

A Tabela 3.1 resume a capacidade operacional do equipamento em termos de seus valores máximos.

Tabela 3.1: Capacidade máxima operacional da unidade de processamento por atrito.

Força Normal	50 kN
Força Tangencial	10 kN
Velocidade de Rotação	8.000 rpm
Torque Nominal (limitado pelo acoplamento)	45 N.m
Deslocamento do Eixo	45 mm

A unidade hidráulica de potência, Figura 3.4, é composta por três conjuntos moto-bomba, um bloco de válvulas e um reservatório de óleo com capacidade para armazenamento de 400 litros.

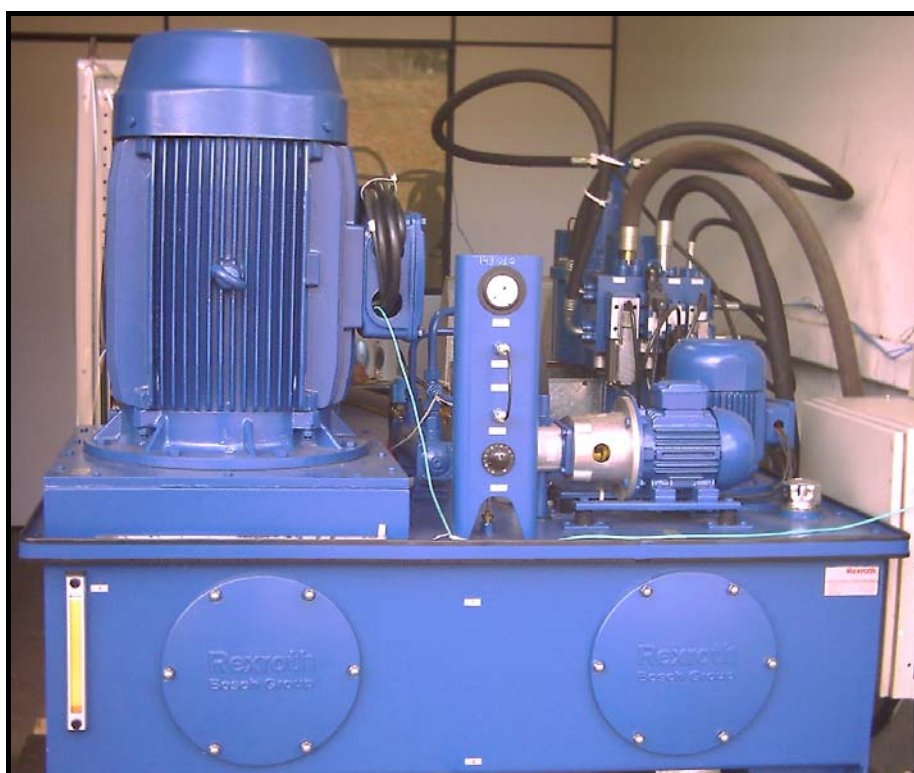


Figura 3.4: Unidade hidráulica de potência.

Um conjunto moto-bomba, com potência de 0,75 kW (1 CV), é destinado à filtragem e recirculação do óleo. Um segundo conjunto, com potência de 1,5 kW (2 CV), é utilizado no fornecimento de óleo à haste hidráulica, permitindo assim, uma velocidade de deslocamento da haste de até 11 mm/s. O terceiro e último conjunto moto-bomba, o qual apresenta uma

potência de 75 kW (100 CV), é responsável pelo acionamento do motor hidráulico. A vazão de trabalho pode atingir até 99 litros/min e pressão máxima da ordem de 35 MPa, garantindo-se, deste modo, um torque máximo no motor hidráulico de 57 N.m.

O bloco de válvulas é responsável pelo controle lógico de pressão e vazão do fluido provido da unidade hidráulica, sendo composto por seis válvulas, das quais três destinam-se ao controle da haste hidráulica, e três para o controle do motor hidráulico.

3.1.2 Sistema de Controle do Processo de Reparo de Trincas

3.1.2.1 Instrumentação do Sistema de Controle

A automatização do processo, obtida via implementação de um sistema de controle para a UPPA, permite a fácil e segura operação do equipamento. Além do mais, possibilita a execução de reparos afastados da unidade de comando, e onde o acesso fica restrito apenas à cabeça de reparo (áreas submersas e a elevadas profundidades).

Visando um baixo tempo de resposta do sistema de controle, o mesmo é realizado via “hardware” utilizando-se para isto cartões analógicos com algoritmo de controle PID (Proporcional Integral Derivativo) (SOUZA, 2006).

A Figura 3.5 ilustra o fluxo de informações dos sinais do processo e auxilia na compreensão da lógica instrumental. Todos os sinais (força axial, velocidade de rotação, torque e comprimento de queima) foram adquiridos com um taxa de 145 Hz.

É importante destacar que o procedimento de reparo é controlado pelo deslocamento do pino de queima, ou seja, pelo comprimento de queima. Tanto o cartão de controle PID da velocidade de rotação, como o da força axial, recebem o sinal provindo do sensor de posição. É a partir do processamento deste sinal, que os cartões PID irão atuar no bloco de válvulas, mais precisamente, nas válvulas direcional proporcional. Tal ação indicará uma possível mudança no estágio de reparo (alteração da força e ou rotação, previamente informado pelo operador) em função do deslocamento, e mesmo o fim do processo.

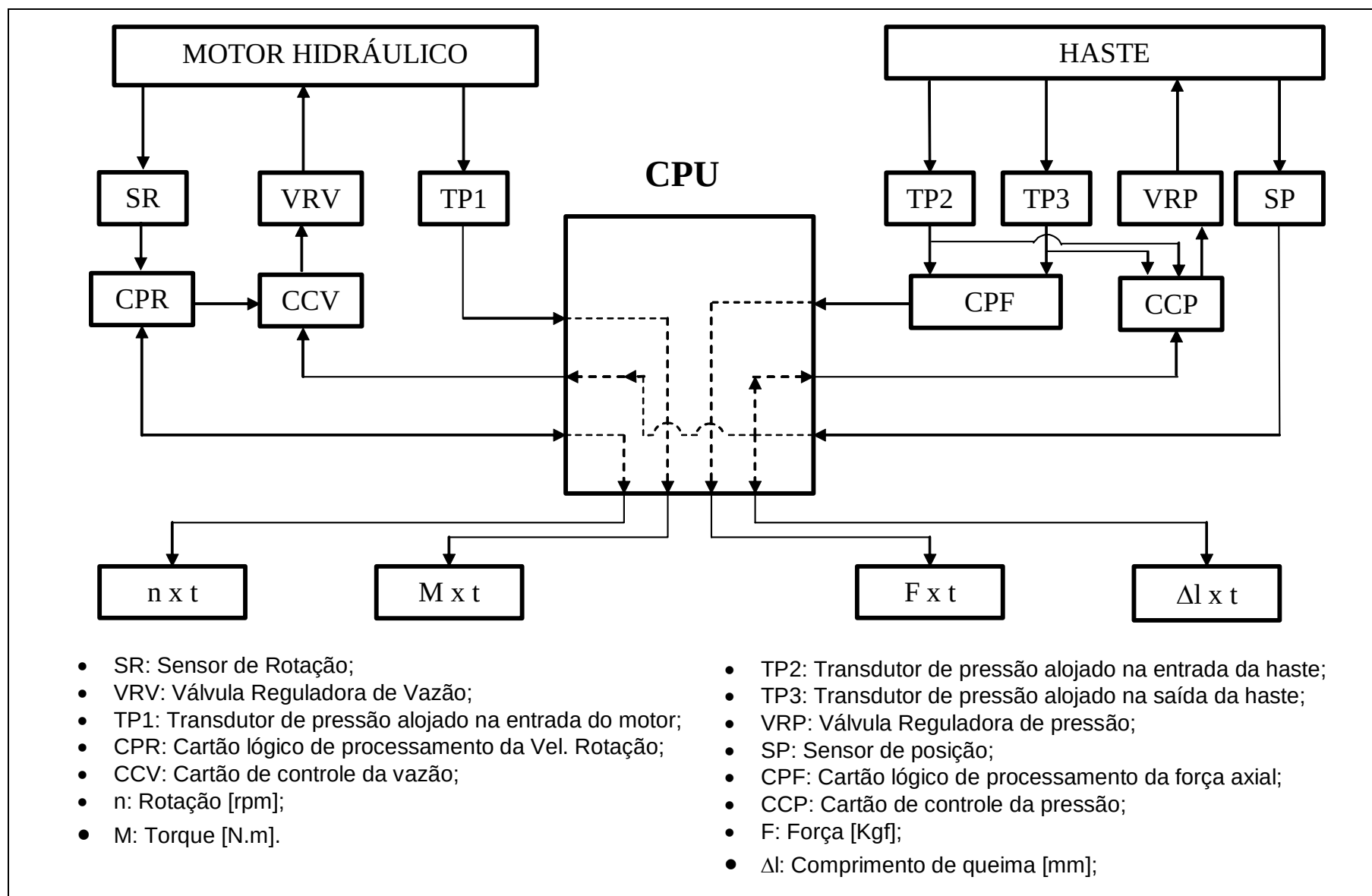


Figura 3.5: Fluxo de informações dos sinais analógicos de controle e monitoração das variáveis do processo de reparo de trinca.

3.1.2.2 Programa de Controle do Processo de Reparo

O algoritmo do programa de controle do processo de reparo por atrito foi implementado em linguagem Labview 6.0[®], sendo esta fase, de programação e otimização do programa desenvolvida ao longo do trabalho de Souza (2006). No presente trabalho foram executadas ainda, pequenas implementações à versão final do programa, visando-se assim, o seu constante aperfeiçoamento e melhor adequação às necessidades operacionais do processo.

O *software* possui uma interface gráfica (Figura 3.6) funcional e de fácil operação, viabilizando a rápida alimentação do programa com os dados de entrada necessários para o controle e execução do processo.

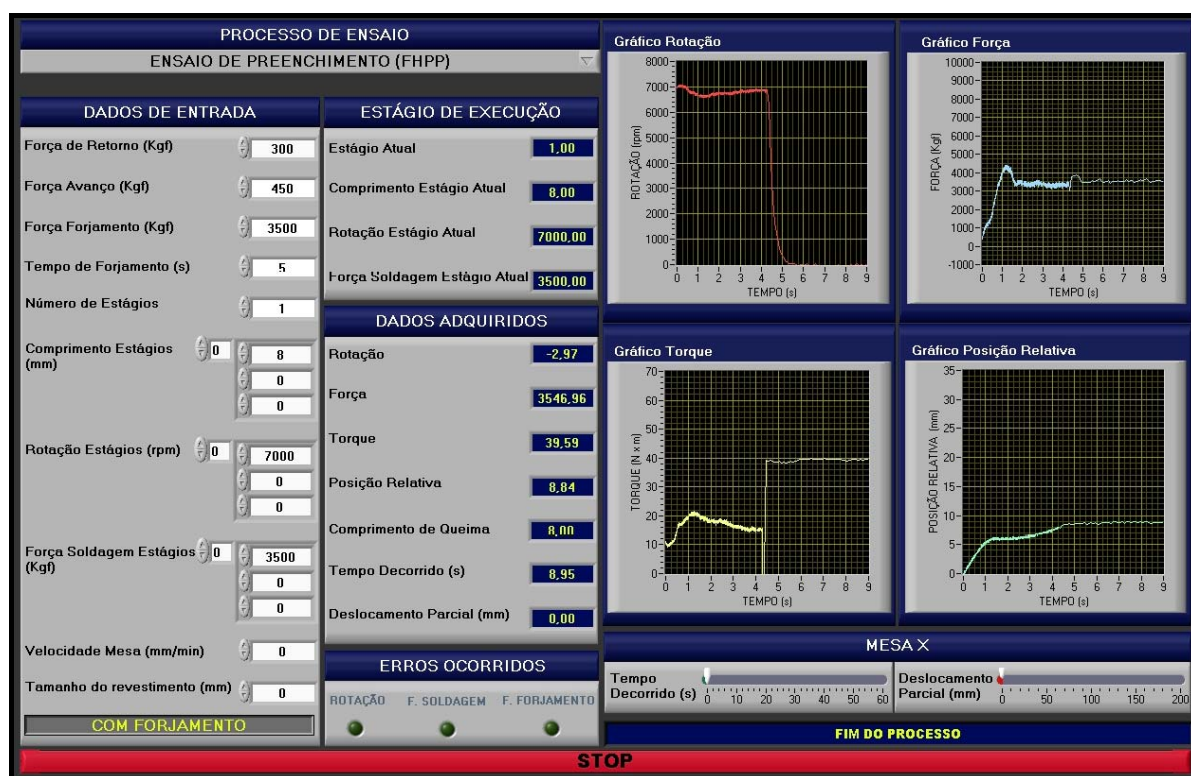


Figura 3.6: Interface gráfica de comunicação do *software* de controle.

O processo de reparo pode ser realizado tanto em estágio único, quanto em mais de um. Deste modo, pode-se variar os parâmetros de força axial e velocidade de rotação ao longo do preenchimento. No caso de optar-se por mais de um estágio, os valores das variáveis (força axial, velocidade de rotação e comprimento de queima) são previamente informados e, a alternância é realizada via controle do comprimento de queima, ou seja, cada estágio ocorre dentro de um intervalo de deslocamento do pino, pré-determinado.

Tem-se ainda, como opção do processo, a realização do mesmo com o sem a aplicação da força de forjamento. Esta força pode ser similar ou diferente da que foi empregada ao longo do preenchimento, e o tempo de aplicação desta, fica a critério do operador.

Além de permitir o controle do processo de preenchimento (reparo de trincas), o programa possibilita também, a automação do procedimento de revestimento por atrito (*"friction surfacing"*). Neste caso, além de se ter o movimento de rotação e translação vertical do pino, há o deslocamento uniaxial da mesa, possibilitando-se, assim, ao final do processo, a deposição de material do consumível (pino) sobre a superfície a ser recoberta.

O programa de controle disponibiliza em tempo real o comportamento da força axial, da rotação, do torque e do comprimento de queima, todos em função do tempo. Essas funções são plotadas em janelas discretas na interface gráfica do software. Contudo, essas informações geradas são armazenadas, e podem ser exportadas em formato matricial para análises futuras mais detalhadas.

O sistema conta ainda com uma opção de segurança, que interrompe o processo, caso o valor de alguma variável desvie repentinamente do seu valor de referência. O programa permite também, que o próprio operador possa encerrar o processo a qualquer momento, caso esse verifique algum problema ou falha do sistema.

3.2 - Materiais Ensaitados

Para a execução de todos os ensaios laboratoriais, relatados neste trabalho, não houve variação dos materiais empregados, tanto para a usinagem dos pinos (consumível) quanto dos blocos de reparo. Como mencionado no Capítulo 2, a natureza do material é considerada uma variável relevante no processo de soldagem por atrito e, certamente, ela tem influência na determinação dos parâmetros geométricos, bem como na escolha da força axial e velocidade de rotação, impostas na execução do reparo. Desta forma, preferiu-se neste trabalho, manter este fator constante, ficando assim, evidente, que o domínio de operação otimizado dos parâmetros avaliados está restrito aos materiais trabalhados. A extensão destes parâmetros ótimos, para demais materiais, fica submetida a análises e estudos prévios, para que se possam obter reparos com propriedades adequadas e livres de defeitos.

Para a execução dos pinos, foi utilizado o aço carbono ABNT 1010, o qual foi fornecido em barras cilíndricas de 2 m de comprimento e 19 mm (3/4 in) de diâmetro. Já, na

confeção dos blocos de reparo, foi empregado o aço ASTM A36, tendo como matéria-prima chapas laminadas de 2 m de comprimento, 1 m de largura e 25,4 mm de espessura.

A composição química destes materiais é apresentada na Tabela 3.2, sendo determinada via técnica de espectrometria de emissão ótica, realizada pela PETROBRAS, em seu Centro de Pesquisas (CENPES).

Tabela 3.2: Composição química dos materiais utilizados (% em peso).

Elementos	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	S	P
Substrato ASTM A36	0,13	0,94	0,02	0,01	0,01	0,19	0,008	0,014
Pino ABNT 1010	0,12	0,69	0,03	0,01	0,00	0,16	0,027	0,044

A motivação para o emprego destes aços neste projeto é intrínseca às necessidades da Petrobras. Dentre a grande diversidade de materiais metálicos à disposição da indústria petrolífera, um dos mais usuais, empregados na construção de estruturas marítimas, embarcações e sistemas de redes dutoviários, são os aços estruturais de baixo carbono. O teor de carbono destes aços não ultrapassa 0,2% e apresentam grande ductilidade (<http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/acos_estruturais.asp>). Deve-se salientar ainda, para o emprego na indústria “offshore”, os aços estruturais de média e alta resistência mecânica, devido à sua apreciável resistência, ductilidade e outras propriedades, as quais são adequadas para a utilização em elementos sujeitos aos mais variados tipos carregamentos.

Dentre os aços estruturais existentes atualmente, um dos mais utilizados e conhecidos é o ASTM A36, que é classificado como um aço carbono de média resistência mecânica, ver Tabela 3.3. Sua composição química varia em torno de: 0,29% máximo de C, 0,8 a 1,2% Mn, 0,15 a 0,3% Si, 0,2% Cu e 0,04% máximo de P e S, (ASM, 1978), estando os percentuais obtidos na Tabela 3.2. dentro da faixa destes valores de concentração.

Tabela 3.3. Classificação dos aços estruturais em função do limite de escoamento, (<http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/acos_estruturais.asp>).

Tipo	Limite de Escoamento Mínimo, [MPa]
Aço carbono de média resistência	195 a 259
Aço de alta resistência e baixa liga	290 a 345
Aços ligados tratados termicamente	630 a 700

A microestrutura do aço carbono ABNT 1010 e ASTM A36 é composta pelos constituintes ferrita e perlita (Figura 3.7 e 3.8). O aço para a confecção dos blocos de reparo apresenta sua microestrutura texturizada, devido à presença de colônias de perlita bandeadas, característico de um aço fabricado via processo de laminação.

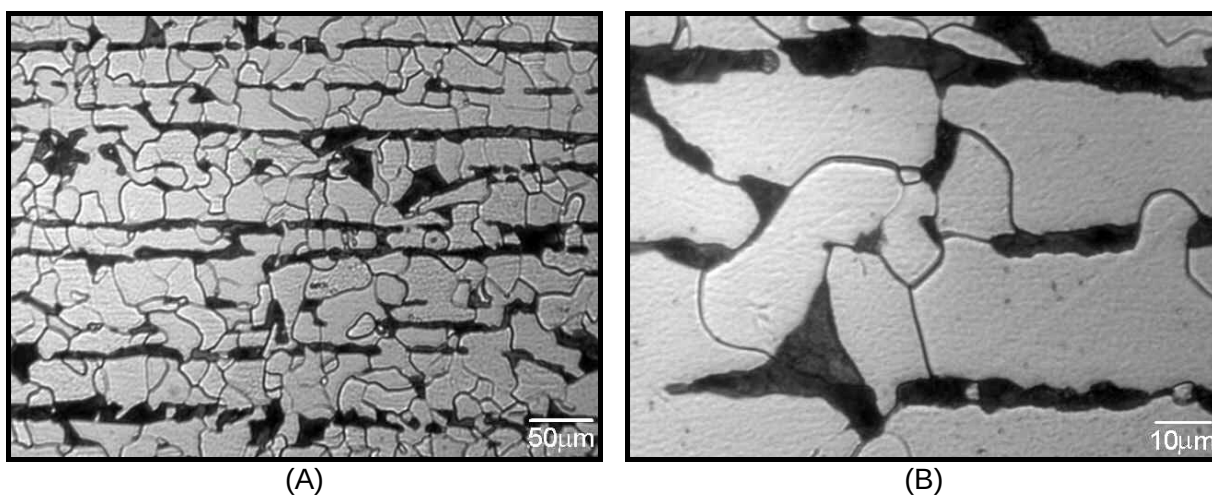


Figura 3.7: Fotomicrografias do aço carbono ASTM A36; (A) vista geral e (B) vista em detalhe (Nital 2%).

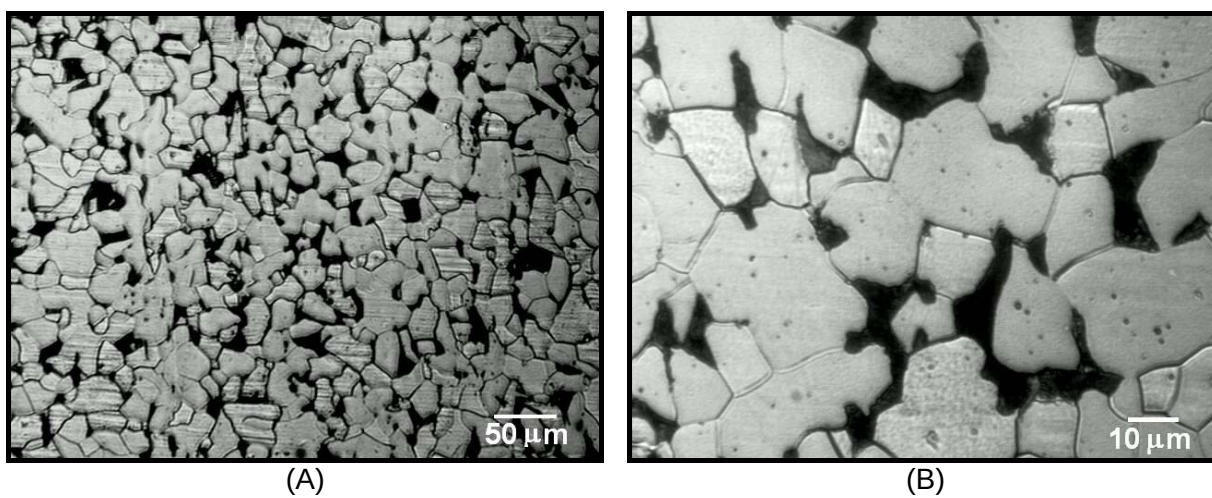


Figura 3.8: Fotomicrografias do aço carbono ABNT 1010; (A) vista geral e (B) vista em detalhe (Nital 2%).

3.3 - Ensaios de Preenchimento

3.3.1 - Ensaios Preliminares

Os ensaios realizados dentro deste tópico foram executados com o intuito de identificar os parâmetros mais relevantes do processo a serem investigados.

Esse procedimento auxiliou consistentemente na redução dos fatores (parâmetros) a serem introduzidos nos planejamentos experimentais posteriores, reduzindo-se assim, significativamente, a quantidade de ensaios dos mesmos.

Como parâmetros geométricos, foram avaliados dois pares (pino e bloco) de geometrias cônicas distintas (Figura 3.9).

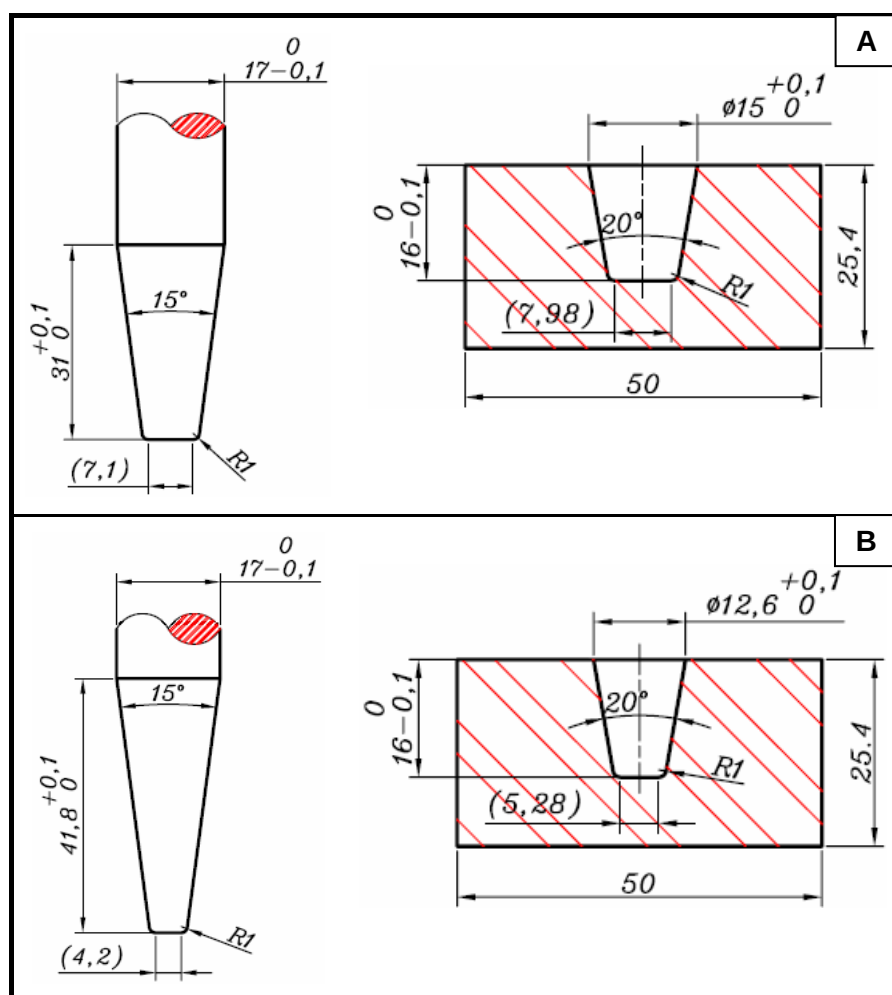


Figura 3.9: Geometria dos pinos e blocos utilizados nos ensaios preliminares: A) Pino e bloco da geometria 1; B) Pino e bloco da geometria 2.

Todos os blocos foram confeccionados em seções quadradas de 50x50 mm², com 25,4 mm de espessura. Os parâmetros geométricos, a saber: profundidade do furo, raio de

concordância no fundo do furo e ângulo do tronco de cone, foram mantidos constantes nas geometrias 1 e 2 dos blocos. Variando-se apenas os diâmetros superiores e inferiores do furo (Figura 3.9).

Com respeito às geometrias dos pinos, variou-se apenas o diâmetro inferior da ponta destes, permanecendo constantes os demais parâmetros.

Por se tratar de ensaios preliminares, os parâmetros de força axial, velocidade de rotação, comprimento de queima e força de forjamento, foram definidos ao longo dos ensaios, tendo em vista a evolução dos mesmos. O tempo de aplicação da força de forjamento foi de 5 s para todos os ensaios. A Tabela 3.4 expõe os parâmetros empregados ao longo dos ensaios denominados como preliminares.

Tabela 3.4: Parâmetros utilizados dentro da fase de ensaios preliminares.

Ensaio	Força Axial [kgf]	Velocidade de Rotação [rpm]	Comp. Queima [mm]	Geom.	Forjamento [kgf / 5 s]
1	1.500	5.000	8	1	1.500
2	2.000	5.000	8	1	2.000
3	2.500	5.000	8	1	2.500
4	3.000	5.000	8	1	3.000
5	3.500	6.000	8	1	3.500
6	3.500	7.000	8	1	3.500
7	1.500	5.000	8	2	1.500
8	1.500	5.000	6	2	1.500
9	2.000	5.000	6	2	2.000
10	2.500	5.000	6	2	2.500
11	3.000	5.000	6	2	3.000
12	3.500	5.000	6	2	3.500

As velocidades lineares obtidas na ponta inferior dos pinos (menor diâmetro) são apresentadas na Tabela 3.5. Estas velocidades foram calculadas com base nos parâmetros geométricos das geometrias 1 e 2, descritos na Figura 3.9 e nas rotações da Tabela 3.4.

Durante a execução de todos os ensaios, os mesmos tiveram seus respectivos gráficos de força axial, velocidade de rotação, comprimento de queima e torque, plotados em tempo real. Os arquivos gerados foram salvos para análises posteriores, e estudos criteriosos do desenvolvimento destas grandezas ao longo do tempo de cada ensaio.

Tabela 3.5: Velocidades lineares em função da rotação e da geometria da ponta dos pinos de processamento utilizados nos ensaios preliminares.

Velocidade Linear [m/s]			
Geometria	Rotação [rpm]		
	5.000	6.000	7.000
1	1,86	2,23	2,60
2	1,10	1,32	1,54

3.3.2. - Ensaios de Otimização de Parâmetros

Nesta etapa, foram realizados ensaios de preenchimento previamente planejados, visando-se assim, com base nos resultados obtidos nesta prática, a determinação de parâmetros ou uma faixa de operação otimizada destes. Permitindo-se assim, à execução de futuros reparos livres de defeitos, e com propriedades mecânicas favoráveis.

Os ensaios visando o seguimento de otimização foram divididos em duas fases, sendo a primeira, composta basicamente por uma matriz de ensaios mais ampla e constituída por ensaios realizados com apenas um ciclo. Já, a segunda etapa destes ensaios de otimização foi composta por uma matriz menor, em relação à primeira, sendo os preenchimentos realizados todos em dois ciclos de processamento.

3.3.2.1 - Primeira Fase: Planejamento Fatorial

Com base nos conhecimentos adquiridos dentro da realização dos ensaios preliminares, uma matriz de ensaios mais ampla foi construída, a fim de investigar de modo mais abrangente a influência dos parâmetros do processo no preenchimento. Deve-se pensar nesta fase analogamente a um procedimento inicial de afunilamento, cabendo à fase subsequente uma análise mais acurada e específica.

Dentro deste contexto, foram desenvolvidos cinco pares de geometrias cônicas distintas, denominadas como geometrias: A, B, C, D e E. Os parâmetros geométricos dos **pinos** de preenchimento estudados foram: ângulo do tronco de cone, diâmetro inferior e raio de concordância da ponta (Tabela 3.6).

Com respeito aos **blocos** das cinco geometrias, foi estudado o efeito da variação do ângulo do tronco de cone, variação dos diâmetros superiores e inferiores, e raio de concordância no fundo do furo. A Tabela 3.6 apresenta os valores adotados para cada um destes parâmetros, tanto para os blocos quanto para os pinos.

Tabela 3.6: Descrição dos parâmetros geométricos das geometrias utilizadas nos ensaios da primeira fase.

Geometria		ϕ_{superior} [mm]	ϕ_{inferior} [mm]	Ângulo do tronco de cone	Profundidade [mm]	Raio de concordância [mm]
A	Pino	18,0	8,2	15°	----	1,0
	Bloco	17,5	8,5	20°	16,0	2,0
B	Pino	18,0	4,2	15°	----	1,0
	Bloco	14,0	5,0	20°	16,0	2,0
C	Pino	18,0	8,1	19°	----	1,0
	Bloco	18,5	8,5	24°	16,0	2,0
D	Pino	18,0	0,74	15°	-----	3,0
	Bloco	12,6	1,92	20°	16,0	3,0
E	Pino	18,0	4,1	15°	----	3,0
	Bloco	15,8	5,1	20°	16,0	3,0

As Figuras 3.10 e 3.11 ilustram, respectivamente, os pinos e blocos dos cinco pares de geometrias descritos anteriormente.

Devido à relevância dos parâmetros geométricos, achou-se conveniente, antes da realização dos ensaios, ser executada a verificação dimensional de alguns parâmetros geométricos dos pinos e blocos usinados. Esta verificação ficou restrita aos diâmetros superiores e profundidade do furo nos blocos, e ao ângulo do tronco de cone e raio de concordância na ponta dos pinos. Para tanto, além da utilização de instrumentos de medição como paquímetro e goniômetro, foi utilizado um microscópio ferramenteiro para completar esta verificação. Demais parâmetros, como por exemplo, o raio de concordância do furo, não foram avaliados devido à necessidade de técnicas que necessitam de maior tempo para sua realização.

Além do efeito da geometria, foram selecionados mais dois parâmetros do processo a serem estudados, são eles: a força axial e a velocidade de rotação. Estes fatores foram analisados em dois níveis, tendo o nível superior sido determinado em função das limitações operacionais do equipamento (força axial de 5.000 kgf e rotação de 8.000 rpm). Foi acrescentado ainda, a este nível superior de operação, um limite de segurança, de modo a não operar o equipamento em suas condições limites de projeto, objetivando-se assim, a integridade do mesmo e a concretização dos trabalhos.

Os ensaios foram então realizados com forças axiais de 2.000 e 3.500 kgf, e velocidades de rotação de 4.000 e 7.000 rpm. A Tabela 3.7 apresenta o planejamento fatorial estabelecido, com os fatores força axial e velocidade de rotação a dois níveis, e o fator geometria a cinco níveis.

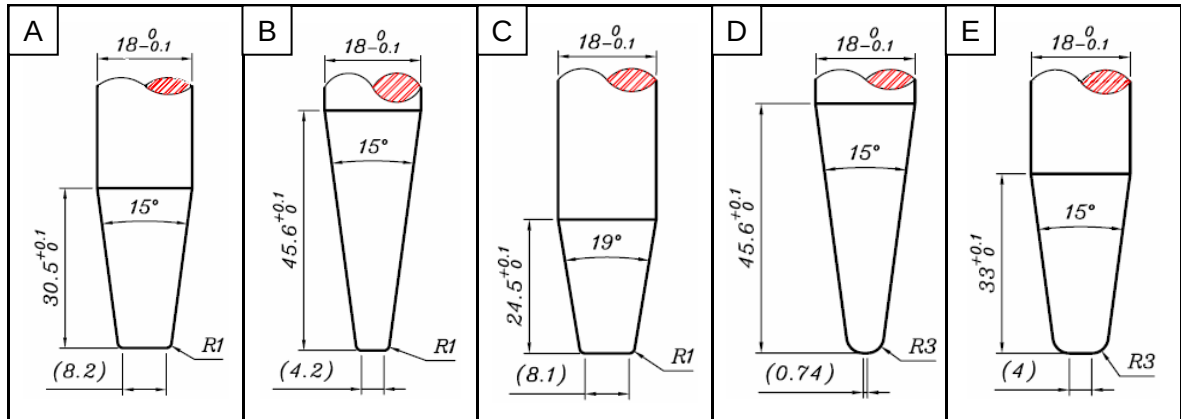


Figura 3.10: Pinos utilizados na primeira fase: A) Pino da geometria A; B) Pino da geometria B; C) Pino da geometria C; D) Pino da geometria D; E) Pino da geometria E.

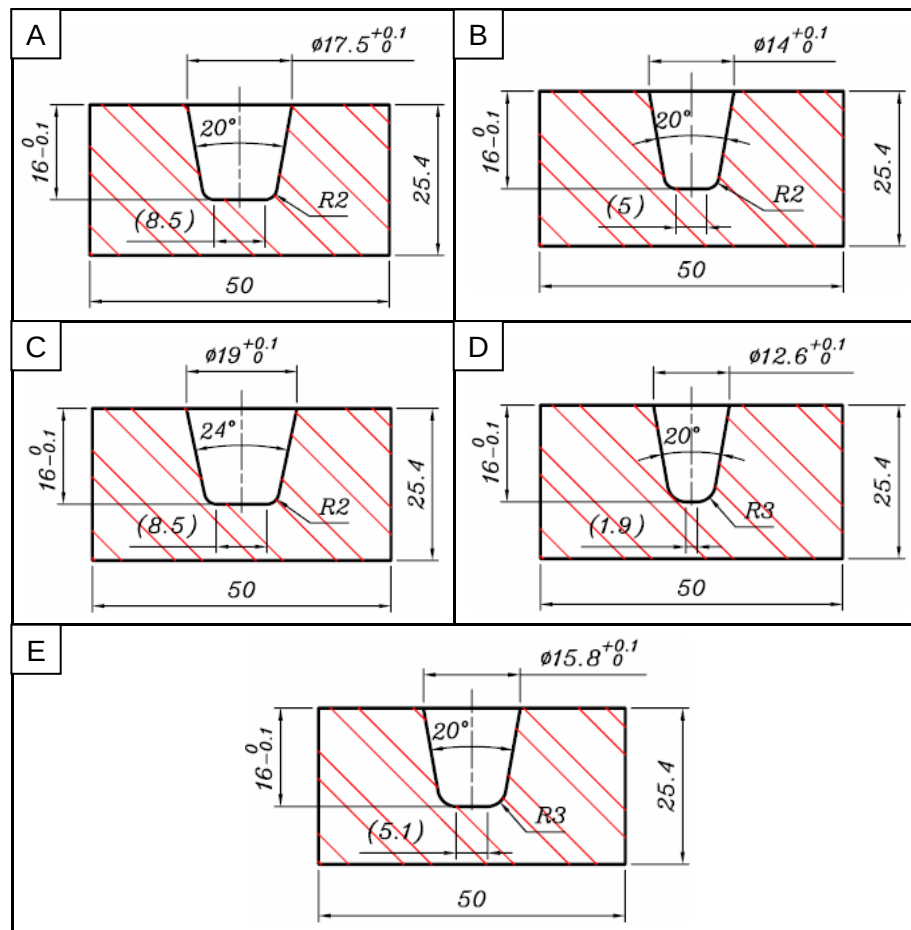


Figura 3.11: Blocos utilizados na primeira fase: A) Bloco da geometria A; B) Bloco da geometria B; C) Bloco da geometria C; D) Bloco da geometria D; E) Bloco da geometria E.

Tabela 3.7: Planejamento fatorial 2 x 2 x 5.

Nº do ensaio	1	2	3
1	-	-	A
2	+	-	A
3	-	+	A
4	+	+	A
5	-	-	B
6	+	-	B
7	-	+	B
8	+	+	B
9	-	-	C
10	+	-	C
11	-	+	C
12	+	+	C
13	-	-	D
14	+	-	D
15	-	+	D
16	+	+	D
17	-	-	E
18	+	-	E
19	-	+	E
20	+	+	E

Fatores	(-)	(+)
(1) Força axial [kgf]	2000	3500.
(2) Rotação [rpm]	4000	7000.
(3) Geometria: A, B, C, D e E.		

O comprimento de queima necessário para o completo preenchimento do furo, no bloco de reparo, é uma função de cada geometria. Os comprimentos de queima utilizados foram adotados visando uma deposição média, ao final do processo, de 15% a mais do volume total a ser preenchido de cada furo do bloco. Desta maneira, buscou-se reduzir a influência da utilização de comprimentos de queima distintos para cada geometria testada. Os comprimentos de queima e demais parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 3.8.

Com relação ao parâmetro força de forjamento, este foi empregado em todos os ensaios, sendo mantida a força utilizada ao longo do ensaio por um período de três segundos (Tabela 3.8).

Em relação à nomenclatura das amostras da Tabela 3.8, o primeiro número refere-se ao nível de força (2 para 2.000 kgf e 3 para 3.500 kgf). O segundo número refere-se à rotação (4 para 4.000 rpm e 7 para 7.000 rpm). Os últimos dois dígitos da nomenclatura referem-se à geometria, onde o número utilizado é apenas para controle das amostras.

Tabela 3.8: Descrição dos parâmetros utilizados nos eventos realizados na primeira fase.

Ensaio	Amostra	Força [kgf]	Rotação [rpm]	Comprimento de Queima [mm]	Geometria	Forjamento [kgf durante 3 s]
1	241A	2.000	4.000	7,0	A	2.000
2	374B	3.500	7.000	8,5	B	3.500
3	275C	2.000	7.000	7,0	C	2.000
4	273D	2.000	7.000	6,0	D	2.000
5	241E	2.000	4.000	5,0	E	2.000
6	342A	3.500	4.000	7,0	A	3.500
7	241B	2.000	4.000	8,5	B	2.000
8	374C	3.500	7.000	7,0	C	3.500
9	374D	3.500	7.000	6,0	D	3.500
10	374A	3.500	7.000	7,0	A	3.500
11	342E	3.500	4.000	5,0	E	3.500
12	342B	3.500	4.000	8,5	B	3.500
13	342C	3.500	4.000	7,0	C	3.500
14	342D	3.500	4.000	6,0	D	3.500
15	374E	3.500	7.000	5,0	E	3.500
16	273A	2.000	7.000	7,0	A	2.000
17	273B	2.000	7.000	8,5	B	2.000
18	241C	2.000	4.000	7,0	C	2.000
19	241D	2.000	4.000	6,0	D	2.000
20	273E	2.000	7.000	5,0	E	2.000
21	345A	3.500	4.000	7,0	A	3.500
22	345B	3.500	4.000	8,5	B	3.500
23	345D	3.500	4.000	6,0	D	3.500
24	345E	3.500	4.000	5,0	E	3.500

Com base nas rotações utilizadas na matriz de ensaios da Tabela 3.8 e com as geometrias dos pinos da Tabela 3.6 e/ou Figura 3.10, puderam ser calculadas as velocidades lineares alcançadas na extremidade inferiores destes pinos (Tabela 3.9). As velocidades lineares obtidas referem-se à velocidade alcançada no diâmetro inferior da ponta do pino, ou seja, a região plana que entra em contato inicialmente com a superfície do bloco. Devido à configuração cônica da ponta dos pinos, as velocidades lineares apresentadas na Tabela 3.9 não são constantes ao longo do ensaio, estas velocidades elevam-se, conforme o pino vai sendo processado.

Tabela 3.9: Velocidades lineares em função da rotação e da geometria da ponta dos pinos de processamento utilizados nos ensaios da primeira fase.

Velocidade Linear [m/s]		
Geometria do Pino	Rotação [rpm]	
	4.000	7.000
A	1,72	3,01
B	0,88	1,54
C	1,70	2,97
D	0,15	0,27
E	0,86	1,50

Mais uma vez, durante a realização de cada evento, foram gerados e armazenados para posterior análise, os gráficos referentes a cada ensaio. Preservaram-se assim, as informações relativas ao desenvolvimento da força axial, velocidade de rotação, torque e comprimento de queima, ao longo do tempo de ensaio.

3.3.2.2 - Segunda Fase: Ensaios com Dois Ciclos de Processamento

A segunda etapa de realização de ensaios de otimização foi composta por uma matriz de eventos com dois ciclos de processamento. Neste sentido, foram permutadas a força axial e/ou rotação ao longo do preenchimento, sendo a mudança de ciclo controlada pelo comprimento de queima do pino. Assim, ao se atingir o valor de deslocamento previamente estipulado teve-se início um novo ciclo de processamento.

Na matriz de eventos desta fase, o fator geometria não mais foi alterado, sendo este parâmetro já definido e qualificado na etapa anterior. Para os ensaios que se seguiram, foi adotado o uso permanente do par pino/bloco da geometria A (Tabela 3.6), devido à melhor qualidade da união obtida com esta geometria, e que será mostrado no Capítulo 4.

Concebeu-se então, a esta segunda fase, a realização de ensaios que viessem a corroborar ou não, com a viabilidade na execução de processamentos com dois ciclos, além de dar continuidade à avaliação dos parâmetros força axial e velocidade de rotação.

A matriz de ensaios desta segunda fase é apresentada na Tabela 3.10. Pode ser notado dessa tabela que, em geral, os eventos foram realizados de modo a ser executado

um preenchimento inicial com forças axiais mais moderadas no primeiro ciclo, sendo as mesmas elevadas no segundo ciclo.

Tabela 3.10: Descrição dos parâmetros utilizados nos preenchimentos realizados na segunda fase, com dois ciclos de processamento. Comprimento de queima de 3,0 mm / 7,5mm e forjamento de 3.500 kgf / 3 s.

Ensaio	Amostra	1º Ciclo		2º Ciclo	
		Força [kgf]	Rotação [rpm]	Força [kgf]	Rotação [rpm]
1	273711A	2.000	7.000	3.500	7.000
2	27342A	2.000	7.000	3.500	4.000
3	25359A	2.000	5.000	3.500	5.000
4	373510A	3.500	7.000	3.500	5.000
5	37345A	3.500	7.000	3.500	4.000
6	27366A	2.000	7.000	3.500	6.000
7	26367A	2.000	6.000	3.500	6.000
8	37368A	3.500	7.000	3.500	6.000

O comprimento de queima para o primeiro ciclo foi de 3,0 mm, e o segundo ciclo encerrado ao se atingir o deslocamento total de 7,5 mm. Como força de forjamento foi empregada a mesma carga aplicada ao longo do segundo ciclo (3.500 kgf / 3 s).

Novamente, os gráficos de cada ensaio foram salvos após sua realização para análises posteriores.

3.3.3 - Ensaio de Reparo por Costura “Stitch Welding”

Após a caracterização de reparos pelo processamento de pinos por atrito, e os trabalhos de otimização efetivados sobre os parâmetros mais influentes desta técnica, coube a este procedimento final, a realização de ensaios que venham a simular a prática do reparo de trincas. Esta técnica, denominada, costura por atrito “*friction stitch welding*”, consiste na execução de preenchimentos consecutivos e sobrepostos por uma dada distância, ao longo de uma trajetória (defeito ou falha, o qual se deseja reparar).

Os reparos por costura aqui realizados foram destinados à análise e caracterização detalhada da qualidade dos mesmos.

3.3.3.1 - Procedimento de Reparo

Com o intuito de minimizar os tempos gastos com procedimentos de usinagem, para a execução dos furos no bloco de reparo, e maximizar o número de preenchimentos possíveis de serem realizados subsequentemente, os blocos propostos ao reparo por costura foram fabricados em uma sequência especial.

Primeiramente, foram realizadas as aberturas de furos equidistantes ao longo de uma trajetória na superfície do bloco de reparo (Figuras 3.12 e 3.13 (1)), e, posteriormente, o preenchimento dos mesmos. Em seguida, após a remoção do material excedente dos pinos, foram então realizados novos furos, intercalados aos preenchimentos anteriores, para obter-se assim o preenchimento total do reparo (Figuras 3.12 e 3.13 (2)).

Como materiais utilizados, foi mantido o uso do aço carbono ABNT 1010 para confecção dos pinos e do aço ASTM A36 para os blocos.

Duas geometrias foram avaliadas, sendo que a primeira, apresentada na Figura 3.12, foi utilizada nos ensaios preliminares, não se preocupando com obtenção de reparos ótimos, mas sim de adquirir um primeiro contato com a técnica de reparo por costura. Neste reparo foram empregados uma força axial de 2.000 kgf, velocidade de rotação de 7.000 rpm, comprimento de queima de 7 mm e força de forjamento de 2.000 kgf por três segundos.

A segunda geometria de reparo testada (Figura 3.13) corresponde à mesma geometria A, designada anteriormente. Para este reparo foram realizados ensaios com dois ciclos de processamento, sendo aplicadas forças de 2.000 / 3.500 kgf, rotação de 7.000 rpm, comprimento de queima de 3,0 / 7,5 mm e força de forjamento de 3.500 kgf por três segundos ao final de cada preenchimento. Estes parâmetros utilizados foram definidos mediante análise dos resultados obtidos com as matrizes dos ensaios anteriores.

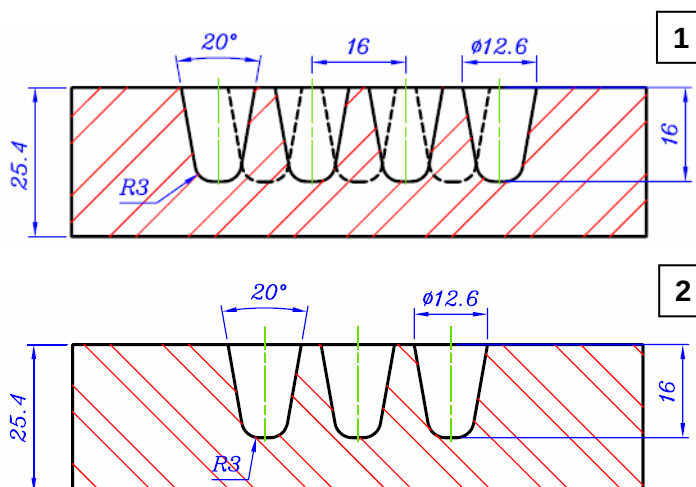


Figura 3.12: Bloco de reparo por costura, geometria D:

(1) Primeiro passe, as linhas tracejadas indicam os furos que serão abertos no segundo passe; (2) Segundo passe, furos abertos após o preenchimento dos furos realizados no primeiro passe.

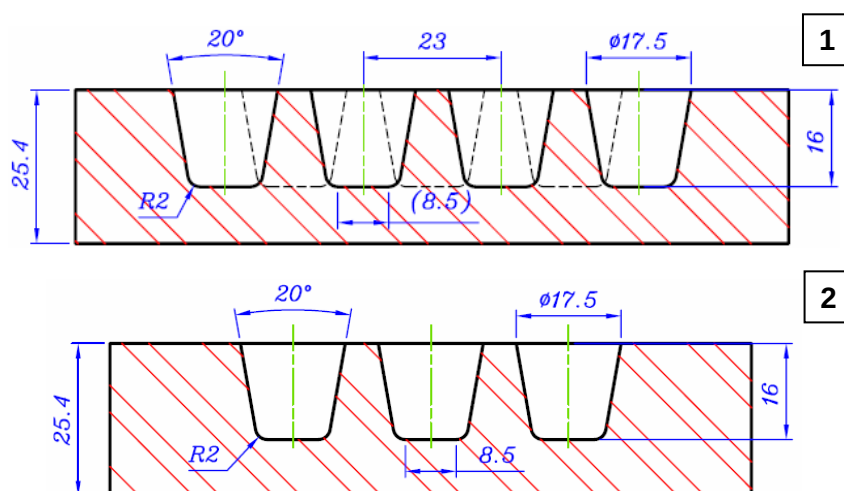


Figura 3.13: Bloco de reparo por costura, geometria A:

(1) Primeiro passe, as linhas tracejadas indicam os furos que serão abertos no segundo passe; (2) Segundo passe, furos abertos após o preenchimento dos furos realizados no primeiro passe.

3.4 - Preparação Metalográfica

Após a realização dos ensaios de preenchimento por atrito, as amostras foram preparadas metalograficamente, visando a análise do reparo, tanto via observações visuais com vista desarmada (a olho nu), bem como através do auxílio de microscópios, tanto óptico como eletrônico de varredura. Esta preparação é também necessária e apresenta-se como fase integrante e inicial para a realização dos perfis de microdureza Vickers.

A metalografia foi dividida em duas vertentes, a primeira visando caracterizar a macroestrutura e a segunda a microestrutura. Estes dois procedimentos são detalhados nos subtítulos subsequentes.

3.4.1 - Macrografia

Inicialmente, as amostras foram submetidas a um processo de corte, visando a remoção da porção superior do pino, a qual fica solidária à superfície superior do bloco, quando da realização de ensaios em que se faz uso da força de forjamento. Em seguida, o bloco foi seccionado longitudinalmente em relação ao pino, ao longo de um plano paralelo ao centro do furo, visando, deste modo, preservar a seção central para realização de inspeções e estudos de qualificação do reparo. Todos os cortes aqui realizados foram executados mediante o uso de disco abrasivo e refrigerados com fluxo de fluido refrigerante, buscando-se assim minimizar o efeito térmico do corte na microestrutura.

A seção a ser analisada foi lixada, conforme técnicas metalográficas, fazendo-se uso sequencial de lixas de Al_2O_3 (alumina) de granulometrias 220, 320, 400 e 600 mesh.

Após limpeza em banho ultra-sônico, as amostras foram então atacadas com solução de Nital 6%. O tempo de imersão das amostras no reagente variou em média de 7 a 10 segundos.

Com a superfície a ser analisada atacada, foram realizadas inspeções visuais da macroestrutura das amostras, buscando-se identificar a presença ou não de defeitos no reparo. Nesta fase, atentou-se principalmente para as regiões da interface pino/bloco, em especial, a interface inferior, além de se verificar a ocorrência ou não de uma união metalúrgica nestas regiões. Foi investigada também a morfologia desta macroestrutura ao longo do preenchimento, e o desenvolvimento da ZTA no material de base.

Foram geradas macrografias da seção de todas as amostras. As imagens foram digitalizadas a partir do uso de um *scanner* (Hewlett Packard ScanJet 4C).

3.4.2 – Micrografia

Depois de encerrada todas as observações da macroestrutura, as amostras foram lixadas com lixa de Al_2O_3 de granulometria 600 e 1.200 mesh, procedendo-se, a seguir, o polimento das mesmas com pasta de diamante de granulometria 3 μm . A superfície em estudo foi então atacada com solução de Nital 2%, com tempo médio de imersão variando entre 8 a 10 segundos.

Posteriormente, as amostras foram examinadas através de microscopia óptica, prestando-se, para tal, o conjunto óptico do microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2t. Esta prática visa identificar e caracterizar as microestruturas formadas decorrentes do processo de reparo por atrito. Esta investigação foi executada na região de processamento do pino, bem como também ao longo da interface pino/bloco e no material do bloco, englobando-se assim a ZTA.

Fotomicrografias da microestrutura foram realizadas, tanto com a utilização do microscópio óptico, quanto com a utilização de microscópio eletrônico de varredura da marca LEO, modelo 940 A, equipado com detector de raios-X (EDS).

3.5 - Ensaio de Microdureza Vickers

A mesma superfície preparada para as observações microestruturais, prestou-se para a realização dos perfis de microdureza Vickers. O levantamento destes perfis visou à avaliação das propriedades mecânicas do reparo bem como regiões vizinhas (ZTA) em termos de microdureza, além de exercer função preponderante na caracterização microestrutural.

Foram gerados três perfis de microdureza, sendo um vertical e dois horizontais. O perfil vertical teve início a 3 mm da interface inferior, passando pelo centro do pino, sendo o seu término, determinado quando a microestrutura avaliada tornava-se similar à microestrutura original do pino, com a consequente equivalência nos valores de dureza. O primeiro perfil horizontal foi realizado a 5 mm de altura da interface inferior, e o segundo a 10 mm desta. Ambos tendo início no centro da amostra e estendendo-se em direção às interfaces laterais, sendo finalizados com a utilização do mesmo critério acima mencionado. Deste modo, os ensaios foram encerrados quando não mais eram percebidas modificações microestruturais originárias de efeito térmico na microestrutura, a qual corresponde ao material do bloco com seu valor de dureza característico. A Figura 3.14 auxilia a elucidar o procedimento de posicionamento destes perfis.

As indentações foram geradas com carga de 0,05 kgf, e em geral, com 0,02 mm de espaçamento entre cada evento, o tempo de aplicação dessa carga foi de 15 segundos. Como elemento penetrador, foi utilizado um indentador piramidal de diamante Vickers.

Para realização destes ensaios foi utilizado um microdurômetro Shimadzu (HVM-2T).

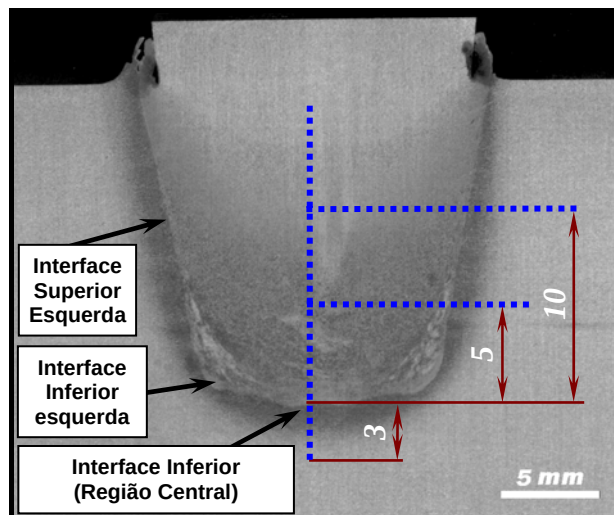


Figura 3.14: Posicionamento dos perfis de microdureza e indicação das regiões interfaciais pino/bloco.

3.6 - Teste de Dobramento

Os ensaios de dobramento foram realizados com base nas normas ASTM E 190-92 (2003) e ANSI/AWS B 4.0-98 (1997). O procedimento de teste consiste em flexionar uma seção retangular de um corpo de prova soldado, de dimensões pré-determinadas.

O teste tem por objetivo avaliar a ductilidade de uniões soldadas, evidenciada por sua habilidade de resistir à propagação de descontinuidades (micro-trincas ou defeitos decorrentes do processo) na superfície tracionada.

O dispositivo para ensaios de dobramento (Figura 3.15) foi desenvolvido de acordo com as normas acima mencionadas, no Laboratório de Tribologia e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. O equipamento permite que a seção central da amostra seja impelida por um êmbolo, fazendo com que suas extremidades sejam forçadas a se recostarem sob dois roletes, possibilitando-se assim, o flexionamento da amostra em torno de sua seção central (região soldada de interesse a ser avaliada).

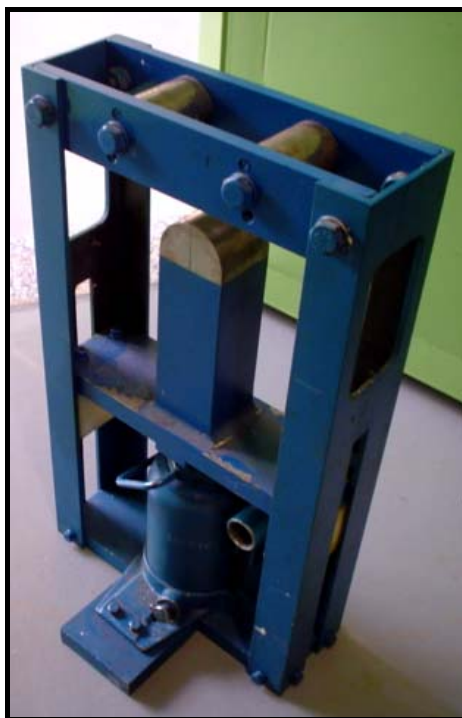


Figura 3.15: Dispositivo usado nos ensaios de dobramento.

Devido às características construtivas do aparato de testes (raio do êmbolo de 27 mm), e espessura do corpo de prova de dobramento (3,2 mm), a deformação percentual máxima conseguida no teste é de 5,6%, alcançado na superfície mais externa tracionada. A Equação (3.1) define o cálculo desta deformação, e a Figura 3.16 ilustra o procedimento de dobramento.

$$e = \frac{L \times 100}{2A + L} \quad (3.1)$$

Onde:

e = deformação percentual da superfície mais externa;

L = espessura da amostra;

A = raio de curvatura do êmbolo.

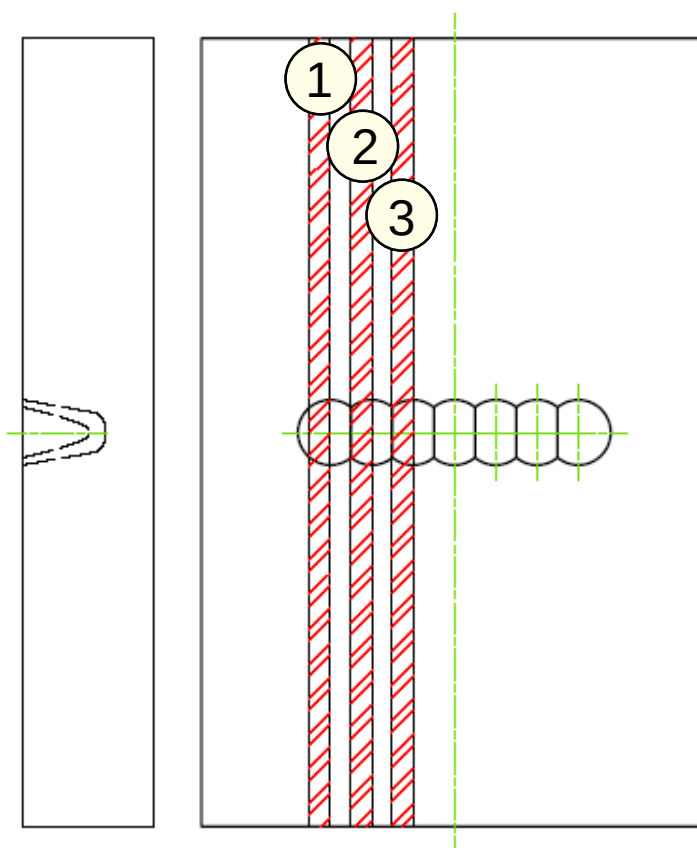


Figura 3.17: Disposição, dentro do bloco de reparo, das amostras para ensaio do tipo dobramento lateral transversal.

As amostras obtidas foram retiradas de posições específicas no bloco de reparo, de forma a serem avaliadas diferentes seções de preenchimento.

3.6.2 – Dobramento Transversal de Raiz

No dobramento transversal de raiz (*“transverse root bend”*) o reparo é transversal ao eixo longitudinal da amostra, a qual foi dobrada de modo que a superfície raiz do reparo (interface inferior pino/substrato) se tornasse a superfície tracionada (convexa).

A Figura 3.18 ilustra o posicionamento das amostras de dobramento dentro do bloco de reparo, e a Figura 3.19 apresenta o corpo de prova propriamente dito para o ensaio de dobramento de raiz, que avalia a ductilidade na raiz do reparo.

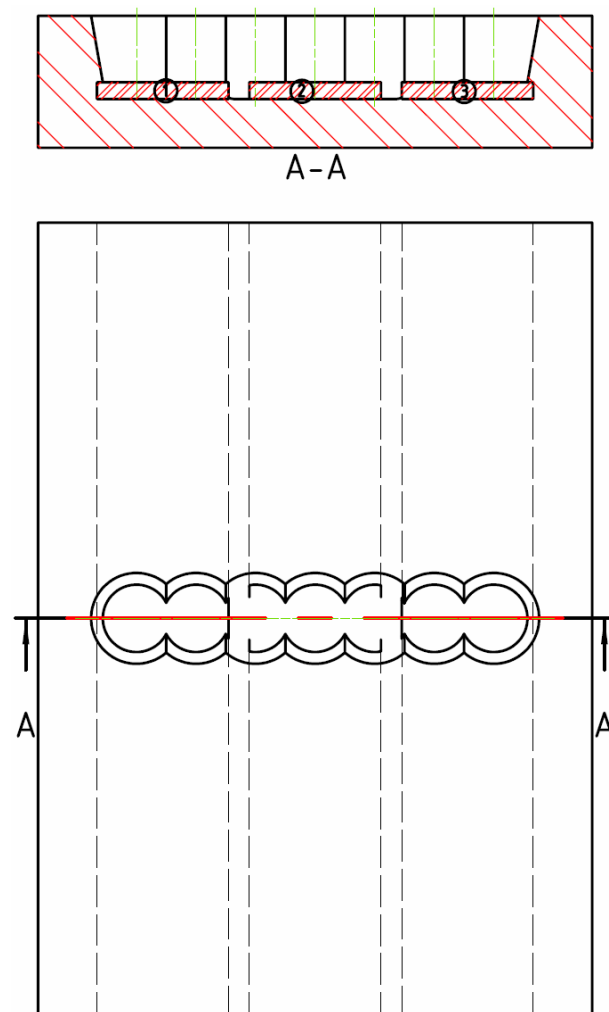


Figura 3.18: Disposição das amostras para ensaio do tipo dobramento de raiz transversal.

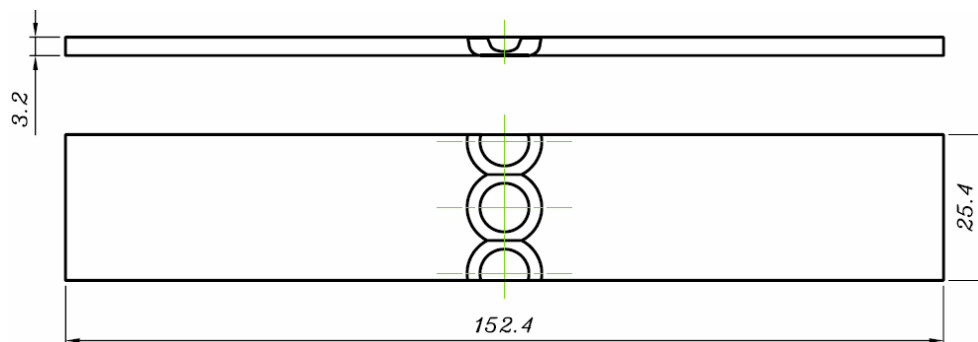


Figura 3.19: Amostra para teste de dobramento de raiz.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e, consecutivamente, discutidos os resultados referentes aos ensaios descritos no capítulo anterior. A sequência lógica de apresentação dos resultados ocorre, obedecendo-se à concretização de cada matriz de ensaios de preenchimento, correspondente aos ensaios preliminares, ensaios de otimização de parâmetros e os ensaios de reparo por atrito “*stitch welding*”. Ao término de cada uma destas matrizes, são, nesta ordem, discutidos os resultados, referentes: aos gráficos do processo de preenchimento, às análises metalográficas, aos ensaios de microdureza Vickers e, por fim, aos ensaios de dobramento.

4.1 - Ensaios Preliminares

Os resultados apresentados nessa seção referem-se aos ensaios, cujos parâmetros geométricos e demais condições do processamento são descritos, respectivamente, na Figura 3.9 e Tabela 3.4. Vale ressaltar, que os processamentos de pinos por atrito aqui realizados não tiveram compromisso com a execução de preenchimentos perfeitos, ou seja, livre de defeitos. A principal função destes ensaios foi de fornecer subsídios à realização dos ensaios subsequentes e uma investigação superficial acerca dos efeitos dos seguintes parâmetros: força axial, velocidade de rotação e geometrias do furo e do pino na qualidade do preenchimento.

4.1.1 - Gráficos do Processo de Preenchimento

Os gráficos construídos com as aquisições dos sinais de força axial, velocidade de rotação do pino, comprimento de queima e torque, todos em função do tempo, são apresentados nas Figuras de 4.1 a 4.12.

Primeiramente, observa-se dessas figuras, que o sistema de controle e monitoramento do processo de reparo mostrou-se capaz e eficiente na aquisição dos sinais monitorados, até mesmo, para pequenas variações ocorridas em curtos intervalos de tempo. Tal característica é de suma importância em um processo que ocorre em questão de poucos segundos; uma vez que, existe a necessidade de rápida aquisição dos sinais e processamento dos mesmos, possibilitando assim, uma atuação quase que imediata das válvulas direcionais proporcionais de controle do motor hidráulico e da haste, mantendo as condições de força e velocidade de rotação preestabelecidas.

Observando o comportamento da curva referente à velocidade de rotação do pino, tanto para a geometria 1, quanto para a geometria 2 (Figuras 4.2 a 4.12), nota-se uma queda inicial deste parâmetro, que tende a ser mais expressiva quando da utilização de baixas velocidades de rotação, aliadas as altas forças axiais. Posteriormente, a rotação tende a se recuperar em torno do valor pré-determinado.

Este comportamento pode ser mais bem compreendido quando observado o desenvolvimento da curva do torque resistivo.

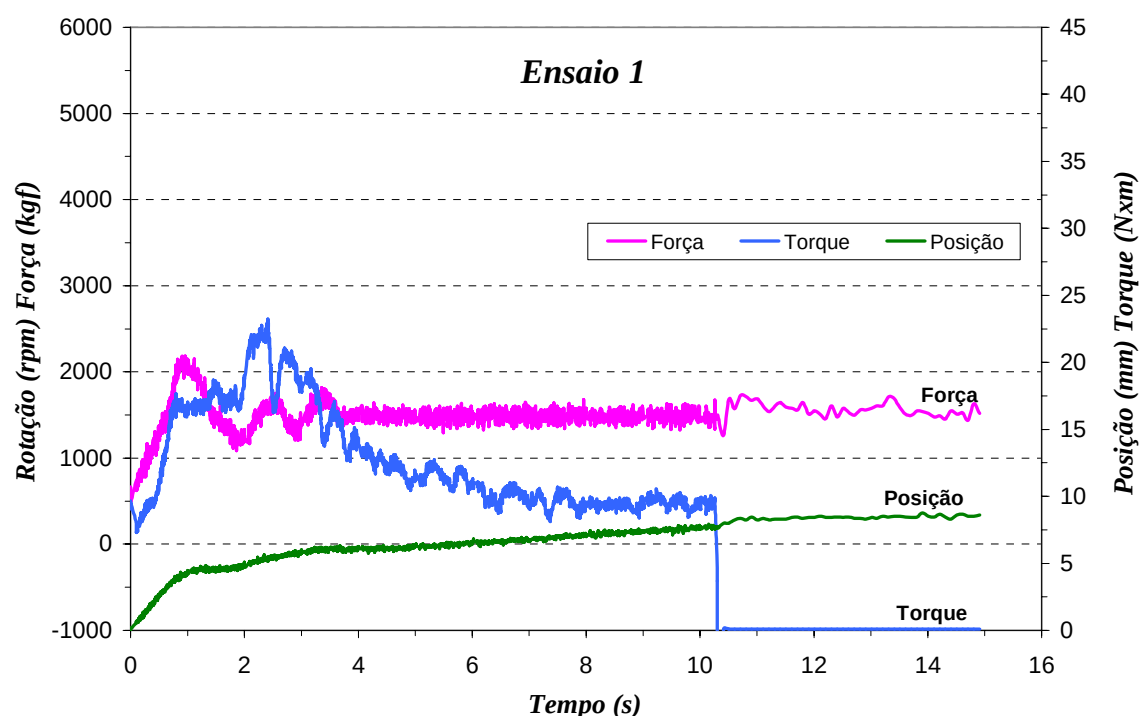


Figura 4.1: Sinais adquiridos para o Ensaio 1, (1.500 kgf e 5.000 rpm – geometria 1). Obs.: os sinais de rotação não puderam ser adquiridos.

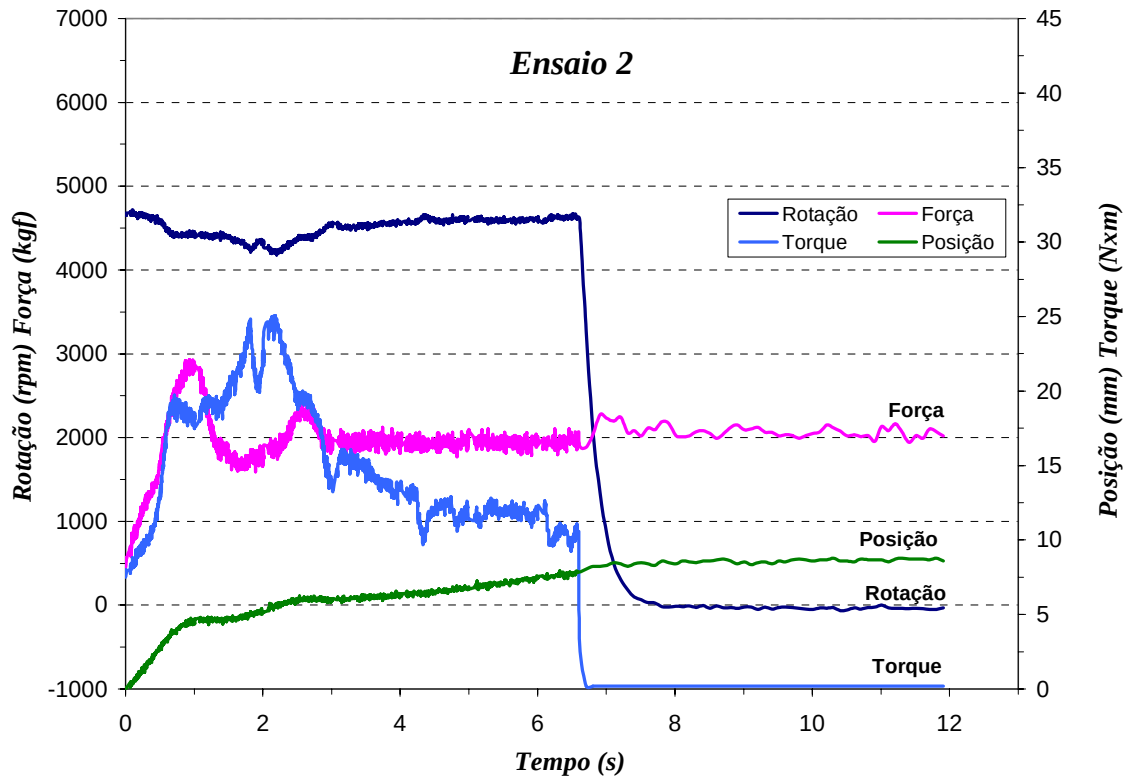


Figura 4.2: Sinais adquiridos para o Ensaio 2, (2.000 kgf e 5.000 rpm – geometria1).

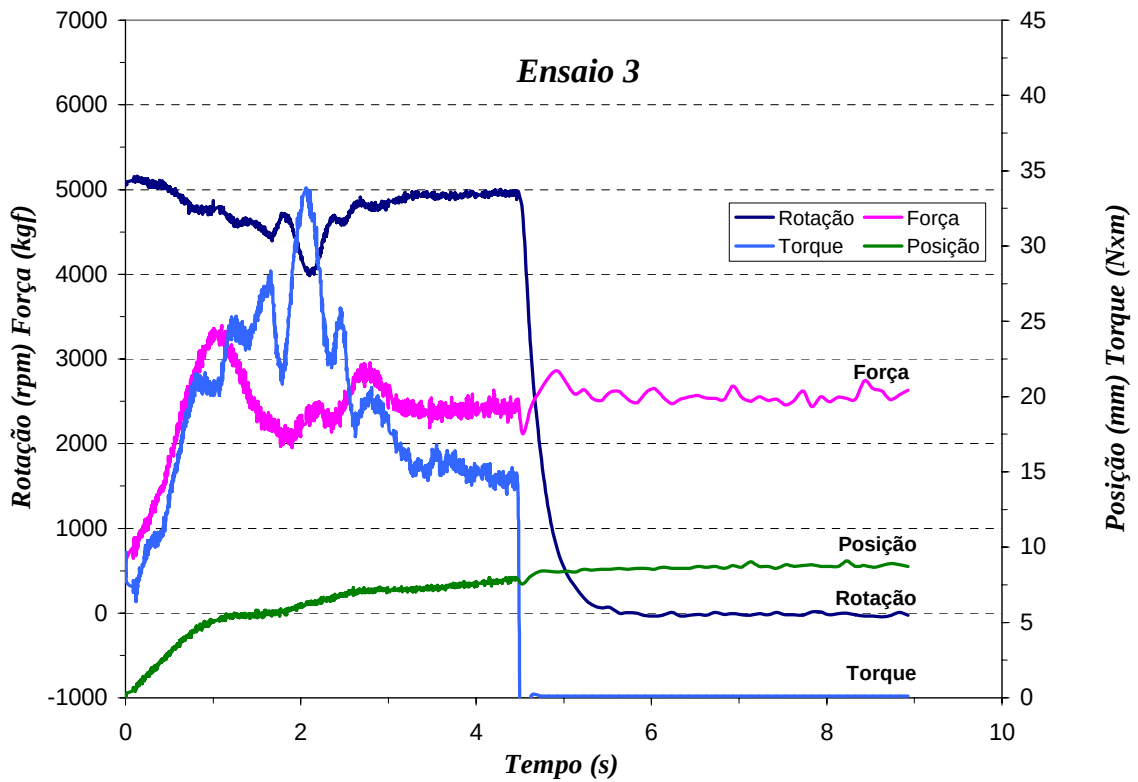


Figura 4.3: Evolução dos sinais adquiridos para o Ensaio 3, (2.500 kgf e 5.000 rpm - geometria1).

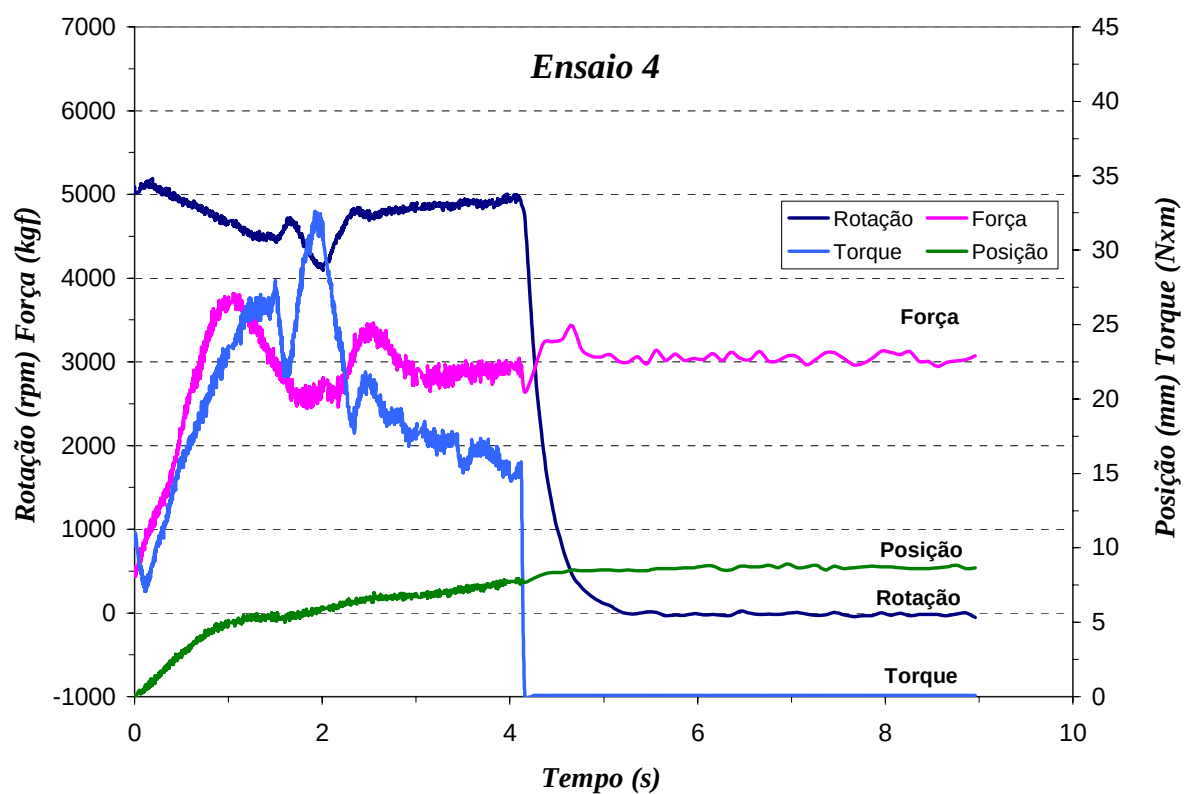


Figura 4.4: Sinais adquiridos para o Ensaio 4, (3.000 kgf e 5.000 rpm - geometria1).

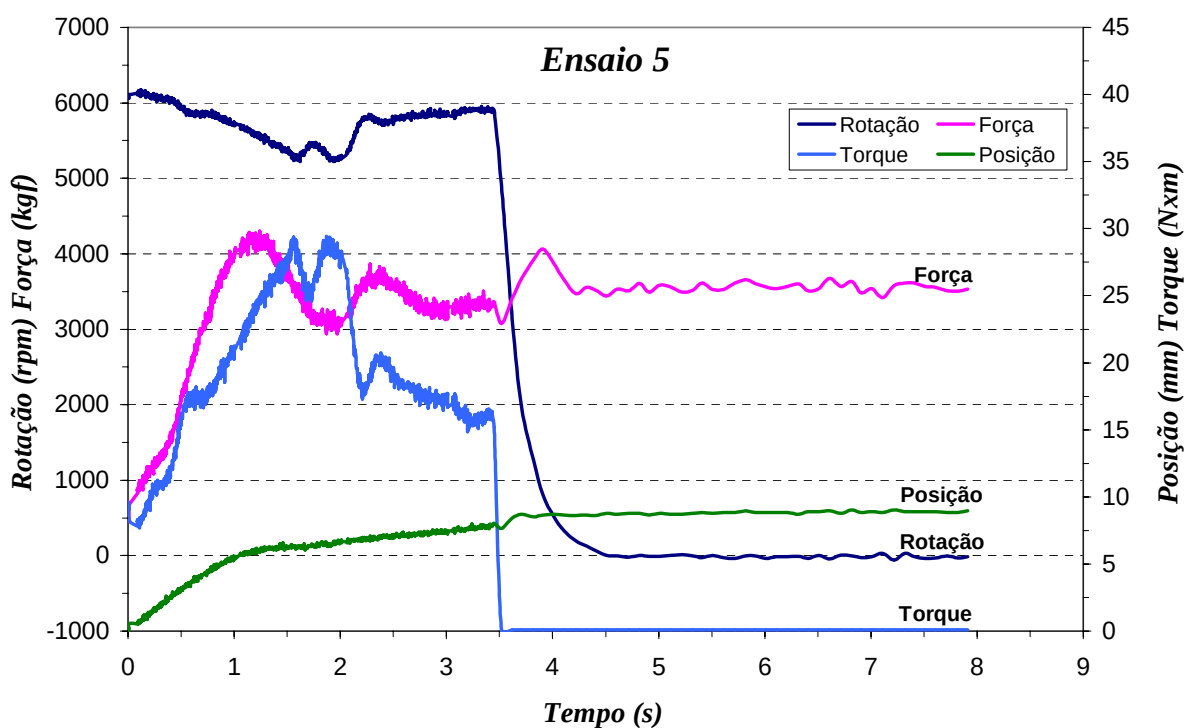


Figura 4.5: Sinais adquiridos para o Ensaio 5, (3.500 kgf e 6.000 rpm - geometria1).

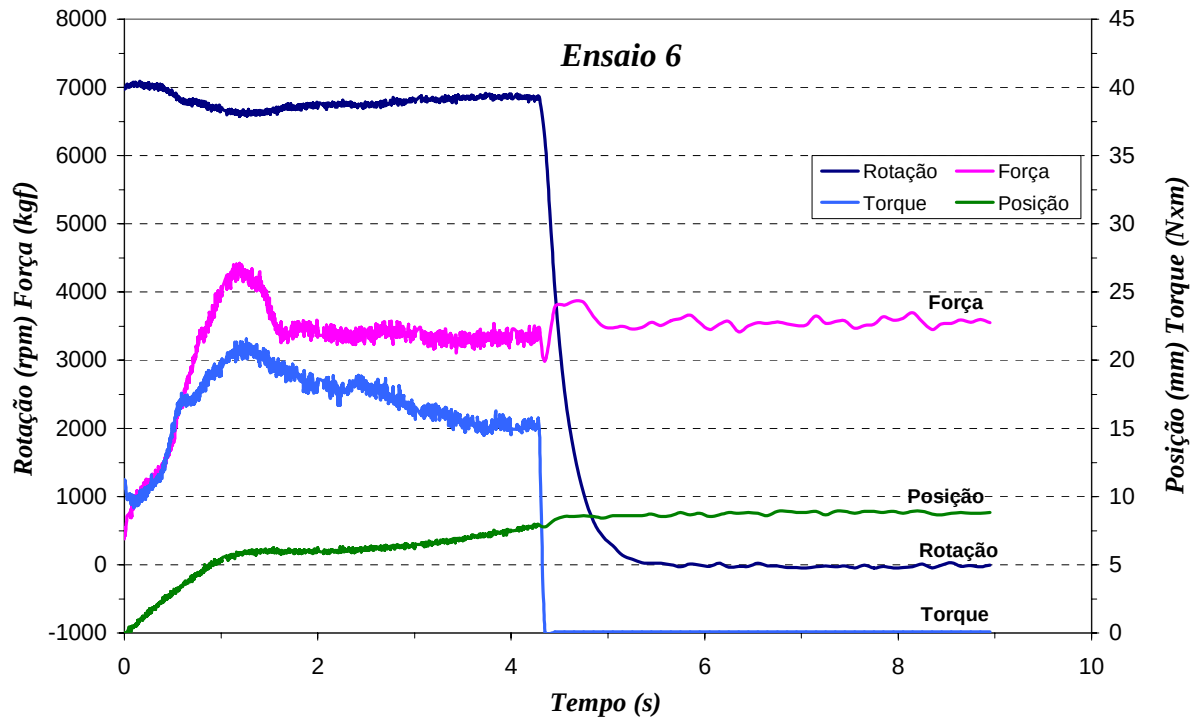


Figura 4.6: Sinais adquiridos para o Ensaio 6, (3.500 kgf e 7.000 rpm - geometria1).

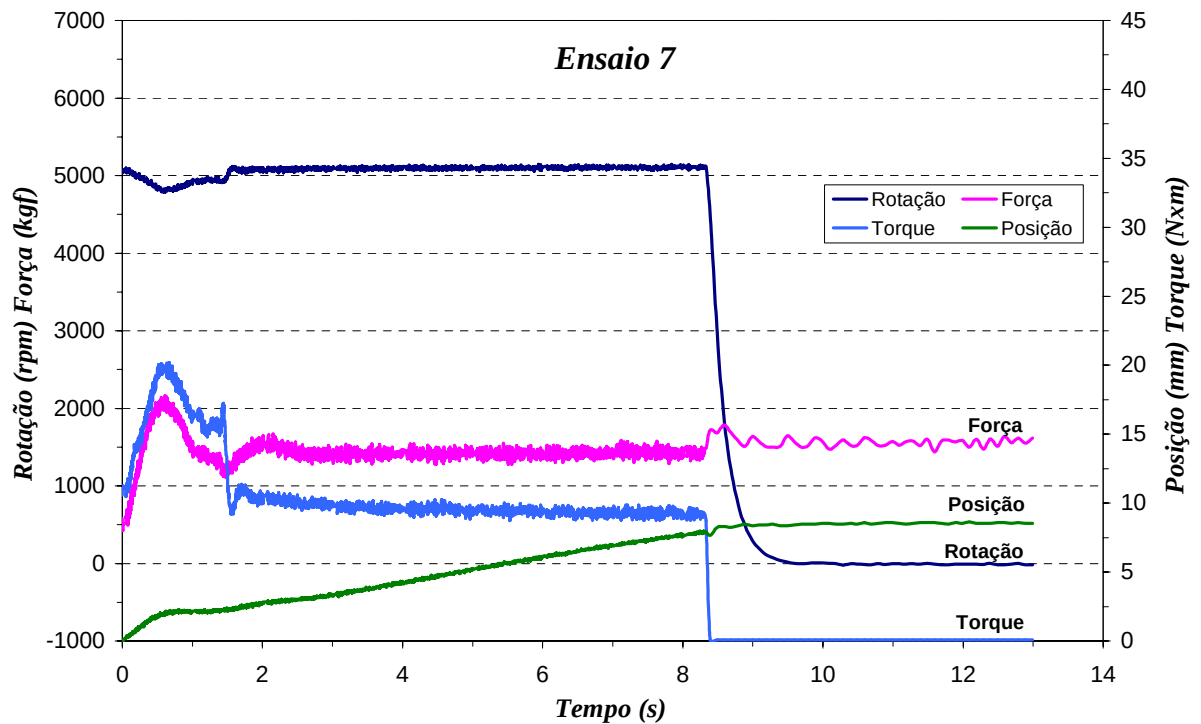


Figura 4.7: Sinais adquiridos para o Ensaio 7, (1.500 kgf e 5.000 rpm – geometria 2).

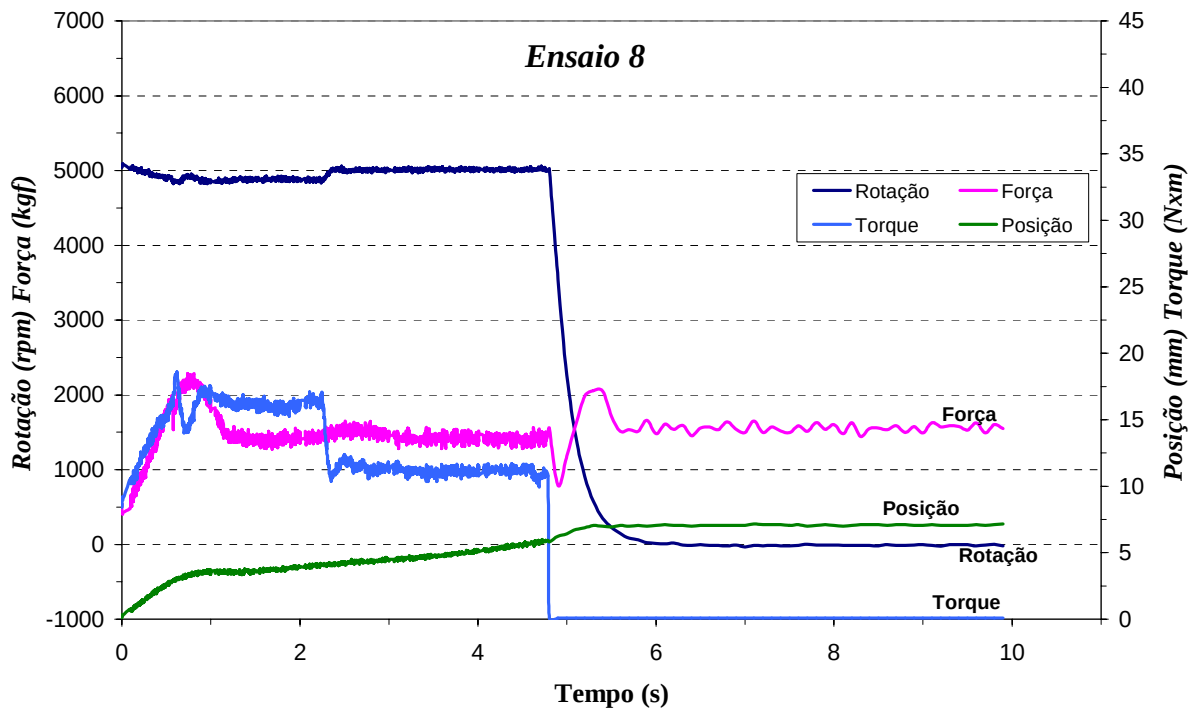


Figura 4.8: Sinais adquiridos para o Ensaio 8, (1.500 kgf e 5.000 rpm - geometria 2).

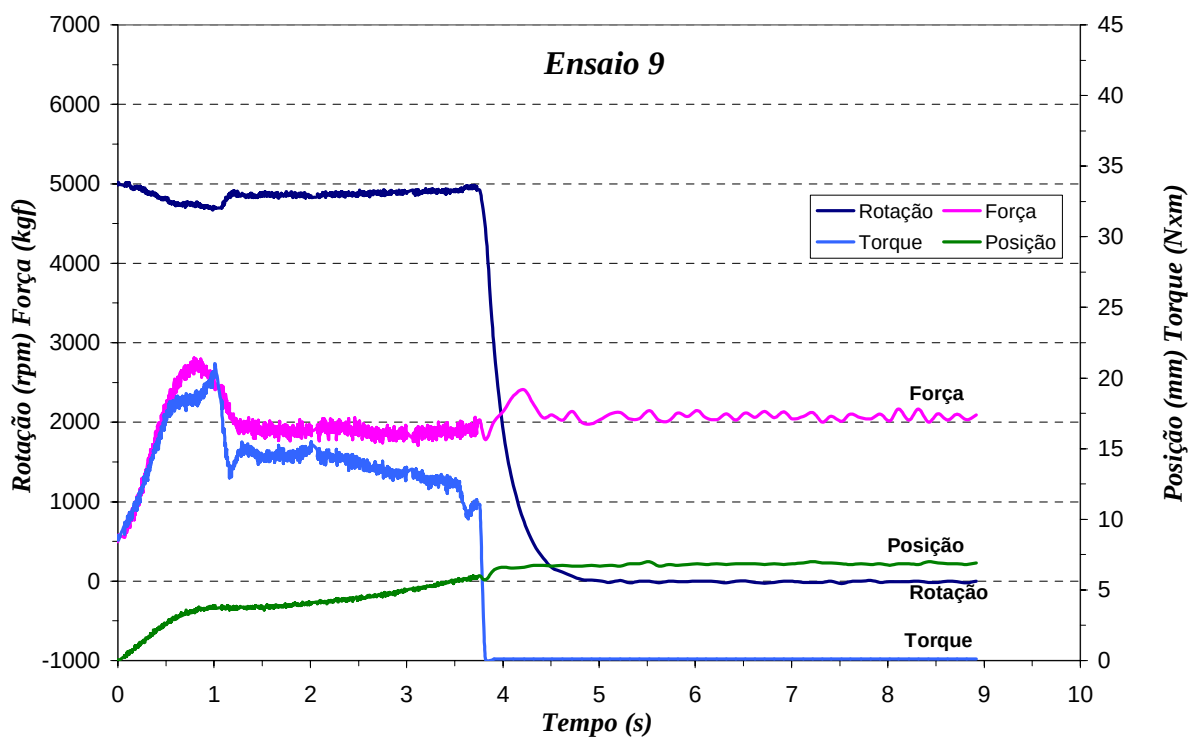


Figura 4.9: Sinais adquiridos para o Ensaio 9, (2.000 kgf e 5.000 rpm - geometria 2).

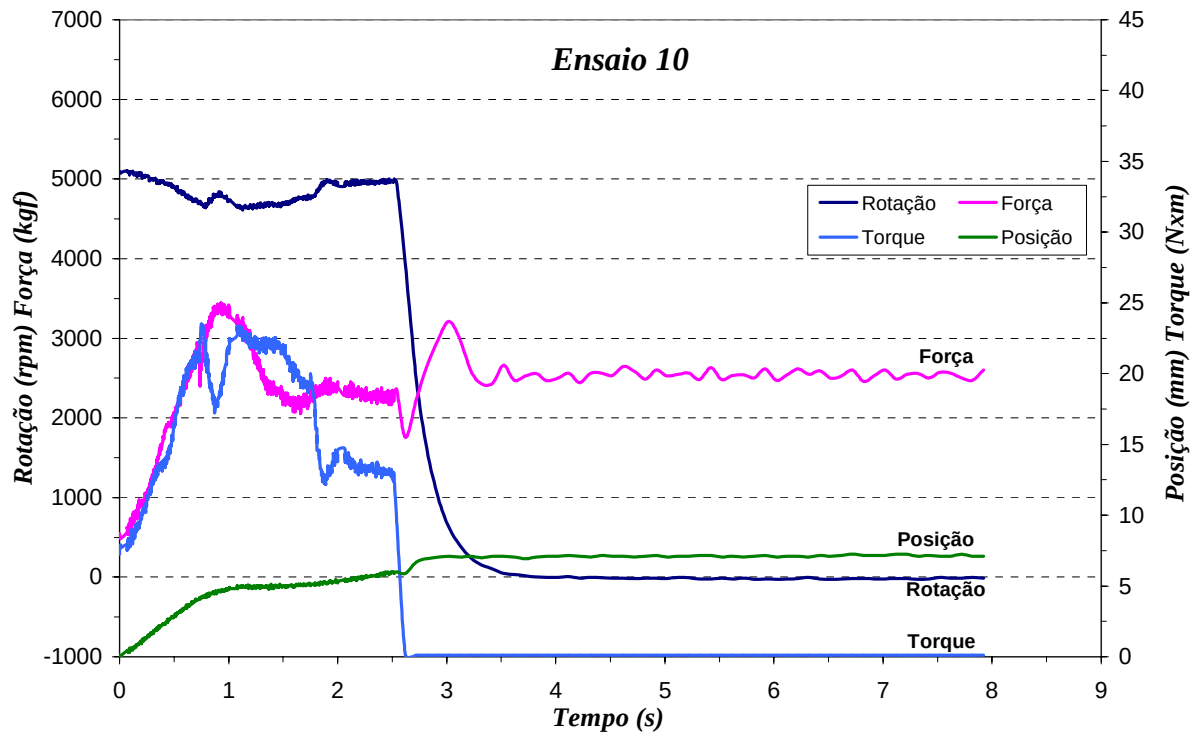


Figura 4.10: Sinais adquiridos para o Ensaio 10, (2.500 kgf e 5.000 rpm - geometria 2).

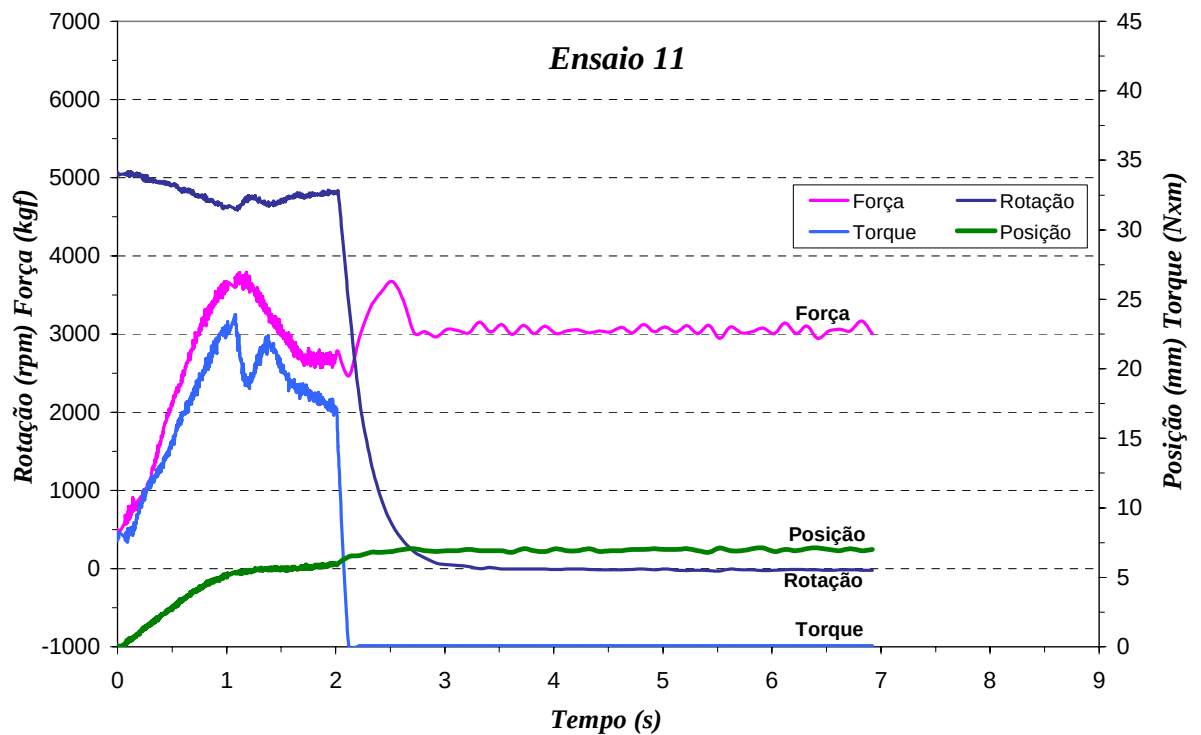


Figura 4.11: Sinais adquiridos para o Ensaio 11, (3.000 kgf e 5.000 rpm - geometria 2).

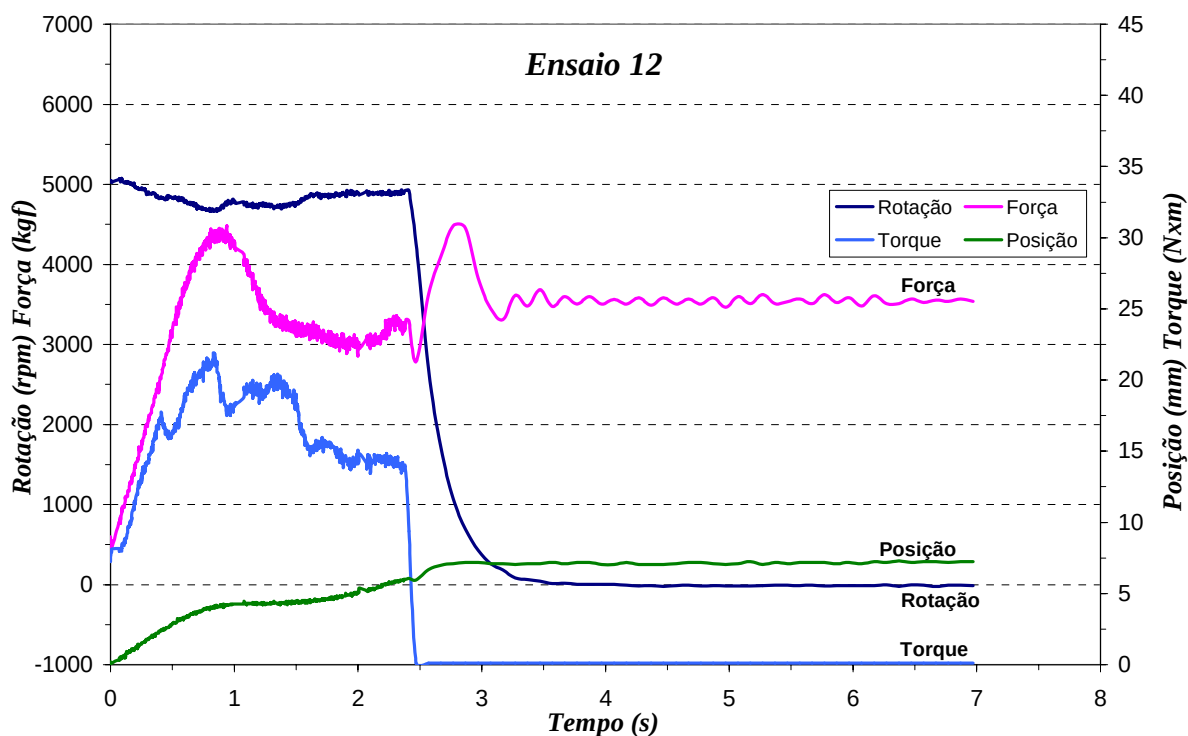


Figura 4.12: Sinais adquiridos para o Ensaio 12, (3.500 kgf e 5.000 rpm - geometria 2).

Segundo Lebedev e Chernenko (1992), nos processos de soldagem por atrito, o coeficiente de atrito médio entre duas superfícies em contato varia no processo do mesmo modo que o torque resistivo, ou seja, a curva referente ao torque oferece um indicativo aproximado da variação do coeficiente de atrito médio ao longo do processo.

Deste modo, para os ensaios realizados com uma mesma velocidade de rotação e forças distintas (ensaios de 1 a 4 para a geometria 1, e ensaios de 7 a 12 para a geometria 2), a queda inicial da rotação tende a ser mais proeminente para forças axiais mais elevadas. Essas promovem o aumento da força de atrito, e, como resposta do sistema, um pico na curva de torque surge, conjuntamente com um vale na curva de rotação.

Ainda com relação aos ensaios realizados com a geometria 1 (Figuras 4.4 a 4.6), com forças axiais semelhantes e rotações distintas, nota-se, que o declínio da velocidade tende a ser menor, quanto maior for o seu valor preestabelecido.

Segundo Hutchings (1992), uma redução no coeficiente de atrito, entre corpos sob movimento relativo, pode ser obtida com aumentos da velocidade. Este fato é comprovado por um menor valor de pico da curva de torque, com a utilização de rotações mais elevadas. O torque máximo declina, de aproximadamente 30 N.m (Figura 4.5) para 22 N.m (Figura 4.6), quando a rotação imposta foi incrementada em 1.000 rpm.

Esse comportamento está ainda associado a efeitos dinâmicos do sistema, como descrito a seguir. Quanto maior a energia cinética do corpo em rotação, maior será a sua

inércia, e, conseqüentemente, mais facilmente o sistema superará os esforços resistivos ao movimento.

Concentrando-se ainda nos gráficos das Figuras de 4.1 a 4.12, mas atendo-se agora ao comportamento da curva referente ao deslocamento do pino, é possível notar, para todos os ensaios, uma taxa de queima mais elevada no início do processo, e, posteriormente, uma queda desta. Essa última taxa tende a permanecer constante até que o processo entre na etapa de forjamento, onde ocorre um pequeno, e instantâneo, acréscimo desta. A seguir, essa taxa tende a zero.

A primeira taxa de queima é devida ao efeito combinado da estabilização da força axial entorno do valor previamente estabelecido, bem como das alterações de área de contato nos instantes iniciais do processo. Na seqüência, o processo desenvolve-se a uma taxa menor, mediante a estabilização da força axial.

A segunda e última mudança no comportamento da taxa de queima é bem menos perceptível, e refere-se à acomodação do material deformado do pino no instante final do processo, ou seja, momento em que ocorre apenas a atuação da força de forjamento.

A variação do tempo de processamento em função dos parâmetros do processo é apresentada, inicialmente para a geometria 1, na Figura 4.13. Nota-se dessa figura, que, quanto menor a força axial empregada numa mesma rotação (ensaios de 1 a 4), tanto maior é o tempo de processamento. Tal comportamento foi também observado por Eichhorn (1968 citado por MEYER, 2002) para a soldagem por atrito convencional (*continuous drive*).

Considerando os ensaios 5 e 6, cuja força axial foi mantida constante, e alterada a velocidade de rotação, identifica-se na Figura 4.13 um acréscimo no tempo de processamento do pino para incrementos neste parâmetro. Esse comportamento pode ser devido a uma diminuição do coeficiente de atrito, obtido com a velocidade de rotação mais elevada.

Segundo Vill (1962 citado por MEYER, 2002), o aumento no tempo de processamento com a elevação da rotação pode ter sua causa decorrente de uma maior ação de polimento nas superfícies em atrito. Esse comportamento requer um maior tempo de aquecimento para se alcançar às condições adequadas de plastificação.

Do mesmo modo, como relatado para os seis primeiros ensaios, os tempos de preenchimento dos testes de 7 a 12 também tiveram, em geral, seus valores reduzidos com aumentos na carga axial, como é mostrado na Figura 4.14.

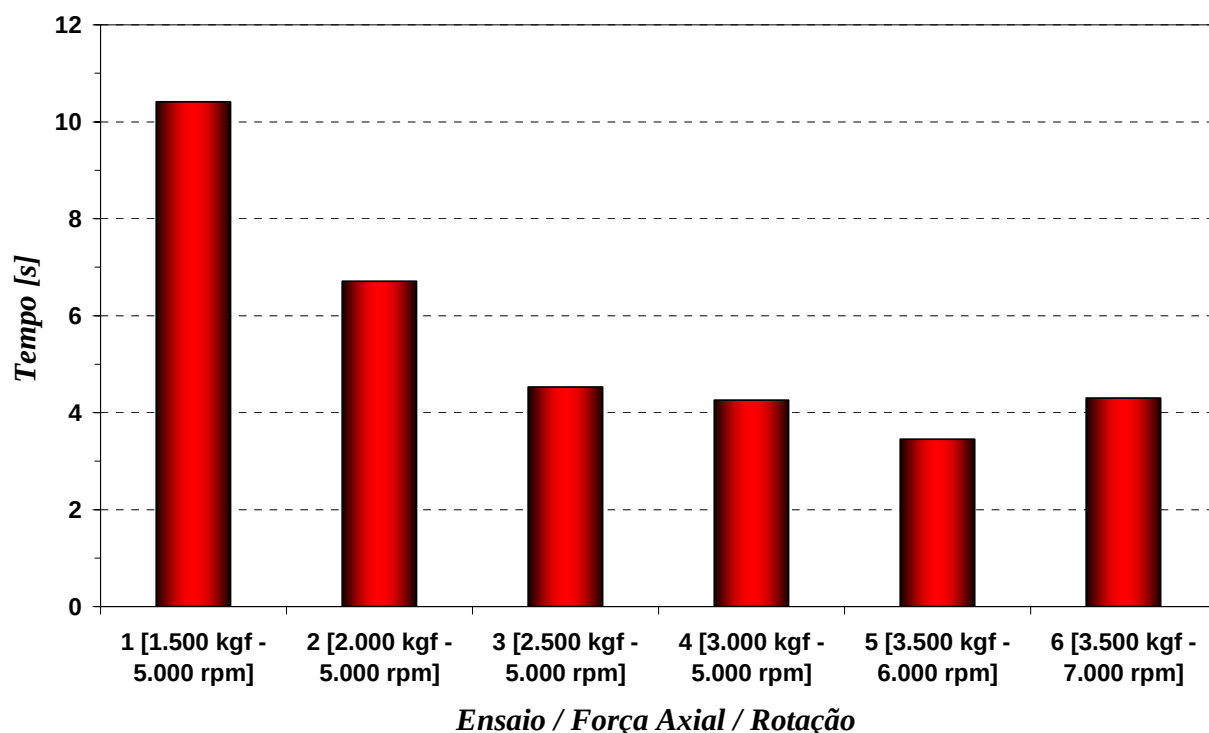


Figura 4.13: Tempos despendidos para o processo de preenchimento dos ensaios 1 a 6 da Tabela 3.4, (geometria 1). Valores obtidos mediante apreciação dos gráficos dos respectivos ensaios.

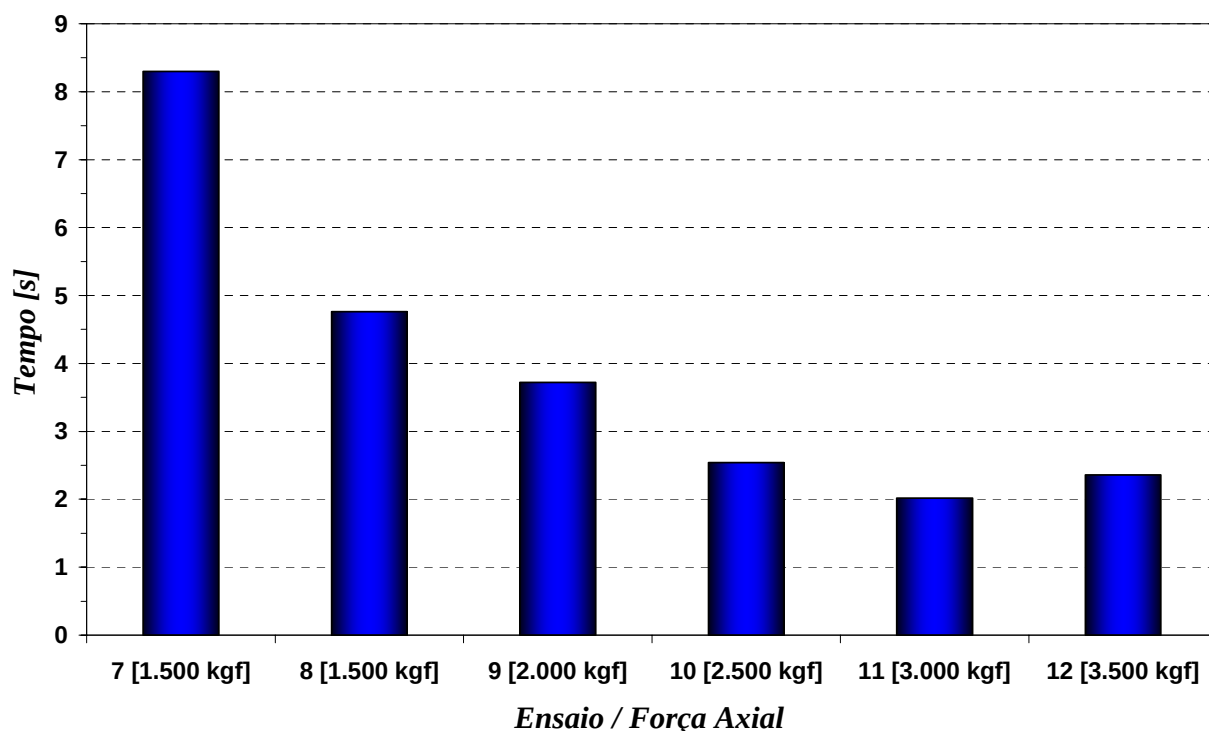


Figura 4.14: Tempos despendidos no preenchimento dos ensaios 7 a 12 da Tabela 3.4 (geometria 2). Valores obtidos mediante apreciação dos gráficos dos respectivos ensaios, sendo todos realizados com rotação de 5.000 rpm.

Para os ensaios 7 e 8, realizados com a mesma força normal, a diferença no tempo de preenchimento reside no fato de que, o primeiro foi realizado com comprimento de queima igual a 8 mm, enquanto que para o segundo, foi utilizado um comprimento de 6 mm (Tabela 3.4).

Uma ressalva deve ser feita em relação aos ensaios 11 e 12, onde o tempo de preenchimento do segundo foi ligeiramente superior ao primeiro, mesmo tendo sido o ensaio 11 realizado com força axial inferior. Destaca-se aqui, que os valores apresentados, tanto na Figura 4.13, como na Figura 4.14, não são passíveis de um tratamento estatístico, haja vista que se trata da execução de apenas um único ensaio para cada evento. Assim, deve-se nestes gráficos ater apenas às tendências observadas.

Outro fato que merece atenção, ao se analisar as Figuras 4.13 e 4.14, é a menor sensibilidade do tempo de preenchimento, quando da realização de ensaios com forças mais elevadas. Nota-se, que para ambas as geometrias, o tempo de processamento tende a se estabilizar com o aumento da força axial. Contudo, Meyer (2002), trabalhando com processamento em condições parecidas (furos cilíndricos), observou uma correlação aproximadamente linear, da força, com o tempo de processamento.

A estabilização dos tempos com aumentos da força pode ser mais bem entendida através da análise dos gráficos da força axial (Figuras 4.1 a 4.12). Estes gráficos apresentam dois comportamentos distintos em função do tempo. Inicialmente, eles desenvolvem-se de forma transiente, visando estabilização da força no valor de referência. Em seguida, tendem a se manter constantes em torno do valor preestabelecido. Foi possível notar que, quanto maior o valor da força axial, tanto maior é a parcela do tempo em que o ensaio ocorre no intervalo transiente. As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram este fato. Assim, como a parcela do tempo de processamento, em que o ensaio ocorre no tempo de referência é reduzida, uma menor diferenciação é conseguida para os processamentos realizados com forças mais elevadas.

Uma relação aproximadamente linear da força com o tempo, como aquela encontrada por Meyer pode ser conseguida através de uma redução no tempo para a estabilização da força no valor de referência. Este comportamento pode ser obtido mediante ajustes no controlador PID, de modo a elevar a taxa de aplicação da força, e reduzir a variação desta em torno do seu valor de referência.

Para os ensaios realizados, o cartão de controle PID da força axial foi regulado para uma vazão limite de 2,4 l/min, o que corresponde a uma taxa de queima máxima do pino de até 6 mm/s. Pode ser notado na Figura 4.15, para o ensaio número 6, onde se utilizou uma alta força axial, que este valor limite de vazão não foi alcançado. A máxima taxa de queima foi de 5,4 m/s. Este resultado mostra que, para a realização de ensaios com maiores

velocidades de aplicação de carga, será necessário aumentar o valor da vazão limite da haste hidráulica.

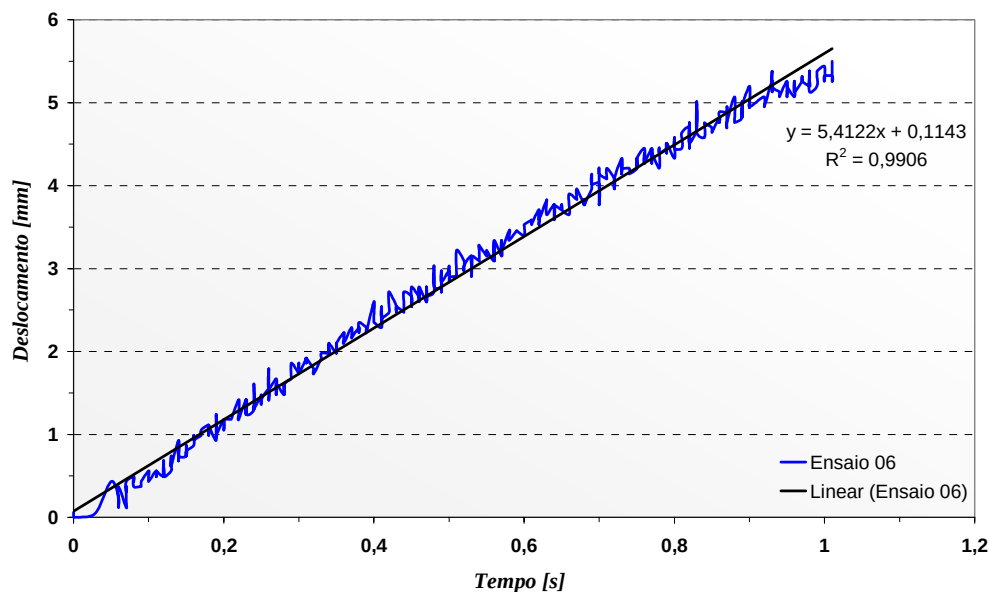


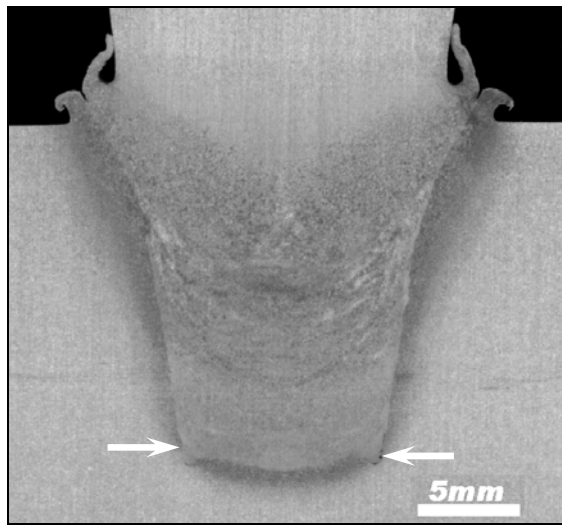
Figura 4.15: Trecho inicial da curva do deslocamento em função do tempo para o ensaio 06.

4.1.2 - Caracterização Metalográfica

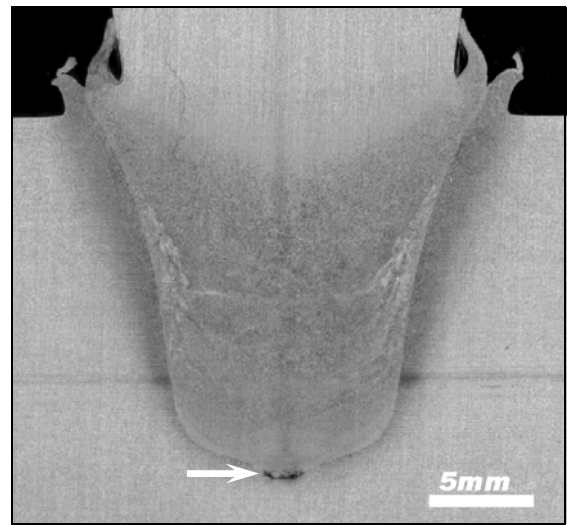
As macrografias obtidas ao longo da seção longitudinal do pino de preenchimento para os ensaios 1 a 6 da Tabela 3.4 são apresentadas na Figura 4.16. Estes ensaios referem-se à geometria 1 (Figura 3.9 A). Aparentemente, houve uma forte união interatômica entre a região interfacial pino/bloco, ou seja, a existência de uma união metalúrgica na interface. Há evidências também do desenvolvimento de uma ZTA na porção adjacente à linha interfacial, no material do bloco de reparo. É possível notar ainda uma tendência à redução dos fenômenos acima descritos na porção inferior do bloco.

Macroscopicamente observa-se, para os ensaios 1 e 2, a presença de defeitos (falta de conformidade geométrica) decorrentes do preenchimento incompleto, tanto nos cantos, quanto no centro da interface inferior (observar setas nas figuras dos ensaios 1 e 2). Estes defeitos revelam-se como pontos escuros (vazios) nesta região. Acredita-se, que esse comportamento se deva às baixas forças axiais empregadas nos ensaios 1 e 2, visto que os demais ensaios com a geometria 1, aparentemente, não o apresentaram. Tal fato será retomado, a seguir, durante a análise microscópica.

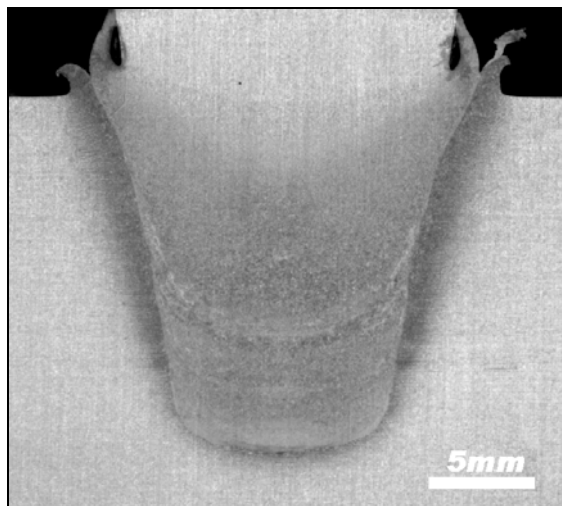
Em algumas macrografias, como por exemplo, a do ensaio 5 da Figura 4.16, é possível perceber a formação de bandas de cisalhamento a quente, (linha horizontal escura que atravessa todo o material do bloco). Este defeito teve sua origem na laminação a quente das chapas utilizadas como material base para os blocos deste trabalho.



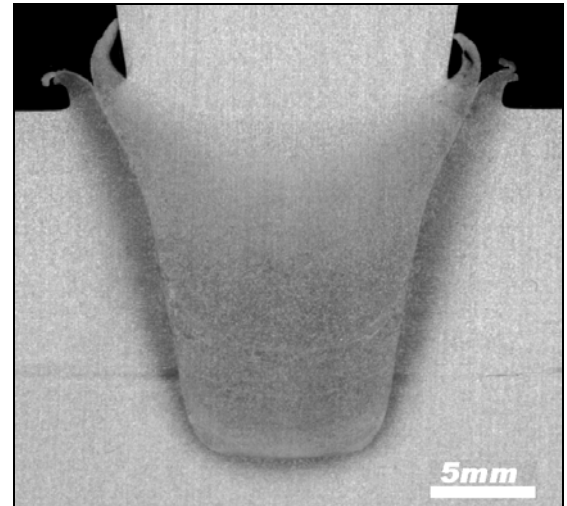
Ensaio 1 (1.500 kgf / 5.000 rpm)



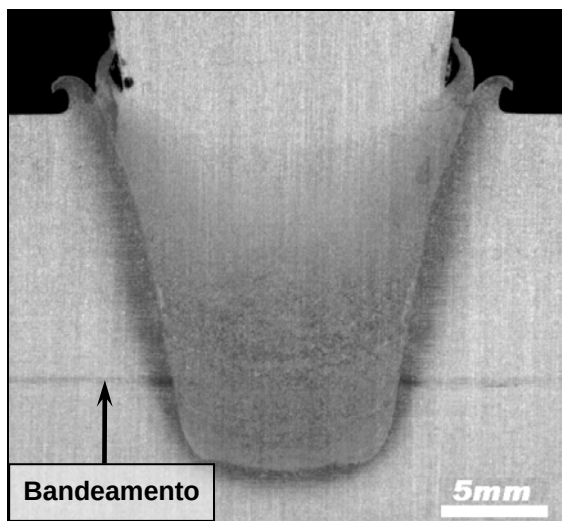
Ensaio 2 (2.000 kgf / 5.000 rpm)



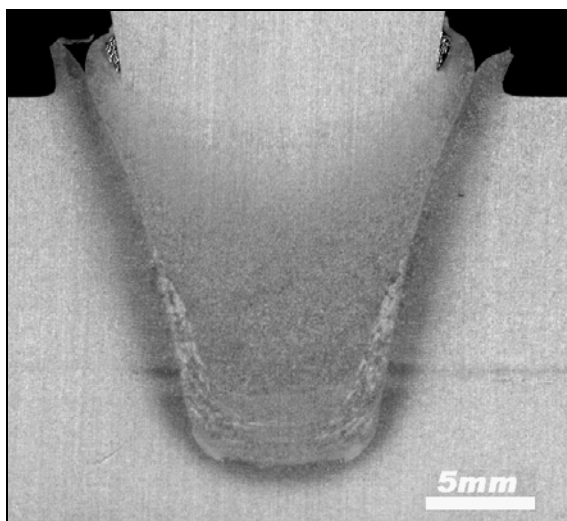
Ensaio 3 (2.500 kgf / 5.000 rpm)



Ensaio 4 (3.000 kgf / 5.000 rpm)



Ensaio 5 (3.500 kgf / 6.000 rpm)



Ensaio 6 (3.500 kgf / 7.000 rpm)

Figura 4.16: Macrografias dos ensaios de 1 a 6, referentes à geometria 1 (ver tabela 3.4).

Nos ensaios de 1 a 4, realizados com valores de força distintos e iguais rotações, há uma visível tendência à redução de tamanho da ZTA, na medida em que se eleva o valor da força axial. Nota-se também uma aparente homogeneização da macroestrutura com este aumento.

Em concordância com a Figura 4.13, onde aumentos na força axial promoveram decréscimos nos tempos de preenchimento, os ensaios de mais longa duração foram submetidos a um maior intervalo de tempo de aquecimento. Em decorrência disso, houve a intensificação, tanto do processo de condução térmica, como dos processos difusionais referentes a alterações microestruturais.

Ellis (1972) demonstrou para a soldagem por atrito convencional, que a força axial também influencia as características da zona termicamente afetada.

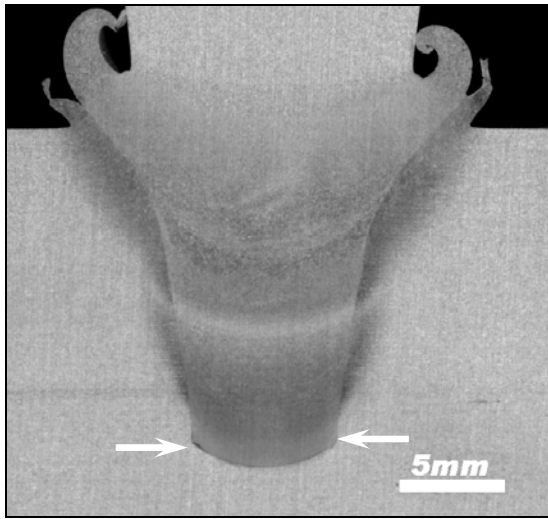
Um efeito semelhante ao acima mencionado ocorreu também quando foi mantida a força constante e alterada a velocidade de rotação (ver ensaios 5 e 6 da Figura 4.16). O aumento da velocidade de rotação promoveu uma pequena elevação no tempo de preenchimento do ensaio 6 (Figura 4.13), e resultou também em uma maior extensão da ZTA.

As macrografias referentes aos ensaios 7 a 12, descritos na Tabela 3.4, são apresentadas na Figura 4.17, onde a geometria 2 foi utilizada como parâmetro geométrico para a confecção dos pinos e blocos.

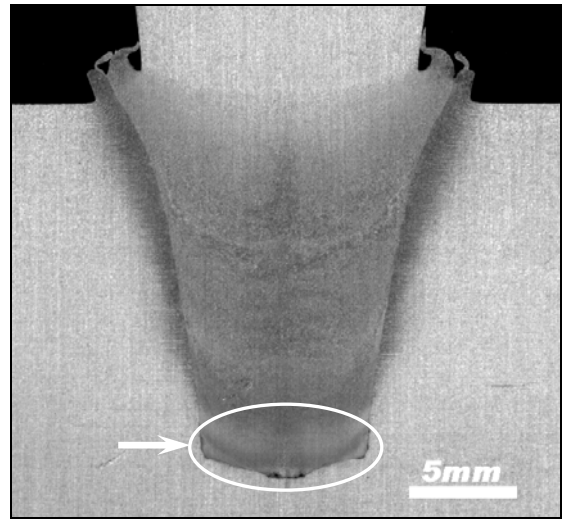
Uma análise geral dessas macrografias torna evidente o aumento do número e tamanho dos defeitos (vazios) ocorridos ao longo das bordas da interface inferior, em relação ao observado na geometria 1. Diferentemente do ocorrido para a geometria 1, em que os defeitos macroscópicos tenderam a desaparecer com acréscimos da força axial, a geometria 2 continuou a apresentar esses defeitos, mesmo com o aumento da força normal.

Esse comportamento sugere, então, que o parâmetro primordial neste caso, que levou ao agravamento de preenchimentos com defeitos, venha a ser o parâmetro geométrico. O menor diâmetro da ponta dos pinos da geometria 2 resultou em uma menor velocidade linear (Tabela 3.5), dificultando a geração de calor. As velocidades conseguidas com a geometria 2 são cerca de 1,7 vezes menor, que as conseguidas com a geometria 1. Pode-se notar, na Figura 4.17, a falta de aquecimento na interface inferior, bem como a ausência de uma ZTA nesta região. Todavia, a ZTA se torna bastante proeminente em uma porção superior do pino, depois de decorrido certo intervalo de tempo de processamento.

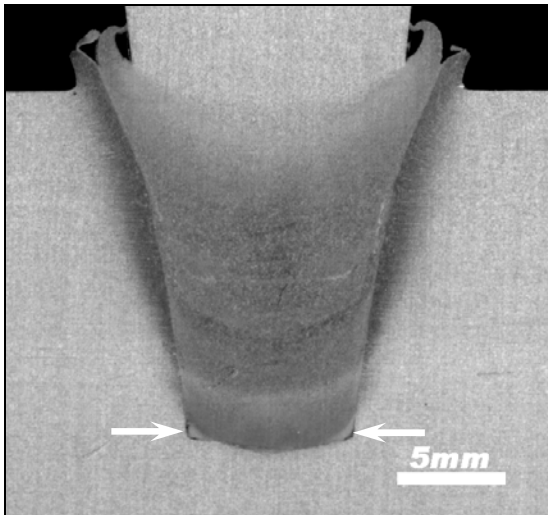
Em decorrência dos menores tempos de preenchimento com o aumento da força normal (Figura 4.14), pode ser observado na Figura 4.17, que este efeito, semelhantemente ao ocorrido com os ensaios da geometria 1, resultaram em uma menor taxa de aquecimento do material processado e num estreitamento da ZTA.



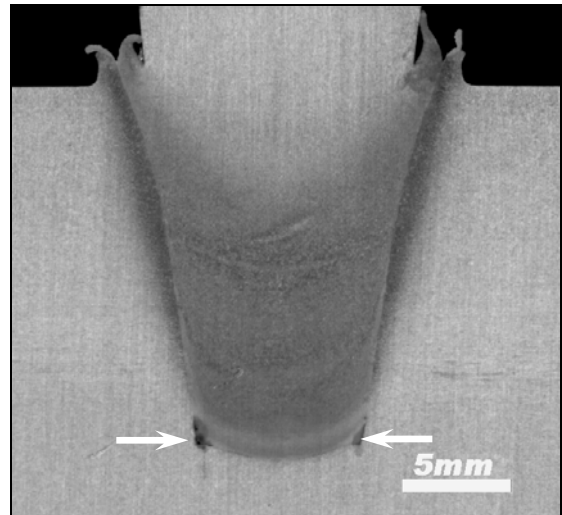
Ensaio 7 (1.500 kgf / 5.000 rpm)



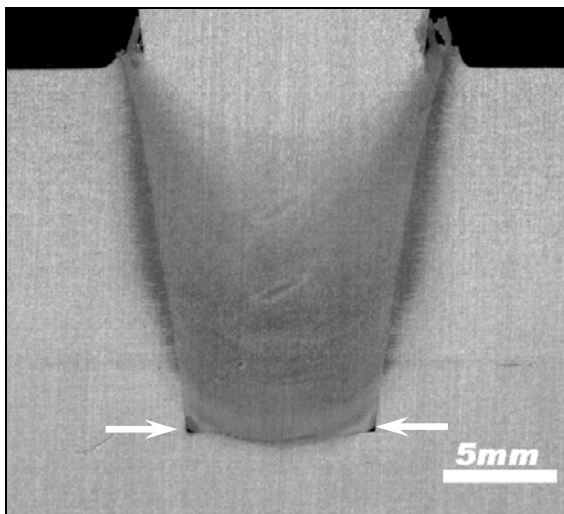
Ensaio 8 (1.500 kgf / 5.000 rpm)



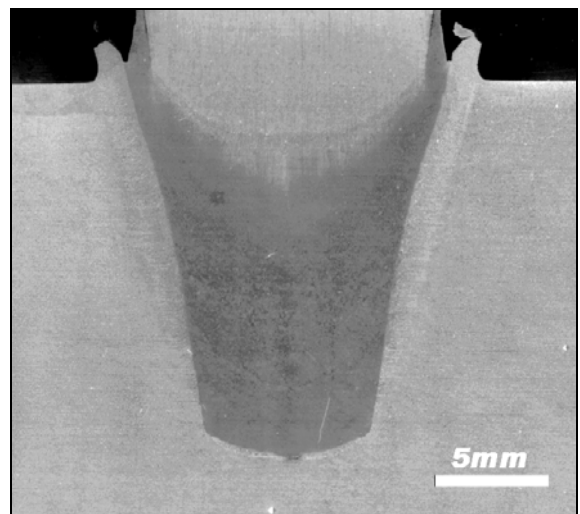
Ensaio 9 (2.000 kgf / 5.000 rpm)



Ensaio 10 (2.500 kgf / 5.000 rpm)



Ensaio 11 (3.000 kgf / 5.000 rpm)



Ensaio 12 (3.500 kgf / 5.000 rpm)

Figura 4-17: Macrografias dos ensaios de 7 a 12 (ver tabela 3.4), realizados com a geometria 2.

Ainda, com relação aos ensaios de 01 a 06 da Tabela 3.4, mas agora sob um aspecto microscópico, nota-se, que as falhas de preenchimento, já visíveis nas macrografias da Figura 4.16, tornam-se mais evidentes, enquanto que aquelas não perceptíveis passam a ser evidenciadas. Este é o caso, por exemplo, do ensaio 01, cuja micrografia (Figura 4.18 A) revelou a existência de um micro defeito na interface inferior esquerda.

As Figuras 4.18 A e B mostram os efeitos do baixo aquecimento gerado na interface inferior para o ensaio 01. Nota-se nessas figuras a quase ausência da ZTA nesta região, visto que, praticamente, uma restrita porção das estruturas ferríticas e perlíticas do material do bloco sofreu alterações por meio de efeitos termomecânicos. Identifica-se, de modo geral, apenas a descontinuidade destas estruturas metalúrgicas na interface pino/bloco. Contudo, o material pertencente ao pino sofreu modificações induzidas por transformações termo-mecânicas, provocando alterações na microestrutura original do pino (Figura 3.8).

Como fora mencionado, os aumentos nos valores da força axial reduziram a dimensão dos defeitos, mas não foram suficientes para eliminá-los em uma escala micrométrica. As Figuras 4.18 C e D, referentes aos ensaios 04 e 05, denotam uma união metalúrgica debilitada nas laterais da interface inferior (interseção entre o fundo e parede lateral do furo), onde o preenchimento não foi realizado com completo sucesso e qualidade desejada.

O incremento de rotação realizado no ensaio 06, combinado com uma força axial da ordem de 3.500 kgf, resultou em melhores resultados de preenchimento, como mostrado na Figura 4.18 E. Acredita-se ter ocorrido, nesse caso, um maior aquecimento na interface lateral inferior, propiciando uma quase ausência de vazios, bem como uma ZTA mais proeminente nesta região interfacial. Neste ensaio, uma velocidade linear de 2,6 m/s (Tabela 3.5) foi conseguida na ponta do pino de preenchimento.

Um bom exemplo de uma união metalúrgica é apresentada na Figura 4.18 F, na interface inferior central do ensaio 06. Nesta, torna-se difícil a distinção entre a microestrutura do pino (porção superior) e a do bloco (porção inferior). Neste caso, tem-se nesta interface uma união coesa e livre de defeitos.

Este resultado é mais um indício da melhoria do reparo, alcançado neste caso, mediante o incremento, tanto da força axial, quanto da rotação. Tal procedimento intensificou os processos de geração de calor, facilitando a obtenção de um fluxo plástico uniforme e capaz de se conformar à geometria do furo. Esta característica é principalmente necessária na região interfacial inferior, pois aí estão concentrados os defeitos observados nos ensaios preliminares.

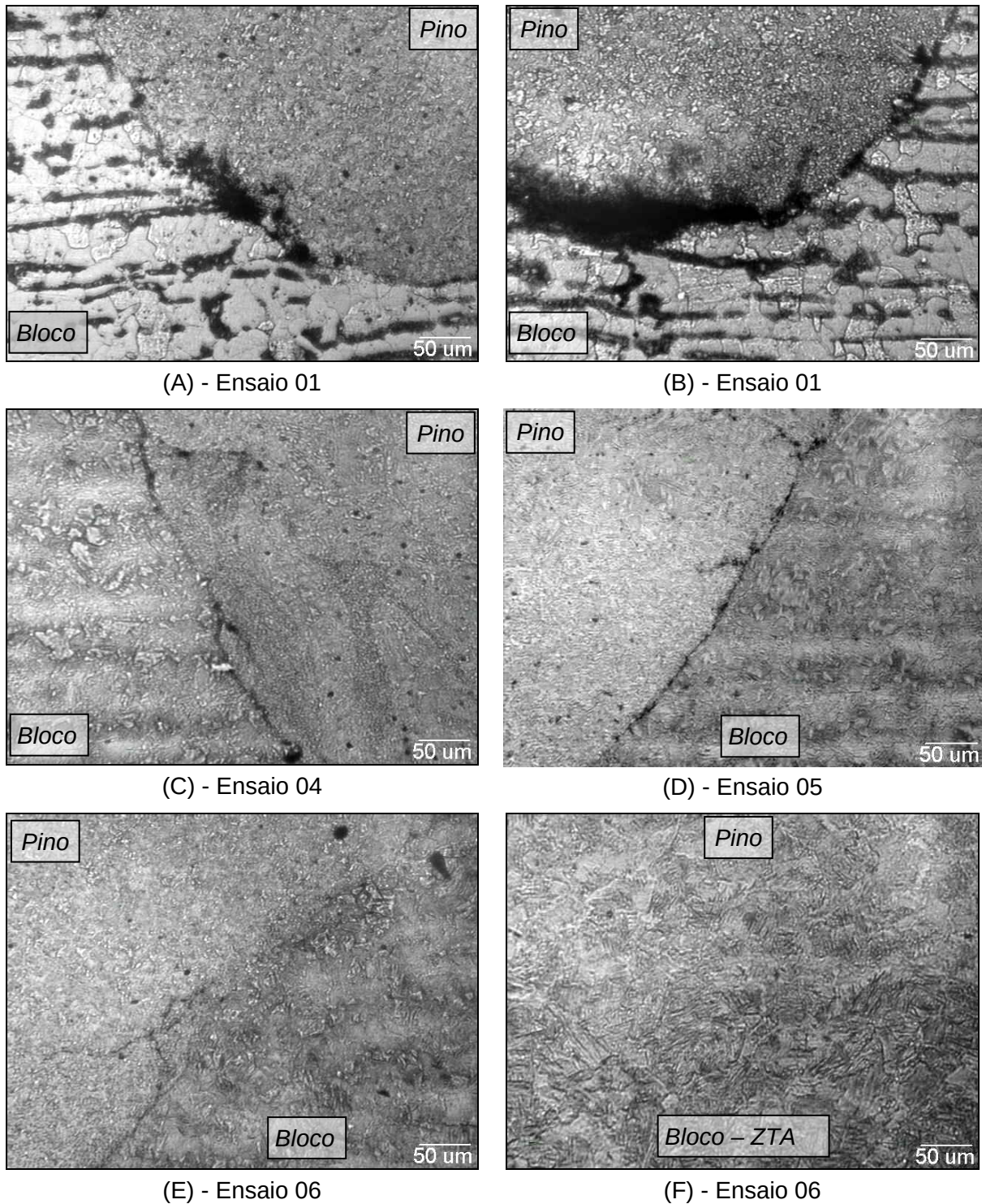


Figura 4.18: Micrografias das amostras produzidas com a geometria 1: (A) e (B) extremidades da interface inferior pino/bloco, esquerda e direita respectivamente para o ensaio 01; (C) extremidade esquerda da interface inferior, ensaio 04; (D) extremidade direita da interface inferior, ensaio 05; (E) extremidade direita da interface inferior, ensaio 06; (F) extremidade central da interface inferior.

Para apreciação microestrutural dos ensaios realizados com a geometria 02, são apresentadas, na Figura 4.19, fotomicrografias, destacando, para alguns ensaios, sítios de defeitos, bem como as microestruturas na interface pino/ bloco. Observa-se dessa figura, que existe, em todos os ensaios com a geometria 02, uma clara tendência à concentração e agravamento de defeitos nas interfaces inferiores, principalmente onde não se percebe a presença da ZTA. Este indício de baixo aquecimento repercutiu, tanto na qualidade do reparo, quanto na microestrutura. Neste caso, os parâmetros de processo empregados propiciaram um baixo aquecimento, e, em decorrência deste fato, um prejuízo na obtenção de um fluxo de material viscoplástico de melhor conformabilidade, que minimizaria a formação de defeitos. Ressalta-se ainda, que mesmo com o uso de uma carga mais elevada, como no ensaio 12, não houve melhoria apreciável na qualidade da união na interface inferior pino/bloco.

As microestruturas na porção inferior dos reparos, mais precisamente, nas zonas interfaciais, obtidas com a geometria 2, caracterizam-se por deformações plásticas superficiais no material do bloco, com desprezíveis transformações térmicas nos constituintes ferrita e perlita originais (Figura 4.19). Entretanto, para esta mesma região, no material do pino, em linhas gerais, é observado nas Figuras 4.19 (A), (B), (G) e (H) a formação de uma textura com linhas de fluxo de material deformado plasticamente.

Notam-se nesta mesma região nítidos grãos de material recristalizado (Figura 4.19 I), presentes em alguns locais da interface inferior. Devido ao baixo aporte térmico, trata-se aqui, muito provavelmente, de uma microestrutura resultante do processamento dentro da região crítica, que leva à formação de uma ferrita refinada, contendo cementita não dissolvida, e algumas colônias de perlita.

Em decorrência dos fenômenos acima descritos, a formação de uniões metalúrgicas na interface inferior não foi satisfatória, sendo caracterizada por descontinuidades na interface pino/bloco.

A comparação dos resultados obtidos com os ensaios realizados com a geometria 01 e 02 ilustram a influência dos parâmetros geométricos na qualidade final do reparo. A diferença entre estas geometrias reside apenas na redução de aproximadamente 3 mm nos diâmetros inferiores, tanto do pino quanto do bloco, mantendo-se os demais parâmetros constantes. Tal observação é um forte indício da real necessidade de se avaliar, mais detalhadamente, nas etapas seguintes de otimização do processo, o efeito dos demais parâmetros geométricos sobre a qualidade do reparo por atrito.

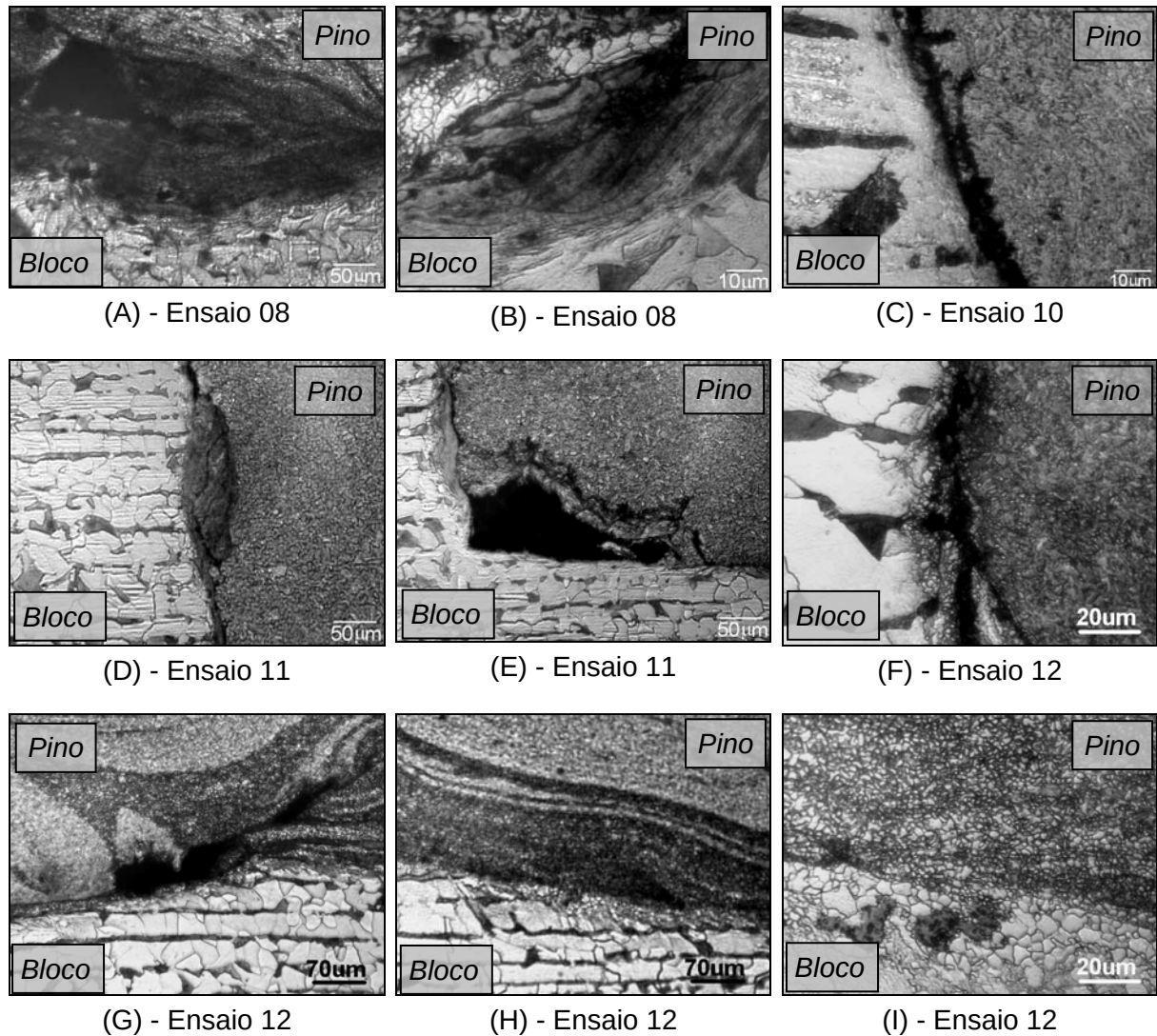


Figura 4.19: Micrografias dos reparos executados com a geometria 2: (A) interface inferior central, (B) imagem anterior com maior ampliação; (C) interface inferior esquerda; (D) interface lateral inferior esquerda; (E) interface inferior esquerda; (F) interface lateral inferior esquerda; (G) interface inferior direita; (H) interface inferior esquerda, (I) ampliação da imagem anterior.

4.1.3 - Ensaios de Microdureza Vickers

As modificações microestruturais decorrentes do processamento por atrito resultaram em alterações nos valores de durezas originais do material, como mostrado na Figura 4.20 para a geometria 1. Nessa figura, notam-se três regiões, onde se encontram, com maior probabilidade, a grande maioria dos valores de dureza para os perfis verticais dos ensaios 01 a 06. Na primeira região, da esquerda para a direita, tem-se, nos menores valores, a microdureza da microestrutura original. Os maiores valores pertencem à ZTA. Na segunda região (central), tem-se os valores correspondentes ao material adicionado no reparo. Por fim, tem-se, na terceira região, as microdurezas do material do pino termicamente modificado. Os valores das posições mais elevadas no pino correspondem à dureza de referência (material sem deformação termomecânica).

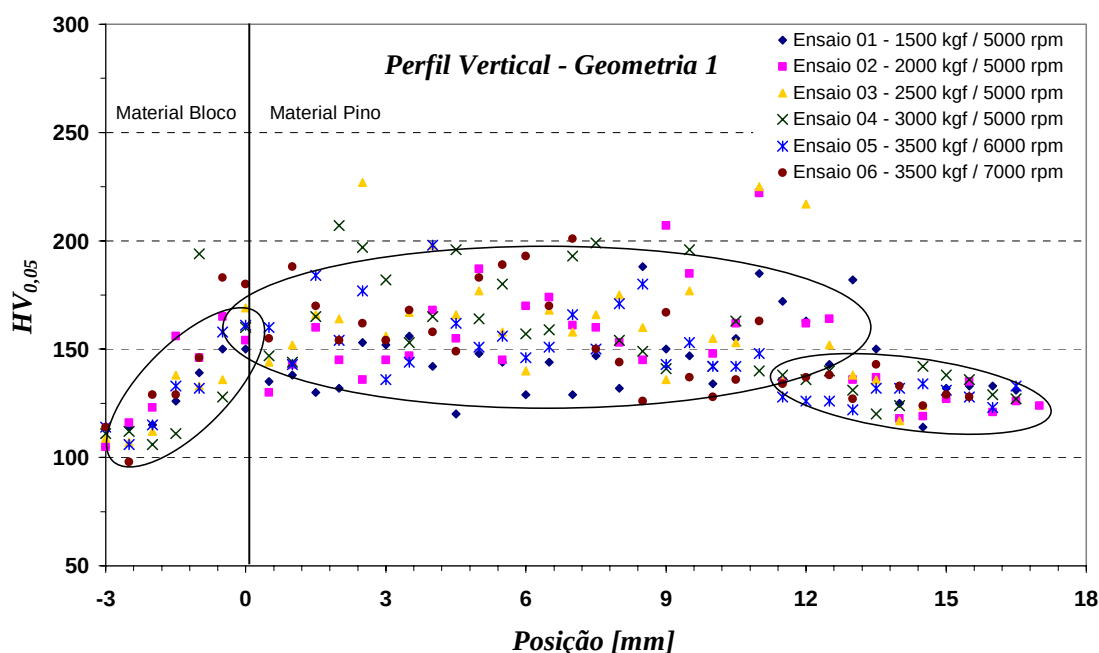


Figura 4.20: Perfis verticais de microdureza Vickers, realizados com carga de 50 gf para os ensaios de 01 a 06, geometria 1.

De modo geral, para todos os ensaios, houve um aumento na dureza, começando na ZTA, até ser atingida a região do pino. Deste ponto em diante, as durezas apresentaram um comportamento médio praticamente constante em função da posição. Ao final, as durezas tendem a se estabilizarem em torno do seu valor de referência (dureza do material não deformado plasticamente).

Os resultados mostraram também, que os valores de dureza sofreram uma ligeira influência dos parâmetros de força e rotação. Inicialmente, na Figura 4.21, é destacado o efeito da força axial em dois níveis (1.500 kgf e 3.000 kgf), a uma rotação de 5.000 rpm.

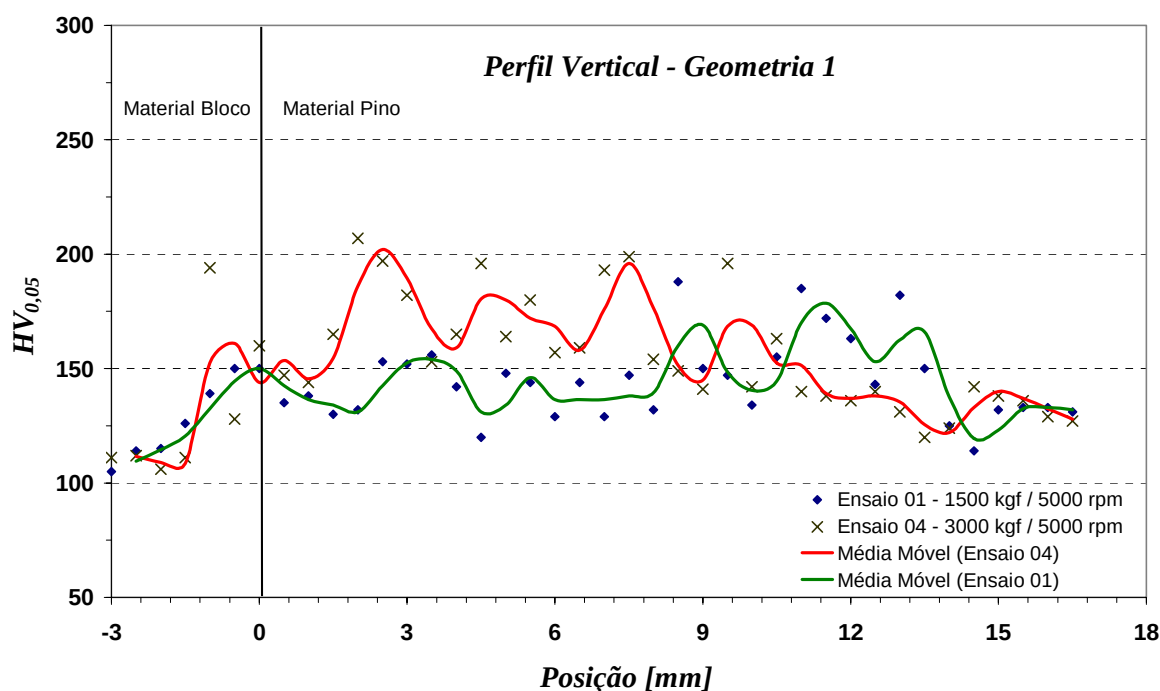


Figura 4.21: Perfil vertical de Microdureza Vickers, realizado com carga de 50 gf, para os ensaios 01 e 04, geometria 1.

Na Figura 4.21, de modo geral, são observados valores de dureza ligeiramente superiores para o ensaio 04 (3.000 kgf), frente aos valores do perfil do ensaio 01 (1.500 kgf). Constata-se ainda no ensaio com carga de 1.500 kgf, bem como nos demais ensaios com cargas baixas, uma tendência da dureza se manter em valores mais elevados nas posições superiores do perfil vertical (posições mais à direita da Figura 4.21). O ensaio 04, a aproximadamente 9 mm da interface inferior, apresentou um decréscimo no valor de dureza, enquanto que para o ensaio 01, esta queda de dureza passa a ser mais evidente na posição a 12 mm. Este efeito pode ser decorrente do maior tempo de processamento para os ensaios com menores forças (Figura 4.13), o que permite uma maior propagação de calor e modificações microestruturais mais abrangentes na região do pino. A literatura técnica relata que, na soldagem por atrito convencional, é de se esperar um aumento na dureza com o aumento da força axial. Todavia, Ellis (1972), em seu trabalho, não reportou mudanças nos valores de dureza em função da força axial.

Com relação à velocidade de rotação, Figura 4.22, não há indicação nítida de alteração dos perfis de microdureza em função da posição. Resultados semelhantes foram obtidos por Ellis (1972) e Meyer (2002).

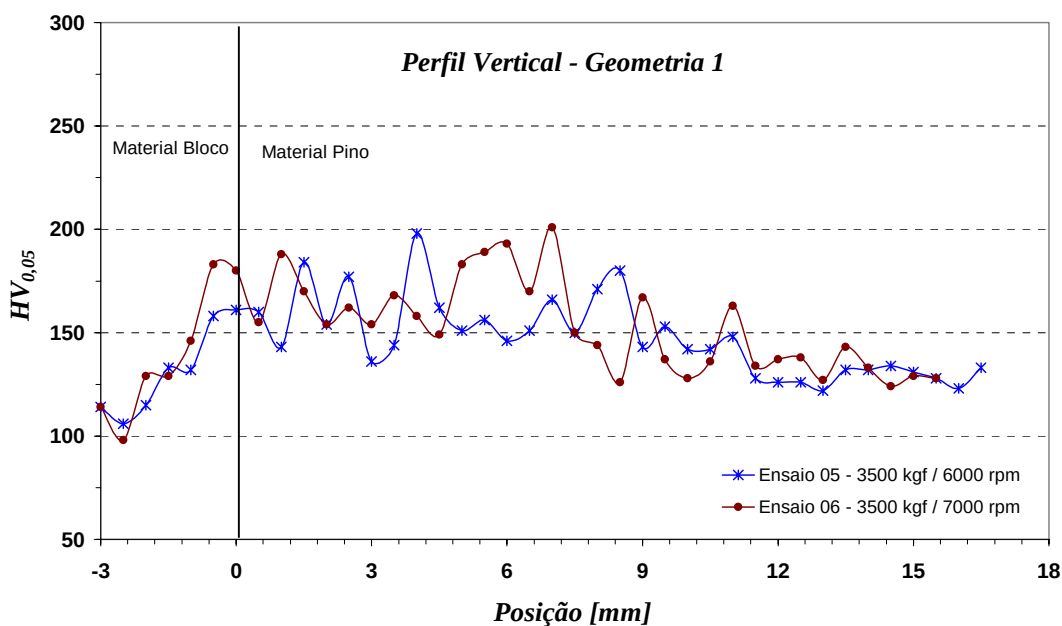


Figura 4.22: Perfil vertical de microdureza Vickers, realizado com carga de 50 gf, para os ensaios 05 e 06, geometria 1.

A Figura 4.23 exibe os perfis horizontais de microdureza, realizados a 5 mm da interface inferior. Esses perfis corroboraram o mencionado anteriormente, no que diz respeito à pequena influência dos parâmetros força axial e velocidade de rotação nos valores de dureza. Todavia, a força axial apresentou ter alguma influência no perfil de dureza, como pode ser observado na Figura 4.23.

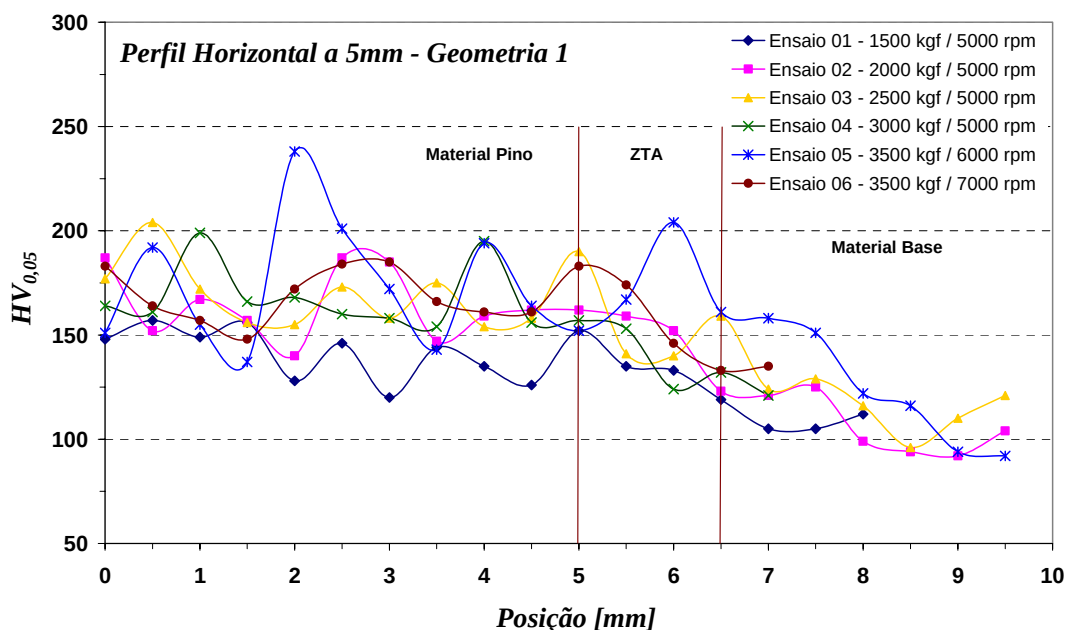


Figura 4.23: Perfil horizontal de microdureza Vickers, situado a 5 mm da interface inferior e realizado com carga de 50 gf, para os ensaios de 01 a 06, geometria 1.

Comparando-se os perfis de microdureza obtidos na geometria 1, com os da geometria 2, notam-se perfis semelhantes. Contudo, como mostrado na Figura 4.24, o efeito do parâmetro força axial sobre os valores de microdureza é menos evidente, haja vista a intensa sobreposição destes para os perfis dos ensaios 08 e 11. É possível, novamente, identificar nesta figura, a tendência das durezas dos ensaios realizados com cargas axiais mais baixas, (ensaio 08), se apresentarem com valores mais elevados, em posições axiais superiores. Esse efeito, como já mencionado, é decorrente dos tempos de ensaios, (ver Figura 4.14). O ensaio 08 apresenta um tempo superior ao dobro do tempo do ensaio 11, o que reflete, diretamente, no aumento do calor total gerado no processo, e, consequentemente, na intensificação e maior alcance das modificações microestruturais.

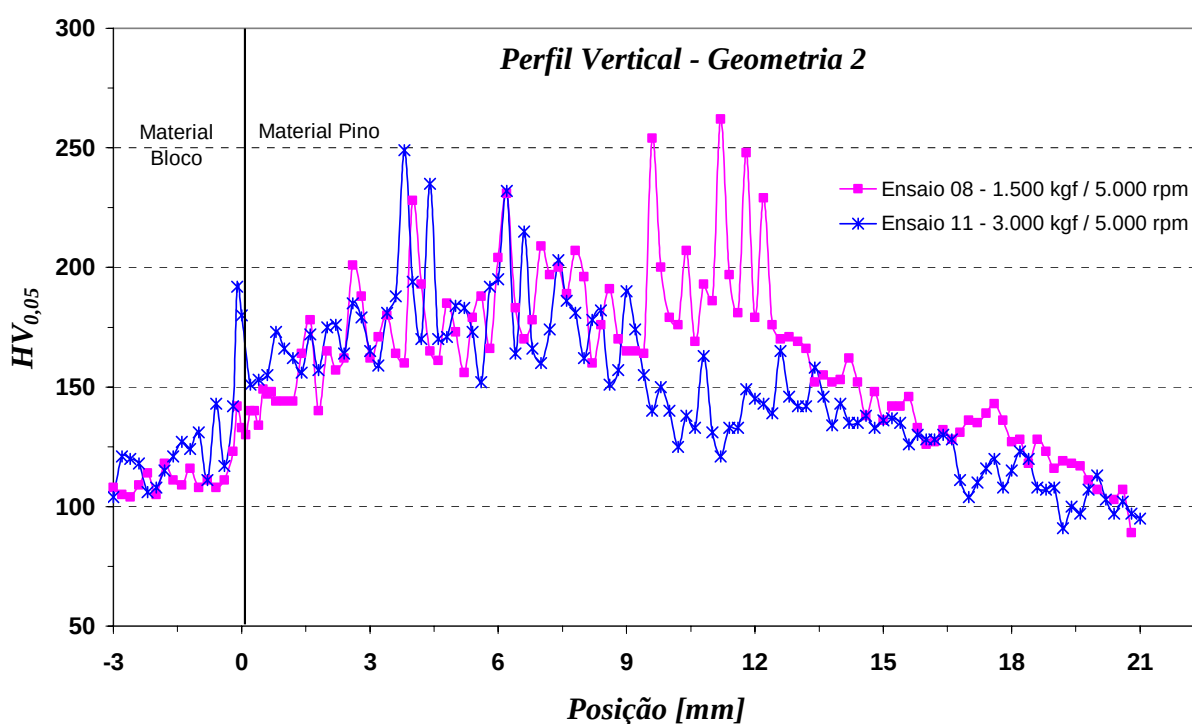


Figura 4.24: Perfil vertical de microdureza Vickers para os ensaios 08 e 11, geometria 2.

Um fato isolado e que merece destaque são os resultados obtidos para os perfis do ensaio 12. Na Figura 4.25 são comparados os valores de dureza medidos no perfil vertical deste ensaio, com os do ensaio 11 (geometria 2). Notam-se elevados valores de dureza para o ensaio 12, realizado com força axial de 3.500 kgf. Neste caso, as durezas do material do pino foram, em média, de 460 $HV_{0,05}$. Estes valores são bem superiores aos alcançados pelos demais processamentos; em termos de tempo de duração para os processos 11 e 12, verifica-se na Figura 4.14, que os mesmos são praticamente idênticos. Logo, o fator tempo de processamento não deve ser o responsável por estas diferenças de dureza.

A fotomacrografia deste ensaio (Figura 4.17) apresenta um aspecto diferenciado em relação às demais imagens. Ressalta-se ainda a maior sensibilidade desta amostra ao ataque químico, com tempos de ataque inferiores aos das demais amostras.

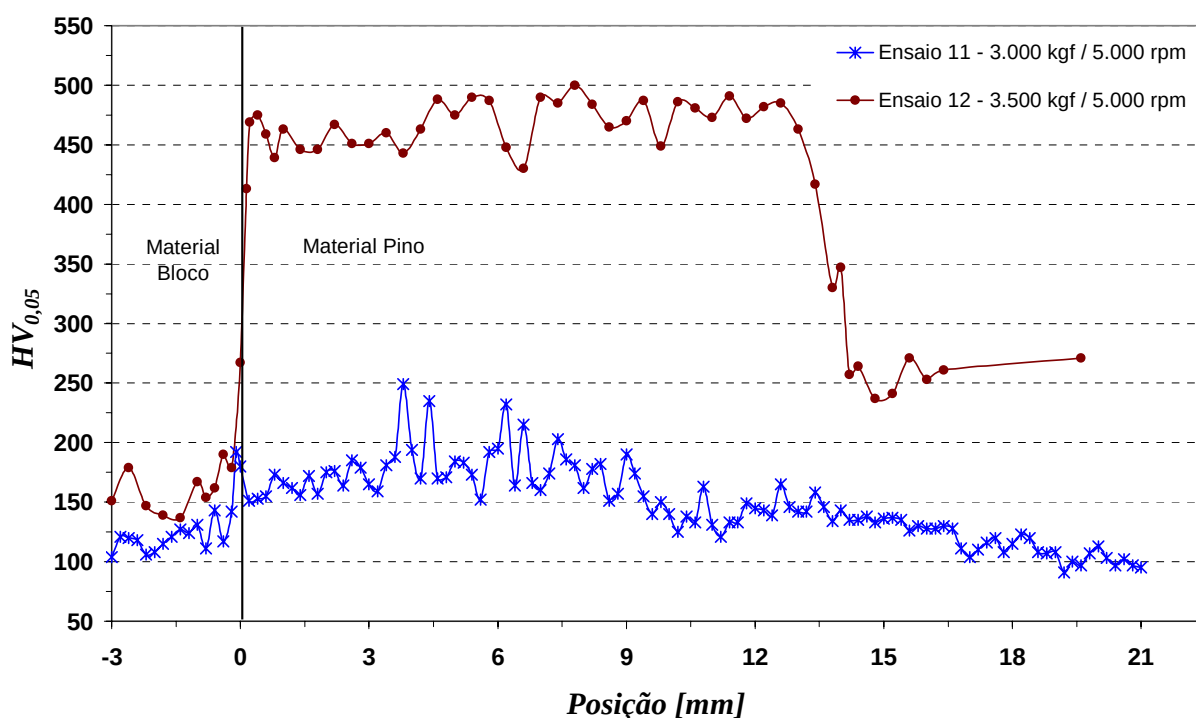


Figura 4.25: Perfil vertical de microdureza Vickers, para os ensaios 11 e 12, geometria 2.

A microestrutura da interface inferior relativa ao ensaio 12 é apresentada na Figura 4.19 (G, H e I). Nesta figura é nítida a presença de uma textura com alto grau de encruamento, o que reflete nos altos valores de dureza.

A Figura 4.26 ilustra a microestrutura na interface lateral, a uma distância de 8 mm da interface inferior. Essa microestrutura corrobora as durezas encontradas neste material. As imagens ilustram a presença de uma microestrutura com caráter acicular, que é constituída, provavelmente, de martensita, bainita e/ou ferrita de Widmanstätten. Esses constituintes aparecem, tanto no material do bloco quanto do pino.

As modificações microestruturais descritas para a amostra do ensaio 12 permitem justificar os elevados valores de dureza encontrados. Tais modificações podem estar ligadas aos parâmetros do processo, em especial, às interações entre os fatores geométricos e força axial, os quais influenciam na quantidade de calor gerado, bem como no desenvolvimento do fluxo plástico.

O comportamento apresentado por esta amostra, induz a presumir, que os parâmetros do processo possam vir a gerar modificações nas propriedades mecânicas, que ocorrem em faixas discretas de operação. Assim, as variações podem ser para um dado

intervalo, pequenas e de difícil percepção, sendo esta uma hipótese, e que merece ser mais bem investigada.

Uma hipótese, que poderia explicar também o maior valor de dureza alcançado na amostra do ensaio 12, seria uma possível má distribuição química ocorrida na material do pino de preenchimento. Concentrações mais elevadas de carbono ou de alguns elementos residuais poderiam, através do trabalho termomecânico, favorecer a formação de uma microestrutura com propriedade de dureza mais elevada que a encontrada para as demais amostras.

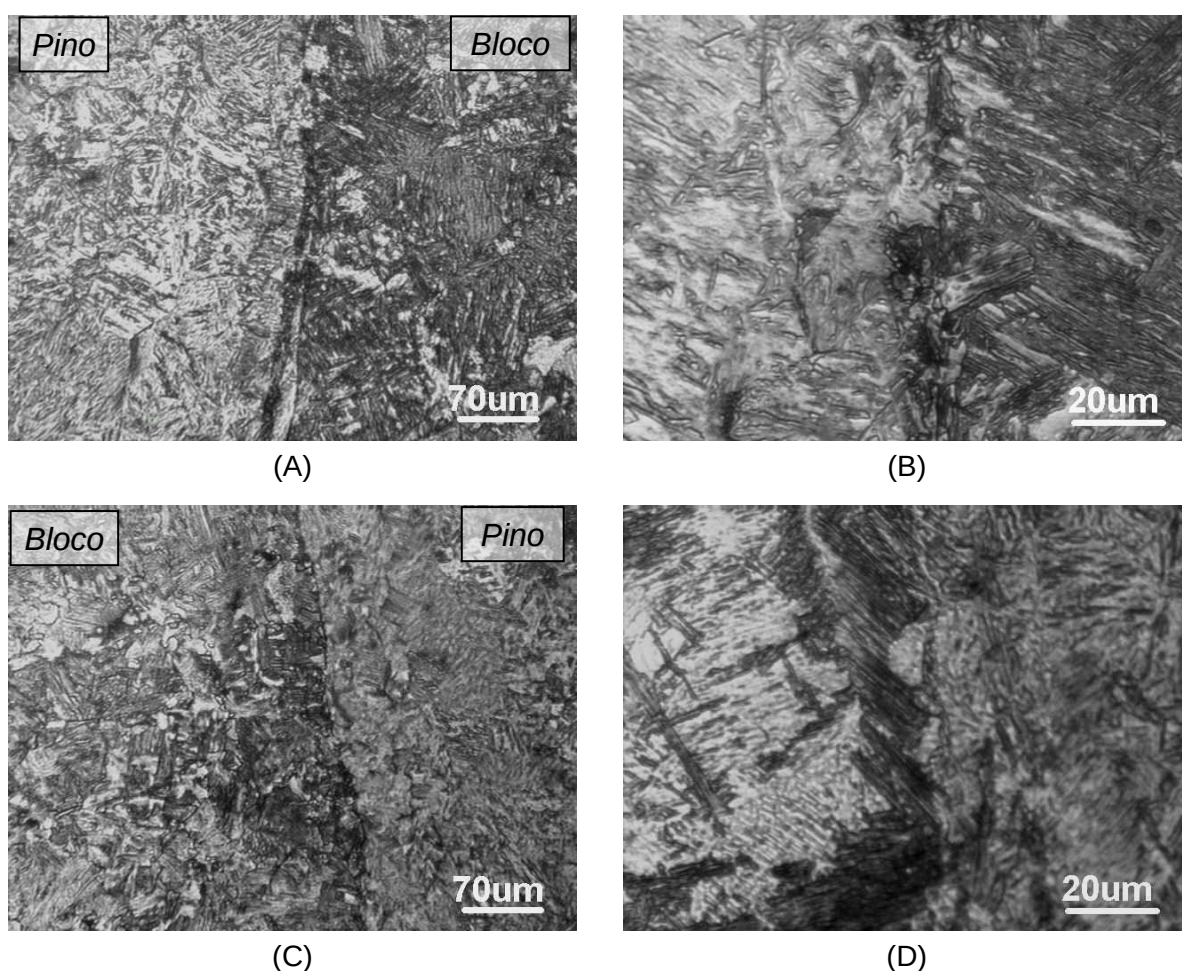


Figura 4.26: Micrografias relativas à amostra do ensaio 12. (A) interface lateral direita a 8 mm da interface inferior; (B) imagem anterior com maior aumento; (C) interface lateral esquerda a 8 mm da interface inferior; (D) imagem anterior com maior aumento.

4.2 - Ensaios de Preenchimento: Otimização de Parâmetros

Os resultados relativos a esta seção são apresentados em dois subtítulos, sendo o primeiro referente aos ensaios realizados em apenas um ciclo de processamento (**Primeira Fase**). O segundo refere-se aos ensaios realizados com dois ciclos (**Segunda Fase**), e onde não mais será avaliado o parâmetro geometria do furo e do pino.

4.2.1 - Primeira Fase

Os resultados aqui expostos fazem referência à matriz de ensaios apresentada na Tabela 3.8. Nesta matriz, além de se investigar os parâmetros força axial e velocidade de rotação, propôs-se também a avaliação de cinco diferentes tipos de pares de geometrias, denominadas como geometrias A, B, C, D e E. A completa descrição e ilustração destas geometrias foram realizadas na Tabela 3.6 e nas Figuras 3.10 e 3.11.

4.2.1.1 - Gráficos do Processo de Preenchimento

A partir dos resultados obtidos dos gráficos de processamento de cada ensaio, foi possível construir o gráfico da Figura 4.27, que apresenta os tempos despendidos para se atingir os comprimentos de queima. As lacunas presentes neste gráfico referem-se aos ensaios, cujo processo foi interrompido em decorrência do travamento do motor hidráulico.

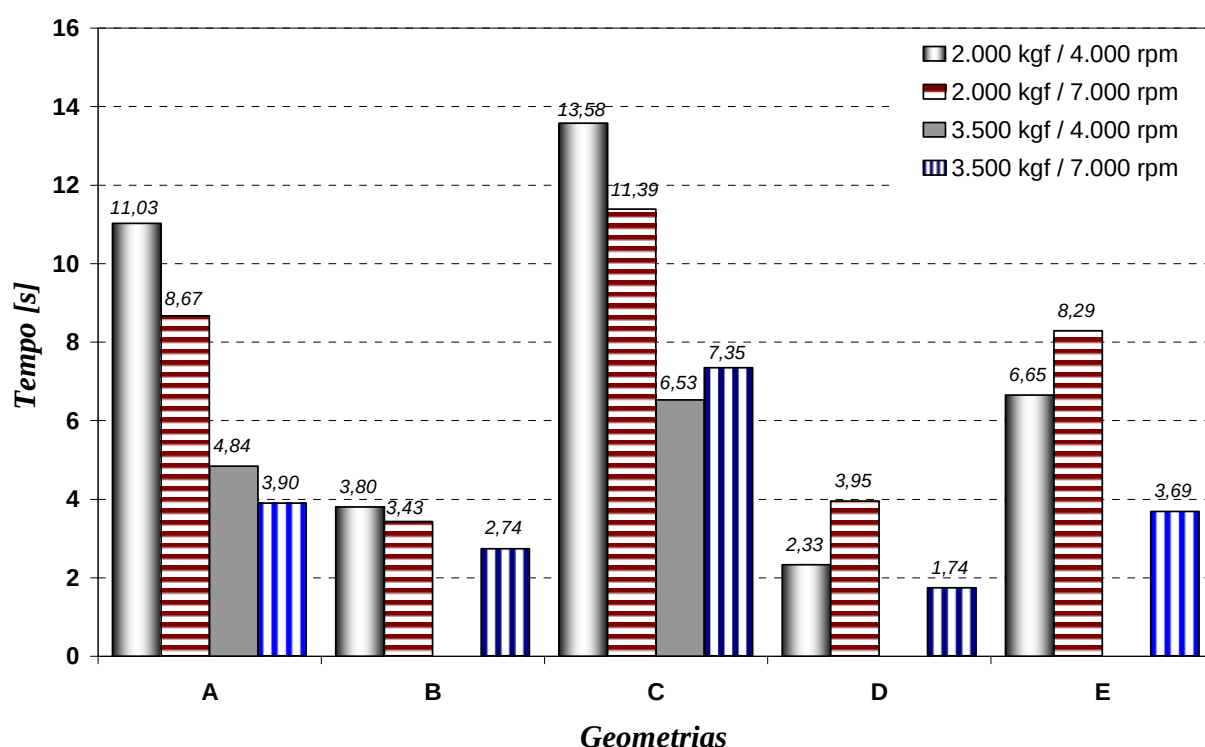


Figura 4.27: Tempos despendidos para os processamentos descritos na Tabela 3.8.

O tempo correspondente ao processamento com 3.500 kgf e 4.000 rpm para a geometria A refere-se ao ensaio 21 da Tabela 3.8. O ensaio de número 6, realizado nas mesmas condições, apresentou travamento do motor hidráulico. Os ensaios com estes mesmos parâmetros também foram repetidos para as geometrias B, D e E, o que culminou, em ambas as tentativas, no travamento do motor.

A Figura 4.27 evidencia o fato de que, aumentos na força axial promovem, tanto a baixas, quanto a altas rotações, uma sensível redução nos tempos de processamento, como verificado nos ensaios preliminares. Isso é observado para todas as geometrias em questão. Consequentemente ocorre também um aumento nas taxas de queima, visto que os comprimentos de queima são os mesmos para cada geometria estudada. Tal comportamento está em conformidade com os resultados obtidos por Meyer (2002).

Nota-se ainda da Figura 4.27, que a influência da velocidade de rotação sobre o tempo de processamento é de menor relevância em relação à força axial, e seu efeito não mostrou uma clara tendência. Observa-se para as geometrias A, B e C, que os processamentos realizados a 2.000 kgf e 4.000 rpm apresentaram tempos superiores aos realizados a 7.000 rpm, e inferiores para as geometrias D e E. Para os ensaios a 3.500 kgf, a geometria A apresentou tempo ligeiramente inferior com a rotação de 7.000 rpm, enquanto que a geometria C apresentou mesmo comportamento com a rotação de 4.000 rpm. Tais resultados ilustram o fato da não correlação do tempo de processamento com a velocidade de rotação.

Como pode ser notado, em alguns ensaios, onde se procura identificar o efeito exercido pelo parâmetro velocidade de rotação, a diferença no tempo chega a ser inferior a um segundo. Tal fato torna difícil precisar, o quanto desta suposta diferença, se refere realmente à rotação, ou se está mais correlacionada aos desvios normais, ocorridos dentro da faixa de operação do conjunto propulsor da haste hidráulica. Como a força axial é o parâmetro preponderante na alteração dos tempos de processamento, pequenos desvios na taxa de aplicação desta, dentro de sua faixa de operação, podem vir a ser o real motivo de tais variações.

Para um comportamento condizente com os resultados obtidos por Vill (1962 citado por MEYER, 2002), para a soldagem por atrito convencional, espera-se que as maiores velocidades de rotação conduzam a superiores tempos de processamento. Esse efeito decorre de alterações nas condições mecânicas entre os planos em contato. Destaca-se aqui, principalmente, o efeito da temperatura sobre o coeficiente de atrito (HUTCHINGS, 1992).

O real efeito do parâmetro velocidade de rotação merece ser mais bem investigado. Para isso, seria razoável o tratamento estatístico dos dados e a realização de ensaios, nos quais sejam desprezados os tempos iniciais de processamento (regime transiente da força axial).

Para uma investigação do comportamento do torque resistivo ao longo do processo, são apresentados na Figura 4.28, as curvas de torque para os ensaios realizados com a geometria A. Nota-se desta figura, que, independentemente dos parâmetros empregados, as curvas de torque são semelhantes. Além disso, observa-se que para o ensaio realizado com baixo valor de força axial e de rotação, existe uma leve tendência do torque resistivo se apresentar com valores um pouco mais elevados. Já para o ensaio realizado a alta força axial, existe um claro aumento no torque resistivo a 4.000 rpm, o qual, após altos valores no início do processo, tende, ao longo do tempo, a valores equivalentes aos obtidos com o ensaio a 7.000 rpm. Estas características se mantiveram para os demais ensaios da Tabela 3.8.

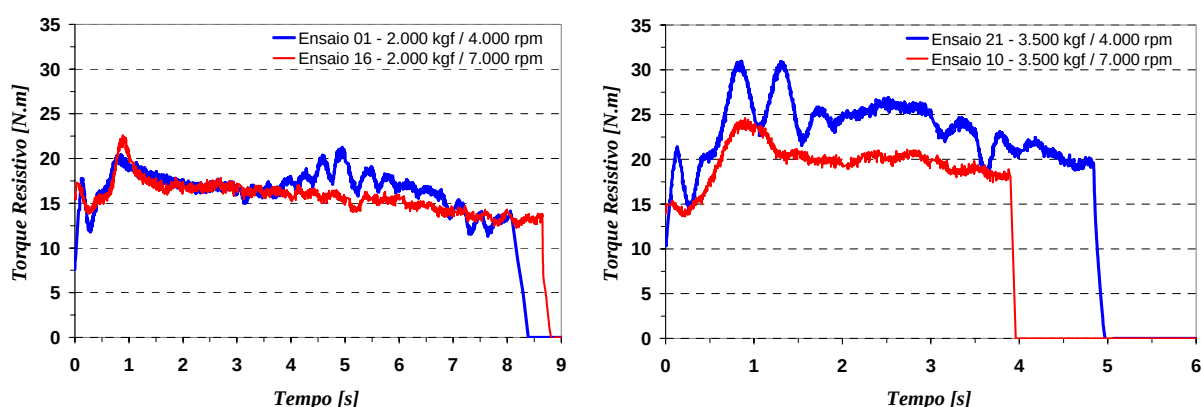


Figura 4.28: Curvas de torque resistivo em função de parâmetros do processo.

Com base na multiplicação dos sinais de torque pelos de rotação, obtiveram-se, como apresentado na Tabela 4.1, os valores de potência média empregada em cada ensaio. Esses valores são apresentados graficamente na Figura 4.29.

Tabela 4.1: Valores de potência média para cada ensaio de preenchimento.

Geometria	Potência Média [kW]			
	2.000 kgf / 4.000 rpm	2.000 kgf / 7.000 rpm	3.500 kgf / 4.000 rpm	3.500 kgf / 7.000 rpm
A	6,97	11,68	9,05	14,48
B	6,16	12,08	-----	10,45
C	6,36	11,28	9,06	12,23
D	7,24	9,37	-----	12,05
E	5,95	11,01	-----	13,97

Os maiores valores de potência média foram verificados nos ensaios realizados em condições elevadas de força (3.500 kgf) e de rotação (7.000 rpm), que correspondem às condições com maiores taxas médias de geração de energia. Aparentemente, a velocidade de rotação, tem uma influência mais pronunciada no aumento da taxa de geração de energia, quando comparado com os efeitos da força axial (ver Figura 4.29, para cada uma das geometrias).

Ainda, na Figura 4.29, nota-se que o fator geométrico tem uma pequena influência frente à força axial e à rotação, no sentido de gerar alterações nos valores da potência média. O valor desta potência foi praticamente igual entre as geometrias estudadas, para uma dada força e rotação.

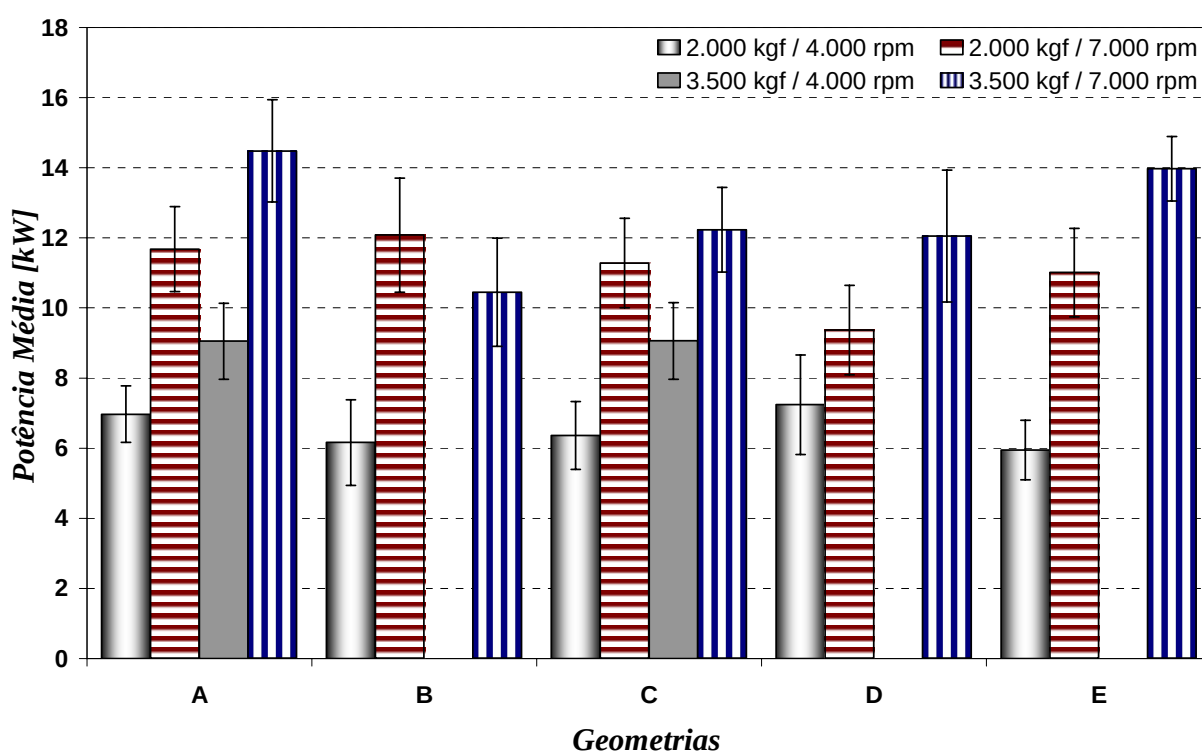


Figura 4.29: Potência média em função dos parâmetros de processamento.

A energia aportada em cada processo é uma função diretamente proporcional aos valores de potência e aos seus tempos de duração. As energias de soldagem envolvidas em cada ensaio foram então calculadas, através do cálculo da integral da curva de potência, e são apresentadas na Figura 4.30.

Nesta figura, observa-se que, aumentando-se a força axial, há uma redução da energia aportada. Esse parâmetro, como visto anteriormente, atua na elevação da potência média, mas causa um efeito mais pronunciado no abaixamento dos tempos de

processamento, como pode ser visto na Figura 4.27. Assim, pode-se concluir que, aumentando-se a força, tem-se uma redução nas energias de soldagem.

Nos ensaios realizados com rotações mais elevadas, há um incremento no nível de energia de soldagem (Figura 4.30), em comparação com os valores obtidos a velocidades inferiores nas mesmas condições de força axial. A rotação, além de elevar os valores de potência envolvidos, possui efeito menos importante, sobre o tempo de processamento, que os encontrados para a força axial. Assim, a velocidade de rotação é proporcional à energia de soldagem, sendo tal afirmação verificada para os cinco pares de geometrias avaliadas.

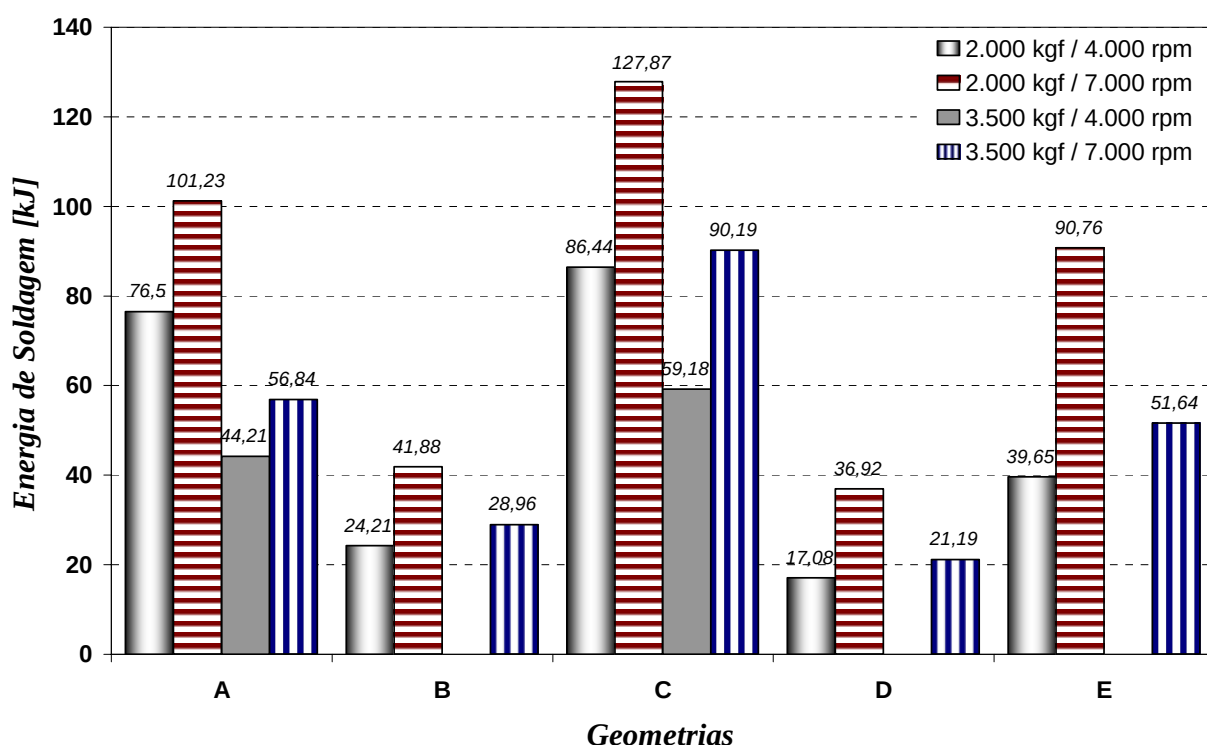


Figura 4.30: Energia de soldagem associada aos parâmetros do processo.

4.2.1.2 - Caracterização Metalográfica

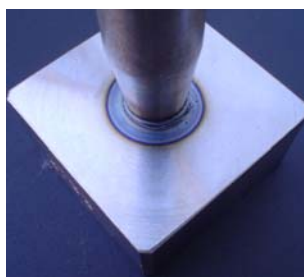
Primeiramente, antes de se proceder às análises da seção transversal, a Figura 4.31 ilustra os diferentes aportes térmicos em alguns ensaios, em função dos parâmetros do processo. Em especial, destaca-se o efeito dos parâmetros geométricos.

Os ensaios 3 e 18 foram realizados com a geometria C e apresentaram maiores tempos de processamento (Figura 4.27). Em decorrência deste fato, independentemente da taxa de geração de calor, um maior aquecimento destas amostras pode ser observado. Ressalta-se, que a diferença entre as geometrias A (ensaio 16) e C, reside apenas no maior ângulo de tronco de cone da geometria C, tanto para o pino, quanto para o bloco.

Os menores aportes térmicos foram observados nos ensaios com as geometrias B e D, ensaios 17 e 19, respectivamente. Essas geometrias apresentam menores diâmetros inferiores e superiores, resultando numa menor velocidade linear (Tabela 3.9) e num menor volume de material aquecido. Mais adiante serão apresentados, mais detalhadamente, os reais efeitos dos parâmetros geométricos na microestrutura.



Ensaio 16 - geometria A



Ensaio 17 - geometria B



Ensaio 18 - geometria C



Ensaio 03 - geometria C



Ensaio 19 - geometria D



Ensaio 20 - geometria E

Figura 4.31: Imagens ilustrativas de blocos de reparo após o seu preenchimento:

Ensaio 16: 2.000 kgf / 7.000 rpm; **Ensaio 17:** 2.000 kgf / 7.000 rpm;

Ensaio 18: 2.000 kgf / 4.000 rpm; **Ensaio 03:** 2.000 kgf / 7.000 rpm;

Ensaio 19: 2.000 kgf / 4.000 rpm; **Ensaio 20:** 2.000 kgf / 7.000 rpm.

As macrografias obtidas ao longo da seção central, na região do preenchimento, para a matriz de ensaios da Tabela 3.8, são apresentadas nas Figuras de 4.32 a 4.36. Destas imagens, as referentes aos ensaios a 3.500 kgf e 4.000 rpm, para as geometrias B, D e E, ilustram os ensaios, cujo processo não pôde ser completado em decorrência do travamento do motor hidráulico.

Um comportamento semelhante a todas as geometrias foi observado, via análise das macroestruturas, qual seja: os processamentos realizados com altas rotações (7.000 rpm) e baixas forças axiais (2.000 kgf) favoreceram a propagação do calor gerado, tanto no material do bloco (substrato), como no material pino (consumível). Esse efeito induz nestes materiais uma maior abrangência das transformações de origem térmica.

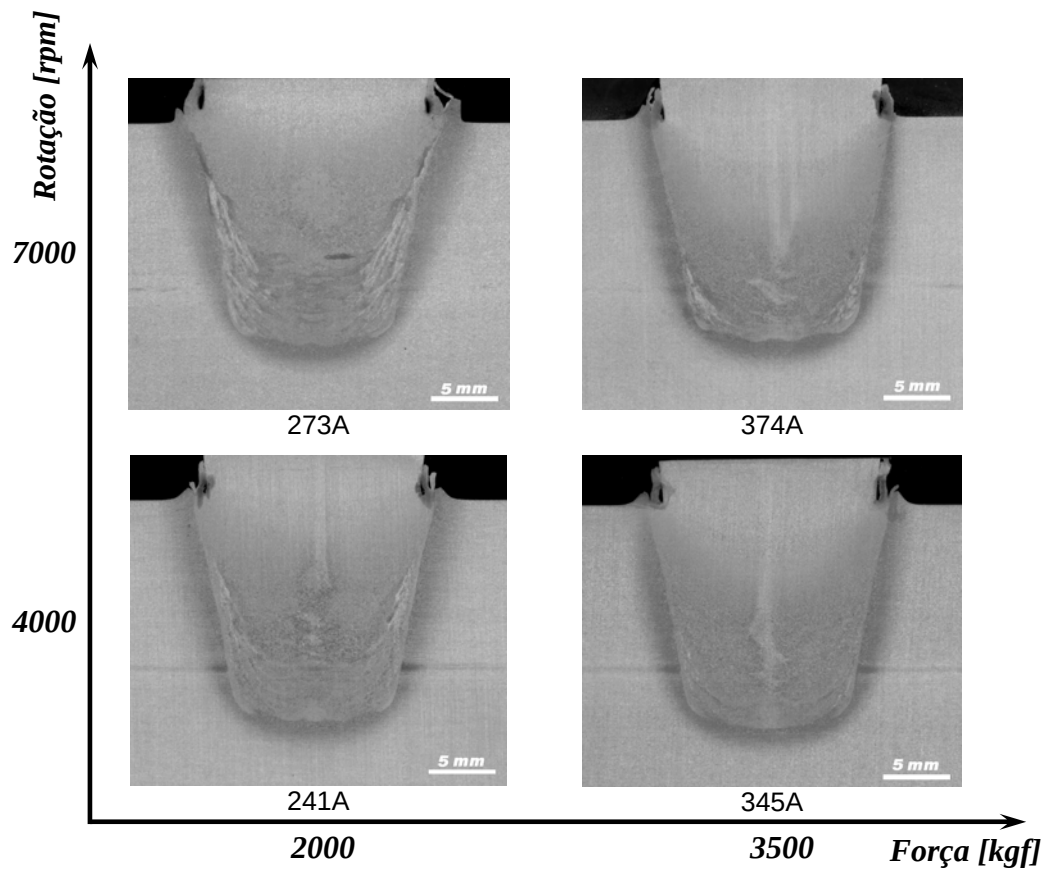


Figura 4.32: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria A.

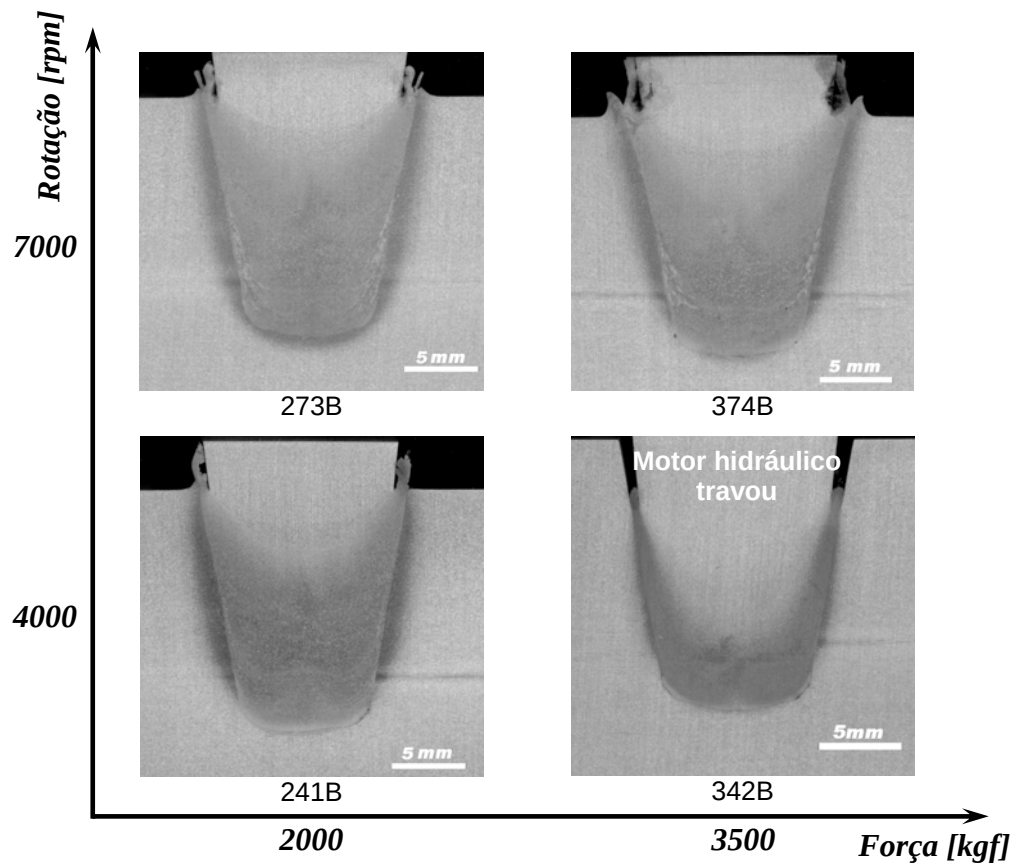


Figura 4.33: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria B.

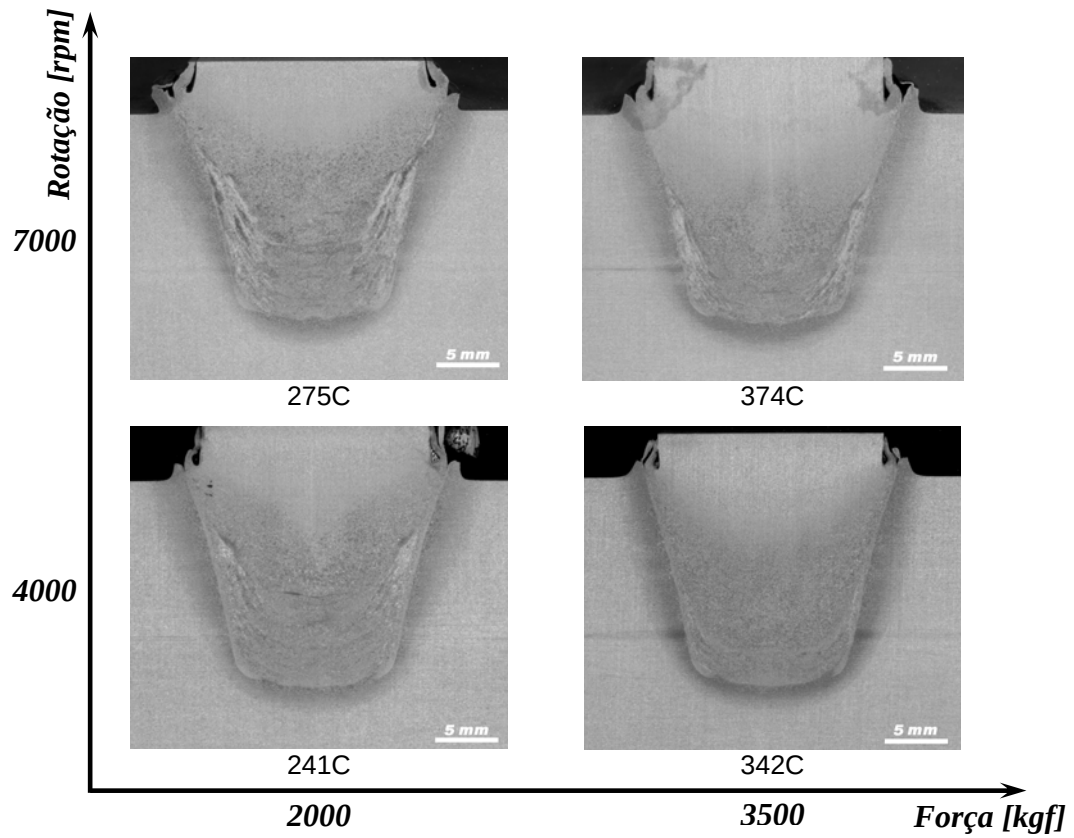


Figura 4.34: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria C.

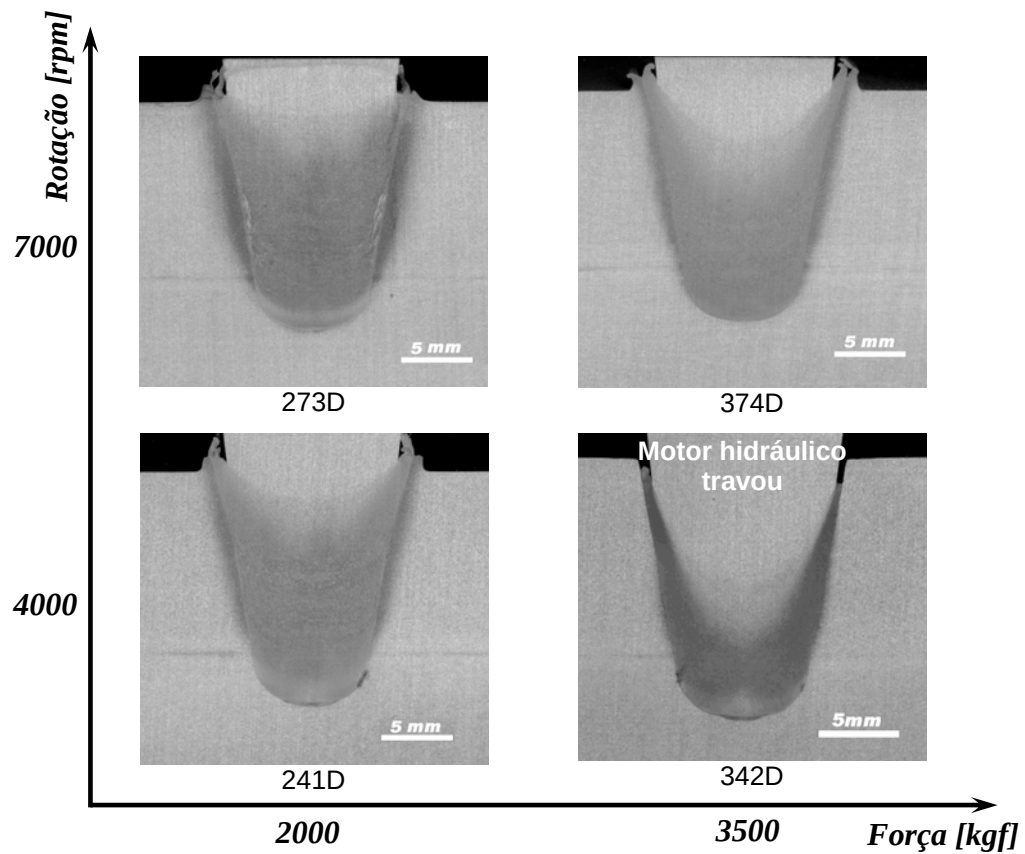


Figura 4.35: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria D.

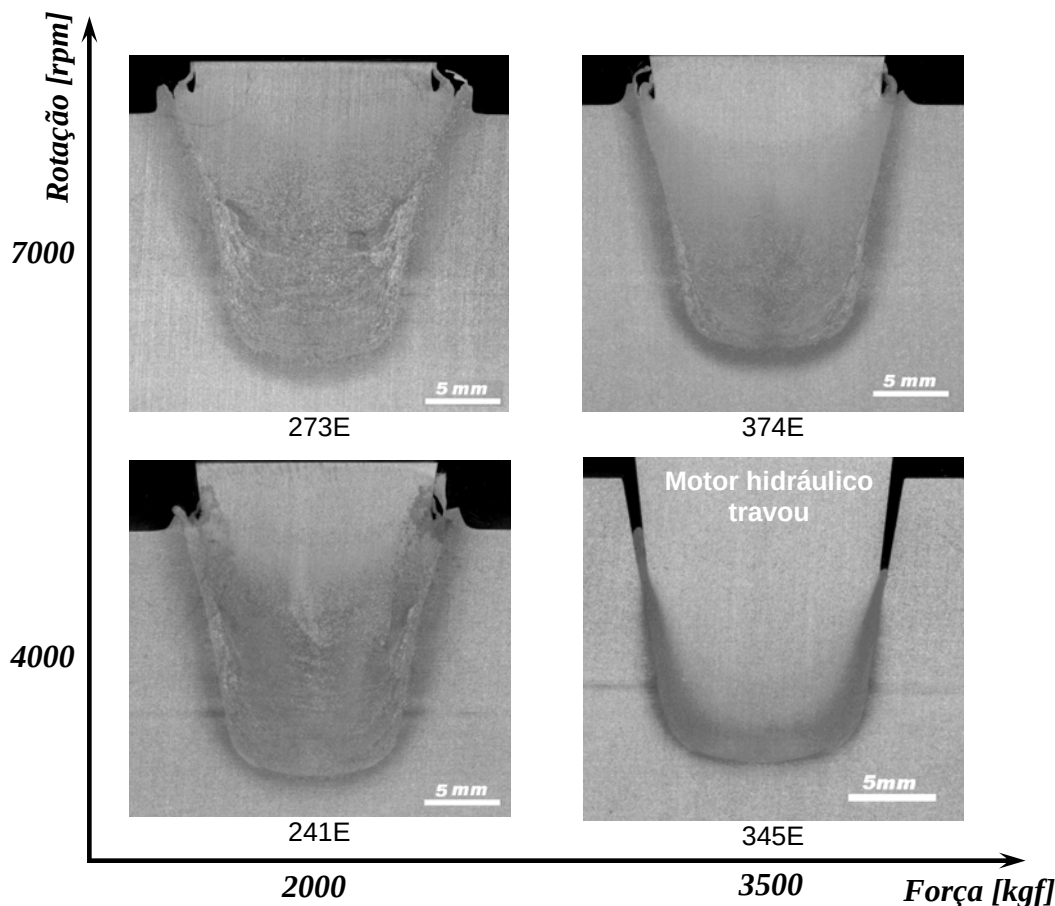


Figura 4.36: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria E.

Pode ser notado das Figuras 4.32 a 4.36, que, para uma dada geometria e valor de rotação, um aumento na força axial promove o estreitamento da ZTA no substrato. Este efeito está associado à maior taxa de queima, que é diretamente proporcional à força axial. O aumento desse parâmetro minimiza o aporte total de energia de soldagem (Figura 4.30). Deste modo, o calor gerado na interface, com as forças mais altas, permanece e atua mais intensamente nesta região, visto que, os menores tempos de processamento minimizam o aporte de calor no material de base, e consequentemente, reduzem a extensão da ZTA.

Para a rotação, valores mais elevados contribuem na intensificação das interações mecânicas entre as superfícies em contato do pino e do bloco, de modo que, a taxa de geração de calor por atrito é favorecida, pelo menos nos instantes iniciais. Tal fato é comprovado ao se analisar a Figura 4.33, cuja macrografia do ensaio 273B apresenta, na porção inferior da interface, um nítido volume de ZTA superior ao da amostra 241B. Esse maior aumento ocorreu apesar de ambas as amostras terem tido tempos de processamento semelhantes (Figura 4.27).

Esta maior ZTA, obtida com a utilização de rotações mais elevadas, não pode ser compreendida pela análise dos tempos de processamento. Um melhor entendimento para a

formação desta maior ZTA pode ser conseguido mediante análise da energia total de soldagem envolvida em cada processo (Figura 4.30).

Quando se analisa a diferença na energia de soldagem (Figura 4.30), para as amostras 241B e 273B, esse valor é de 17,67 kJ a mais para o ensaio a 7.000 rpm, ou seja, 73% a mais do valor alcançado com o ensaio a 4.000 rpm. Esta maior energia aportada no ensaio 237B torna-se um fator mais coerente para explicar a ZTA mais larga na interface inferior desta amostra.

Deste modo, considera-se que, independentemente do tipo de geometria e da força axial, os incrementos na velocidade de rotação irão implicar em aumentos na energia de soldagem, como já o fora mostrado na Figura 4.30. Este aumento de energia é o responsável então pela maior extensão da ZTA em rotações mais elevadas.

Devido às alterações do coeficiente de atrito com a temperatura, não é evidente dizer que maiores velocidades de rotação irão contribuir, ao longo de todo o reparo, com mais altas taxas de aquecimento. Neste trabalho, notou-se apenas que, um valor mais elevado da rotação, nos instantes iniciais do processo, contribuiu para um superior aquecimento inicial. Este fato pode ser visto nas macrografias, e ficará mais explícito a seguir, nas análises micrográficas. Contudo, Meyer (2002) em suas avaliações, a partir da medição pontual de temperatura ao longo da interface (inferior e superior) pino/bloco, observou, para todo o processo, que as mais altas velocidades de rotação conduzem a taxas de aquecimento mais baixas. Este comportamento é condizente com a equação da geração de calor apresentada por Vill (1962 citado por MEYER, 2002).

É provável que seja justamente a fenomenologia ligada às leis de atrito a responsável pelas conclusões controversas a cerca da influência da velocidade de rotação nos processos de soldagem por atrito. Como o coeficiente de atrito não é uma propriedade intrínseca do material, e sim uma propriedade tribológica, o seu valor pode variar bastante ao longo de um processo. Deste modo, as grandezas dependentes do coeficiente de atrito, irão também sofrer alterações. Assim, o comportamento destas grandezas não pode ser generalizado.

Antes da análise via caracterização micrográfica, será feita uma rápida investigação nas macrografias dos ensaios que culminaram no travamento do motor hidráulico. Esse travamento ocorreu nos ensaios a 3.500 kgf e 4.000 rpm (Figuras 4.33, 4.35 e 4.36).

A combinação de forças axiais elevadas e baixas rotações implicaram, como era de se esperar, na elevação das forças de atrito e, conseqüentemente, do torque resistivo. Contudo, o que permitiu efetivar os ensaios nestas condições, para as geometrias A e C, foi certamente a maior dimensão da seção transversal dos pinos. Esses pinos possuem diâmetros inferiores iguais (8 mm), e ângulos de tronco de cone de 15° e 19°

respectivamente, para o pino da geometria A e C. A maior dimensão desta seção conferiu a estes pinos uma maior velocidade linear tangencial (Tabela 3.9), elevando-se assim o aporte térmico. Além disso, conseguiu-se também uma maior resistência à deformação, em comparação com os pinos de seção mais estreita das demais geometrias. Esta resistência mais alta implicou em uma velocidade de queima menor, o que possibilitou também um superior aquecimento do material deformado plasticamente. As altas forças conduzem a elevadas taxas de aquecimento (MEYER, 2002), e o calor gerado passa a ser muito pontual, de modo que os curtos tempos de processamento impedem a propagação do calor gerado para as demais regiões do pino. O aquecimento deficiente dificulta a redução do limite de resistência do material deformado plasticamente, o qual irá, ao longo do processo, conduzir ao gradativo aumento do torque resistivo, levando então ao travamento do motor hidráulico.

Micrografias na região do preenchimento

As micrografias da interface inferior, para os ensaios realizados a 2.000 kgf e 7.000 rpm são apresentadas na Figura 4.37, para os ensaios com as geometrias A, C e E. Nesta figura, são apresentados os aspectos metalúrgicos típicos, obtidos nas interfaces substrato/pino. Ressalta-se aqui, que não houve sensível modificação microestrutural mediante alterações dos parâmetros de processamento nos demais ensaios.

Como pode ser observado, existiu uma completa extinção de defeitos para estas três geometrias, o que foi verificado também, para todas as outras condições de ensaio da Tabela 3.8. Excetuam-se apenas as amostras 342A e 342E, onde ocorreu o travamento do motor hidráulico.

Comparando-se as duas geometrias inicialmente testadas dentro do tópico Ensaios Preliminares, com as três geometrias (A, C e E), destaca-se nestas últimas a presença de maiores dimensões no diâmetro inferior do pino e do bloco, além do maior raio de concordância no fundo do orifício do bloco. Este raio foi elevado de 1 mm para 2 mm nas geometrias A e C, e para 3 mm na geometria E.

O aumento no diâmetro da ponta do pino permite que maiores velocidades lineares sejam alcançadas nas extremidades dos pinos, facilitando o aporte térmico. Além disso, o aumento na seção transversal do pino impede que taxas de queima excessivamente elevadas sejam impostas. Assim, a maior resistência ao deslocamento axial permite que o processo ocorra em um tempo maior, possibilitando um aquecimento mais homogêneo do material do pino.

O aumento no raio de concordância do furo facilitou o escoamento e a acomodação do fluxo plástico, impedindo que o mesmo ficasse impossibilitado de preencher toda a interface inferior.