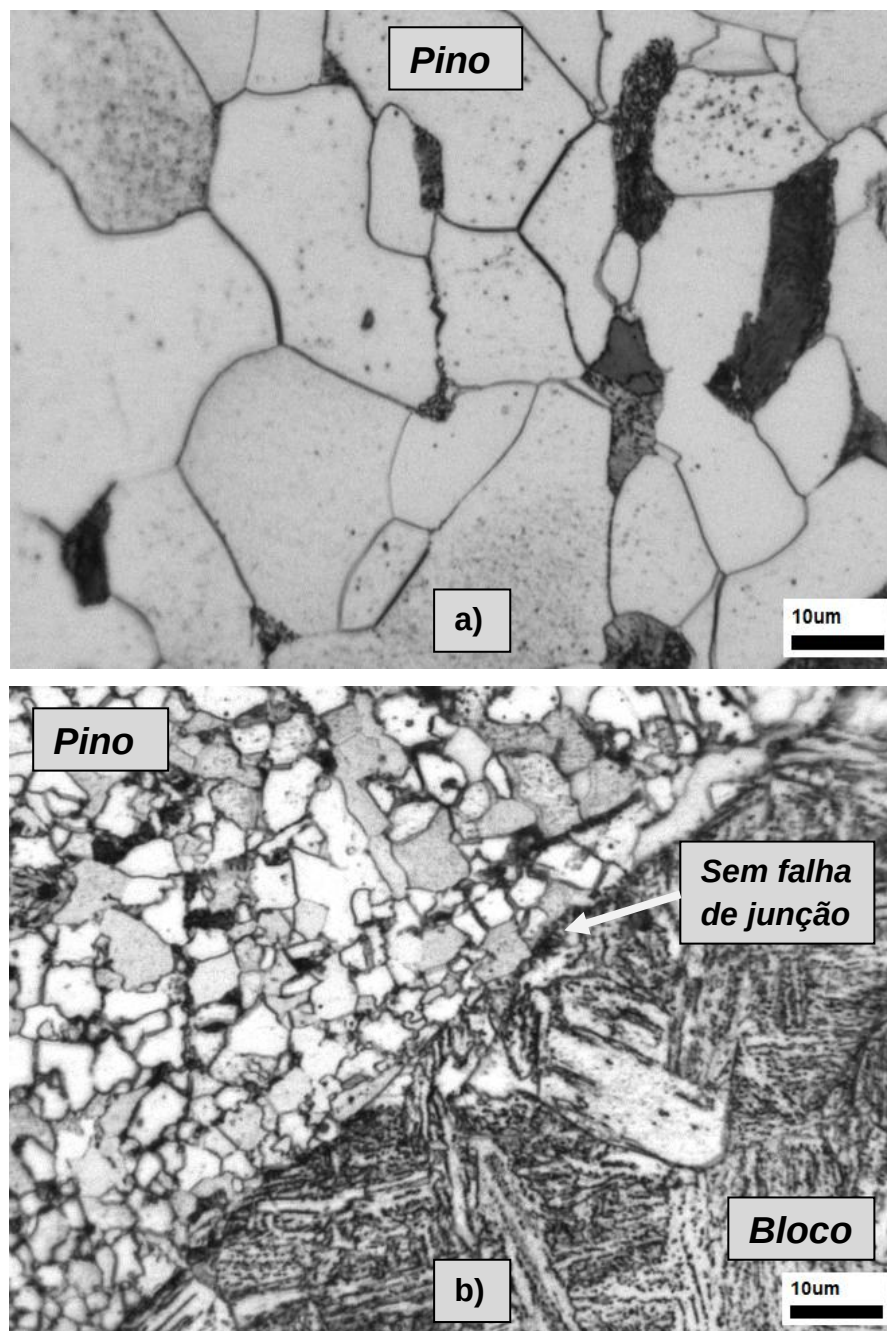


Figura 4.55 – Comparação entre os grãos do pino. a) Antes do ensaio e b) Após o ensaio, na fronteira pino/bloco na posição 2.0.

Uma avaliação por comparação, utilizando-se uma máscara de medida de tamanho de grão Carl Zeiss Jena, revelou que o tamanho de grão ASTM original do pino é 7 e o tamanho de grão ASTM do pino na posição 2.0 é um número ASTM maior que 8.

A Figura 4.55 (b) mostra também que não houve falha de junção. Na junção ocorrem efeitos térmicos e mecânicos mais acentuados e é a região por onde escoia o *flash* de material deformado que preenche a cavidade entre o pino e o bloco e que atinge além da superfície do bloco. O *flash* “carrega” também óxidos e impurezas das superfícies dos pinos e dos blocos e, parte dessas fica retida na interface, ocasionando diferenças reveladas pelo ataque químico.

Pode-se concluir das análises micrográficas que não se observa efeito significativo da espessura e da velocidade de rotação nas microestruturas e falhas de preenchimento.

A comparação das micrografias em posições dentro das ZTAs (2.1 – posição diagonal e 1.1 – posição horizontal) revelaram microestruturas similares para todas as amostras, mas com uma textura mais grosseira na posição 1.1, evidenciando uma maior temperatura nessa região, o que foi comprovado pelos termopares T0 e T2. A Figura 4.56 mostra como exemplo as micrografias das amostras 31416 (25,5 mm, 60 kN e 1700 rpm) e 31417 (25.4 mm, 120 kN e 1700 rpm)

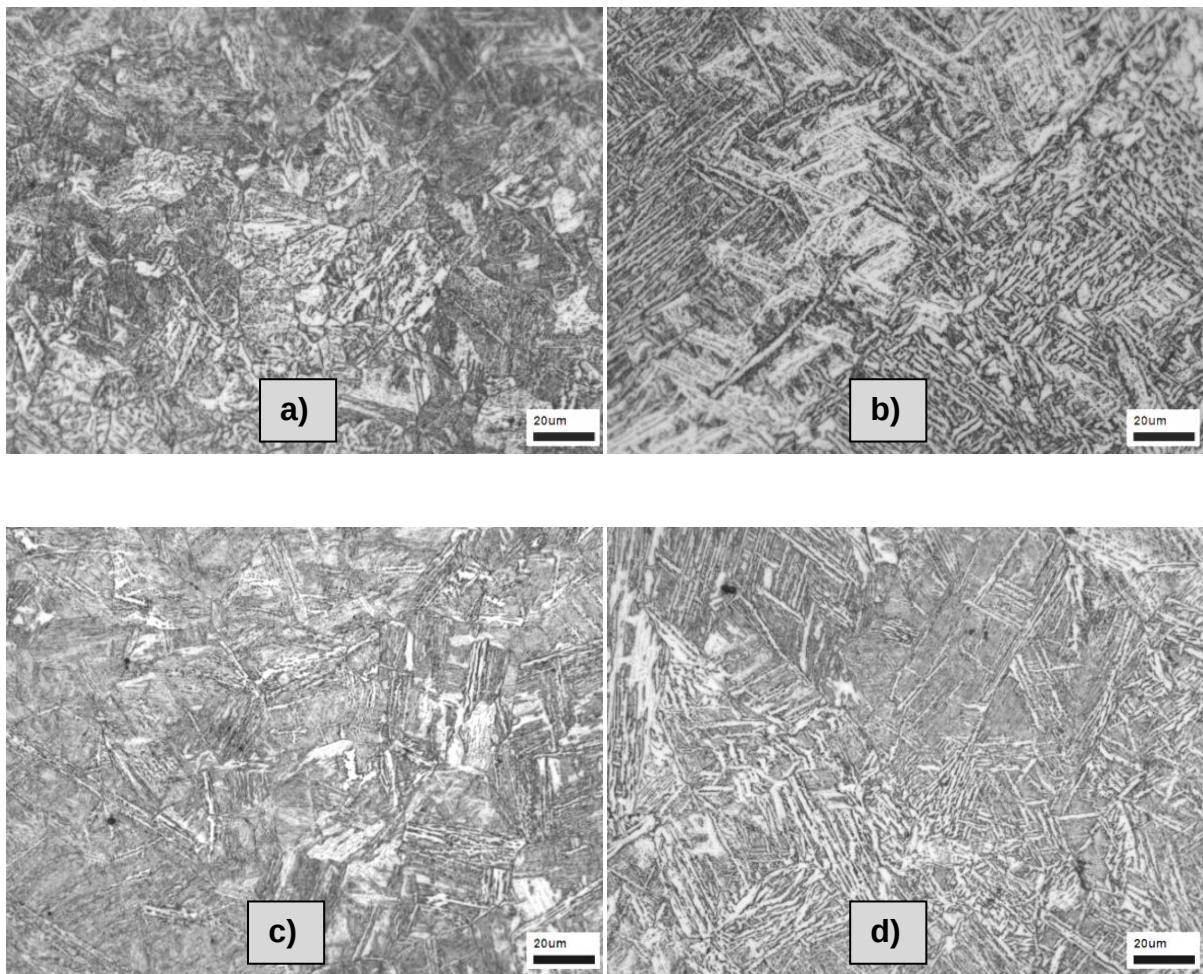


Figura 4.56 – Comparação entre micrografias das posições 2.1 e 1.1. a) Amostra 31416 (25,4 mm, 60 kN e 1700 rpm), posição 2.1. b) Amostra 31416 (25,4 mm, 60 kN e 1700 rpm), posição 1.1. c) Amostra 31417 (25,4 mm, 120 kN e 1700 rpm), posição 2.1. d) Amostra 31417 (25,4 mm, 120 kN e 1700 rpm), posição 1.1.

Finalmente, para justificar as perturbações nos máximos de temperatura e alterações nas velocidades de resfriamento, pode-se considerar os desvios nas espessuras das paredes das cavidades dos termopares com as paredes dos furos cônicos como mostrado Capítulo 3. Considera-se ainda que as deformações das citadas paredes em virtude das temperaturas geradas e do fluxo plástico podem ter causado o desprendimento de algum termopar o que compromete a veracidade das leituras de temperaturas. A Figura 4.57 mostra significativas deformações dos fundos das cavidades dos termopares que ocorreram na amostra 31414, podendo o mesmo efeito ter ocorrido com maior ou menor intensidade nas demais amostras.

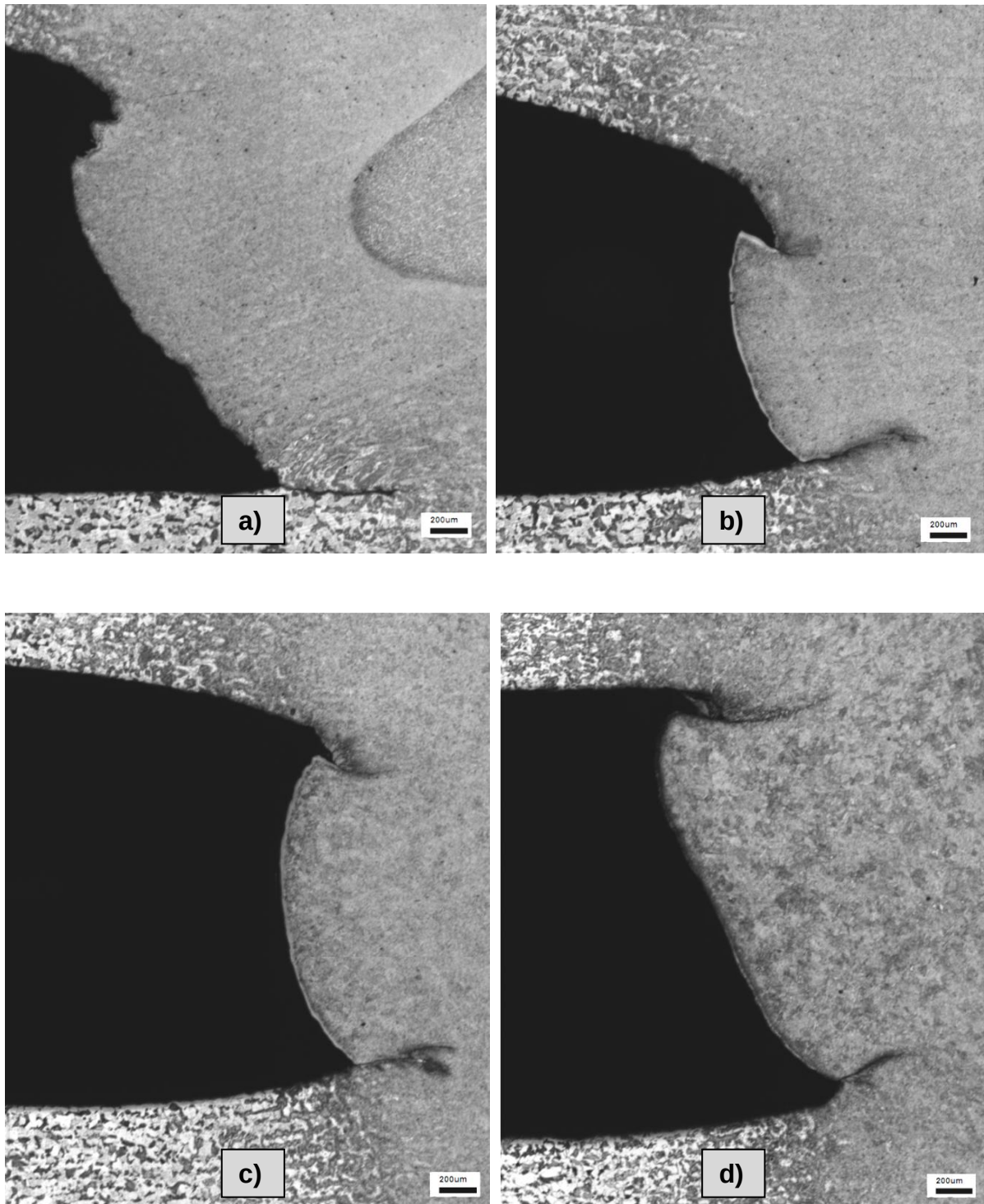


Figura 4.57 – Deformações dos furos dos termopares causadas pelo fluxo plástico na amostra 31414, nas seguintes posições: a) T0, b) T1, c) T2 e d) T3.

4.5 – Ensaios de Dureza Vickers

Com o objetivo de se verificar variações de propriedades mecânicas em virtude das diferentes combinações de espessura, força axial e velocidade de rotação dos corpos de prova processados, foram feitas medições de dureza Vickers, que geraram 3 perfis (vertical, horizontal 5 mm e horizontal 13 mm) em cada amostra. Os perfis de dureza foram relacionados segundo o critério de mesma força, mesma rotação e espessuras diferentes, isso para ressaltar a influência da espessura da chapa na qualidade do reparo por atrito, que é o objetivo da presente pesquisa. Os gráficos são mostrados nas Figuras 4.58 a 4.69.

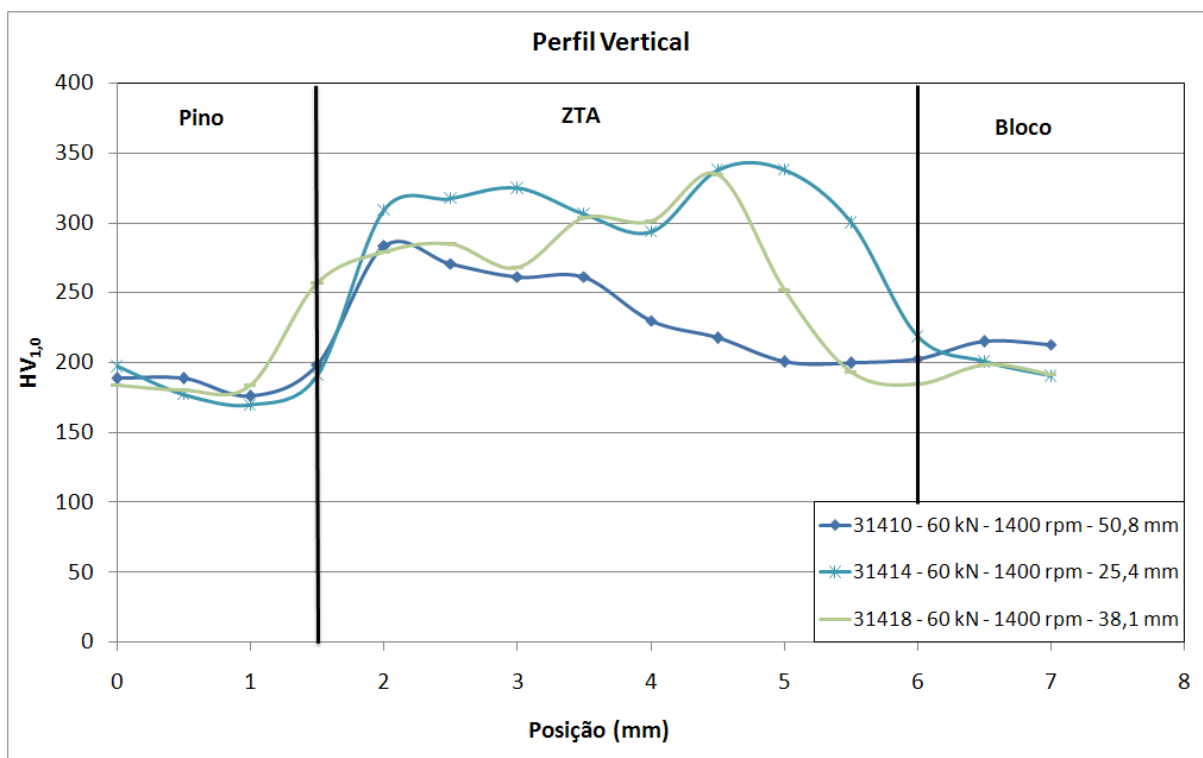


Figura 4.58 – Comparativo dos perfis de dureza verticais. Força 60 kN, Rotação 1400 rpm. Amostras 31414, 25,4 mm; 31418, 38,1 mm e 31410, 50,8 mm.

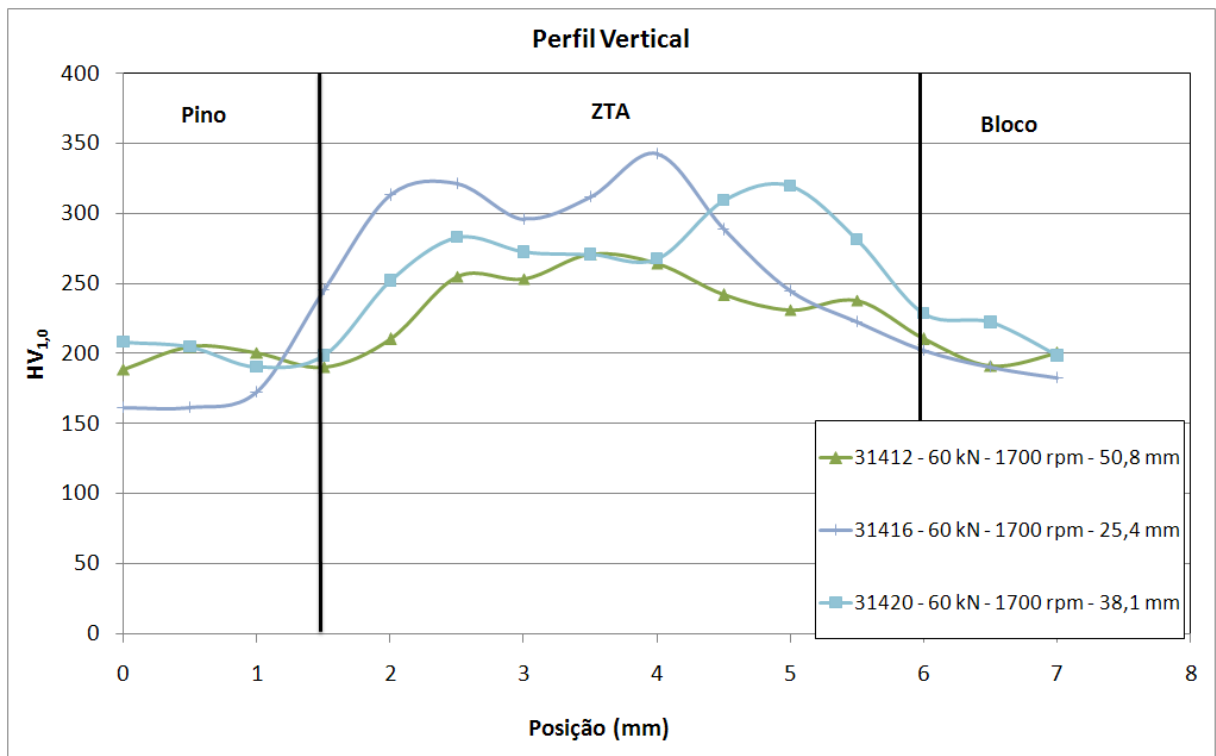


Figura 4.59 – Comparativo dos perfis de dureza verticais. Força 60 kN, Rotação 1700 rpm. Amostras 31416, 25,4 mm; 31420, 38,1 mm e 31412, 50,8 mm.

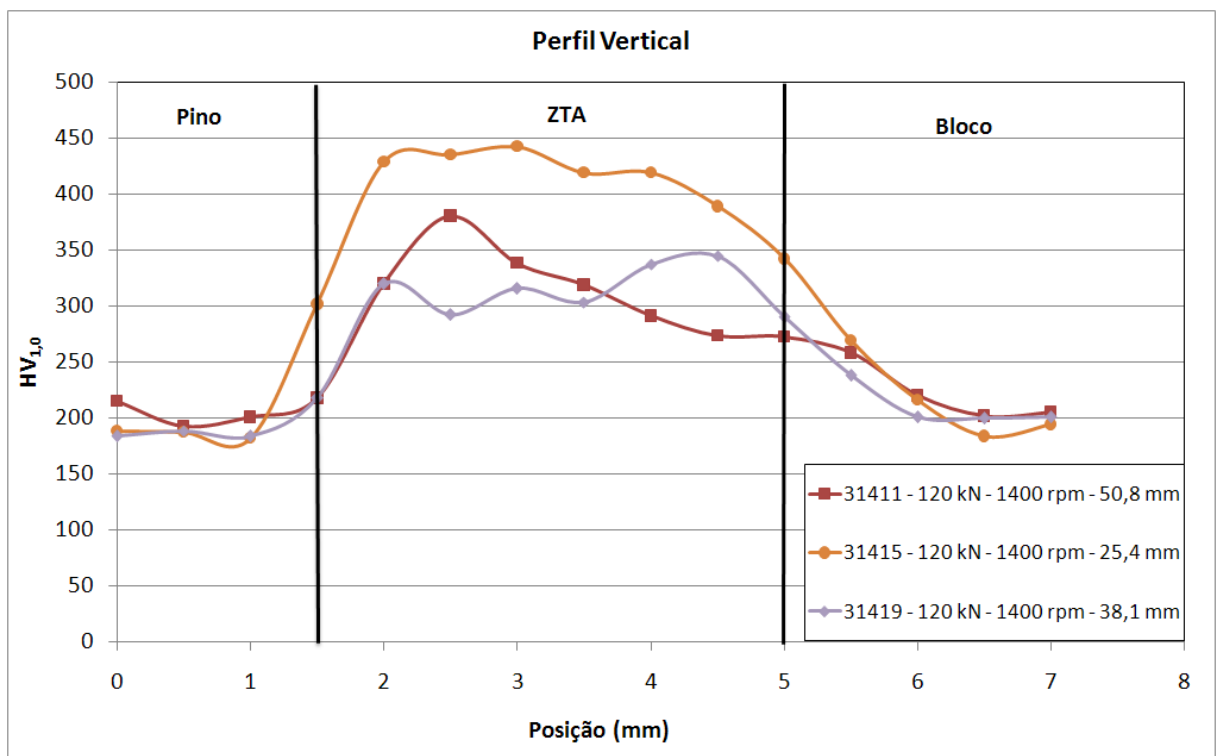


Figura 4.60 – Comparativo dos perfis de dureza verticais Força 120 kN, Rotação 1400 rpm. Amostras 31415, 25,4 mm; 31419, 38,1 mm e 31411, 50,8 mm.

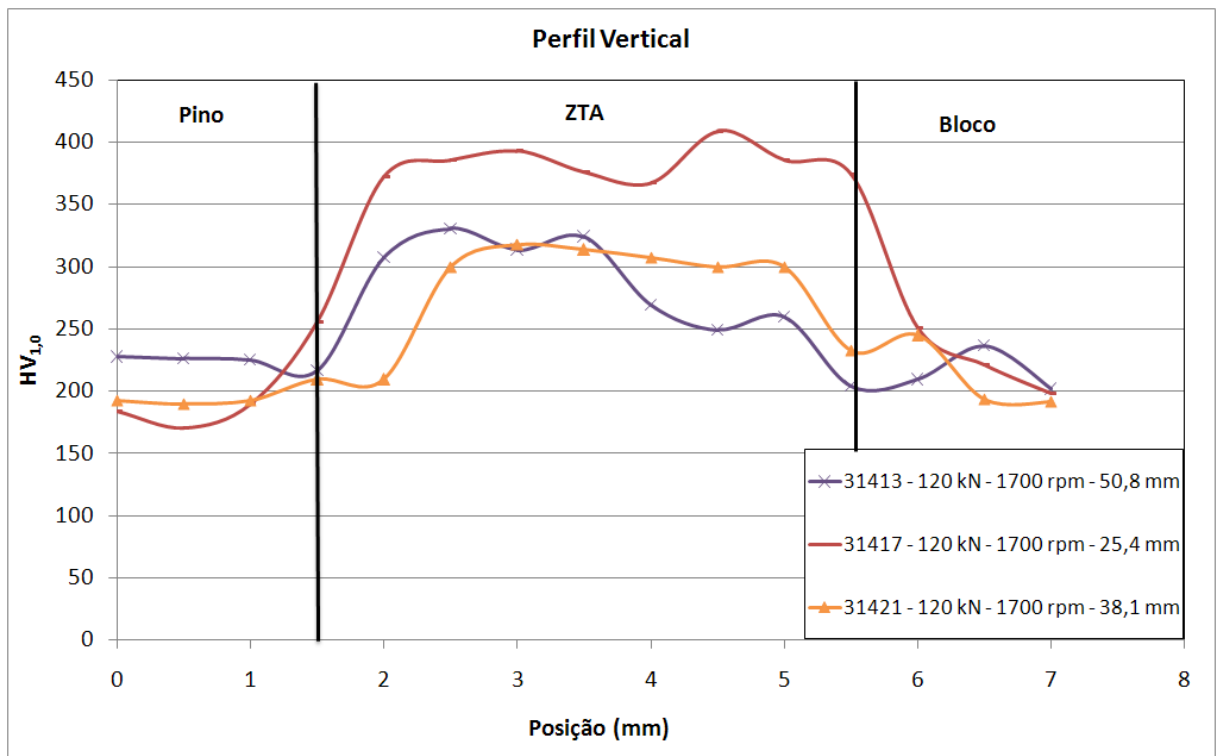


Figura 4.61 – Comparativo de perfis de dureza verticais. Força 120 kN, Rotação 1700 rpm. Amostras 31417, 25,4 mm; 31421, 38,1 mm e 31413, 50,8 mm.

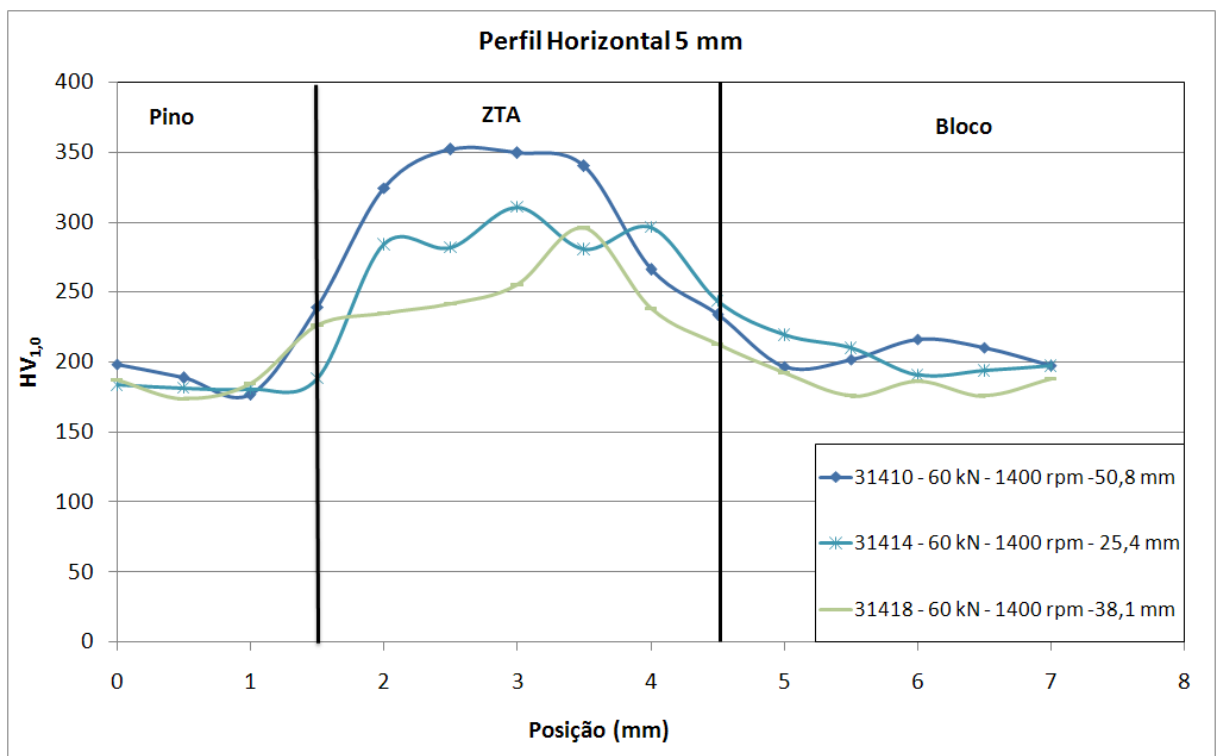


Figura 4.62 – Comparativo de perfis de dureza horizontais a 5 mm. Força 60 kN, Rotação 1400 rpm. Amostras 31414, 25,4mm; 31418, 38,1mm e 31410, 50,8mm.

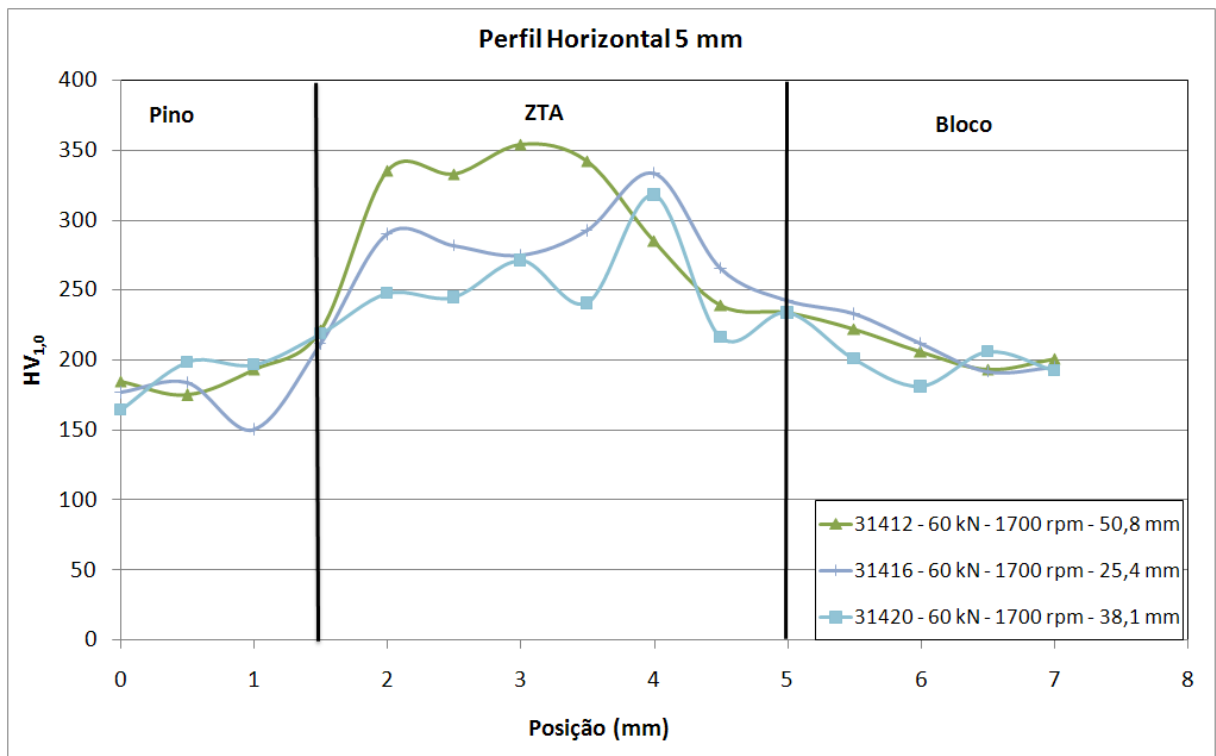


Figura 4.63 – Comparativo dos perfis de dureza horizontais a 5 mm. Força 60 kN, Rotação 1700 rpm. Amostras 31416, 25,4 mm; 31420, 38,1mm e 31412, 50,8 mm.

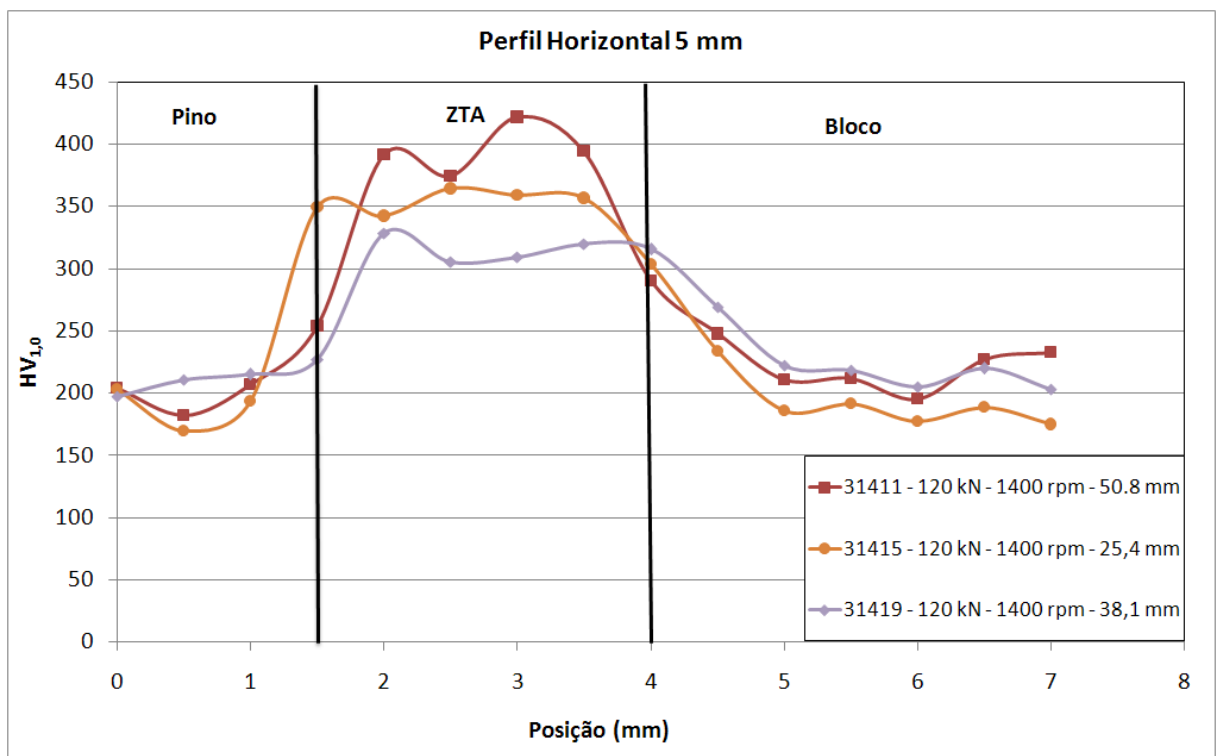


Figura 4.64 – Comparativo dos perfis de dureza horizontais a 5 mm. Força 120 kN, Rotação 1400 rpm. Amostras 31415, 25,4 mm; 31419, 38,1mm e 31411, 50,8 mm.

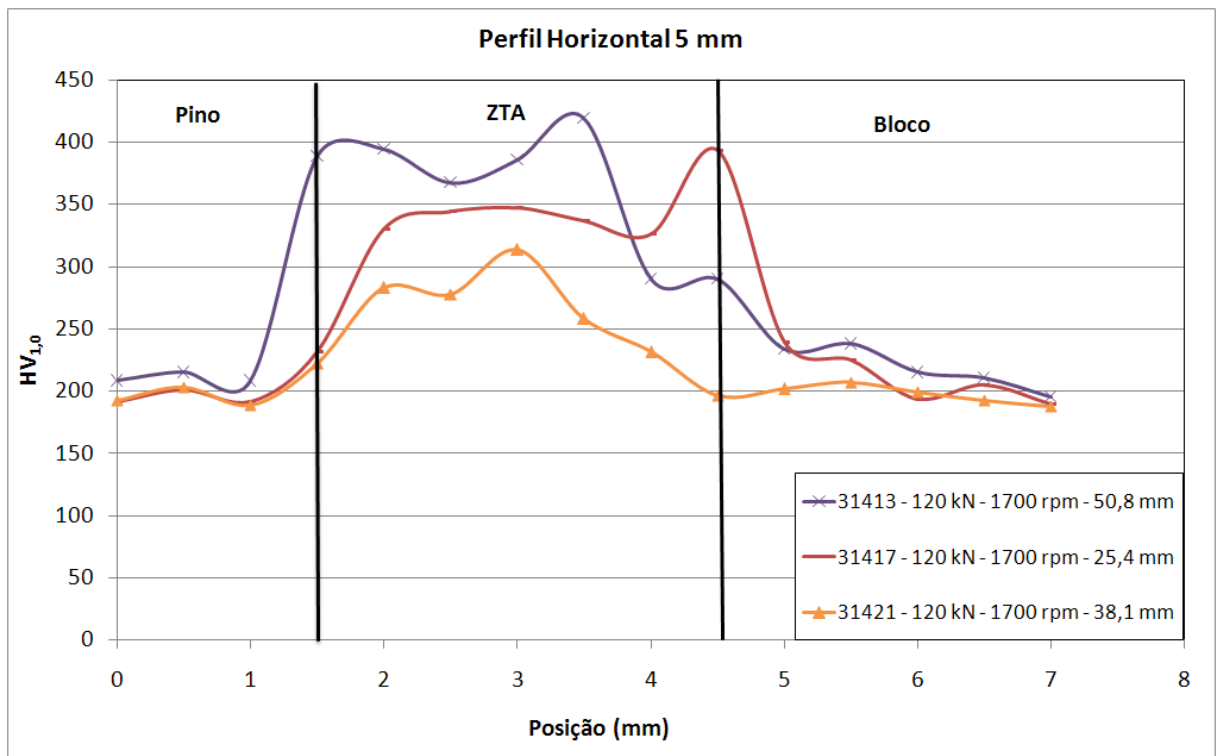


Figura 4.65 – Comparativo dos perfis de dureza horizontais a 5 mm. Força 120 kN, Rotação 1700 rpm. Amostras 31417, 25,4 mm; 31421, 38,1 mm e 31413, 50,8 mm

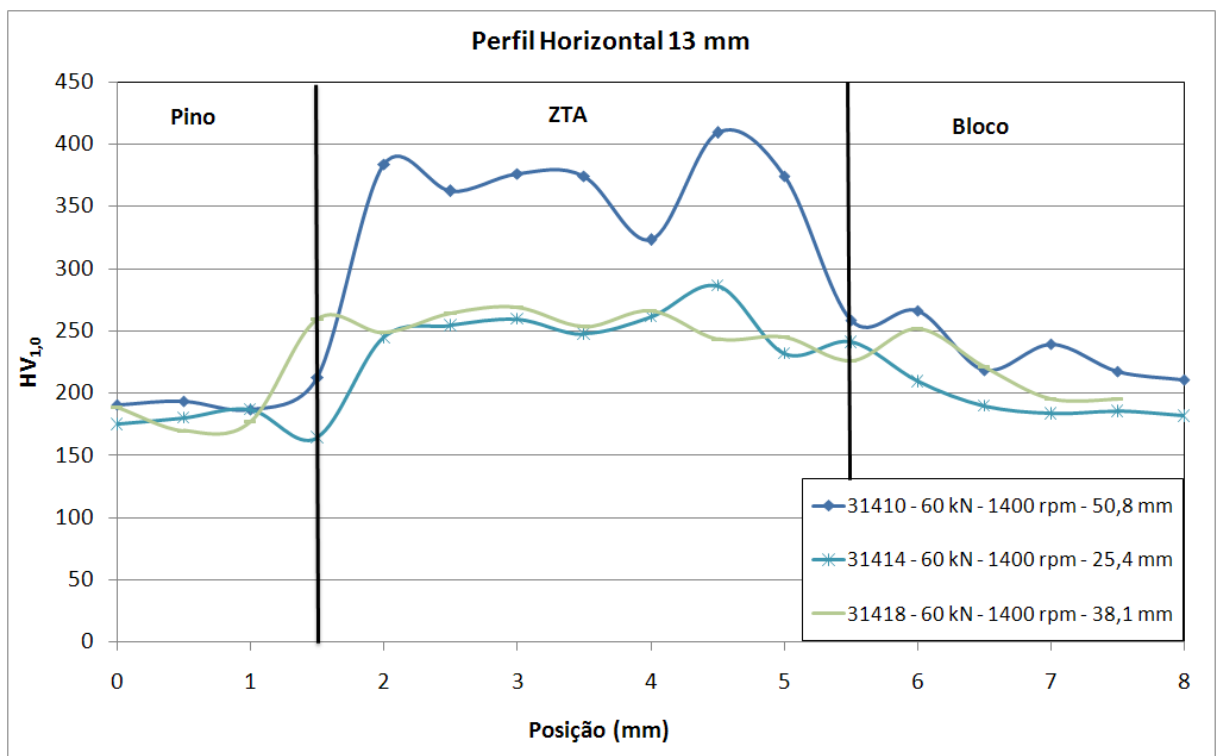


Figura 4.66 – Comparativo dos perfis de dureza horizontais a 13 mm. Força 60 kN, Rotação 1400 rpm. Amostras 31414, 25,4 mm; 31418, 38,1 mm e 31410, 50,8 mm.

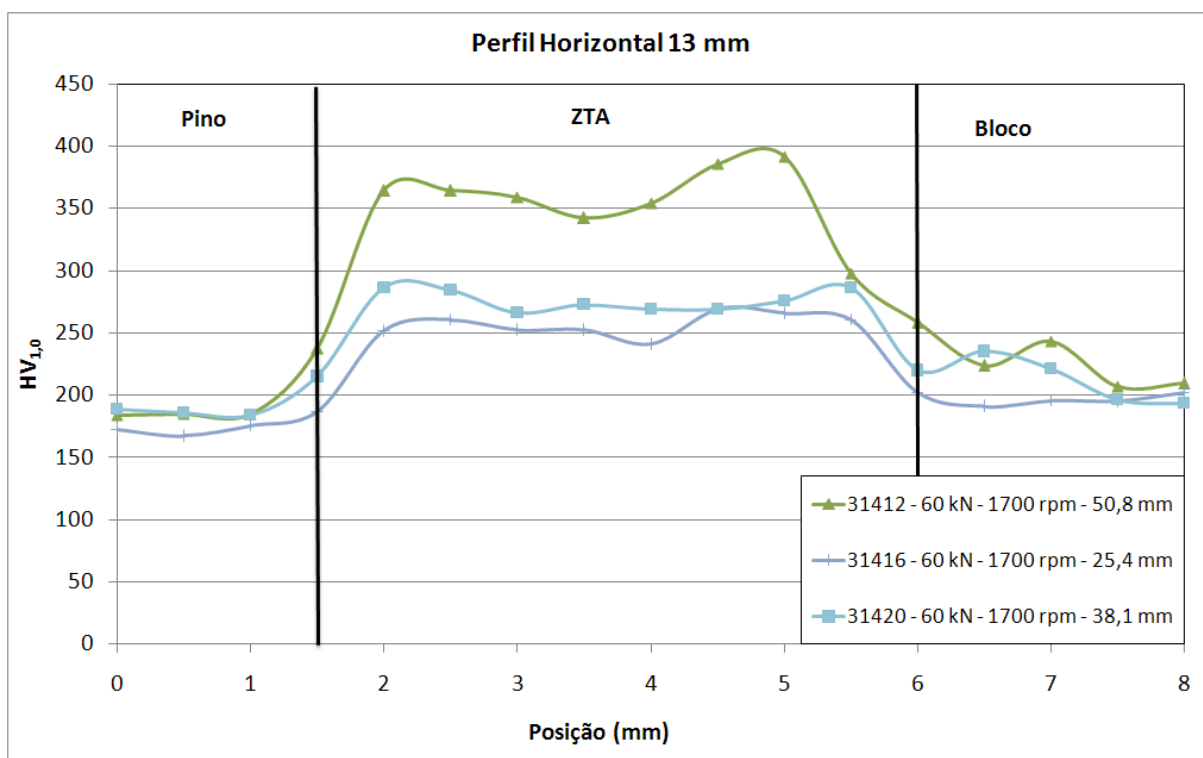


Figura 4.67 – Comparativo dos perfis de dureza horizontais a 13 mm. Força 60 kN, Rotação 1700 rpm. Amostras 31416, 25,4 mm, 31420, 38,1mm e 31412, 50,8 mm.

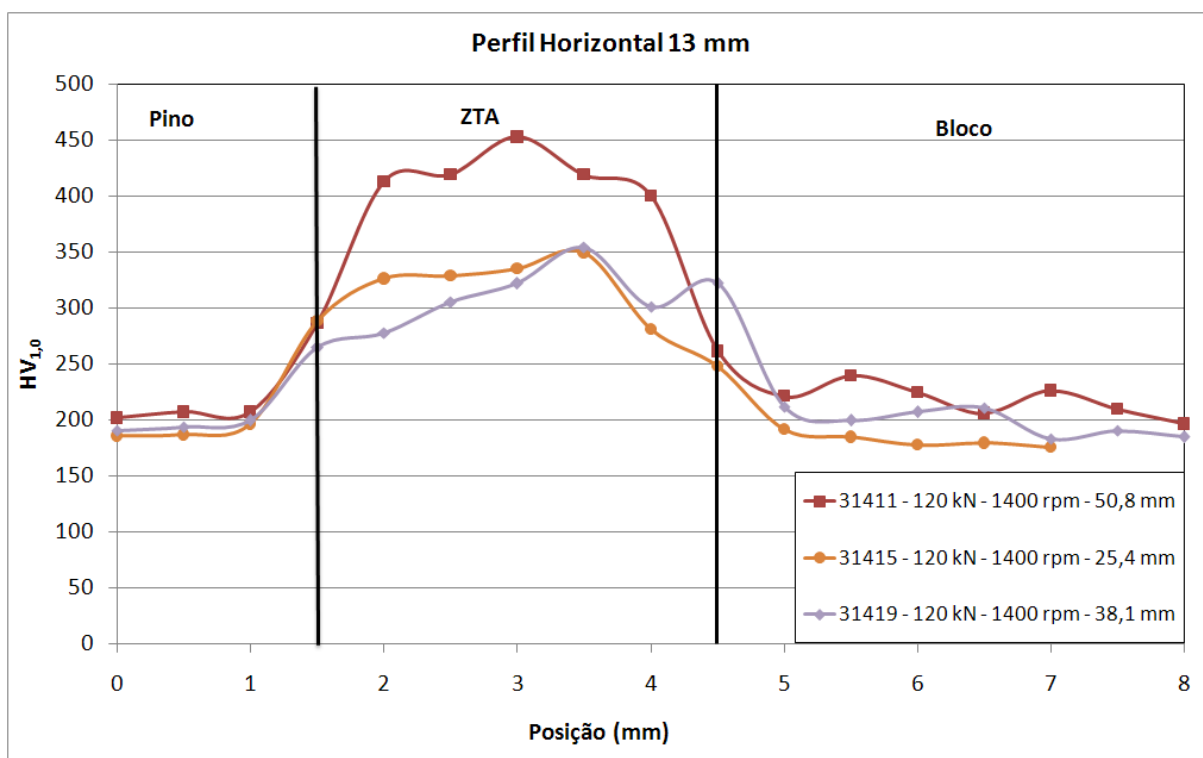


Figura 4.68 – Comparativo dos perfis de dureza horizontais a 13 mm. Força 120 kN, Rotação 1400 rpm. Amostras 31415, 25,4 mm; 31419, 38,1mm e 31411, 50,8 mm.

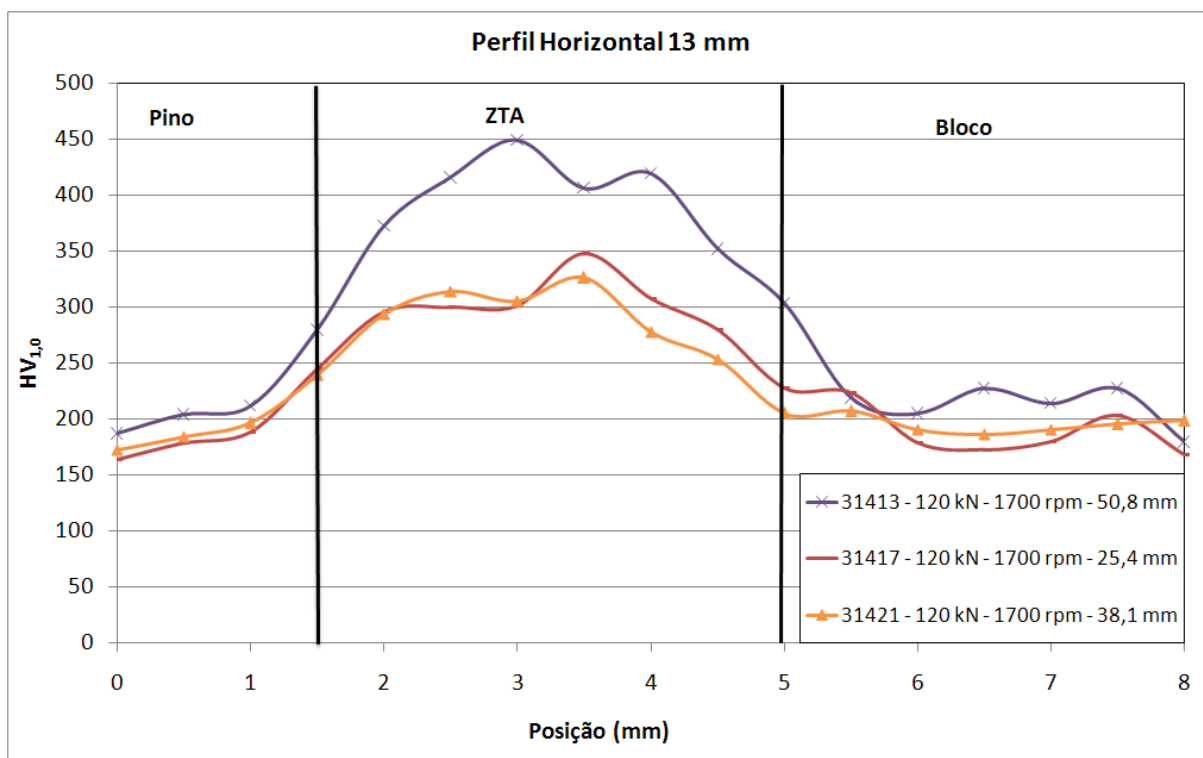


Figura 4.69 – Comparativo dos perfis de dureza horizontais a 13 mm. Força 120 kN, Rotação 1700 rpm. Amostras 31417, 25,4 mm; 31421, 38,1 mm e 31413, 50,8 mm.

Analisando os gráficos de dureza, observou-se que nos perfis verticais a maior dureza foi registrada nos corpos de prova com a menor espessura (25,4 mm). Para os perfis horizontais de 5 mm e 13 mm, a maior dureza foi encontrada nos corpos de prova com maior espessura (50,8 mm). Por causa disso decidiu-se fazer uma análise de composição química ao longo da espessura da chapa de aço utilizada na confecção dos blocos. Com essa nova análise de composição feita pelo CENPES – PETROBRAS constatou-se que a composição química do material não era homogênea ao longo da espessura da peça, como mostrado na tabela 4.1. Os pontos analisados foram parte superior, meio e parte inferior da secção transversal da chapa.

Tabela 4.1 – Composição química da chapa de 50,8 mm – ASTM A36 (% em peso).

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
Superior	0,196	0,324	0,950	0,018	0,016	0,005	0,015	0,538	0,171
Meio	0,146	0,232	0,946	0,041	0,015	0,265	0,000	0,091	0,032
Inferior	0,189	0,308	0,931	0,017	0,017	0,023	0,013	0,501	0,156

Ocorre, nesse caso, uma maior concentração de elementos de liga nas superfícies da chapa e conseqüentemente uma menor concentração de elementos de liga no meio da chapa, fazendo com que o carbono equivalente do material seja maior nas extremidades do que no meio do bloco.

O carbono equivalente foi calculado utilizando-se a Eq. (4.3).

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Cu}{13} \quad (4.3)$$

Essa fórmula é válida quando os teores estão dentro das faixas: - %C <0,50; %Mn < 1,60; %Ni < 3,50; %Mo < 0,60; %Cr < 1,00; %Cu < 1,00, de acordo com FORTES (2004).

Como a composição química da chapa está dentro dessas faixas, foram calculados os carbonos equivalentes (C_{eq}) para as composições químicas da parte superior, parte do meio e da parte inferior, apresentando os seguintes resultados:

- Parte Superior - $C_{eq} = 0,51$
- Parte do Meio- $C_{eq} = 0,35$
- Parte Inferior- $C_{eq} = 0,49$

Foram feitos também, um perfil vertical de dureza, ao longo da espessura na chapa de 50,8 mm e as micrografias correspondentes às partes superior, meio e inferior, no mesmo local onde foi feito esse perfil de dureza (Figura 4.70), numa região não afetada pelo calor, onde se podem verificar as variações da dureza e da micrografia.

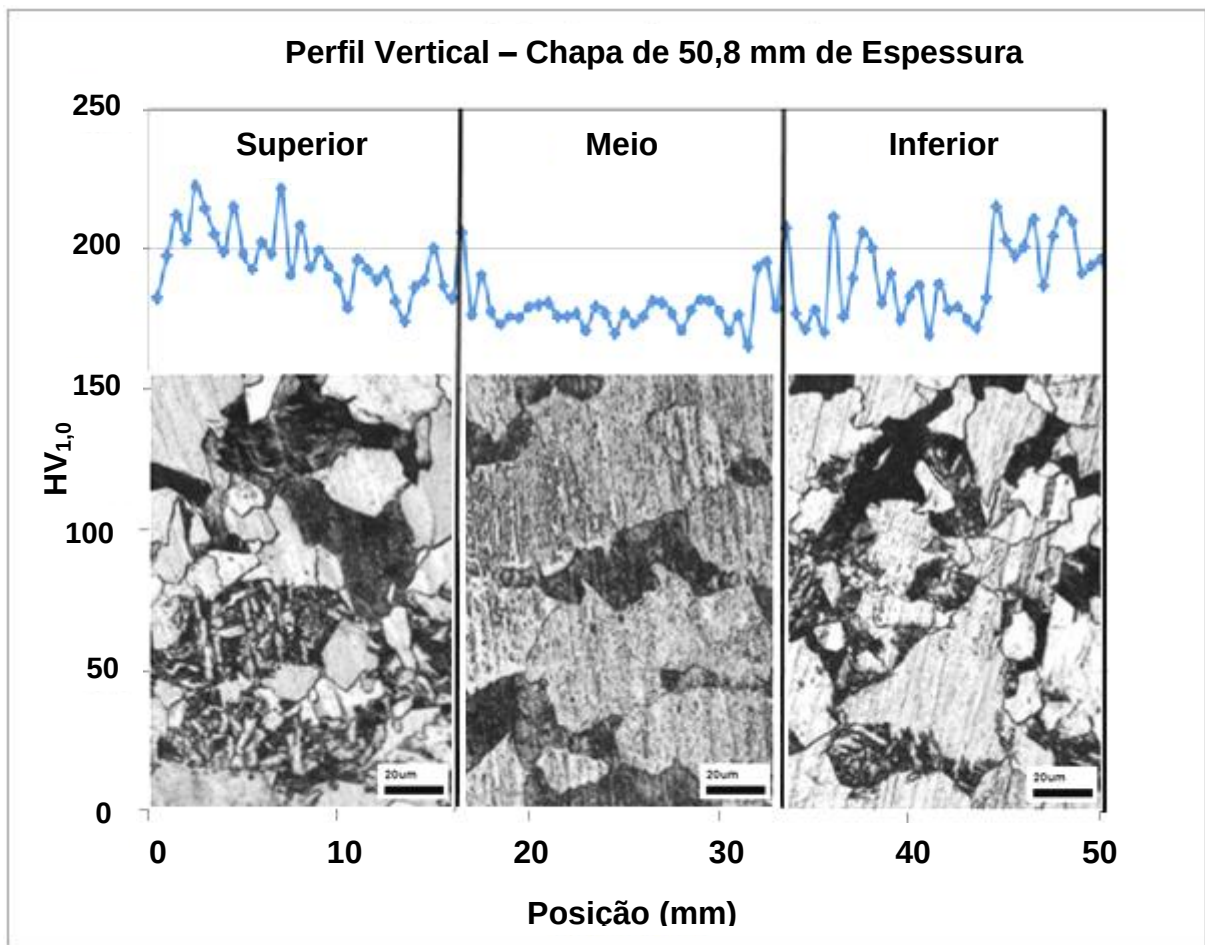


Figura 4.70 – Perfil vertical chapa 50,8 mm de espessura.

Nota-se que nesse caso, sem o efeito do aquecimento e do resfriamento, a dureza é mais elevada nas extremidades da chapa, por causa do carbono equivalente mais alto.

A Figura 4.71 mostra posições relativas de composição química e também dos furos cônicos.

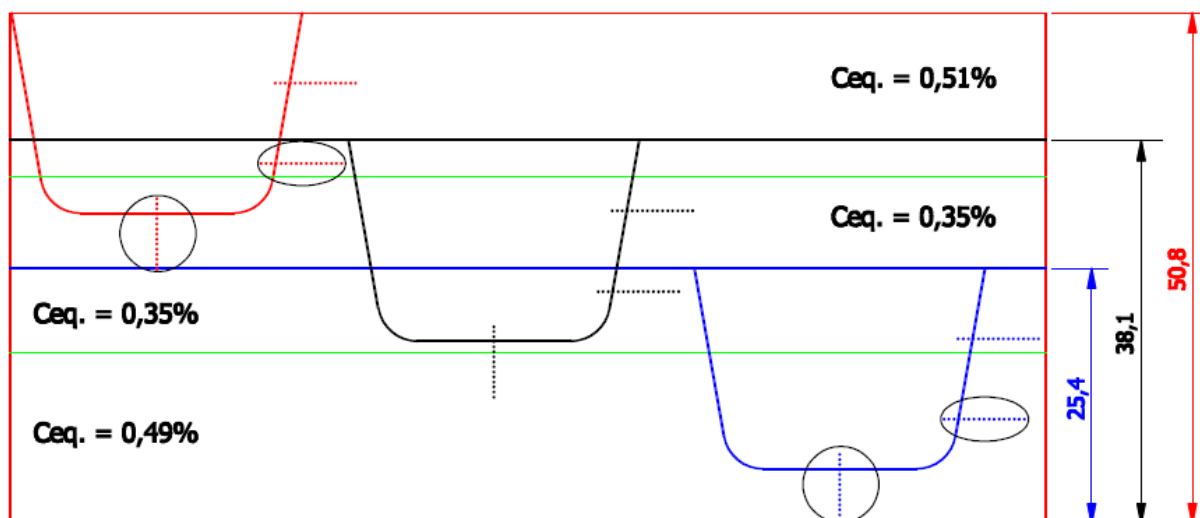


Figura 4.71 – Posicionamento dos blocos em relação ao carbono equivalente.

Considerando que todos os corpos de prova foram produzidos a partir da chapa de 50,8 mm de espessura, com desbaste através de plaina e fresadora para se atingir as espessuras de 38,1 e 25,4 mm, os furos cônicos apresentaram variações de composição química como mostrado na Figura 4.71.

A dureza de um material está relacionada à sua composição química e pode ser influenciada pela temperatura de aquecimento, tempo de permanência nessa temperatura e velocidade de resfriamento (REED-HILL, 1973).

Na Figura 4.71 pode se verificar como a porcentagem de carbono equivalente variou ao longo do bloco de 50,8 mm e o posicionamento dos blocos de 25,4 e 38,1 mm em relação a esse carbono equivalente.

Algumas constatações foram feitas, por exemplo, na posição vertical, os blocos de 25,4 mm de espessura apresentaram máximos de dureza maiores do que os máximos de dureza dos blocos de 38,1 e 50,8 mm de espessura como mostrado nas Figuras 4.58 a 4.61.

Os blocos de 25,4 mm de espessura apresentaram menores velocidades de resfriamento e apesar disso apresentaram máximos de dureza maiores por causa do maior teor de carbono equivalente.

Para a posição horizontal 5 mm o carbono equivalente dos blocos de 25,4 mm e 50,8 mm tem valores próximos. Mas, como o bloco de 50,8 mm de espessura tem um maior volume de material, houve então uma transmissão de calor por condução mais acentuada no bloco de 50,8 mm, o que influenciou na dureza mais elevada do

material com espessura maior. Evidenciando neste caso a influência da espessura como mostrado pelos perfis de dureza nas Figuras 4.62 a 4.65.

Para os perfis de dureza horizontais a 13 mm, o máximo de dureza foi registrado para os blocos com espessura maior (50,8 mm), onde houve uma combinação entre composição química e velocidade de resfriamento como mostrado pelos perfis de dureza nas figuras 4.66 a 4.69.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo verificar a influência da espessura da chapa, na qualidade de reparos por atrito. A análise dos resultados permitiu concluir que:

1. Não foram observadas falhas de preenchimento em nenhuma das amostras ensaiadas, indicando que os parâmetros de ensaio definidos foram corretos.
2. Os tamanhos das ZTAs foram influenciados pelos aportes térmicos gerados.
3. As ZTAs são mais estreitas nas posições diagonais, o que evidencia o menor aporte térmico nessas regiões.
4. As análises micrográficas mostram que para os ensaios com forças axiais mais altas, ocorreu um maior refino dos grãos e para ensaios realizados com os mesmos parâmetros, mas com espessuras diferentes, mostraram que com uma maior espessura houve também um maior refino dos grãos.
5. A chapa de onde foram retirados os corpos de prova apresentou significativa variação de composição química ao longo da espessura.
6. As chapas mais espessas apresentaram maiores velocidades de resfriamento e comparando as durezas das mesmas com as durezas das chapas de menor espessura, verificou-se que nas posições em que apresentaram carbonos equivalentes próximos, houve marcante influência da espessura, ocorrendo maiores durezas para as chapas mais espessas.
7. A máxima temperatura medida durante os ensaios foi 1038 °C, sugerindo que o processo ocorre no estado sólido.
8. A aplicação de forças maiores mostrou-se mais vantajosa, pois são menores o tempo de processamento, a temperatura e a energia de soldagem.
9. O processo é muito rápido, os maiores tempos de processamento estão em torno de 23 segundos e a qualidade da solda é muito boa.
10. Os resultados mostram que o objetivo central do trabalho foi alcançado, ou seja, ficou demonstrado que há o efeito da espessura da chapa sobre a qualidade do reparo por atrito.

CAPÍTULO 6

TRABALHOS FUTUROS

Abaixo estão listadas algumas sugestões para possíveis trabalhos:

- Continuação dos ensaios com cargas mais elevadas;
- Investigar ainda mais os efeitos da temperatura nos ensaios, utilizando um número maior de termopares;
- Fazer furos para inserção dos termopares utilizando o processo de eletroerosão, para um controle maior da profundidade e da qualidade do fundo do furo;
- Realizações de ensaios de dobramento e de tração nos corpos de prova;
- Trabalhar com materiais com teor de carbono mais elevado, microligados e composição química mais homogênea;
- Estudo sobre viabilidade de construção de máquina com acionamento por inércia;
- Estudo sobre aplicação industrial do processo de reparo por atrito.
- Comparar o aporte térmico de cada ensaio através do cálculo dos volumes das ZTAs.
- Realizar cálculo inverso da temperatura, partindo das temperaturas dos termopares até a interface entre pino e bloco.
- Mudar posicionamento dos furos para inserção dos termopares, mantendo T0 e T2 de um lado e deslocando T1 e T3 para o lado oposto, isso para interferir o mínimo possível na dissipação do calor gerado durante o processamento de pinos por atrito.
- Fazer ensaios de dureza nas mesmas posições das micrografias, ou seja, vertical, diagonal e horizontal.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASM - AMERICAN SOCIETY OF METALS. **Welding Handbook**. v. 6. 1993.

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

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

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

BLAKEMORE, G. R. Friction Welding, Technology for the New Millennium. In: **OFFSHORE CONFERENCE**, May. 1999, Houston, Texas.

CAIXETA, L. A. “**Otimização de parâmetros de processamento de pinos por atrito em unidade com capacidade de 245 kN**”, em dissertação de mestrado para o programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

CROSSLAND, B. Friction Welding - Recommended Practices for Friction Welding. In **Contemporary Physics**, v. 12, n. 6, p 559-574, 1971.

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

2009 FPE &GatwickFusion. Disponível em:

<<http://www.fpe.co.uk/process/friction-welding>>. Acesso em: 30 Jul. 2012.

Fortes, Cleber. **Metalurgia da Soldagem.** ESAB BR, 2004

FRANCO, Neide Bertoldi. **Cálculo numérico.** São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2006. p. 326 – 345.

HWANG, H. F., “**Desenvolvimento, Projeto, Construção e Teste de um Cilindro de Reparo por Atrito Portátil**”. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

KREITH, Frank. **Princípios da transmissão de calor.** São Paulo. Edgard Blücher, 1965. p. 1 – 19.

LEBEDEV, V. K.; CHERNENKO, I. A. **Friction Welding.** Sov. Tech. Ver., 1992. v.4. p. 59 –168.

MAREGA, B. B. “**Instrumentação, controle e operacionalização de uma unidade de reparo por atrito com capacidade de carga axial de 500 kN**”, em dissertação de mestrado para o programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

MARQUES, P.V. **Tecnologia da soldagem:** Belo Horizonte: ESAB, 1991. p. 17 – 28, p. 301 - 314.

MEYER, A., **Friction Hydro Pillar Processing – Bonding Mechanism and Properties**, Dissertationan der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2003.

MOURA, R. F. **Estudo da Energia Dissipada em Ensaios de Reparo por Atrito.** 2011. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

NICHOLAS, E. D. **Underwater Friction Welding for Electrical Coupling of Sacrificial Anodes**. In: 16th ANNUAL OTC. Houston, Texas, May 7-9, 1984.

NIXON, J. **Effects of Water Depth on Friction Stud Welding Parameters**. School of Welding and Joining Technology, Cranfield, Cranfield University, England, 1986.

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

PINHEIRO, G. A.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V.; MEYER, A.; DOS SANTOS, J. F.; BLAKEMORE, G. R., **Costura por Fricção: Fundamentos e Aplicações**. 1º Cobef, abr. 2001.

PINHEIRO, G. A., **Local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanisms and Assessment of Joint Properties**, Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2008.

PIRES, R. R. **Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito**. 2007. 136 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

REED-HILL, R. E. **Physical Metallurgy Principles**. 2. ed. USA: D. Van Nostrand Company, 1973, p. 517-597.

SOUZA, R. J. **“Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito”**. 2006. 42 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

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

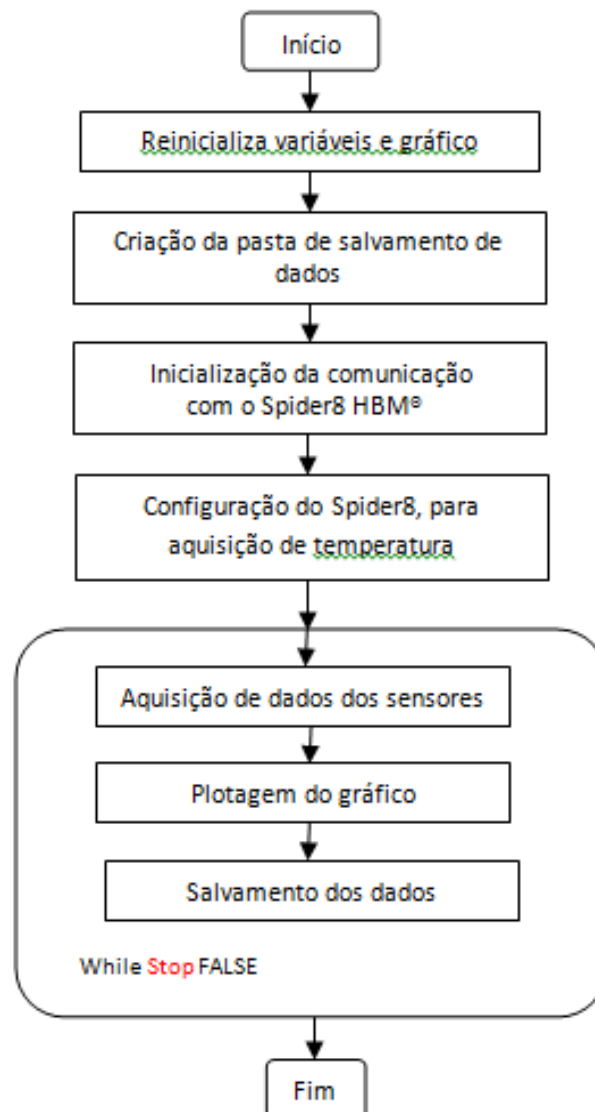
VILL, V. I. **Friction Welding of Metals**. ed. I.P. Baykova. 1962, New York: American Welding Society, Inc.

ANEXOS

São apresentados aqui o fluxograma do programa de aquisição e monitoramento de temperatura – Anexo I e o esquema elétrico do dispositivo de solda capacitiva – Anexo II.

ANEXO I

Fluxograma do Programa de Aquisição e Monitoramento de Temperatura.



ANEXO II

Esquema Elétrico do Dispositivo de Solda Capacitiva.

