

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e  
de Materiais – PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA ESTUDO DE  
SOLDAGEM POR FRICÇÃO

Fabiano Mattei

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Porto Alegre  
Fevereiro de 2011

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e  
de Materiais – PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA ESTUDO DE  
SOLDAGEM POR FRICÇÃO

Fabiano Mattei  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) do Departamento de Metalurgia (DEMET) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), dentro do Programa de Pós-Graduação de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
Fevereiro de 2011

Esta Dissertação foi julgada e adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Dr. Rubem Manoel de Braga (UFRGS) Porto Alegre

Prof. Dr. Vitor José Frainer (FURG) Rio Grande

Prof. Dr. Fabiano Dornelles Ramos (IFRS) Caxias do Sul

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho à minha esposa Bianca Lenise  
pelo amor e carinho incondicionais.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente e especialmente agradeço ao orientador Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker pelo apoio e incentivo não somente a este trabalho, mas também para a lida diária no LAMEF.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no qual me dedico há alguns anos.

Aos integrantes do Grupo ProEng, companheiros na jornada, especialmente aos que ajudaram nas montagens e desmontagens da máquina, aos que se dedicaram nas análises dos corpos de prova e os que participaram nas aquisições de temperatura.

Ao Eng. Facundo S. Lopez pelas conversas e trocas de opiniões que ajudaram para o desenvolvimento do equipamento e deste trabalho.

Aos Engenheiros Mecânicos Luís Gustavo Ferrão Avancini e Marcelo Favaro Borges pela ajuda na finalização do projeto e simulação numérica da máquina.

Aos Engenheiros do CENPES/Petrobras, Marcelo Torres Piza Paes inspetor de equipamentos e Ricardo Reppold Marinho engenheiro de equipamentos pelo incentivo e conhecimento de soldagem por fricção.

Ao CNPQ e FINEP/PETROBRAS pelo investimento em pesquisa no qual resultou a construção Máquina de Processos por Fricção (MPF1000).

Às famílias Mattei e Gama pela paciência, carinho, incentivo, força e confiança.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	v
SUMÁRIO .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS: .....	ix
ÍNDICE DE TABELAS: .....	xvi
ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES:.....	xvii
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xxi
1.0 INTRODUÇÃO.....	23
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
2.1 Soldagem: sua história e seus princípios. ....	25
2.2 Definição de soldagem.....	28
2.3 Soldagem por resistência e centelhamento .....	33
2.4 Soldagem por atrito.....	37
2.5 Energia para efetuar a soldagem por atrito. ....	39
2.5.1 Solda por fricção com acionamento por inércia.....	39
2.5.2 Solda por fricção com acionamento direto.....	42
2.6 Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção.....	44
2.7 Processo de caracterização e etapas do processo.....	46
2.7.1 Etapa de Atrito Inicial (Etapa 1) <sup>(27),(28)</sup> .....	46
2.7.2 Etapa de aquecimento (Etapa 2) <sup>(27), (28)</sup> .....	47
2.7.3 Etapa de frenagem (Etapa 3) <sup>(27), (28)</sup> .....	47
2.7.4 Etapa de Colagem (Etapa 4) <sup>(27), (28)</sup> .....	48
2.8 Zonas da solda e a influência dos parâmetros de controle.....	48

2.9	Velocidades e forças envolvidas no Processo.....	51
2.10	Vantagens dos processos de solda por fricção por inércia e direta... 52	52
2.11	Variações do processo de solda por fricção. ....	52
2.12	Deposição de material por fricção.....	55
2.13	Soldagem por fricção e mistura.....	56
2.14	Soldagem por fricção por ponto.....	58
2.15	Processo de soldagem por fricção com pino consumível.....	59
2.16	Processo de soldagem de costura por fricção.....	61
2.17	Equipamentos para soldagem com pinos consumíveis. ....	64
3.0	MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
3.1	Equipamento de Soldagem por Atrito.....	67
3.1.1	Projeto da constituição do equipamento. ....	70
3.1.2	Dimensionamento e simulação dos componentes.....	74
3.2	Programa do Sistema de Controle da MPF1000.....	81
3.2.1	Setup da máquina de soldagem. ....	82
3.2.2	Limitações de programação da máquina.....	88
3.3	Fabricação dos corpos de prova.....	88
3.3.1	Análise do efeito de preenchimento.....	92
3.3.2	Corpos de prova para ensaio de dobramento.....	93
3.3.3	Perfil de dureza. ....	96
3.3.4	Aquisição de Temperatura .....	97
3.3.5	Metalografia .....	100
3.4	Validação da Máquina para outras Geometrias .....	102
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	103
4.1	Soldagem de Corpos de Prova com Geometria Cônica .....	103
4.1.1	Aquisição de dados e efetividade da máquina. ....	103
4.1.2	Análise dos parâmetros. ....	112
4.1.3	Efeito de preenchimento. ....	116
4.1.4	Dobramento.....	120
4.1.5	Perfis de dureza.....	128
4.1.6	Aquisição de temperatura.....	131
4.1.7	Metalografia. ....	139
4.2	Validação da Máquina para outras Geometrias .....	145

4.2.2	Tubo com tubo.....	147
4.2.3	Tubo anel tubo.....	148
5.0	AVALIAÇÃO GLOBAL DOS RESULTADOS .....	152
6.0	CONCLUSÕES .....	155
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	157
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	158
9.0	ANEXOS.....	162



## ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1.1 – Bancada de ensaios mecânicos para até 1000kN. ....	24
Figura 2.1 - Evolução dos processos de soldagem <sup>(4)</sup> . ....	26
Figura 2.2 – Teoria da ligação no processo de soldagem <sup>(1)(5)(6)</sup> . ....	28
Figura 2.3 – Modelo de soldagem por fusão <sup>(5)</sup> . ....	28
Figura 2.4 – Modelo de soldagem por pressão <sup>(3)</sup> . ....	29
Figura 2.5 - Resistência a ponto (A), costura (B) e centelha (C) <sup>(1)(7)</sup> . ....	29
Figura 2.6 - Soldagem manual a arco elétrico <sup>(8)</sup> . ....	30
Figura 2.7 – Soldagem por fusão (eletrodo revestido e MIG) <sup>(1)</sup> . ....	30
Figura 2.8 – Descontinuidades comuns na soldagem por fusão <sup>(9)</sup> . ....	31
Figura 2.9 – Nomenclatura de soldagem por fusão <sup>(4)</sup> . ....	31
Figura 2.10 - Zona Termicamente Afetada para diferentes processos <sup>(4)</sup> . ....	32
Figura 2.11 – Exemplos de soldas por resistência a ponto <sup>(12), (13)</sup> . ....	34
Figura 2.12 – Exemplo da solda por resistência <i>Butt Welding</i> <sup>(12),(14)</sup> . ....	34
Figura 2.13 - Centelhamento na FW (a), solda sem centelhamento (b) <sup>(15)</sup> . ....	35
Figura 2.14 – Etapas do processo de soldagem <i>Flash Welding</i> <sup>(16)</sup> . ....	35
Figura 2.15 – Aplicações de <i>Flash Welding</i> para união de tubos <sup>(19)(20)</sup> . ....	37
Figura 2.16 – Processo de solda por fricção <sup>(21)</sup> . ....	38
Figura 2.17 – Solda a fricção entre Alumínio e Cobre <sup>(22)</sup> . ....	39
Figura 2.18 - Sistema de solda a fricção por inércia <sup>(8)</sup> . ....	40
Figura 2.19 – Diagrama mostrando a solda por fricção com inércia <sup>(7)</sup> . ....	40
Figura 2.20 –Parâmetros de soldagem em solda a fricção por inércia <sup>(7)</sup> . ....	41
Figura 2.21 – Equipamento para solda a fricção por inércia <sup>(23)</sup> . ....	42
Figura 2.22 – Sistema de solda a fricção com acionamento direto <sup>(8)</sup> . ....	43

Figura 2.23 – Soldagem em solda a fricção com acionamento direto <sup>(7)</sup> .....	43
Figura 2.24 – Perfil soldado por fricção. ....	45
Figura 2.25 – Produto produzido com dimensões finais de acabamento <sup>(22)</sup> .....	46
Figura 2.26 – Efeitos da morfologia na união por fricção <sup>(3)</sup> .....	50
Figura 2.27 – Configuração básica entre barras <sup>(27)</sup> .....	53
Figura 2.28 – Soldagem por fricção radial <sup>(29)</sup> .....	53
Figura 2.29 – Soldagem por fricção em tubulações longas <sup>(30)</sup> .....	54
Figura 2.30 – processos de soldagem a fricção não convencionais.....	54
Figura 2.31 – Soldagem por fricção Linear. ....	55
Figura 2.32 – Deposição de material por fricção <sup>(32)</sup> .....	56
Figura 2.33 – Processo de solda por fricção e mistura <sup>(1)</sup> .....	57
Figura 2.34 – Sequência do processo de FSW e o resultado da solda.....	57
Figura 2.35 – Diferentes geometrias de ferramentas para FSW.....	58
Figura 2.36 – Processo de Solda a fricção por ponto <sup>(34)</sup> .....	58
Figura 2.37 – Resultado da solda por fricção por ponto <sup>(35)</sup> .....	59
Figura 2.38 – Regiões da soldagem por fricção por pino consumível <sup>(36)</sup> .....	59
Figura 2.39 – Sequência de soldagem por pino consumível <sup>(27)</sup> .....	60
Figura 2.40 – Geometrias de soldagem por fricção com pino consumível <sup>(37)</sup> ... ..	60
Figura 2.41 – Regiões da solda por fricção por pino consumível <sup>(27)</sup> .....	61
Figura 2.42 – Sequência de soldagem a fricção por costura <sup>(33), (36)</sup> .....	61
Figura 2.43 – Aspecto do acabamento de costura por fricção.....	62
Figura 2.44 – Soldagem a fricção por costura com passes simples e múltiplos. 62	
Figura 2.45 - Soldagem tipo <i>Friction taper stitch welding</i> .....	62
Figura 2.46 – Junta angular para soldagem tipo <i>Friction Stitch Taper</i> <sup>(3)</sup> .....	63
Figura 2.47 - Ângulos de abertura de furo e pino <sup>(38)</sup> .....	63
Figura 2.48 - Influência da força axial na dureza da interface da solda <sup>(39)</sup> .....	64
Figura 2.49 – Equipamentos pertencente ao <i>HZG</i> <sup>(27)</sup> (a) e à Uberlândia <sup>(37)</sup> (b).65	
Figura 2.50 – Equipamento pertencente ao <i>TWI</i> .....	66
Figura 3.1 – Controlador, computador e inversor de frequência.....	67
Figura 3.2 - Unidade hidráulica para 206 bar de pressão. ....	68
Figura 3.3 – Principais características do catálogo de motores elétricos <sup>(41)</sup> .....	69
Figura 3.4 – Fluxograma do equipamento de solda por fricção. ....	69
Figura 3.5 - Projeto virtual do equipamento e foto do equipamento fabricado..	70

Figura 3.6 – Sistema de transmissão sincronizado com tensionador.....	71
Figura 3.7 – Montagem do eixo de rotação no bloco mancal.....	71
Figura 3.8 – Vista em corte com descrição dos componentes <sup>(42)</sup> .....	72
Figura 3.9 – Vedação da caixa de óleo lubrificante <sup>(42)</sup> .....	73
Figura 3.10 – Detalhe do posicionamento do eixo no bloco mancal.....	73
Figura 3.11 – Sistema de guiamento restringindo movimentos em X e Y. ....	74
Figura 3.12 – Dimensões e capacidades dos rolamentos selecionados <sup>(43)</sup> .....	74
Figura 3.13 – Condições de contorno na base do motor e bloco mancal. ....	75
Figura 3.14 - Tensões máximas e equivalentes segundo Von Mises.....	75
Figura 3.15 - Tensões equivalentes segundo Von Mises (vista inferior).....	76
Figura 3.16 – Deslocamentos verticais simulados. ....	76
Figura 3.17 - Condições de contorno e malha para simulação. ....	77
Figura 3.18 – Tensões equivalentes obtidas no eixo e a deformação máxima. ..	77
Figura 3.19 – Tensões máximas principais do eixo.....	78
Figura 3.20 – Vista da simulação do eixo em corte vertical.....	78
Figura 3.21 - Tensões equivalentes obtidas no flange. ....	79
Figura 3.22 – Tensões aplicadas no flange. ....	79
Figura 3.23 – Sistema de fixação da base e do pino para a soldagem. ....	80
Figura 3.24 – Foto do sistema de fixação da base e do pino. ....	80
Figura 3.25 - Tela do computador mostrando o programa do controlador.....	81
Figura 3.26 - Programa para a soldagem por fricção.....	82
Figura 3.27 - Comando inicial de rotação na solda por fricção.....	83
Figura 3.28 - Comando de força para avanço.....	84
Figura 3.29 - Comando de força de avanço e detecção de deslocamento. ....	84
Figura 3.30 – Linhas de comando de frenagem e detecção para recalque.....	85
Figura 3.31 - Comando de força de recalque e detecção de força de recalque...	86
Figura 3.32 - Comando de tempo de espera após recalque. ....	87
Figura 3.33 - Aquisição de sinais pela MTS.....	87
Figura 3.34 - Dimensões para fabricação dos corpos de prova. ....	88
Figura 3.35. - Espectrômetro óptico <i>Spectrolab</i> .....	89
Figura 3.36 – Diferenças de volumes entre o pino e a base.....	89
Figura 3.37 – Corpos de prova depois de usinados. ....	90
Figura 3.38 - Posição de retirada de amostras. ....	92

Figura 3.39 - Divisão das zonas onde podem ocorrer defeitos.....	93
Figura 3.40 - Dispositivo para dobramento e posicionamento da amostra.....	93
Figura 3.41 – Determinação do ângulo de dobramento.....	94
Figura 3.42 - Posição de retirada das amostras para ensaio de dobramento.....	94
Figura 3.43 – Medidas principais para o teste de dobramento.....	95
Figura 3.44 – Microdurômetro automático <i>Instron</i> modelo <i>Tukon 2100B</i> .....	96
Figura 3.45 – Linhas de medição de pontos de dureza.....	96
Figura 3.46 – Termopar utilizado na aquisição da temperatura. ....	97
Figura 3.47 – Localização dos orifícios para instalação dos termopares.....	97
Figura 3.48 – Posicionamento dos termopares e os orifícios da base.....	98
Figura 3.49 – Amplificador e conversor A/D <i>Spider8</i> da <i>HBM</i> <sup>(46)</sup> .....	98
Figura 3.50 – Posicionamento dos termopares na amostra.....	99
Figura 3.51 - Corte dos corpos de prova na eletroerosão a fio. ....	99
Figura 3.52 – Pirômetro em (a) e a filmagem do visor do pirômetro em (b). ..	100
Figura 3.53 – Aquisição da temperatura da rebarba.....	100
Figura 3.54 - Embutidora <i>LaboPress 3</i> e politriz modelo <i>DP10</i> . ....	101
Figura 3.55 - Microscópio óptico marca <i>Olympus</i> modelo <i>BX51M</i> . ....	102
Figura 4.1 – Foto de algumas soldas processadas. ....	103
Figura 4.2 – Soldagem no corpo de prova G01CP12.....	105
Figura 4.3 - Soldagem no corpo de prova G01CP13.....	105
Figura 4.4 - Soldagem no corpo de prova G01CP14.....	106
Figura 4.5 - Soldagem no corpo de prova G01CP28.....	106
Figura 4.6 - Soldagem no corpo de prova G01CP29.....	107
Figura 4.7 - Soldagem no corpo de prova G01CP15.....	107
Figura 4.8 - Soldagem no corpo de prova G01CP16.....	108
Figura 4.9 - Soldagem no corpo de prova G01CP30.....	108
Figura 4.10 - Soldagem no corpo de prova G01CP31.....	109
Figura 4.11 - Soldagem no corpo de prova G01CP32.....	109
Figura 4.12 - Soldagem no corpo de prova G02CP08.....	110
Figura 4.13 - Soldagem no corpo de prova G02CP09.....	110
Figura 4.14 - Soldagem no corpo de prova G02CP11.....	111
Figura 4.15 - Soldagem no corpo de prova G02CP12.....	111
Figura 4.16 - Gráfico de aquisição do corpo de prova G01CP012.....	112

Figura 4.17 - Gráfico da aquisição do corpo de prova G01CP01.....	114
Figura 4.18 - Gráfico da aquisição do corpo de prova G01CP05.....	114
Figura 4.19 - Patamares de variação na força de soldagem.....	115
Figura 4.20 - Comprimento de queima total do pino pela força de soldagem..	115
Figura 4.21 – Solda no corpo de prova G03CP18 e G03CP19.....	116
Figura 4.22 – Solda no corpo de prova G03CP20 e G03CP21.....	116
Figura 4.23 – Defeitos na soldagem na região “C”.....	117
Figura 4.24 – Aparecimento de defeitos na região “A” da soldagem.....	117
Figura 4.25 – Contato inicial entre o pino e o furo.....	118
Figura 4.26 - Corpo de prova G01CP07 tempo do incremento pré-carga.....	118
Figura 4.27 – Defeitos derivados pela baixa força inicial. ....	119
Figura 4.28 – Gráfico do incremento de pré-carga na amostra G01CP12.....	119
Figura 4.29 – Soldagem resultante com incremento da pré-carga.....	120
Figura 4.30 – Rebarba e diferença no diâmetro do pino após a soldagem. ....	120
Figura 4.31 – Força de dobramento para as amostras soldadas com 200 kN...	121
Figura 4.32 - Tensão para dobramento das amostras com soldagem a 200 kN.122	
Figura 4.33 - Dobra das amostras G01CP31A e B, G01CP32A e B.....	122
Figura 4.34 – Trincas das amostras G01CP31A e G01CP31B.....	123
Figura 4.35 – Tensão de dobramento das amostras com soldagem a 300 kN. .	123
Figura 4.36 – Dobra das amostras G01CP14A, G01CP25A e G01CP26A.....	124
Figura 4.37 - Dobra das amostras G01CP14B, G01CP25B e G01CP26B.....	124
Figura 4.38 - Trincas na amostra G02CP14B soldada com 300 kN.....	125
Figura 4.39 - Tensão para dobramento das amostras com soldagem a 350 kN.125	
Figura 4.40 – Dobras das amostras G02CP08A, G02CP09A e G02CP10A. ...	126
Figura 4.41 - Dobras das amostras G02CP08B, G02CP09B e G02CP10B. ....	126
Figura 4.42 – Trincas nas amostras G02CP09A e G02CP10A. ....	127
Figura 4.43 - Trincas nas amostras G02CP08B e G02CP09B. ....	127
Figura 4.44 - Tensões médias de dobramento das amostras dobradas. ....	128
Figura 4.45 - Microdureza vertical para amostras soldadas com 200 kN.....	128
Figura 4.46 - Microdureza vertical para amostras soldadas com 300 kN.....	129
Figura 4.47 - Microdureza vertical para amostra soldada com 350 kN.....	129
Figura 4.48 - Microdureza horizontal para amostra soldada com 200 kN. ....	130
Figura 4.49 - Microdureza horizontal para amostra soldada com 300 kN. ....	130

Figura 4.50 - Microdureza horizontal para amostra soldada com 350 kN. ....	131
Figura 4.51 - Ampliação dos dados de temperatura adquiridos. ....	132
Figura 4.52 - Temperaturas da amostra G01CP28 soldada com 300 kN. ....	133
Figura 4.53 - Temperaturas da amostra G01CP29 soldada com 300 kN. ....	133
Figura 4.54 - Temperaturas da amostra G01CP30 soldada com 200 kN. ....	134
Figura 4.55 - Temperaturas da amostra G02CP11 soldada com 350 kN. ....	134
Figura 4.56 - Temperaturas da amostra G02CP12 soldada com 350 kN. ....	135
Figura 4.57 - Cruzamento de dados de temperatura força e rotação. ....	135
Figura 4.58 – Ampliação da região de início de soldagem.....	136
Figura 4.59 – Surgimento da rebarba durante a soldagem. ....	137
Figura 4.60 - Máxima temperatura na soldagem do G03CP08. ....	137
Figura 4.61 – Temperaturas da amostra G03CP08 soldada com 250 kN.....	138
Figura 4.62 – Temperatura da amostra G03CP14 soldada com 350 kN. ....	139
Figura 4.63 - Macrografia G01CP29 (a) e G01CP11 (b). ....	139
Figura 4.64 - Macrografia G01CP30 (a) e as deformações na furação em (b). ....	140
Figura 4.65 - Segregação originária da produção dos materiais. ....	140
Figura 4.66 - Metalografia da base (a) e metalografia do Pino (b). ....	141
Figura 4.67 - Zona de ligação G01CP32 soldado com 200 kN. ....	141
Figura 4.68 - G01CP32 ZAC do pino soldado com 200 kN. ....	142
Figura 4.69 - G01CP31 ZAC do pino (a) e G01CP31 ZAC da base em (b). ...	142
Figura 4.70 - Zona de ligação G01CP14 soldado com 300 kN. ....	143
Figura 4.71 - G01CP14 ZAC do pino soldado com 300 kN. ....	143
Figura 4.72 - G01CP25 ZAC do pino (a) e G01CP25 ZAC da base em (b). ...	144
Figura 4.73 – Zona de ligação do G01CP09 soldado com 350 kN. ....	144
Figura 4.74 - G02CP09 ZAC pino soldado com 350 kN. ....	145
Figura 4.75 - G02CP10 ZAC pino em (a) e G02CP10 ZAC da base em (b). ..	145
Figura 4.76 – Fixação na máquina em (a) e tubo soldado com chapa em (b). .	146
Figura 4.77 – Soldagem de amostra com tubo e chapa. ....	146
Figura 4.78 – Usinagem dos tubos para soldagem tubo com tubo. ....	147
Figura 4.79 – Início da soldagem (a) e desalinhamento da máquina (b). ....	147
Figura 4.80 - Aquisição dos parâmetros de soldagem de tubo com tubo. ....	148
Figura 4.81 – Usinagem do anel para a soldagem tubo-anel-tubo.....	148
Figura 4.82 – Sequencia de montagem do tubo-anel-tubo. ....	149

Figura 4.83 - Soldagem do primeiro tubo no anel. ....	149
Figura 4.84 - Soldagem do segundo tubo no anel.....	150
Figura 4.85 – Rebarba para soldas com 2 mm em (a) e com 5 mm em (b). ....	150
Figura 4.86 – Macrografia do perfil de soldagem entre tubo-anel-tubo.....	151
Figura 4.87 – Diferenças entre as rebarbas na soldagem entre tubo-anel-tubo.	151
Figura 9.1 - Geometria de pino e base secundários. ....	164

**ÍNDICE DE TABELAS:**

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens do processo de soldagem. ....	27
Tabela 2.2 – Fatores que afetam a seleção dos processos de soldagem <sup>(10)</sup> .....	32
Tabela 2.3 – Aplicações e as normas reguladoras <sup>(8), (11)</sup> . ....	33
Tabela 2.4 - Valores de pressão aplicada para alguns materiais <sup>(7), (18)</sup> .....	36
Tabela 2.5 – Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção <sup>(25)</sup> . 45	
Tabela 2.6 - Relação entre processos de solda por inércia e direto <sup>(25)</sup> .....	52
Tabela 3.1 - Composição química dos materiais utilizados.....	89
Tabela 3.2 – Tabela da relação de forças de soldagem com pressões aplicadas. 91	
Tabela 3.3 – Tabela de relação de forças de recalque com pressões aplicadas. . 92	
Tabela 4.1 – Grupos de soldagem para estudo da efetividade da máquina. ....	104
Tabela 4.2 – Ângulos das amostras com força de soldagem de 200 kN.....	121
Tabela 4.3 – Ângulos das amostras com força de soldagem de 300 kN.....	124
Tabela 4.4 - Ângulos das amostras com força de soldagem de 350 kN. ....	126
Tabela 4.5 – Amostras soldadas para a aquisição de temperatura.....	131
Tabela 4.6 - Temperaturas máximas de soldagem e posição da medição. ....	132
Tabela 4.7 - Temperaturas observadas em vídeo e adquiridas com pirômetro. 138	
Tabela 9.1 - Parâmetros para confecção de amostras com força menor.....	162
Tabela 9.2 - Parâmetros para confecção das amostras de força maior. ....	163
Tabela 9.3 - Parâmetros de soldagem com a geometria secundária. ....	164
Tabela 9.4 – Posicionamento dos termopares com a interface de soldagem....	165
Tabela 9.5 – Médias das principais medições das amostras de dobramento ....	166



## ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIACIONES:

$\mu$ .....	coeficiente de atrito;
A .....	medida de corrente em ampéres;
A/mm <sup>2</sup> .....	ampéres por milímetro quadrado;
AWS .....	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldagem);
cp's .....	corpos de prova;
D .....	diâmetro;
FW .....	<i>Flash Welding</i> (soldagem por centelhamento);
FRW .....	<i>Friction Welding</i> (soldagem por fricção);
I .....	Momento de inércia;
J .....	medida de energia em Joules;
Kg/m <sup>2</sup> .....	Quilogramas por metro quadrado;
kN .....	Quilonewton (1.000 N);
kN/min. ....	Quilonewton por minuto;
kN/s .....	Quilonewton por segundo;
kW .....	Quilowatts;
l/min .....	litros por minuto;
lvdt .....	<i>linear variable differential transformer</i> (sensor de deslocamento linear);
m/min. ....	metros por minuto;
MIG .....	<i>Metal Inert Gas</i> (soldagem de metais com gás inerte);
mm .....	milímetros;
mm <sup>3</sup> .....	milímetros cúbicos;
MN .....	Meganewton (1.000.000 N);
MPa .....	Megapascal;

N	.....	medida de força em newton;
Nm	.....	Medida de torque em newton vezes metro;
P	.....	pressão;
pol.	.....	polegadas;
r	.....	raio;
R	.....	rotação do processo de soldagem;
rev./min.	.....	Revoluções por min.;
rpm	.....	rotações por minuto;
s	.....	unidade de tempo em segundos;
S	.....	Rotação do volante de inércia;
t	.....	toneladas;
TWI	.....	The Welding Institut;
V	.....	velocidade superficial;
V	.....	medida de voltagem em volts;
W	.....	medida de potência em watts;
ZAC	.....	Zona Afetada pelo Calor;
ZR	.....	Zona de Recristalização;
ZTMA	.....	zona termo-mecanicamente afetada;
$\pi$	.....	número constante com o valor aproximado de 3,1415926.

## RESUMO

Os processos de soldagem evoluíram muito nas últimas décadas. Com novas demandas para a indústria, surgimento de materiais mais avançados e com a criticidade dos processos manuais convencionais, o estudo volta-se para os processos de soldagem utilizando o método de fricção.

No Brasil a soldagem por fricção ainda é pouco estudada. Os equipamentos existentes praticamente são em sua maioria importados e servem para uma demanda específica na indústria. A construção de uma máquina para estudos e pesquisa nesta área da soldagem é de grande importância para a evolução dos processos, na descoberta de novos métodos de união de materiais e principalmente gerando tecnologia independente de fontes externas.

Nas instalações do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) foi construída uma máquina com grande capacidade de força para soldagem por fricção, principalmente com pino consumível, onde é possível controlar as principais variáveis envolvidas no processo, contribuindo com a pesquisa neste setor.

O objetivo deste trabalho é a validação da máquina de soldagem para estudos de soldagem por fricção, comprovando a sua eficiência através de repetitividade e possibilidade de reprodução dos parâmetros das soldas realizadas. Para isso, foi criado um programa para a realização da soldagem. Em uma segunda etapa foram efetuadas as modificações necessárias, variáveis de controle e parâmetros da soldagem, analisando os resultados das propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais processados.

Foram utilizados pinos consumíveis em chapas espessas utilizando variação na força de soldagem para verificação do efeito de preenchimento da solda, análises de consumo de material, verificação de dureza, metalografias, aquisição de temperatura e testes de dobramento. Para realizar aquisição da temperatura de soldagem foram

utilizados dois métodos. No primeiro foram produzidas amostras nas quais foram medidas suas temperaturas durante a soldagem através de termopares inseridos na base. O segundo método foi com a aquisição da temperatura da rebarba através de termopares e com pirômetro ótico.

Os resultados dos testes com a temperatura, metalografia, dobramento e a dureza encontrada na interface de soldagem foram correlacionados com os parâmetros utilizados.

Além dos testes com pinos processados em chapas, foram realizadas soldagens em outras geometrias, de modo a testar a capacidade da máquina e prever modificações nas quais serão possíveis estudos de novas técnicas.

## ABSTRACT

The welding processes have evolved greatly over the last decades. With new needs of modern industry, the arise of advanced materials and the criticality of the conventional manual processes, the research turns to welding using friction methods.

In Brazil, friction welding is still not properly explored. Essentially all existing equipment are mostly imported and used for a specific demand in the industry. The construction of a machine for research in this welding area is of great importance for the evolution of the process, the development of new methods of joining materials and mainly to generate national technology independent of external sources.

A high load capacity machine was built at the Physical Metallurgy Laboratory (LAMEF) of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). The main variables involved in the process can be controlled, contributing to researches in this field.

The objective of this work is the validation of the welding machine by evaluating its repeatability. A program was developed to grant the possibility of reproducing the parameters of each welding process.

In a second stage, the influence of the control variables and welding parameter were taken into account by analyzing the mechanical and metallurgical properties of the processed material.

Consumable pins were processed against thick metal sheets varying the welding force to evaluate the effect on filling, deposition rate, hardness, metallography, temperatures cycle and bending tests. Two methods were used to register the welding temperatures. In the first one, the base specimens were instrumented with thermocouples. In the second one, thermocouples and an optic pyrometer were used to register the temperature at the flash.

The results of the temperature tests, metallography, bending tests and bonding-line hardness data were correlated with the welding parameters.

Besides the pin-sheet base combination, other geometries were welded, in a way to test the equipment capacity and look forward modifications that will provide new joining techniques

## 1.0 INTRODUÇÃO

Na década de 40 surgiu a soldagem pelo método de fricção, o processo foi desenvolvido devido à grande necessidade de tecnologia estabelecida pela segunda guerra mundial. Ao longo das décadas o processo foi aprimorando e outras técnicas mais versáteis surgiram, possibilitando soldagens mais complexas, com controles mais sofisticados e refinados.

A soldagem por fricção é um processo de união de materiais no estado sólido, e, por não ocorrer fusão no processo, apresenta inúmeras vantagens sobre os processos convencionais, proporcionando união de componentes de uma forma rápida, com qualidade superior e com a possibilidade de combinação de vários materiais.

Neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica dos principais métodos e variantes do processo de fricção. Após é apresentado o desenvolvimento e controle de um equipamento para soldagem por fricção com pinos consumíveis, o projeto de seus componentes, a montagem, a programação, as primeiras soldagens e o aprimoramento do programa de controle para a produção de soldagens sem defeitos de falta de preenchimento.

Para validar o equipamento, foram realizados testes para o desenvolvimento da soldagem com mudanças nos parâmetros de controle e observação do preenchimento do furo. Após foram escolhidos três parâmetros de força de soldagem sem variar os outros parâmetros de controle e realizadas soldagens para aquisição de temperatura, testes de dobramento e verificação da repetitividade entre comandos e respostas do equipamento. Para realizar aquisição da temperatura de soldagem foram utilizados dois métodos. No primeiro foram produzidas amostras nas quais foram medidas suas temperaturas durante a soldagem através de termopares inseridos na base. O segundo método foi com a aquisição da temperatura da rebarba através de termopares e com pirômetro ótico.

Para analisar a ductilidade e a capacidade de deformação da junta, as soldas foram submetidas aos testes de dobramento e microdureza. Para finalizar, foram realizadas análises metalúrgicas dos corpos de prova observando a microestrutura da soldagem e a macrografia.

Para o desenvolvimento do equipamento de soldagem, por não se tratar de um equipamento para uma solda específica, como nos processos de produção industrial, o objetivo foi projetar uma máquina que seja possível englobar a variação de uma maior quantidade de parâmetros de soldagem. Para isso foram analisados os parâmetros essenciais de modo a obter esta grande variação. Para atender as variabilidades na soldagem, o segredo do equipamento está na programação das etapas do processo e no seu sistema de controle. Outra característica essencial para desenvolvimento e estudo dessas soldagens é necessidade de um equipamento que tenha uma grande rigidez estrutural.

A motivação para a criação da Máquina de Processos por Fricção (MPF1000) foi proporcionada por um projeto no LAMEF. O projeto de testes e análises de soldagens por fricção realizadas no TWI, no qual foram processadas amostras com pinos com 25 mm de diâmetro em chapas com furos cônicos. Inicialmente foi ponderada a construção de um equipamento para ser possível reproduzir as soldas com os mesmos parâmetros utilizados no TWI. Com a evolução do projeto foi decidida a utilização de uma bancada de testes já existente no laboratório adaptando-a para o sistema de fricção. Desta forma o desenvolvimento desta máquina para a soldagem estaria centrado na bancada existente apresentada na Figura 1.1. É uma bancada com atuador servocontrolado com capacidade para tração e compressão de até 1.000 kN.

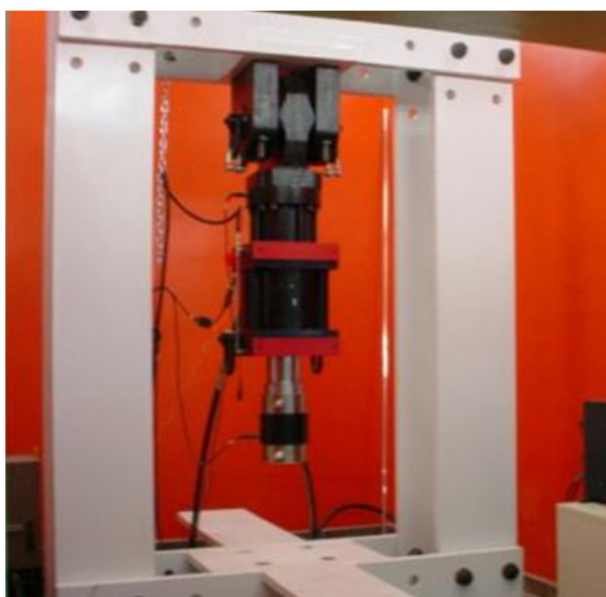


Figura 1.1 – Bancada de ensaios mecânicos para até 1000kN.



## 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Soldagem: sua história e seus princípios.

A arqueologia revela que metais foram encontrados em locais onde o homem primitivo habitava. Há sinais de soldagem em uma peça no Museu do Louvre em Paris, um pingente de ouro com indícios de solda, fabricado na Pérsia por volta de 4.000 A.C.(1), além disso, soldagem por forjamento manual da "Espada de Damasco" (1.300 A.C) igualmente, os gregos e romanos utilizavam um instrumento, similar a um maçarico, porém soprado pela boca, e usado para fundir e soldar o bronze <sup>(2)</sup>.

Foram encontrados pilares de ferro soldados na cidade de Délhi na Índia, que devido a sua técnica da época, são de difícil aplicação operacional.

Segundo Ramalho <sup>(3)</sup> a evolução dos processos de soldagem segue a seguinte cronologia:

- **1800-1850** - cientistas usam um maçarico oxi-hidrogênio como uma ferramenta de laboratório;
- **1800** - Alessandro Volta descobriu que dois metais diferentes conectados por uma substância quando umedecido, tornava-se um condutor, formando uma "pilha voltaica";
- **1801** - Humphrey Davy cria um arco elétrico entre os terminais de um circuito;
- **1831** - Michael Faraday inventa o Dínamo de criação da eletricidade a partir de ímãs;
- **1836** - Edmund Davy descobre o gás Acetileno e, mais tarde, Wohler descobria a forma de obtenção desse mesmo gás, com uma mistura de água e carbureto de Cálcio;
- **1860** - Um inglês chamado Wilde utilizando as teorias de Volta e Davy e fontes elétricas patenteou a hoje conhecida como a "soldagem elétrica";

- **1885** – Nikolai N. Bernardos e Stanislav Olszewski usam o eletrodo de carvão para fusão de aço e realizam a primeira soldagem a ponto pôr resistência;
- **1886 a 1898** – Elihu Thompson da Soldagem Thompson Co. estuda a soldagem por resistência;
- **1887** - Nikolai N. Bernardos e Stanislav Olszewski garantiram uma patente americana para o aparelho de solda;
- **1895** - Le Chatelier estuda a chama oxiacetilênica e prevê suas aplicações industriais;
- **1902** – O alemão Hans Goldschmidt, inventou a soldagem aluminotérmica que consiste em uma reação exotérmica entre o pó de alumínio e um óxido de metal e ainda hoje utilizado para soldar trilhos ferroviários.

A partir de 1916, com o início da primeira guerra mundial os estudos e patentes ligadas ao processo de soldagem foram multiplicados<sup>(2)</sup>. A demanda para a produção e reparos de equipamentos militares foi o principal motivo. Já na segunda guerra mundial, com novas tecnologias houve um grande avanço em diversidades e processos.

Em Outubro de 1941, Klopstock e Neelands<sup>(2)</sup> patenteiam a *Friction Surfacing* sendo patenteado como "Um método melhorado de Junção e Soldagem de Metais" Patente Inglesa registrada com o número 572789.

A Figura 2.1 mostra a linha do tempo e a evolução dos processos de soldagem.

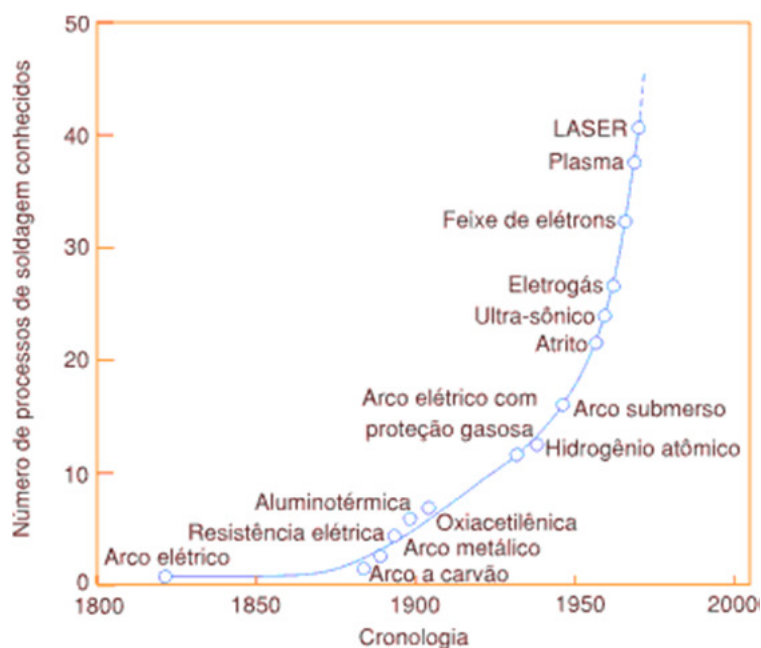


Figura 2.1 - Evolução dos processos de soldagem <sup>(4)</sup>.

Segundo a AWS (*American Welding Society*) a definição do processo de soldagem consiste em: "Processo de união de materiais, usado para obter coalescência localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição." <sup>(4)</sup>. Ou seja, o processo tem por objetivo obter adesão de duas ou mais peças, assegurando a união dos mesmos, uma continuidade ou similaridade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas<sup>(1)</sup>.

A soldagem é um processo muito importante no ponto de vista industrial, na união de materiais, principalmente os metais, sendo extensivamente utilizada na fabricação e recuperação de peças, em equipamentos e estruturas. A aplicação atinge desde pequenos componentes eletrônicos na ordem de microns até grandes estruturas e equipamentos, como: pontes, navios, vasos de pressão, plataformas e outros.

Existe um grande número de processos de soldagem, sendo necessária a seleção do processo adequado para uma correta aplicação. A Tabela 2.1 lista algumas das principais vantagens e desvantagens dos processos de soldagem em relação a outros processos de união.

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens do processo de soldagem.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Juntas com integridade e eficiência elevadas;</li> <li>-Grande variedade de processos;</li> <li>-Aplicável a diversos materiais;</li> <li>-Operação manual ou automática;</li> <li>-Pode ser altamente portátil;</li> <li>-As juntas podem ser isentas de vazamentos;</li> <li>-Custo, em geral, razoável;</li> <li>-Junta não apresenta problemas de perda de aperto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Não pode ser desmontada;</li> <li>-Pode afetar microestrutura e propriedades das partes;</li> <li>-Pode causar distorções e tensões residuais;</li> <li>-Requer considerável habilidade do operador;</li> <li>-Pode exigir operações auxiliares de elevado custo e duração (ex.: tratamentos térmicos);</li> <li>-Estrutura resultante é monolítica e pode ser sensível a falha total.</li> </ul>

## 2.2 Definição de soldagem.

Idealmente, a soldagem ocorre pela aproximação das superfícies de peças a uma distância suficientemente curta para a criação de ligações químicas entre os seus átomos, conforme a Figura 2.2 <sup>(5)</sup>. Porém, estas ligações não ocorrem tão facilmente, pois a aproximação das superfícies a distâncias suficientes para a criação de ligações químicas entre os seus átomos pode ser dificultada pela rugosidade microscópica, camadas de óxido, umidade, gordura, poeira e outros contaminantes existentes em toda superfície metálica <sup>(1)(5)</sup>.

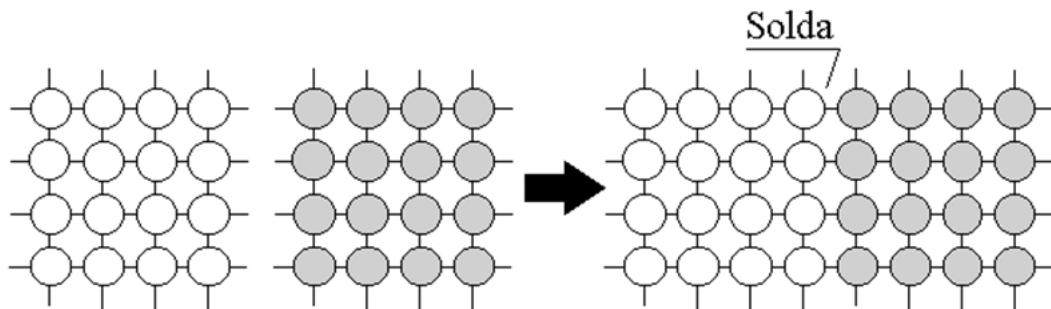


Figura 2.2 – Teoria da ligação no processo de soldagem <sup>(1)(5)(6)</sup>.

Esta dificuldade é superada por duas principais formas, das quais se originam dois grandes grupos: soldagem por fusão e deformação ou pressão <sup>(1)</sup>.

O processo que envolve fusão ocorre aquecendo a região a ser soldada até a sua fusão, destruindo as superfícies e produzindo a solda com a solidificação do material fundido, como visto na Figura 2.3.

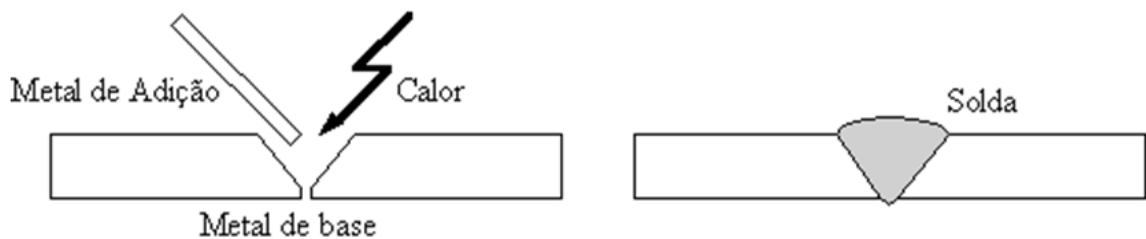


Figura 2.3 – Modelo de soldagem por fusão <sup>(5)</sup>.

O segundo processo consiste em deformar as superfícies em contato, rompendo as camadas de contaminantes, permitindo a sua aproximação e a formação de ligações químicas, como mostrado na Figura 2.4. As superfícies de contato podem ser pré-aquecidas para facilitar a sua deformação.

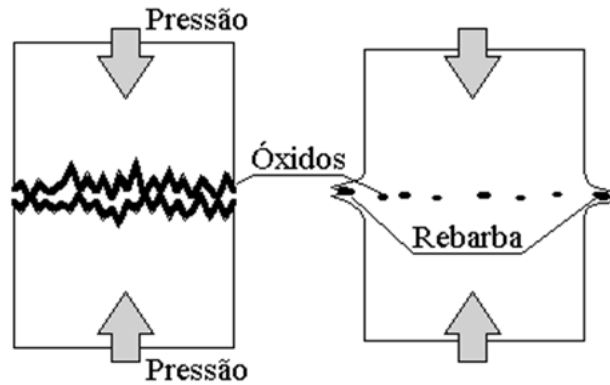


Figura 2.4 – Modelo de soldagem por pressão <sup>(3)</sup>.

No grupo de deformação, incluem-se os processos de soldagem por: ultrassom, fricção, forjamento, difusão e explosão e ainda o processo por resistência elétrica, apresentada na Figura 2.5. Este processo, como a soldagem por resistência a ponto, apresentam características intermediárias entre os processos de soldagem por fusão e por deformação.

Outro processo semelhante é o de solda por centelhamento ou faiscamento ou ainda *FLASH WELDING* (FW) é um processo de solda por resistência em que uma junção de solda é produzida, através de uma ação elétrica e pela aplicação de pressão.

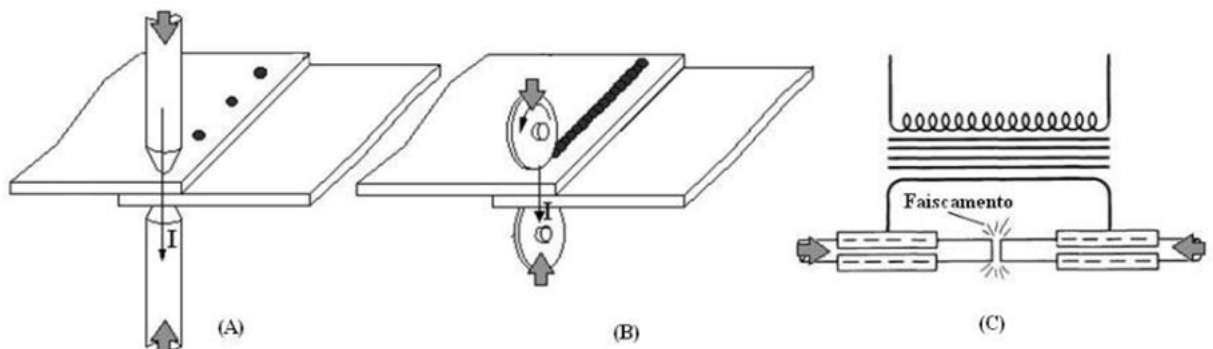


Figura 2.5 - Resistência a ponto (A), costura (B) e centelha (C) <sup>(1)(7)</sup>.

O primeiro grupo inclui um grande número de processos entre os quais se destacam todos os processos de soldagem com arco elétrico que são os mais utilizados na indústria. Além destes, há processos de soldagem por laser, gás e feixe de elétrons. No método a arco é utilizada uma fonte de calor para a fusão da junção, uma descarga elétrica (arco elétrico) em um meio gasoso entre um eletrodo e as peças a serem unidas como pode ser observado na Figura 2.6 e Figura 2.7.

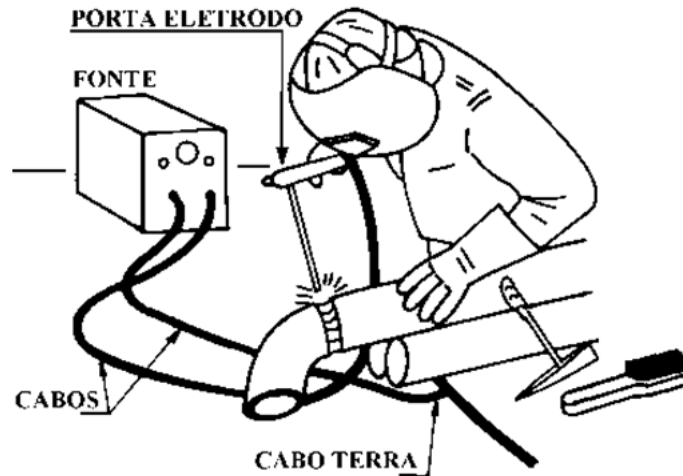


Figura 2.6 - Soldagem manual a arco elétrico <sup>(8)</sup>.

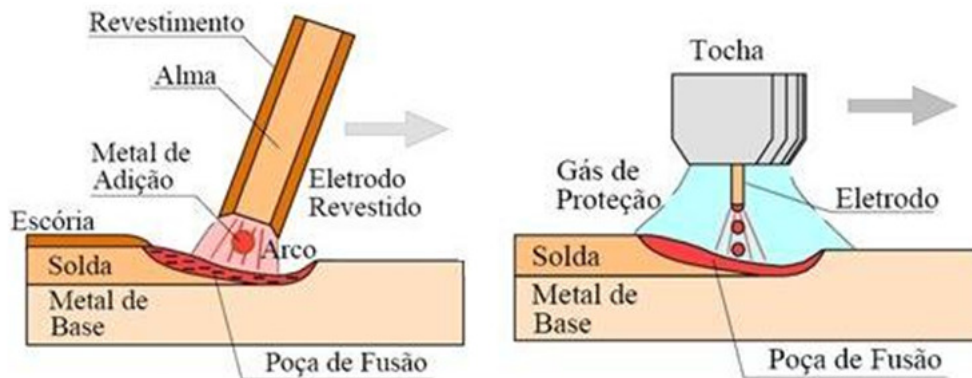


Figura 2.7 – Soldagem por fusão (eletrodo revestido e MIG) <sup>(1)</sup>.

Por sua grande importância e pela variabilidade de processos e parâmetros de soldagem é de fundamental importância que o operador tenha o mínimo de conhecimento básico da tecnologia e dos fundamentos de soldagem, tanto para saber programar e manusear as máquinas que efetuam a solda como para efetuar uma soldagem pelos processos manuais.

Um ponto importante na soldagem é como a estrutura do material é modificada já que inúmeras são as causas que afetam o material. Entre as principais destacam-se, corrente elétrica, velocidades de avanço incorretas, proteção gasosa, temperatura, tipo de materiais a serem unidos e outros <sup>(9)</sup>. Estes parâmetros influenciam de forma importante o desempenho futuro da peça ou a estrutura soldada. Parâmetros incorretos podem ocasionar o aparecimento de discontinuidades, como pode ser observado na Figura 2.8, onde aparecem defeitos como falta de penetração, má operação e multipasses com inclusão de escória.

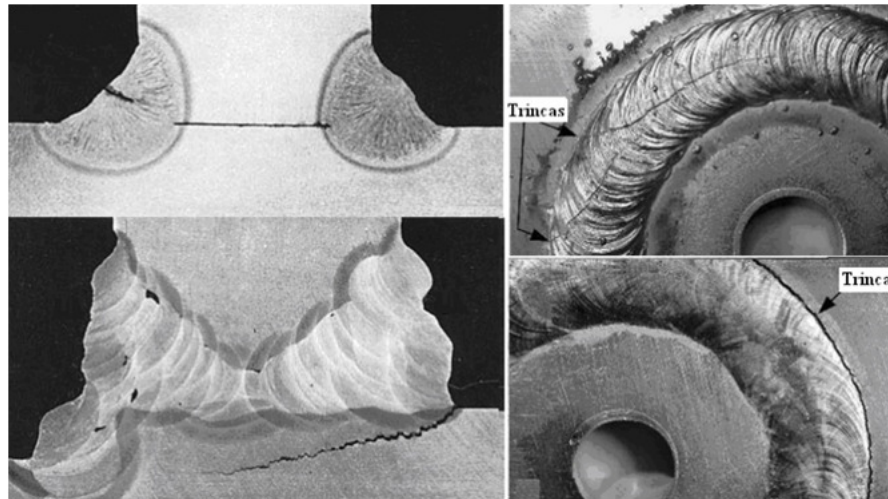


Figura 2.8 – Descontinuidades comuns na soldagem por fusão <sup>(9)</sup>.

Devido à formação da região de fusão nesses processos de soldagem, os principais defeitos são trincas, falta de penetração, porosidades, bolhas, rechupes, crescimento de grãos, inclusões e microestruturas indesejáveis <sup>(9)</sup>.

Um ponto importante refere-se ao aporte térmico <sup>(4)</sup>, ou seja, a quantidade de calor transferida para a região no tempo de exposição do material, conhecidas como as zonas termicamente afetadas (ZTA) Na Figura 2.9 pode-se observar as ZTA's em um cordão de solda, a primeira faixa refere-se à zona que sofreu modificações metalúrgicas e na segunda faixa é a região onde houve um aumento na temperatura, porém não o suficiente para haver transformações.

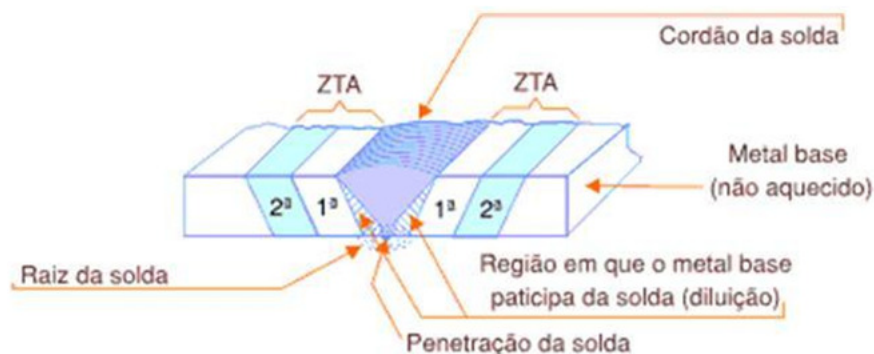


Figura 2.9 – Nomenclatura de soldagem por fusão <sup>(4)</sup>.

As zonas termicamente afetadas nos diferentes processos de soldagem por fusão geralmente são bem maiores que por deformação <sup>(4)</sup>. Assim, a necessidade de um bom controle e escolha dos processos é determinante para a união das juntas soldadas. Na Figura 2.10 pode-se observar a comparação das ZTA's de alguns processos de soldagem.

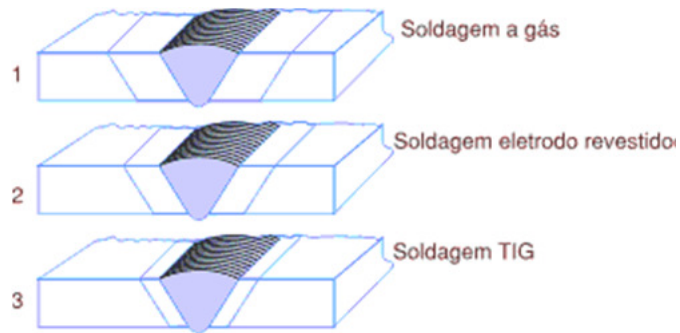


Figura 2.10 - Zona Termicamente Afetada para diferentes processos <sup>(4)</sup>.

Estas mudanças na ZTA são estudadas na metalurgia. Assim, é importante que as pessoas envolvidas nos projetos e supervisão dos trabalhos de soldagem conheçam estes princípios e as normas relativas para obter qualidade e segurança<sup>(10)</sup>.

Para critérios de seleção do processo devem ser levados em conta considerações técnicas, de produção e econômicas<sup>(10)</sup>. Os fatores que afetam as essas considerações são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Fatores que afetam a seleção dos processos de soldagem<sup>(10)</sup>.

<b>Considerações técnicas</b>	<b>Considerações de produção</b>	<b>Considerações econômicas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriedades físicas e metalúrgicas dos materiais;</li> <li>- Geometria e espessura</li> <li>- Projeto de união;</li> <li>- Acessibilidade;</li> <li>- Posição de soldagem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forma e o tamanho da peça a ser trabalhada;</li> <li>- Taxas de deposição;</li> <li>- Disponibilidade de materiais de consumo;</li> <li>- Manutenção do equipamento;</li> <li>- Fumos, ventilação e respingos;</li> <li>- Pré-aquecimento e o tratamento pós-solda;</li> <li>- Habilidade do operador;</li> <li>- Mecanização e automação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Custo do trabalho direto na soldagem;</li> <li>-Trabalho auxiliar;</li> <li>-Custos administrativos;</li> <li>-Depreciação de equipamentos;</li> <li>- Recursos financeiros para desenvolvimento de cursos (capacitação de mão de obra)</li> </ul>

Muitas vezes, mais de um processo de soldagem pode ser utilizado para a fabricação de um mesmo produto final, assim, para a seleção de um processo de união com a qualidade desejada, as considerações econômicas são o principal critério de escolha<sup>(10)</sup>.



As operações de soldagem, como suas etapas, preparação do material, inspeções e testes são reguladas por diferentes códigos e normas, segundo a aplicação desejada. Na Tabela 2.3 são apresentadas algumas aplicações específicas e suas normas orientadoras e fiscalizadoras.

Tabela 2.3 – Aplicações e as normas reguladoras <sup>(8),(11)</sup>.

<b>Aplicações</b>	<b>Normas</b>
Tubulações e dutos (óleo e gás)	API STD- <i>Standard for Welding Pipelines</i>
Estruturas marítimas	DNV - <i>Offshore Structures</i>
Vasos de pressão	ASME <i>Boiler and Pressure Vessel Code</i>
Estruturas soldadas de aço carbono	AWS - <i>Structural Welding Code</i>

Existem outras normas formadas por associações com especificações diferentes como exemplo ISO (*International Organization for Standardization*), AWS (*American Welding Society*), BS (*British Standard Institution*), DIN (*Deustches Institute für Normung*), NF (*Association Française de Normalisation*) e a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). A ABNT representa o Brasil na ISO/IEC e nos foros regionais de normalização, auxiliada por entidades governamentais e privadas.

### 2.3 Soldagem por resistência e centelhamento

A solda por centelhamento, *Flash Welding* (FW) ou ainda a *Flash Butt Welding* (FBW), é um método que apresenta características similares à soldagem por resistência.

Na Soldagem por Resistência, *Resistance Welding* (RW), as peças são soldadas devido à combinação da pressão aplicada e o calor localizado gerado por uma alta corrente elétrica fluindo através da área de contato da solda. O calor produzido pela corrente seria suficiente para fundir localmente a peças no ponto de contato. Ocorre a formação uma poça de metal fundido que é solidificado sob pressão unindo as peças <sup>(7),(12)</sup>.

A soldagem por resistência é amplamente utilizada para unir chapas através de soldas ponto ou ainda para costura de tubos. Na Figura 2.11 pode-se observar como é executada uma soldagem por resistência e sua aplicação na indústria automobilística<sup>(13)</sup>.

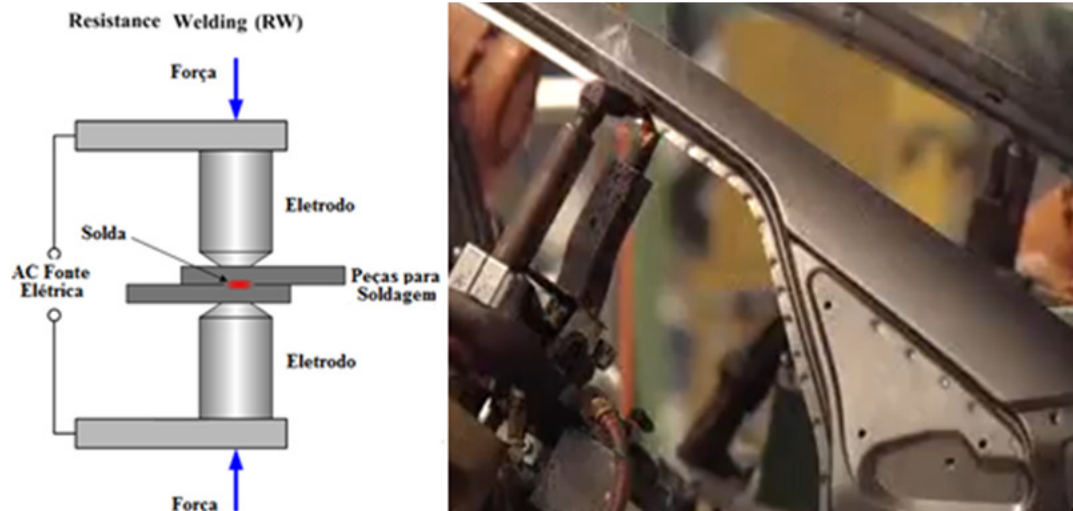


Figura 2.11 – Exemplos de soldas por resistência a ponto <sup>(12), (13)</sup>.

A *Butt Welding* é um processo de solda por resistência que é usado para soldagem de topo para peças pequenas, geralmente arames e barras esbeltas, Figura 2.12. O processo é altamente produtivo e limpo, gerando uniões sem perda dos materiais soldados <sup>(12)</sup>.

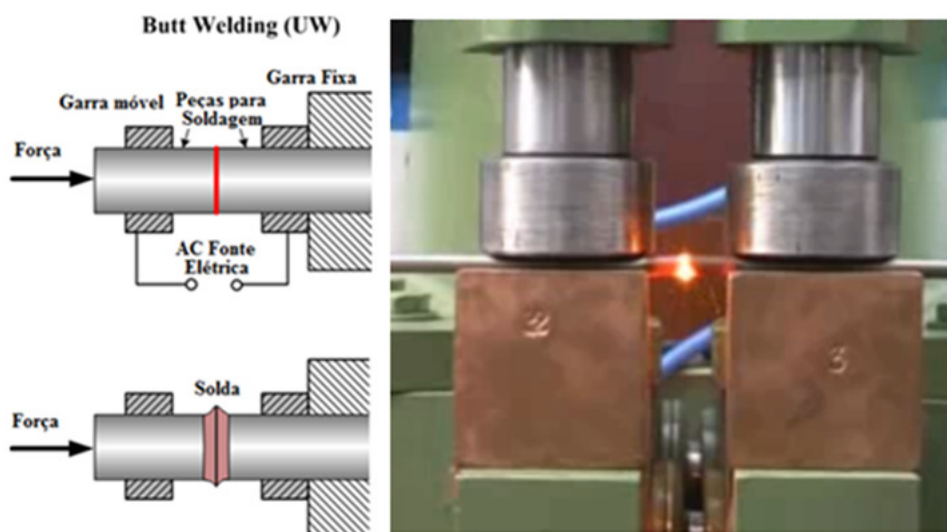


Figura 2.12 – Exemplo da solda por resistência *Butt Welding* <sup>(12),(14)</sup>.

O processo da *Butt Welding* é muito semelhante ao *Flash Welding*, porém a pressão de soldagem e a corrente elétrica são aplicadas simultaneamente e não ocorre o arco elétrico (centelhamento) <sup>(15)</sup>.

A principal diferença entre as outras soldagens por resistência e a *Flash Welding* está na temperatura da região da solda. A FW produz através do centelhamento, Figura 2.13 (a), um gradiente térmico muito mais acentuado e este gradiente térmico, combinado com o recalque, permite a soldagem de uma variedade muito maior de materiais e geometrias que a

solda por resistência <sup>(7),(15)</sup>. Em (b) uma foto de uma soldagem por resistência *Butt Welding* sem o aparecimento do centelhamento.



Figura 2.13 - Centelhamento na FW (a), solda sem centelhamento (b)<sup>(15)</sup>.

Na *Flash Welding* as peças a serem soldadas são fixadas nas garras da máquina de soldagem e aproximadas sem entrarem em contato, conforme a Figura 2.14. A energia elétrica é ligada e, então, as peças são aproximadas uma da outra com velocidade constante  $V_1$ . Essa aproximação causa o aparecimento de um arco elétrico (centelhamento) como um *flash*. As peças são aproximadas e afastadas por um número de ciclos determinado provocando o centelhamento <sup>(16), (17)</sup>.

O centelhamento causa a fusão dos pontos em contato, permitindo, dessa forma, que novos pontos entrem em contato e fazendo que haja aquecimento de toda a superfície de soldagem. Quando as superfícies estiverem aquecidas, a corrente de soldagem é desligada e as peças são fortemente pressionadas uma contra a outra com uma velocidade  $V_2$  maior que  $V_1$ , levando à união metalúrgica da solda <sup>(16)</sup>.

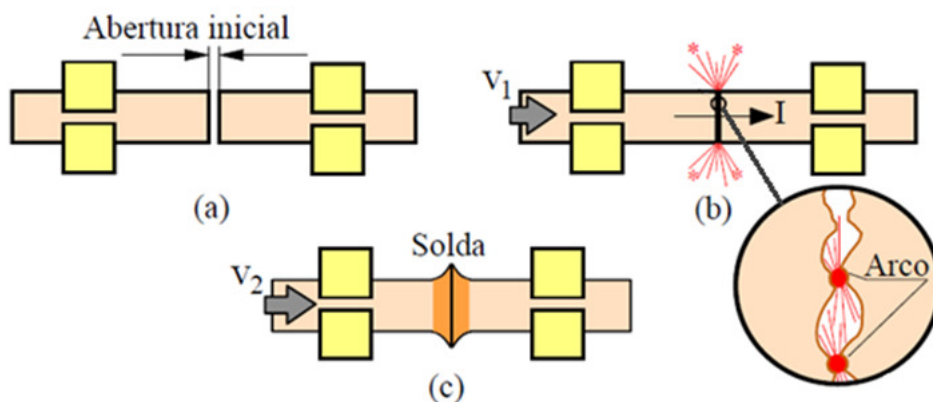


Figura 2.14 – Etapas do processo de soldagem *Flash Welding*<sup>(16)</sup>.

No processo de soldagem *Flash Welding* ocorre entre as superfícies de contato uma fina camada de fusão, porém com a pressão aplicada este material é expulso das superfícies deixando apenas um material plastificado, assim autores consideram esta uma soldagem por deformação<sup>(7)</sup>. Este material expulso é a rebarba da solda que normalmente é removida após a soldagem.

A FW pode ser usada na maioria dos metais sem a necessidade de preparações especiais, exceto para camadas de ferrugem ou graxas. Por ser automática é um excelente processo para as peças produzidas em massa. Contudo exige uma máquina de grande capacidade e deve ser projetada especificamente para as peças a serem soldadas.

As variáveis de soldagem por centelhamento são a corrente elétrica, a pressão de recalque e o tempo<sup>(18)</sup>. A corrente elétrica de soldagem é elevada e fica em torno de 180 A/mm<sup>2</sup> de área de superfície atingindo-se até 100.000 A, a tensão é normalmente de 2 a 24 volts<sup>(17) (18)</sup>.

A FW pode ser usada para unir muitas ligas ferrosas e não ferrosas e combinações de metais diferentes. Além de aços de baixo carbono, pode-se soldar aços de baixa liga, aços ferramenta, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, ligas de magnésio, ligas de níquel e ligas de cobre<sup>(7)</sup>. A pressão de recalque da soldagem recomendada para aços com baixo carbono é superior a 68 MPa e, dependendo do material, ela pode ser muito maior. A Tabela 2.4 mostra algumas pressões utilizadas no recalque dos materiais.

Tabela 2.4 - Valores de pressão aplicada para alguns materiais<sup>(7), (18)</sup>.

<b>Materiais</b>	<b>Pressão de Recalque</b>
Aço com baixo Carbono (SAE 1020,1112,1315)	69 MPa
Aços com alto Carbono (SAE 1045,1065,4140)	103 MPa
Aços Ligados (SAE 4340, 4640)	172 MPa
Aços inoxidáveis Austeníticos	192 MPa
Aços Inoxidáveis Martensíticos	350 MPa
Ligas de Alumínio	549 MPa
Ligas de Cobre	175 MPa
Ligas de Níquel	308 MPa
Ligas de Titânio	192 MPa

Para geometrias de tubos ou peças ocas, as pressões devem ser reduzidas. Caso a pressão de soldagem utilizada for insuficiente, o resultado será uma solda porosa de baixa resistência. Já um excesso de pressão resulta na expulsão do metal de solda gerando uma solda fria com baixa qualidade e pouca resistência. A Figura 2.15 mostra exemplos de soldagens para união de tubos utilizando *Flash Welding*.

Outro fator importante para este tipo de soldagem é a velocidade do recalque, ou o tempo entre o final do período de centelhamento e o fim do período de recalque que deve ser extremamente pequeno para não ocorrer oxidação das superfícies.



Figura 2.15 – Aplicações de *Flash Welding* para união de tubos<sup>(19)(20)</sup>.

#### 2.4 Soldagem por atrito.

O processo mais conhecido de soldagem por deformação é a soldagem por fricção também conhecida como “*Friction Welding*” (FRW não confundir com FW), este tipo de solda apresenta muitas vantagens em relação a outras técnicas de junção.

A solda por fricção é um processo de união de materiais sólidos que produz um tipo de “mistura” entre os mesmos <sup>(7)</sup>. Duas peças são axialmente alinhadas e atritadas através de movimentos relativos e com a aplicação de forças compressivas entre as superfícies é produzido calor. O material aquecido é deslocado plasticamente nas superfícies de atrito e assim ocorre uma junção com qualidade de forjado <sup>(7)</sup>.

Na Figura 2.16 pode ser observado como ocorre uma soldagem. Primeiramente uma peça é fixa e na outra é aplicada uma rotação (A), depois as peças são aproximadas e se inicia o atrito entre as superfícies (B). Após, as superfícies aquecem e se deformam devido ao atrito e à pressão criada pela força axial aplicada (C) e, finalmente, a rotação é cessada, então uma força axial adicional (força de forjamento) faz com que a solda seja consolidada criando um colar de rebarba (D).

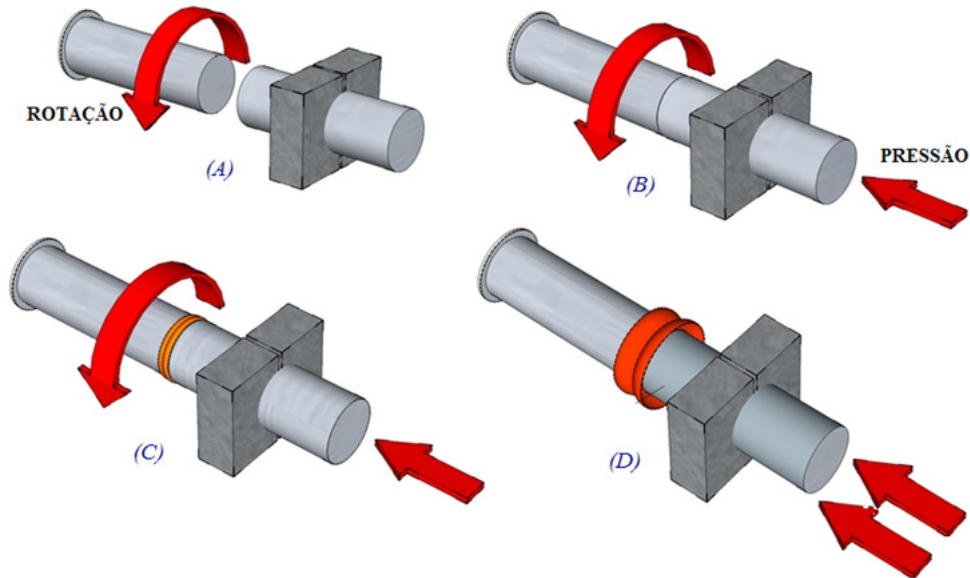


Figura 2.16 – Processo de solda por fricção<sup>(21)</sup>.

Na FRW as superfícies atritadas não chegam ao ponto de fusão e não são necessárias atmosferas protetoras nem a adição de fundentes ou materiais de preenchimento<sup>(7)</sup>.

As principais variáveis controladas na FRW são a velocidade de rotação, a pressão axial, e o tempo de solda, para fornecer a combinação necessária de calor e pressão na formação da solda<sup>(7)</sup>. Esses parâmetros são ajustados de modo que a interface é aquecida a uma temperatura onde acontece uma soldagem plástica. Depois que a interface é aquecida o equipamento exerce uma pressão axial nas interfaces da solda<sup>(7)</sup>.

Na última fase do processo de soldagem, enquanto as interfaces estão em contato, ocorre uma difusão atômica, permitindo formar entre os dois materiais uma ligação metalúrgica<sup>(7)</sup>.

A solda produzida é caracterizada pela ausência de uma zona de fusão, pela presença de uma estreita zona termicamente afetada e por material deformado plasticamente em torno da região de soldagem<sup>(9)</sup>.

Conforme *ASM Metals Handbook*<sup>(9)</sup> a solda por fricção é um processo de solda que permite uma gama de combinações de materiais muito maior que qualquer outro processo de soldagem. Além das combinações comuns de materiais semelhantes, tais como o aço com aço, a solda por fricção permite junções de alta qualidade para materiais de processos críticos como as ligas do magnésio, alumínio e aços com um índice elevado de carbono. Além disso, é possível combinações de materiais considerados incompatíveis. Podendo-se unir sem dificuldade aço com cobre, aço com alumínio, alumínio com magnésio, ligas de níquel com

aço e titânio com cobre. Na Figura 2.17 pode ser observada uma solda a fricção de um conector elétrico com Alumínio e Cobre.

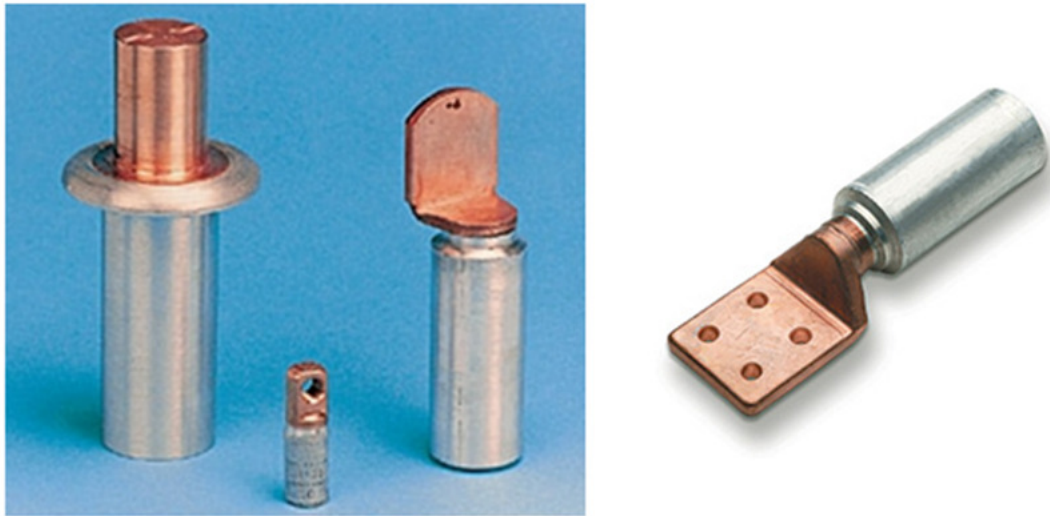


Figura 2.17 – Solda a fricção entre Alumínio e Cobre<sup>(22)</sup>.

## 2.5 Energia para efetuar a soldagem por atrito.

A soldagem por fricção pode ser dividida em duas variações de processo de soldagem, dependendo do modo como é fornecida a energia de rotação para a realização da solda dividindo-se em acionamento direto ou acionamento por inércia<sup>(7)</sup>.

O processo de acionamento direto ou acionamento contínuo tem sido utilizado comercialmente desde a década de 1940. Esse processo necessita de energia constante a partir de uma fonte. O outro processo por inércia foi desenvolvida na década de 1960, usa a energia cinética armazenada em um volante rotativo<sup>(2), (7)</sup>.

### 2.5.1 Solda por fricção com acionamento por inércia.

A solda por fricção tipo inércia é uma variação do processo de solda por fricção, no qual a energia necessária para execução da mesma é obtida pela energia cinética de rotação armazenada na máquina de soldagem<sup>(7), (8)</sup>.

No processo de solda por inércia, uma das peças fica presa a um volante e a outra parte fica imóvel<sup>(8)</sup>. Na Figura 2.18 pode ser observado esse sistema de solda por inércia. Um volante é acelerado a uma velocidade de rotação pré-determinada armazenando a energia

necessária para a solda. O motor de acionamento é desconectado e as partes são pressionadas uma contra a outra pela força axial na máquina de solda. O movimento faz com que as superfícies a serem soldadas atritem pela pressão. A energia cinética armazenada no volante é dissipada na forma de calor, através do processo de fricção, para as interfaces da solda, à medida que a rotação diminui.

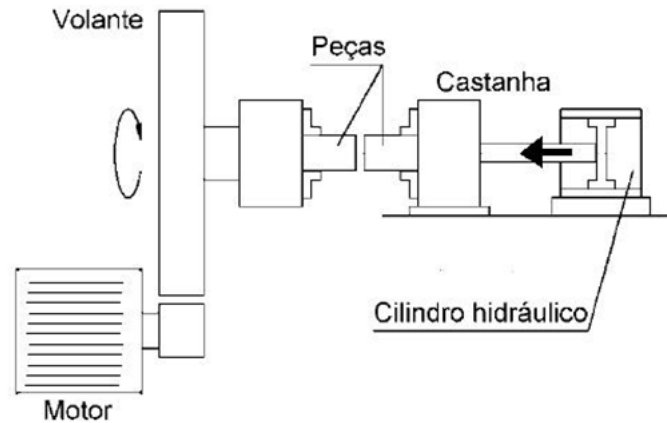


Figura 2.18 - Sistema de solda a fricção por inércia<sup>(8)</sup>.

Na Figura 2.19 pode-se observar um gráfico de como é processada a solda a fricção por inércia. Inicia-se acelerando o volante até a velocidade de soldagem para, em seguida, ser aplicada a força de soldagem até a parada total da rotação.

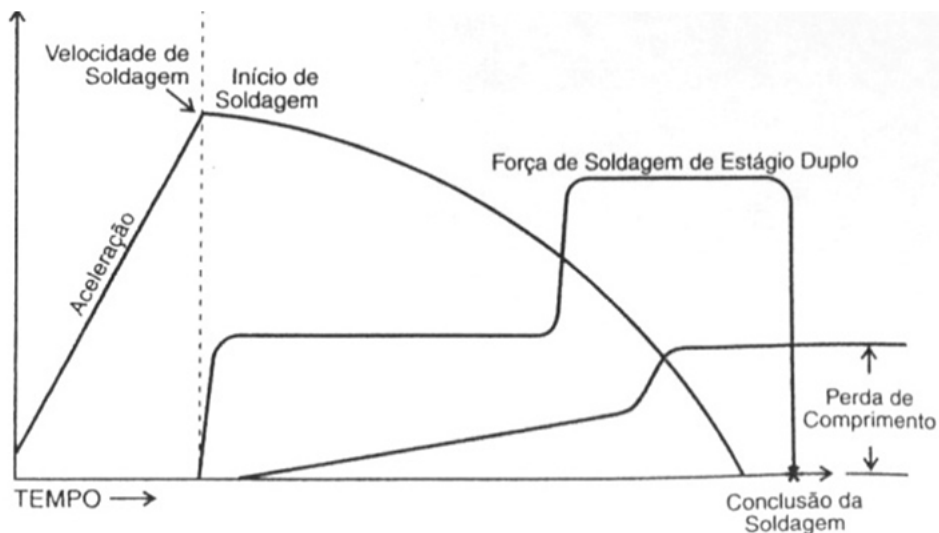


Figura 2.19 – Diagrama mostrando a solda por fricção com inércia<sup>(7)</sup>.

Para o processo de soldagem por fricção com inércia existem três parâmetros de soldagem: a massa e geometria do volante (momento de inércia), velocidade de rotação e força axial. Se a força axial permanece constante durante todo o processo, ele é chamado de



soldagem de estágio único ou simples. Quando existirem níveis de forças diferentes na soldagem o processo é chamado de soldagem de duplo estágio e o processo começa a se tornar mais complexo <sup>(7)</sup>, conforme Figura 2.20.

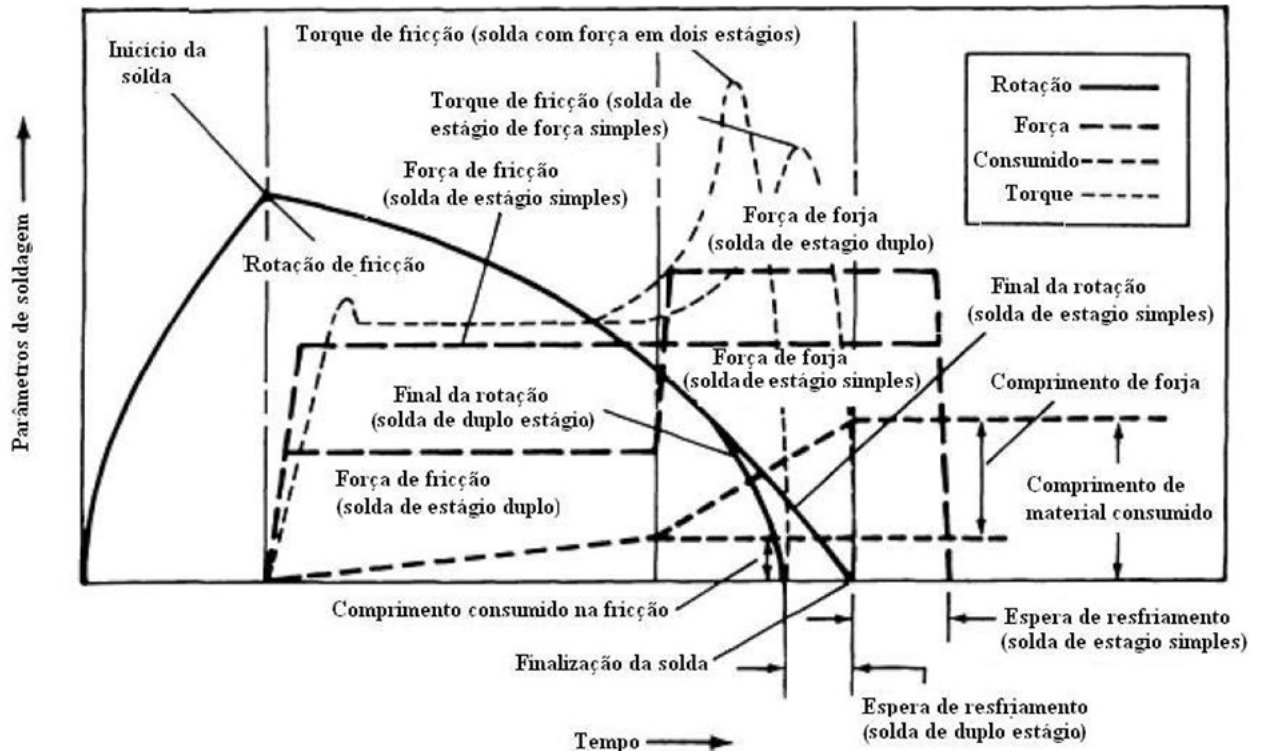


Figura 2.20 –Parâmetros de soldagem em solda a fricção por inércia <sup>(7)</sup>.

Os processos de estágio simples e duplo se diferem pela ocorrência ou não da força de forjamento. No duplo estágio, como há aumento na força axial, o atrito do segundo pico de torque se torna maior, por consequência, o tempo de rotação diminui. Em ambos os processos há um tempo extra de permanência da força após a rotação ter cessado. Este tempo é utilizado para o resfriamento da união para evitar descolagem pela liberação de energia de deformação armazenada <sup>(7)</sup>.

A energia cinética armazenada depende do momento de inércia do volante e da velocidade de rotação. Assim o calor gerado pelo atrito na união das superfícies é determinado pela taxa de entrega de energia, ou seja, a variação desta energia é influenciada pelo momento de inércia do volante e pela força axial aplicada <sup>(7)</sup>.

Pode-se calcular a energia cinética do volante em qualquer momento durante a solda por ela ser independente da força axial e da rotação e pelo momento de inércia ser uma variável fixa. A energia de soldagem é calculada pela equação:

$$E = \frac{S^2 \times I}{C} \quad (2.1)$$

Sendo E a energia (J), I o momento de inércia do volante ( $\text{kg/m}^2$ ), S é a rotação do volante (rev./min.) e C é uma constante de conversão que no sistema métrico é 182,4<sup>(7)</sup>.

O intervalo de velocidades superficiais recomendado para o aço com aço, a velocidade periférica inicial recomendada varia de 90 a 460 m/min. Porém podem ser efetuadas boas soldagens com velocidades mais baixas<sup>(7)</sup>.

Nas soldas por fricção geradas por inércia, para cada componente deve ser especificada uma energia cinética de soldagem. Cada troca de geometrias de soldagem é necessário recalcular a energia e dependendo ocorre a troca do volante de inércia. Este tipo de soldagem é mais utilizado para uma produção em larga escala de um mesmo componente. A Figura 2.21 ilustra um equipamento de solda a fricção com capacidade para 450 t. de força.



Figura 2.21 – Equipamento para solda a fricção por inércia<sup>(23)</sup>.

### 2.5.2 Solda por fricção com acionamento direto.

A solda por fricção com acionamento direto *Direct Drive*<sup>(7)</sup> é uma variação do processo de solda por fricção na qual a energia necessária para a execução da solda é fornecida pela máquina através da conexão direta com o motor de acionamento por um período pré-determinado para o ciclo de soldagem. No processo de solda por fricção com acionamento direto, uma das peças é presa à unidade acionada pelo motor enquanto a outra permanece imóvel, como pode ser observado na Figura 2.22.

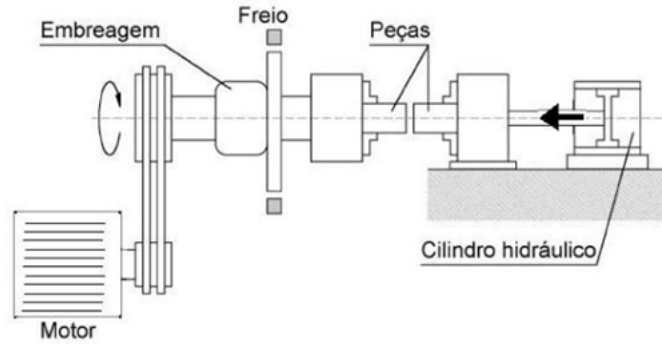


Figura 2.22 – Sistema de solda a fricção com acionamento direto<sup>(8)</sup>.

No sistema de solda direta a peça acionada pelo motor faz um movimento de rotação a uma velocidade pré-determinada. As peças a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra e é aplicada a força necessária para o processo de soldagem. À medida que as peças entram em atrito é gerado calor e esta etapa é mantida até o momento em que é cessada a rotação. A rotação do sistema é cessada por uma frenagem ou pelo próprio processo de soldagem, neste caso o sistema é híbrido, pois há inércia na soldagem. Ao final do processo de soldagem a força é mantida ou intensificada até que atinja um tempo determinado. A intensificação da força é conhecida como força de forjamento ou ainda como recalque.

A relação dos parâmetros de soldagem de solda por fricção direta é mostrado no gráfico da Figura 2.23.

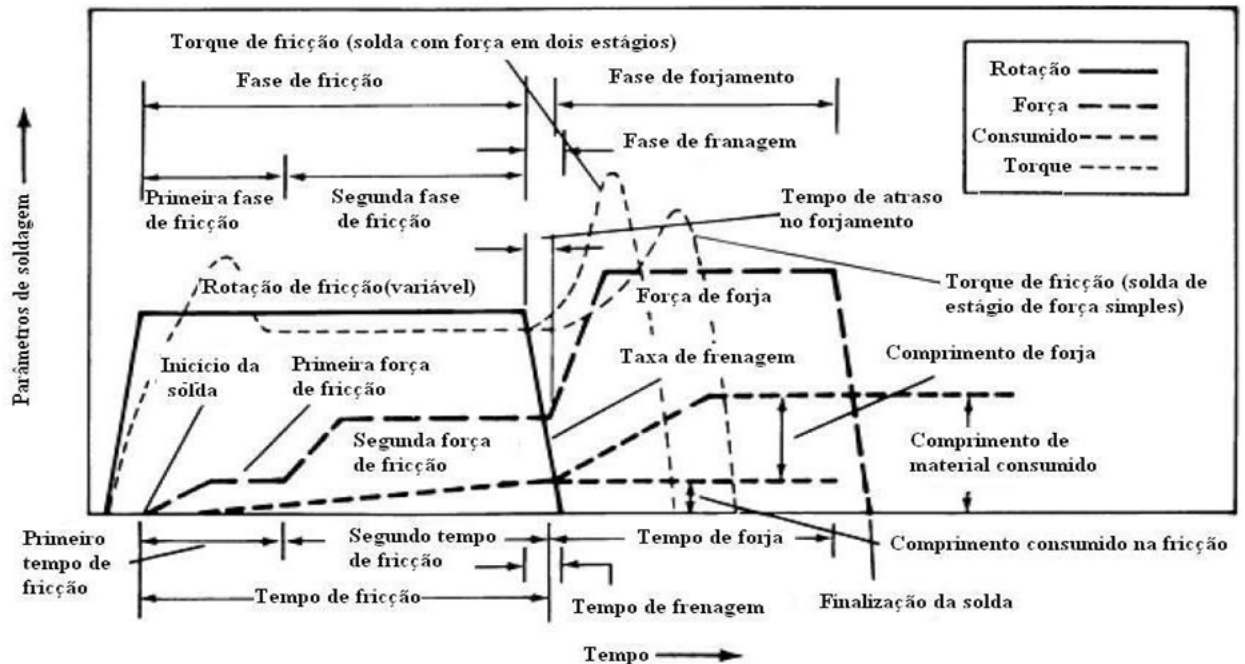


Figura 2.23 – Soldagem em solda a fricção com acionamento direto<sup>(7)</sup>.

Na soldagem por fricção direta existem dois mecanismos diferentes de controle para determinar o fim do ciclo de soldagem, um deles pode ser finalizado quando um tempo pré-determinado de soldagem é atingido, o outro quando é atingida a quantidade de deslocamento determinada (comprimento de material consumido), conhecido como *burnoff*.

Para a solda por fricção com acionamento direto pode-se calcular o torque através da potência ou vice-versa <sup>(24)</sup>. A equação de cálculo da potência é dada por:

$$W = 2,7\pi RT \quad (2.2)$$

Sendo W a potência necessária para a soldagem, R a rotação de soldagem e T o torque adquirido no processo <sup>(24)</sup>. Ainda pode-se calcular o torque para a soldagem com a equação:

$$T = 2\pi\mu Pr^3 \quad (2.3)$$

Nesta equação o torque resultante será em Nm, sendo  $\mu$  o coeficiente de atrito, P a pressão aplicada (MPa) e r o raio da superfície da barra. Para calcular a pressão aplicada ao processo divide-se a força aplicada pela área de atrito.

## 2.6 Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção.

Existem alguns requisitos importantes para uma boa formação de soldas por fricção, um deles é que os materiais a serem unidos possam ser forjados ou que os materiais possam gerar atrito na interface de solda. O primeiro requisito elimina soldas metálicas entre materiais frágeis semelhantes, como cerâmicas, ferros fundidos e carbonetos, porém podem ser unidos materiais frágeis com dúcteis. O outro requisito elimina ou dificulta a soldagem de materiais que contêm na liga aditivos livres que forneçam lubrificação como exemplo o grafite nas ligas de ferro fundido e ligas de chumbo <sup>(7)</sup>.

A solda por fricção permite junções não somente entre barras, também entre tubos, tubos com barras, barras e tubos com discos ou chapas Na Figura 2.24 pode ser observado um componente soldado por atrito. Para superfícies planas não são necessários grandes preparos das superfícies, ou seja, peças com acabamento, por exemplo, cortadas a serra, a gás, disco abrasivo, forjadas, ou até mesmo cisalhadas são soldáveis.

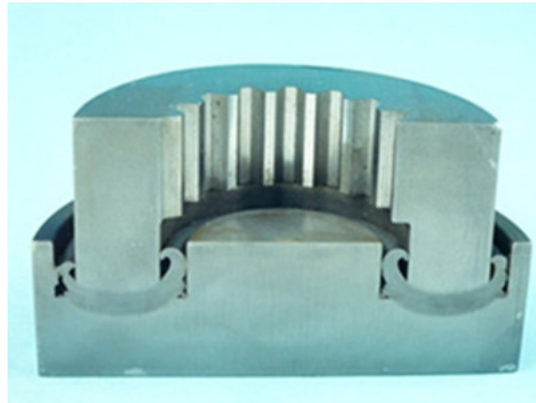


Figura 2.24 – Perfil soldado por fricção.

Muitas peças fundidas, fabricadas pela metalurgia do pó ou mesmo compostos com matriz metálica são soldáveis. Como regra geral todos os materiais metálicos de engenharia que são forjáveis podem ser soldados por fricção <sup>(7)</sup>. Na Tabela 2.5 podem ser observadas as vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção.

Tabela 2.5 – Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção <sup>(25)</sup>.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não é necessária limpeza ou acabamento das superfícies (no caso de soldas de topo);</li> <li>• Não é necessário gás de proteção;</li> <li>• Mais seguro à saúde do operador, pois não tem radiação e nem fumos;</li> <li>• Não há riscos elétricos;</li> <li>• Não há defeitos relacionados à fusão, pois a soldagem é efetuada no estado sólido;</li> <li>• Há possibilidades de fabricação de juntas de transição com materiais diferentes;</li> <li>• O processo é estável e automatizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pelo menos uma peça precisa ser rotacionada;</li> <li>• Limitado às juntas de topo planas, cônicas e angulares desde que perpendiculares e concêntricas com o eixo de rotação;</li> <li>• O alinhamento das peças pode ser crítico;</li> <li>• O material de pelo menos um componente deve ser plasticamente deformável;</li> <li>• Custos dos equipamentos e ferramentas são elevados</li> </ul>

Outra vantagem do processo de solda a fricção é a precisão em comprimento e excentricidade, obtendo-se produtos que não necessitem de outros processos além da retirada de rebarba da solda, conforme a Figura 2.25. O processo é distinguido por tempo curto de soldagem e, por consequência, ciclo extremamente curto. Sendo um processo menos suscetível a erros, pois a solda é totalmente controlada pela máquina.



Figura 2.25 – Produto produzido com dimensões finais de acabamento<sup>(22)</sup>.

## 2.7 Processo de caracterização e etapas do processo.

A divisão do processo de soldagem em diferentes etapas facilita o entendimento dos mecanismos envolvidos no processo<sup>(26)</sup>. A maioria dos autores faz uma divisão em quatro etapas: etapa de atrito inicial, aquecimento, frenagem e colagem<sup>(27),(28)</sup>.

### 2.7.1 Etapa de Atrito Inicial (Etapa 1) <sup>(27),(28)</sup>.

Na primeira etapa, o contato das superfícies de atrito resulta em um efeito de uniformização das superfícies. Uma pequena superfície de soldagem faz contato, conseqüentemente, em certos locais a pressão de superfície chega a valores extremamente altos, ocasionando uma deformação plástica das superfícies em contato. Em pontos isolados, ocorrem ligações locais (microligações) que são imediatamente cisalhadas. A ruptura dessas microligações induz um aquecimento adicional no material adjacente, pela liberação de energia.

Microligações são criadas e cisalhadas até o momento em que o atrito atinge um número significativo de microligações distribuídos ao longo das superfícies extraindo os contaminantes e permitindo o contato das superfícies metal/metal.

A presença de fatores externos de contaminantes de superfície como a oxidação, graxas e óleos tem influência e afetam o momento de atrito máximo inicial.

### 2.7.2 Etapa de aquecimento (Etapa 2) <sup>(27), (28)</sup>.

Na segunda etapa, há uma concentração de partículas mais perto do centro de giro e provocam aquecimento local formando uma película de material plastificado em forma de anel. Esta área do anel aumenta em tamanho e faz com que o material altamente plastificado seja empurrado para as duas zonas mais frias da área de atrito: para a área externa e para o centro. Neste caso, partículas não dissolvidas ficam encapsuladas em material plastificado e são transportadas para o centro de rotação da zona de soldagem. Quando o alargamento da área do anel chega ao centro de rotação, forma uma área circular, que agora se alargam em seu diâmetro lentamente para as regiões exteriores da zona de solda.

Quando as superfícies de atrito estão totalmente plastificadas, o equilíbrio de temperatura é alcançado, porém à medida que a temperatura sobe, o metal se torna mais plástico e o atrito diminui fazendo uma menor geração de calor reduzindo a temperatura. Como o material amolece, ocorre um encurtamento axial e material novo chega à interface de atrito, provocando um aumento do coeficiente de atrito e elevando a temperatura. A temperatura entra em equilíbrio e permanece em um estado estável até o final da fase de aquecimento.

O processo mantém um equilíbrio, criando uma pressão hidrodinâmica que empurra material plastificado para fora da superfície de atrito formando uma rebarba (*flash*). Este processo é mantido, enquanto a temperatura e a zona plastificada são mantidas em equilíbrio, porém se o flash aumentar a superfície de atrito também aumentará e mais calor será gerado. Com a interrupção do processo, a geração de calor é reduzida, causando um resfriamento.

### 2.7.3 Etapa de frenagem (Etapa 3) <sup>(27), (28)</sup>.

A etapa de frenagem começa com uma diminuição da velocidade de rotação. Reduzindo-se a velocidade, aumentará o número de microligações que ocorrem

simultaneamente ao longo de todo processo de atrito das superfícies. A ruptura dessas microligações produz aquecimento adicional, que mantém a temperatura. Além disso, o cisalhamento aumenta a resistência devido à menor taxa de deformação e, portanto, o momento de atrito atinge o seu segundo pico. Num momento crítico, a rotação é reduzida a um nível tão baixo que a temperatura das superfícies de atrito não pode mais ser mantida. Finalmente o eixo para e segue-se o início do processo de recristalização.

#### 2.7.4 Etapa de Colagem (Etapa 4) <sup>(27), (28)</sup>.

O mecanismo de ligação começa no momento final da etapa de aquecimento, porém a homogeneidade de colagem em toda a seção transversal é realizada na pressão de forjamento dentro da fase de ligação.

A força de forjamento ocorre no final da etapa de frenagem. O aumento da força axial resulta em um aumento no momento de fricção e camadas de óxido das regiões exteriores da zona de solda são expulsas.

#### 2.8 Zonas da solda e a influência dos parâmetros de controle.

A microestrutura do material soldado é influenciada pelo tipo e intensidade da energia aplicada e pela deformação submetida durante o ciclo de soldagem.

As zonas podem ser divididas em três modos:

- Zona afetada pelo calor (ZAC): onde a microestrutura e as propriedades mecânicas apenas sofrem a influência do calor gerado durante o processo de soldagem.
- Zona termomecanicamente afetada (ZTMA): onde a quantidade de calor é maior do que na ZAC, resultando uma recuperação de grãos e aparecimento de grãos deformados.
- Zona de Recristalização (ZR): é claramente caracterizada pela formação de uma microestrutura de grãos finos e com a morfologia equiaxial como resultado do fenômeno de recristalização dinâmica.

Geralmente, máquinas de soldagem por inércia usam duas variáveis, velocidade e pressão. No método de soldagem por inércia a energia é fornecida pelo volante e é



descarregada em um tempo menor, isto normalmente resulta em tempos de soldagem mais curtos, menos rebarba e ZTA menor quando comparados com o método de acionamento direto.

No método soldagem direta, a energia da soldagem é fornecida diretamente pela potência do motor da máquina e estes sistemas de controle são mais complexos. As variáveis de controle, para máquinas de soldagem direta, mais encontradas na literatura <sup>(25), (28)</sup> são: a velocidade das superfícies em atrito, a pressão de soldagem, tempo e um controle de encurtamento axial.

A velocidade das superfícies na rotação é o parâmetro do processo que menos tem influência entre os parâmetros de soldagem.

A equação para cálculo da velocidade periférica é dada pela equação:

$$V = \pi DR \quad (2.4)$$

Sendo V a velocidade superficial, D o diâmetro da barra e R a rotação do processo de soldagem.

Para altas velocidades de rotação precisam de maior tempo de aquecimento levando a menores taxas de resfriamento, provocando uma ZAC maior e mais dispersa e, como consequência, um perfil com maior dureza <sup>(7), (28)</sup>.

Nas soldas com baixas velocidades de rotação ocorre maior geração de calor e menor tempo de soldagem e assim são produzidas ZAC mais estreitas, com um perfil de dureza com grande variação entre o material de base e o material da ZAC <sup>(7), (28)</sup>.

A pressão axial deve ser suficiente para manter o atrito entre as superfícies, mantendo as substâncias prejudiciais fora da zona de soldagem e evitar a oxidação.

Além disso, a pressão axial influencia na largura e na definição da ZAC. Altas pressões axiais causam um superaquecimento local e um encurtamento axial muito rápido. Com pressões axiais elevadas, a plastificação de material é mais rápida, gerando soldas com curtos ciclos de soldagem e ZAC estreitas e bem definidas. Baixas pressões levam à tendência de recristalização do material, baixando a dureza e gerando uma ZAC bem dispersa <sup>(7), (28)</sup>.

A pressão excessiva produz uma solda que tem qualidade ruim no centro e tem uma grande quantidade de rebarba e é semelhante a uma solda feita a uma velocidade baixa, conforme a Figura 2.26.

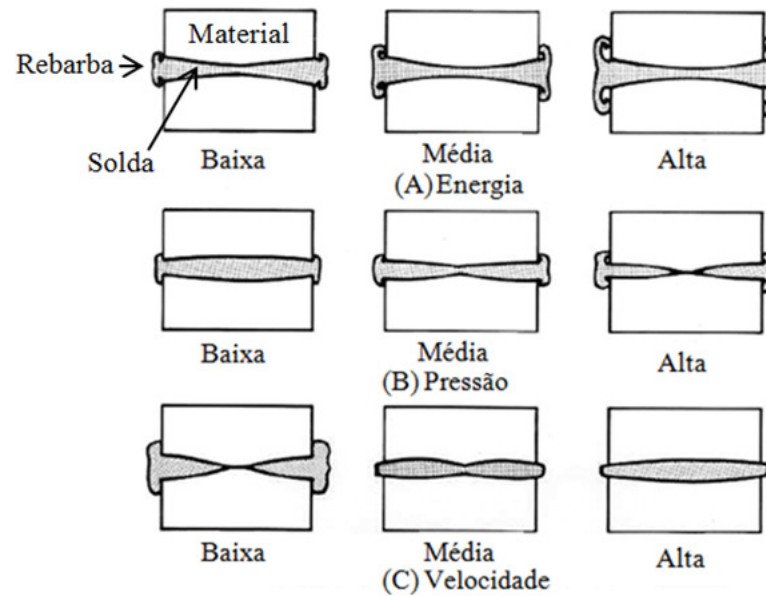


Figura 2.26 – Efeitos da morfologia na união por fricção <sup>(3)</sup>.

Podem ocorrer dois modos de aplicação de pressão axial. Uma delas é a aplicação de uma pressão axial do início da soldagem até o final sem sofrer variações. O outro modo é uma pressão axial para a fase de aquecimento e mais uma pressão axial para o forjamento.

O tempo de aquecimento é definido como o período de tempo do contato inicial de atrito nas superfícies até o fim da fase de frenagem. Ele é significativamente influenciado pela pressão axial e pela velocidade de rotação e determina a energia utilizada na operação de soldagem <sup>(9), (28)</sup>.

O tempo de aquecimento é importante principalmente porque dispara o mecanismo de adesão do material. O aquecimento define a microestrutura na interface de soldagem e afeta a largura da ZAC. Também a taxa de resfriamento é afetada pelo tempo de aquecimento e pelo meio, combinados com a quantidade total de rebarba que é formada em torno da interface de solda. Para rebarbas com grande massa, o calor armazenado dentro delas será conduzido de volta da solda, reduzindo a taxa de resfriamento do metal na região da ZAC <sup>(9), (28)</sup>.

O encurtamento axial (*upsetting*) tem uma influência significativa sobre as propriedades da soldagem <sup>(9)</sup>. A pressão aplicada e a velocidade de rotação irão influenciar o tempo necessário para atingir um encurtamento axial definido, assim, quanto maior velocidade e maior a pressão menor será o tempo para atingir o valor de encurtamento determinado. Aumentando a taxa de encurtamento, o tempo de solda total é reduzido e, portanto, há menor tempo disponível para crescimento de grãos e homogeneização. Para valores de encurtamento

axial grande, o deslocamento provoca na soldagem algumas desvantagens como aparecimento de grandes rebarbas (*flash*) e o desalinhamento das seções<sup>(28)</sup>.

## 2.9 Velocidades e forças envolvidas no Processo.

O início da formação da solda começa no instante em que a maior pressão é aplicada no ciclo, ou seja, quando a fase de forjamento é iniciada e quando a rotação é cessada<sup>(7)</sup>.

Geralmente, a força de forjamento pode ser aplicada de dois modos: primeiro quando o eixo de rotação está desacelerando antes de sua parada, ou após o eixo estar completamente parado<sup>(9)</sup>. A diferença entre os dois modos é a presença ou não de um segundo pico de atrito. No primeiro modo, o torque vai aumentar até atingir seu pico e isso produz uma força de torção na solda. No segundo modo, especialmente quando a fase de desaceleração é muito curta, devido ao rápido travamento, não há origem de torque de atrito e sim uma diminuição de torque até o início do forjamento. Neste caso, não há força de torção, e o forjamento é afetado apenas pela força axial.

Existe um intervalo ideal de velocidades superficiais para cada combinação de metais a serem unidos variando com o modo de energia fornecida na soldagem. Para união de aços com equipamento com acionamento direto, as velocidades de superfície de fricção para solda variam de 76 a 182 m/min<sup>(9)</sup>. A força inicial de atrito é aplicada gradualmente para superar o contato inicial, ou seja, para diminuir o pico inicial de torque. Para os aços é necessária uma pressão no atrito com valores de pressão entre 83 a 166 MPa e de 166 a 332 MPa para a força de recalque<sup>(7)</sup>.

Para os aços, em soldas por fricção por inércia a velocidade periférica recomendada varia de 75 a 215 m/min. Em geral, as velocidades mais elevadas geram baixa quantidade de calor na solda e são utilizados para soldagem de materiais sensíveis ao calor tais como aços temperáveis<sup>(7)</sup>. As pressões normais utilizadas para a soldagem de aços são de 96,5 a 207 MPa. A força forjamento pode variar de 1,5 a 4 vezes a força de soldagem, normalmente é determinado experimentalmente<sup>(7)</sup>. O efeito da variação da pressão axial é oposto ao efeito de variação da velocidade, ou seja, soldas feitas em baixa pressão axial se assemelham a soldas feitas a uma velocidade alta, em formação de rebarba e ZAC.

### 2.10 Vantagens dos processos de solda por fricção por inércia e direta.

Ambos os processos por inércia e direto produzem soldas de excelente qualidade. Existem diferenças ou vantagens sutis de um processo em relação ao outro dependendo da aplicação, tamanho das peças, combinação de materiais, considerações de geometria, entre outros.

As vantagens do processo de solda por inércia e o processo direto são observadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Relação entre processos de solda por inércia e direto<sup>(25)</sup>.

<b>Solda a fricção por inércia</b>	<b>Solda a fricção direta</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ZTA é menor;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor rotação para peças maciças;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• O tempo de solda é mais curto;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não é necessária a mudança de volantes entre programações;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil monitoramento já que as variáveis são a rotação e a pressão. A energia pode ser monitorada antes do processo de solda;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor força de soldagem para peças sólidas, ou seja, peças maiores podem ser soldadas em máquinas de mesma força;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não tem embreagens ou freios;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consegu-se obter orientação angular entre as peças no final;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• O torque da solda é medido indiretamente através da taxa de variação de rotação na solda;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor esforço de torção na solda, assim as exigências das ferramentas são menores;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os parâmetros são previamente calculados e desta forma o processo pode ser escalonado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode-se soldar com tolerância de comprimento e assim obter-se uma precisão dimensional.</li> </ul>

### 2.11 Variações do processo de solda por fricção.

Para a soldagem por fricção, além da configuração básica, conforme a Figura 2.27 pode ter muitas variações no modo como é processada.

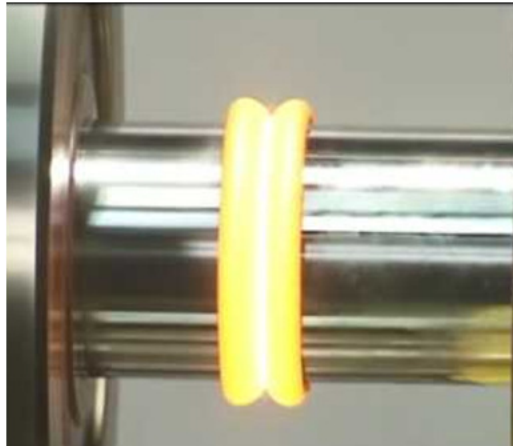


Figura 2.27 – Configuração básica entre barras <sup>(27)</sup>.

Um tipo de soldagem é a soldagem radial, neste processo uma peça com formato cilíndrico é soldada por uma combinação de forças de compressão e forças radiais, as duas peças são cilíndricas e de diferentes diâmetros. Este processo tem grande potencial para ser usado no reparo de tubulações. A ilustração do processo está na Figura 2.28.

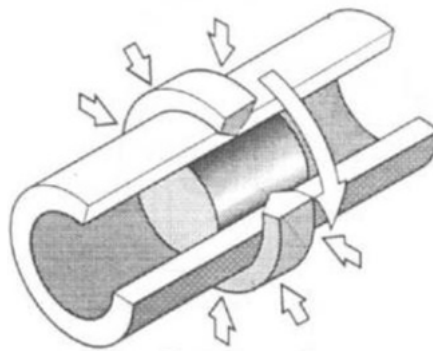


Figura 2.28 – Soldagem por fricção radial<sup>(29)</sup>.

Em alguns casos de soldagem por atrito em que é impossível girar as peças, o caso de tubulações longas, foi desenvolvida uma versão modificada para soldagem pelo processo de fricção<sup>(30)</sup>. A diferença dessa soldagem a fricção para a convencional é que é usado um material intermediário de preenchimento em forma de um anel, conforme a Figura 2.29. O anel é colocado entre as tubulações e posto em rotação. Nos tubos são induzidas forças axiais e as extremidades entram em atrito. O atrito entre anel giratório gera calor até a temperatura de soldagem por fricção. Após, é cessada a rotação e aplicado o recalque.

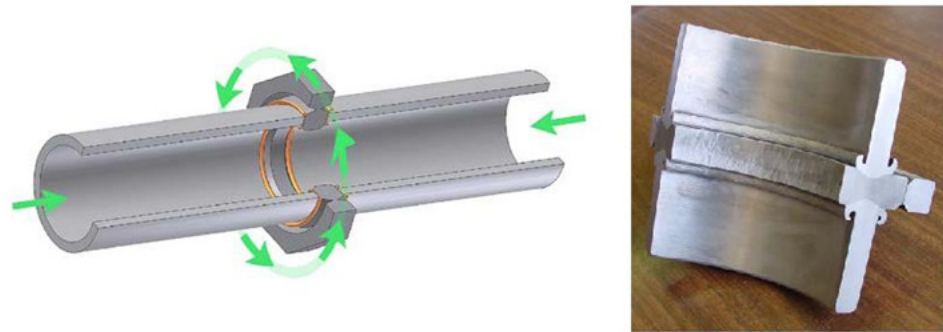


Figura 2.29 – Soldagem por fricção em tubulações longas<sup>(30)</sup>.

Existem processos de solda por fricção em que não há o movimento de rotação, constituindo os processos não convencionais, apresentados na Figura 2.30. Destes processos se destacam os processos de soldagem a fricção orbital, angular e linear. Com estes sistemas, aumenta-se a gama de componentes que podem ser soldados por atrito uma vez que podem ser soldadas geometrias complexas e assimétricas.

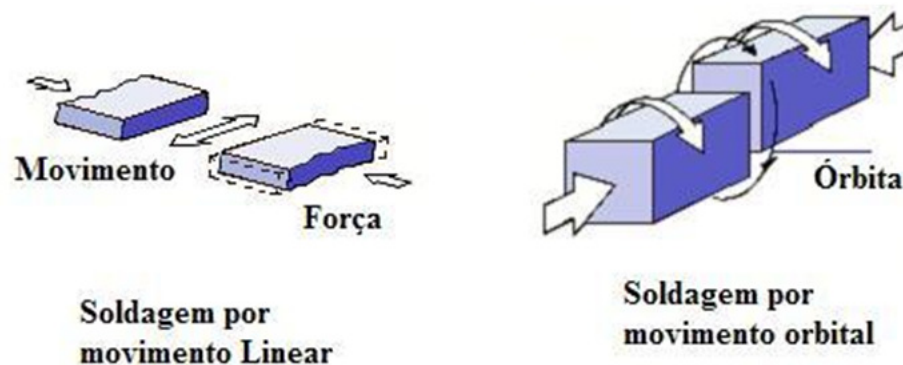


Figura 2.30 – processos de soldagem a fricção não convencionais.

O desenvolvimento do processo de soldagem por fricção por movimento linear ou *Linear Friction Welding* (LFW), foi em 1959, e aperfeiçoado em 1980, causando a ampliação deste processo de solda por fricção para novas aplicações no mercado<sup>(23)</sup>.

A LFW é um processo no estado sólido semelhante ao por fricção rotativa. Unem-se os materiais usando o calor de fricção gerado por uma força e um movimento relativo e controlado entre dois componentes em contato.

A diferença da LFW com as soldas geradas a partir do movimento rotação está no movimento relativo entre as superfícies de atrito. Este é gerado por um movimento linear ou oscilação, geralmente a partir de uma onda senoidal. A força axial é aplicada perpendicular ao eixo de oscilação e a fonte de energia do processo é fornecida pela frequência e a amplitude de oscilação.

Originalmente foi aplicada na fabricação de palhetas em rotores na indústria aeroespacial, ver Figura 2.31, sendo o único processo pelo qual uma lâmina oca pode ser anexada a um eixo sem a usinagem de ranhuras<sup>(23)</sup>.

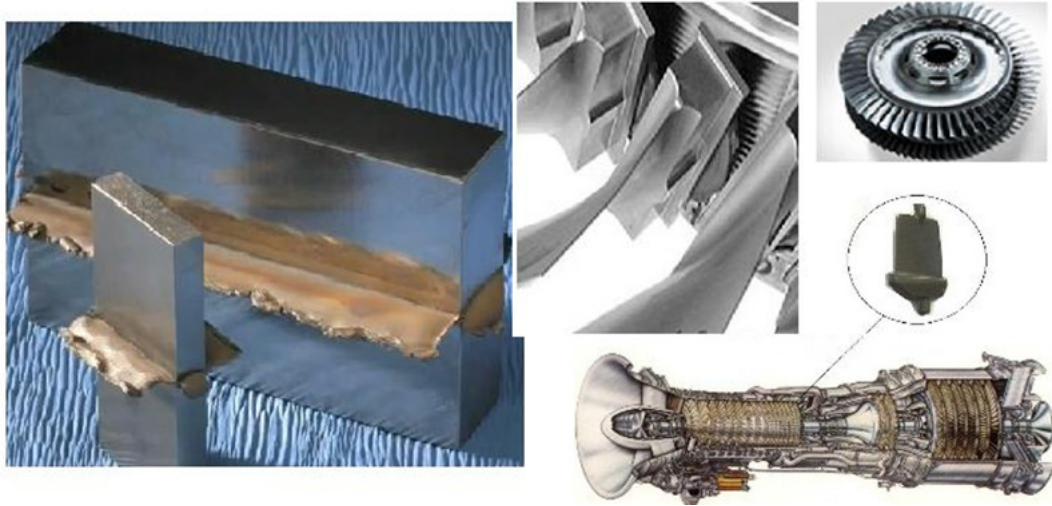


Figura 2.31 – Soldagem por fricção Linear.

A LFW é um processo de soldagem muito semelhante à soldagem por fricção com acionamento direto. O ciclo de soldagem inicia aproximando-se as peças sem movimento de oscilação, depois há um contato inicial e é aplicada a força de fricção. Inicia-se a oscilação do movimento relativo entre as peças e acontece o encurtamento axial. Quando o encurtamento atinge o valor determinado é cessada a oscilação e aplicado a força de recalque.

Como geralmente utiliza-se para a oscilação sistemas hidráulicos e servocontrolados, o volume das peças fica limitado pela massa que pode ser oscilada<sup>(31)</sup>.

## 2.12 Deposição de material por fricção.

O conceito de revestimento por fricção *Friction Surfacing* consiste na rotação de uma barra de material consumível sólido com uma de suas extremidades pressionado contra uma superfície. O calor é gerado na ponta da barra, depositando uma camada plastificada na superfície de contato. O movimento da superfície em relação à barra cria depósitos do material plastificado conforme Figura 2.32<sup>(32)</sup>. A temperatura da camada de aplicação de metal no processo de revestimento é abaixo do ponto de fusão e submetidas à deformação plástica. O produto é um revestimento com qualidade de forjamento a quente.

Neste processo, o depósito é homogêneo e formado apenas pelo material da barra, tem boa resistência mecânica e boa aderência.

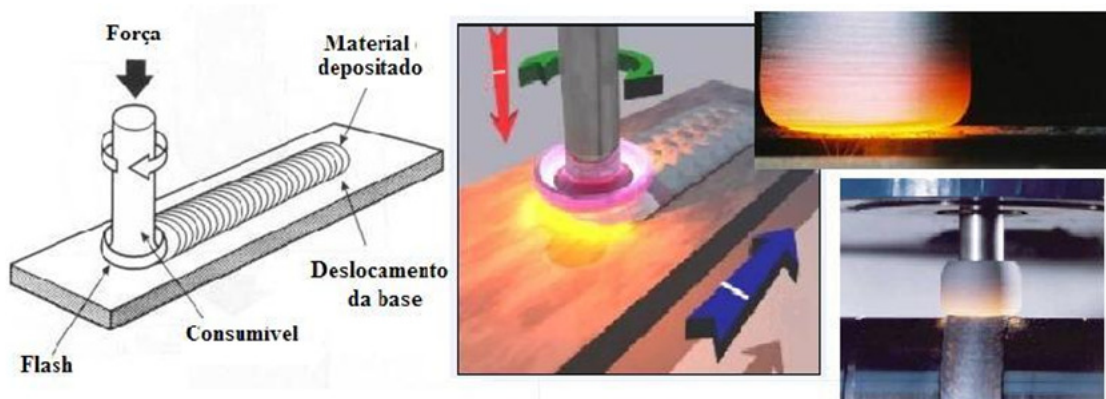


Figura 2.32 – Deposição de material por fricção <sup>(32)</sup>.

Este processo é uma técnica de deposição de materiais como revestimentos com alta dureza, para melhorar o desempenho da superfície. Pode ainda depositar ligas de níquel, aço ferramenta, aços inoxidáveis, alumínio e outros materiais utilizados para a corrosão e desgaste ou ainda para recuperação de componentes desgastados ou para selar uma trinca.

Geralmente a espessura do depósito é fina, mas depende dos materiais a serem depositados e dos parâmetros utilizados. As superfícies a serem depositadas podem ter diversas geometrias podendo ser plana ou não. Podem-se depositar materiais em discos, chapas, cilindros ou tubos<sup>(33)</sup>, reduzindo o custo e consumo de materiais mais caros ou estratégicos.

### 2.13 Soldagem por fricção e mistura.

Uma variação da solda por fricção é a soldagem por fricção e mistura *Friction Stir Welding* (FSW). A FSW foi criada na Inglaterra no TWI (*The Welding Institute*) <sup>(33)</sup> em 1991. Na FSW uma ferramenta de elevada resistência mecânica e com uma geometria adequada é rotacionada e lentamente mergulhada na área de união de duas peças a serem soldadas. Na Figura 2.33 pode ser observado um esquema deste tipo de solda. Neste tipo de soldagem por atrito a ferramenta não é consumível.

A ferramenta mergulha para a união das peças, na Figura 2.34, e forma um tipo de miscelânea entre os dois metais. Quando atinge a posição de soldagem ela é deslocada com um avanço contínuo seguindo a linha, resultando na união das duas peças.



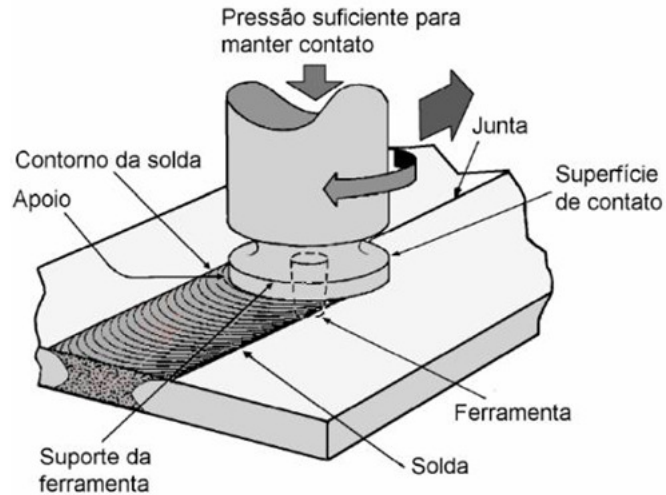


Figura 2.33 – Processo de solda por fricção e mistura<sup>(1)</sup>.



Figura 2.34 – Sequência do processo de FSW e o resultado da solda.

Por não ser consumível, a ferramenta necessita de uma geometria que gere uma boa soldagem, tenha uma vida considerável e não cause torques excessivos no equipamento. Para a geometria da ferramenta há uma série de fontes de atrito na fricção rotativa, nos processos de transformação, incluindo a superfície de atrito da mistura e do processo de extrusão. A contribuição do atrito varia com o desgaste da ferramenta, ocorrendo desgaste erosivo ou deposição de material na superfície original.

Na Figura 2.35 podem ser observadas diferentes geometrias de ferramentas para soldagem por fricção linear. Elas podem ser com ponteiros lisas, com roscas, cônicas ou com sulcos. O suporte (ombro) pode ser liso, em espiral, côncavo ou ainda uma combinação entre essas geometrias.



Figura 2.35 – Diferentes geometrias de ferramentas para FSW.

O processo de FSW permite soldagens a grandes velocidades e é mais aplicado para a soldagem de ligas de alumínio e na área automotiva. Nos aços, para grandes espessuras, apresenta dificuldades, devido ao intenso aquecimento da ferramenta e diminuindo consideravelmente a vida útil.

#### 2.14 Soldagem por fricção por ponto.

A soldagem por fricção por ponto *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) cria uma área soldada por pontos, através da ligação no estado sólido de seções do metal que está sendo soldado. Similar à soldagem por ponto à resistência, esta técnica é usada na indústria automotiva para junção de chapas de aço e soldagens de chassi, painéis de carroceria e capôs. Na Figura 2.36 está ilustrado o processo de FSSW.

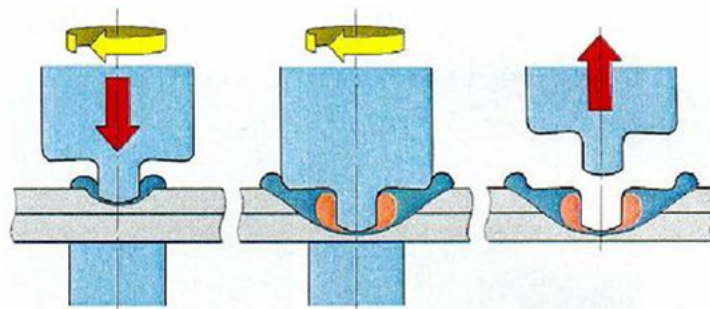


Figura 2.36 – Processo de Solda a fricção por ponto<sup>(34)</sup>.

O método de FSSW consiste em mergulhar uma ferramenta, não consumível, em áreas de chapas metálicas sobrepostas. A ferramenta é rotacionada e pressionada contra as chapas criando uma zona de mistura e depois recolhida. Em alguns casos, a ferramenta é deslocada

para o lado antes de ser recolhida<sup>(35)</sup>. Na Figura 2.37 observa-se em corte o furo cego de uma solda por fricção linear por ponto e três diferentes métodos de aplicação da FSSW. O resultado é um furo cego no centro da zona de solda e uma zona soldada por fricção ao redor.

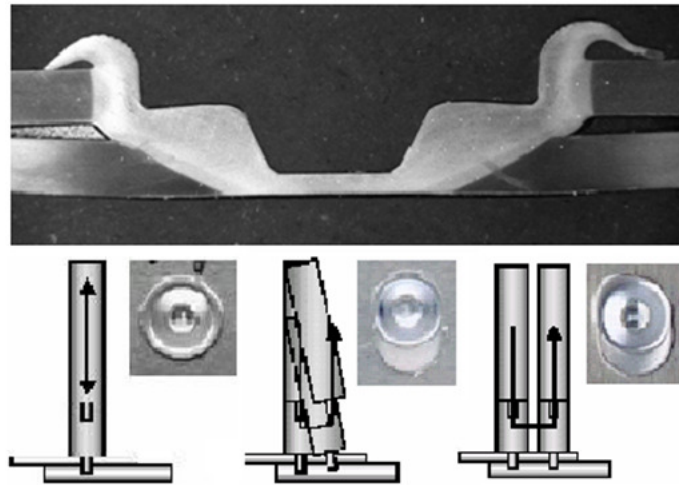


Figura 2.37 – Resultado da solda por fricção por ponto<sup>(35)</sup>.

#### 2.15 Processo de soldagem por fricção com pino consumível.

A técnica envolvida na soldagem por fricção com pino consumível conhecida como *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP) é um processo de soldagem onde um pino consumível é rotacionado e atritado no fundo de um furo. A superfície de fricção se move preenchendo a cavidade com o pino plastificado. Na Figura 2.38 pode-se observar um esquema mostrando como a soldagem se processa.

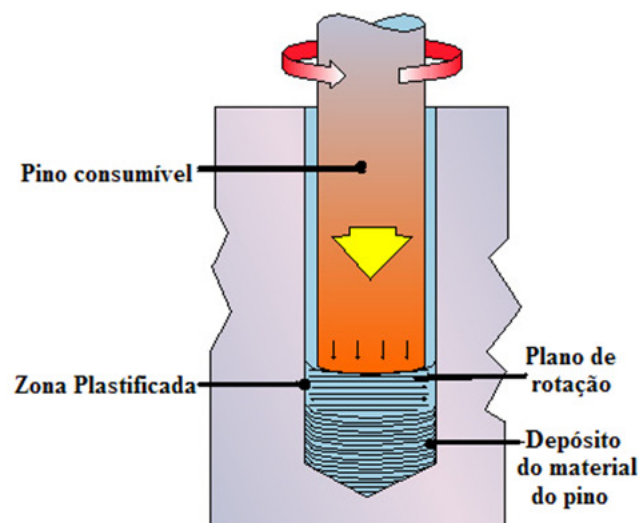


Figura 2.38 – Regiões da soldagem por fricção por pino consumível<sup>(36)</sup>.

Em soldas FHPP o pino consumível sofre grande trabalho a quente, resultando em altos níveis de deformação e por isso é totalmente plastificado, o volume preenchido pode ser considerado como uma zona de recristalização e possui uma microestrutura refinada que faz a união entre as duas peças <sup>(27)</sup>.

Na Figura 2.39 pode ser observada a sequência na soldagem a fricção por pino consumível.

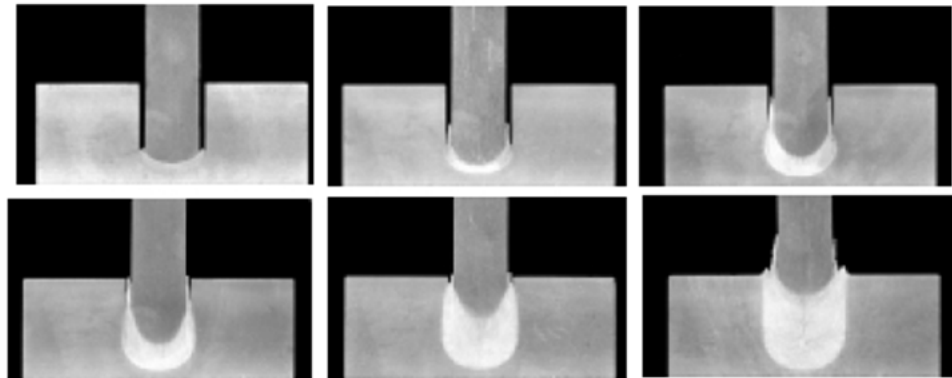


Figura 2.39 – Sequência de soldagem por pino consumível<sup>(27)</sup>.

Primeiramente o material do pino é plastificado na interface de rotação entre o pino e o furo, onde é mantido em uma condição sólido-viscosa suficiente para permitir que ocorram ligações metalúrgicas pelas forças hidrostáticas envolvidas <sup>(27)</sup>. O pino vai sendo consumido e plastificado no furo, e a região de soldagem avança para fora do mesmo. Após o processamento a cavidade fica totalmente preenchida com material do pino plastificado. O excedente do pino é cortado e é feito um acabamento na superfície.

As geometrias do pino e do furo podem ser de diferentes formas, podendo ser de seção reta ou cônica, como visto na Figura 2.40. Neste tipo de soldagem, o pino é plastificado no furo e com a profundidade do mesmo.

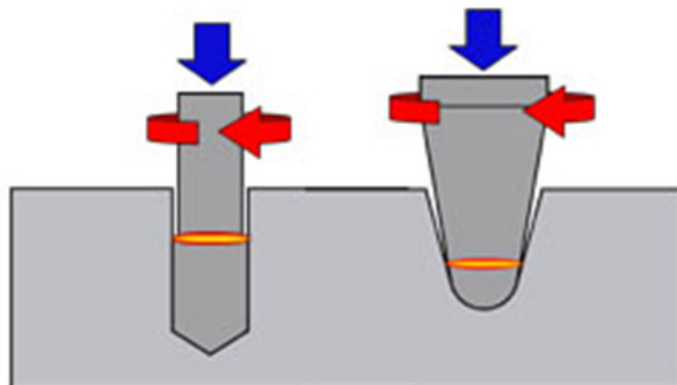


Figura 2.40 – Geometrias de soldagem por fricção com pino consumível <sup>(37)</sup>.

A Figura 2.41 mostra as regiões da solda à fricção por pino consumível. Em “A” e “B” temos o material do pino e da base. Em “C” o material do pino plastificado é depositado no furo. A região “D” é zona de mistura de material do pino e da base, em “E” é o material do pino que sofreu modificações pelo calor do atrito. Finalmente em “F” temos o colar ou rebarba de material plastificado que foi expulso da solda.

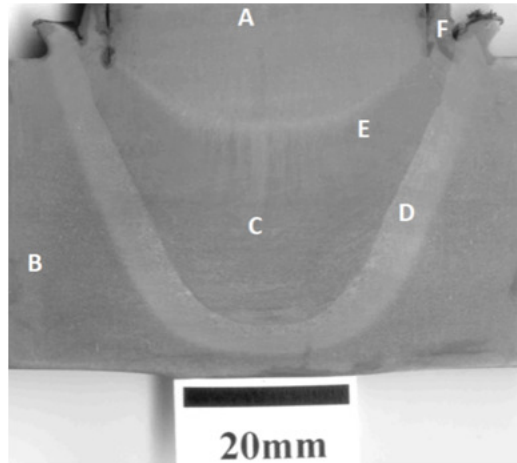


Figura 2.41 – Regiões da solda por fricção por pino consumível<sup>(27)</sup>.

#### 2.16 Processo de soldagem de costura por fricção.

A soldagem de costura por fricção conhecida como *Friction Stitch Welding* é a aplicação do processo de FHPP onde várias soldas FHPP são realizadas ao longo de um caminho. É realizada de uma solda FHPP e a parte restante do pino é cortada na base. Após, é realizada uma nova furação para a solda seguinte, sendo que esta é sobreposta ao pino da solda anterior. A sequência de soldagem de costura por fricção está na Figura 2.42.

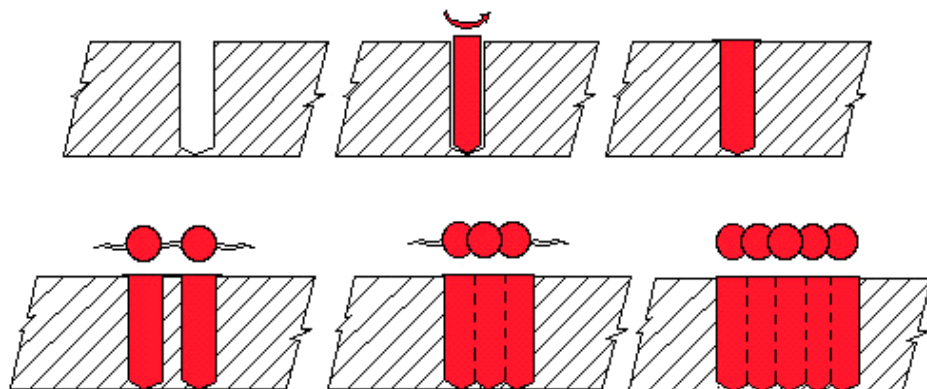


Figura 2.42 – Sequência de soldagem a fricção por costura<sup>(33), (36)</sup>.

Usado para reparar trincas ou para a união de chapas de grande espessura, oferece novas possibilidades de soldagem onde é difícil a soldagem por processos convencionais. Na Figura 2.43 é possível observar com uma macrografia de acabamento de como se apresenta a soldagem por costura por fricção em um chapa.

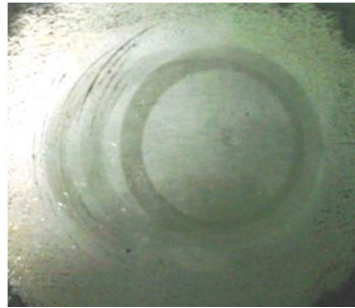


Figura 2.43 – Aspecto do acabamento de costura por fricção.

O processo de preenchimento do furo pode levar de 5 a 20 segundos, dependendo da espessura do material, diâmetro do pino e de sua composição <sup>(3)</sup>. Este processo pode ser aplicado com um passe ou com mais passes de enchimento por costura, como na Figura 2.44.

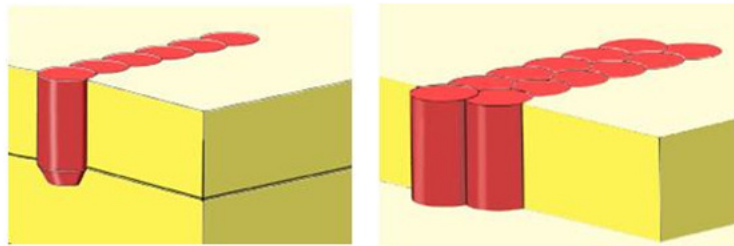


Figura 2.44 – Soldagem a fricção por costura com passes simples e múltiplos.

Existem técnicas diferentes de aplicação do processo de FHPP, sendo utilizados na soldagem furos e pinos cilíndricos ou furos e pinos com formato cônico.

Uma variação no processo de costura por fricção é o processo *Friction Stitch Taper Welding*, utilizado para o reparo de tubulações e chapas, visto na Figura 2.45.

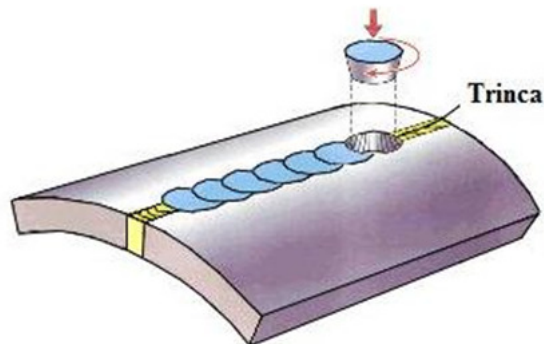


Figura 2.45 - Soldagem tipo *Friction taper stitch welding*.

Este processo envolve a perfuração de um furo cônico em toda a espessura da placa no local do defeito. Um pino cônico com o ângulo do furo é introduzido e depois soldado por atrito no furo, como visto na Figura 2.46.

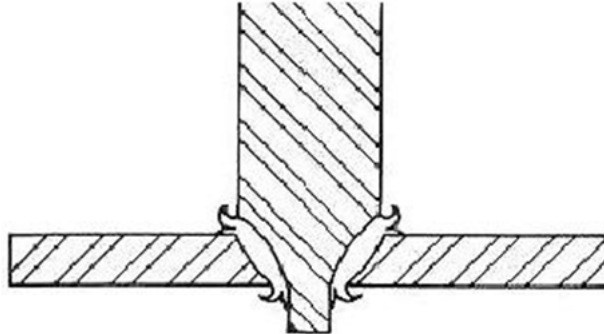


Figura 2.46 – Junta angular para soldagem tipo *Friction Stitch Taper*<sup>(3)</sup>.

A geometria do furo e dos pinos permite maiores forças hidrodinâmicas e maiores forças de reação na soldagem. Essa técnica de FHPP permite efetuar soldagens em materiais em que há necessidade de expulsão do material modificado pela temperatura ou fluxo indesejável na formação da interface de soldagem.

O uso de furos e consumíveis cônicos reduz a tendência de grandes mudanças na localização da interface de atrito e de rotação<sup>(38)</sup>. As geometrias cônicas permitem altas velocidades de rotação, aumento das taxas de deslocamento do pino e aumento das forças utilizadas, comparando-se com furos e consumíveis paralelos.

Além disso, as geometrias do pino e do furo influenciam na qualidade do preenchimento da solda. Na Figura 2.47, para furos com ângulo de abertura muito grandes e com grandes diferenças entre o pino e o furo que facilitam a saída do material, o resultado é um preenchimento incompleto. O mesmo ocorre para diferenças muito pequenas de ângulos entre pino e furo.

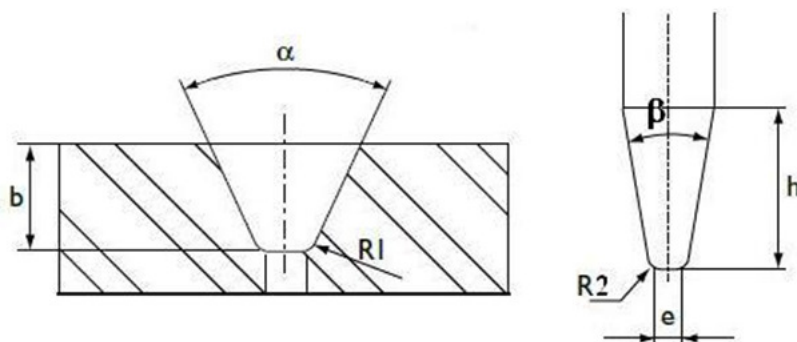


Figura 2.47 - Ângulos de abertura de furo e pino<sup>(38)</sup>.

Para ângulos pequenos há uma maior retenção do material deformado dentro da cavidade, assim se obtêm melhores resultados.

A dureza do material plastificado é influenciada pela geometria. Com a diminuição do ângulo ocorrem durezas maiores. Essas variações na dureza advêm do trabalho termomecânico que impõe modificações microestruturais no material.

Para aços com mesmos comprimentos de queima de pino, o aumento da força axial aplicada pode aumentar o valor da dureza no centro da zona termomecanicamente afetada (ZTMA), porém a extensão desta diminui <sup>(39)</sup>, conforme Figura 2.48 que mostra uma soldagem por fricção em pino de aço SAE 8620 em base SAE 1020. Isto ocorre devido à influência da diferença do tempo de aquecimento para cada soldagem.

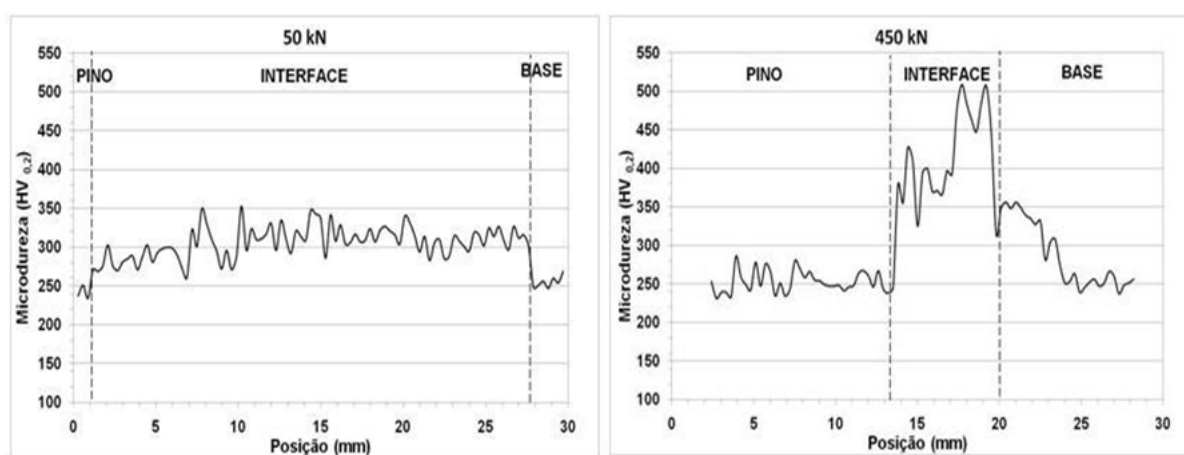


Figura 2.48 - Influência da força axial na dureza da interface da solda <sup>(39)</sup>.

Outro fator importante observado em aços com níveis altos de carbono é a presença de martensita que é incrementada com o aumento da força axial. O incremento de martensita pode ser atribuído à taxa de resfriamento. Assim, para soldas com alta força e curtos períodos de soldagem a presença de martensita é maior. Para diminuir o efeito da alta taxa de resfriamento que provoca o surgimento de martensita pode ser aplicado um preaquecimento localizado, assim, o valor da dureza máxima diminui.

Os defeitos mais comuns encontrados neste tipo de soldagem são a falta de ligação metalúrgica ou falta de preenchimento.

### 2.17 Equipamentos para soldagem com pinos consumíveis.

Através de uma busca por equipamentos de soldagem por pinos consumíveis, foram encontrados equipamentos que, em sua maioria, são utilizados para forças baixas e de tal



modo não foram encontrados estudos realizados na inserção de pinos em chapas para diâmetros maiores que 25 mm e com um controle aprimorado dos parâmetros.

Alguns equipamentos pesquisados encontram-se, por exemplo, no instituto de pesquisas alemão HZG (*Helmholtz-Zentrum Geesthacht - Zentrum für Material und Küstenforschung GmbH ex-GKSS*), em Geesthacht, no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia no Brasil e no TWI em Cambridge na Inglaterra.

O equipamento existente no HZG é uma máquina que tem capacidade para até 50 kN de força axial e rotação máxima de 8000 rpm<sup>(27)</sup>, foto da esquerda na Figura 2.49 (a). Ela possui um cabeçote que faz o deslocamento axial e aplica a rotação ao mesmo tempo e tem capacidade de soldagem para pinos com aproximadamente 16 mm.

O equipamento pertencente ao LTAD de Uberlândia no Brasil é muito similar ao do HZG, tem capacidade de uma força axial para até 50 kN e uma rotação máxima de até 8000 rpm<sup>(37)</sup>. A Figura 2.49 em (b) mostra uma foto deste equipamento.

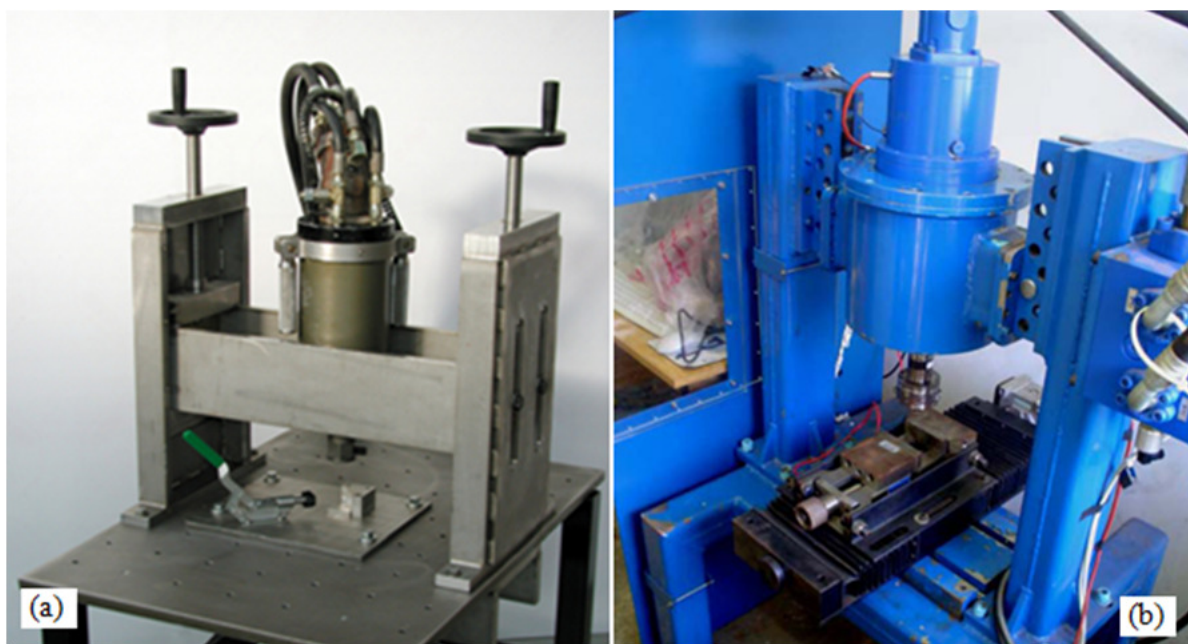


Figura 2.49 – Equipamentos pertencente ao HZG<sup>(27)</sup> (a) e à Uberlândia<sup>(37)</sup> (b).

O equipamento pertencente ao centro de pesquisas TWI da Inglaterra, Figura 2.50, possui uma potência máxima de 43 kW e uma força axial para até 480 kN. Neste equipamento foram processados pinos com até 25 mm e estas soldas posteriormente caracterizadas no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física).

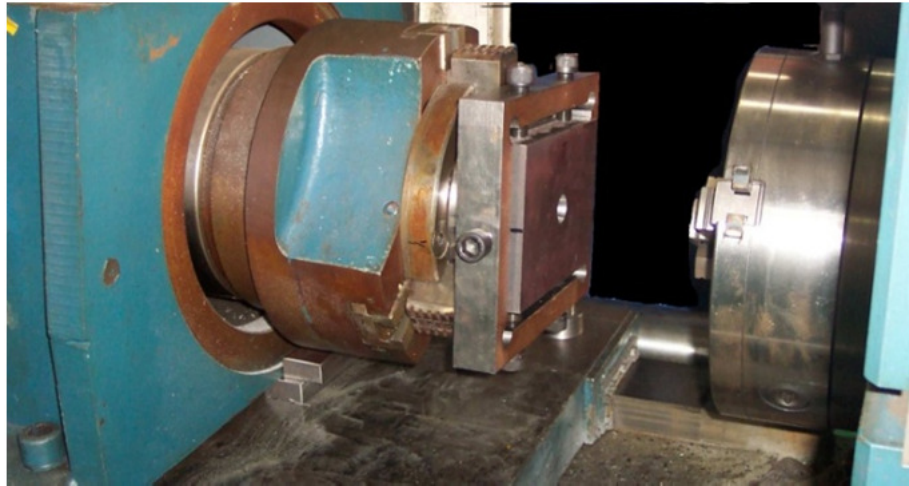


Figura 2.50 – Equipamento pertencente ao *TWI*.

Com a observação destes equipamentos foi possível detectar a necessidade de pesquisa em sondagens por fricção para maiores diâmetros. Assim, foi desenvolvido um equipamento capaz de processar e ampliar esta área da soldagem por atrito.

### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Equipamento de Soldagem por Atrito

Para efetuar a solda por fricção com pinos consumíveis é necessário ter-se controle sobre os parâmetros da soldagem. Como visto na revisão bibliográfica os principais parâmetros de controle para o equipamento são: a rotação, a força de soldagem, a força de recalque e o consumo do pino. Esses parâmetros ainda podem ser subdivididos devido a complexidade deste tipo de soldagem. No controle de força de soldagem, um parâmetro importante é a taxa que é aplicada a força e o consumo do material, no controle de rotação é a taxa de frenagem.

O sistema de controle e aquisição é composto pelo controlador *FlexTest GT* marca *MTS* <sup>(40)</sup>, pelo inversor de frequência *CFW 09* <sup>(41)</sup> e por um computador apresentados na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Controlador, computador e inversor de frequência.

Os parâmetros para soldagem são inseridos no computador que se comunica por rede com o controlador, este por sua vez processa os parâmetros, controla a servoválvula do atuador hidráulico e controla o inversor. O controlador utiliza os valores adquiridos no sensor de deslocamento (*lvdt*) do atuador e a força adquirida na célula de carga para seu processamento. O inversor está conectado ao controlador por três conexões sendo uma para controle da rotação, outra para aquisição e a terceira para início e parada da rotação.

O registro de dados durante a solda é efetuado no computador. O controlador envia os sinais para acompanhamento e registro. O controlador possui para controle de servoválvula  $2 \times 10^{19}$  bits e para registro de sinais  $2 \times 10^{16}$  bits. Para este tipo de processamento há uma resposta muito mais rápida e com maiores detalhes comparando-se com um CLP (Controlador Lógico Programável).

O projeto do equipamento foi dividido em duas fontes de potência. A primeira fonte de potência é para a força e deslocamento e a segunda para o sistema de rotação.

Para a potência do sistema de força e deslocamento foi utilizada uma unidade hidráulica com capacidade de até 454 l/min. de vazão de óleo hidráulico a 206 bar de pressão (Figura 3.2). A unidade hidráulica está conectada a um sistema de válvulas solenóides (*Manifold*) que permite, por segurança, interromper instantaneamente o fluxo de óleo hidráulico e cessar a força aplicada na solda pelo atuador.



Figura 3.2 - Unidade hidráulica para 206 bar de pressão.

O atuador tem capacidade para tração e compressão para até 1000 kN e velocidade máxima de deslocamento de 15 mm/s.

Para o sistema de potência de rotação foi utilizado um motor elétrico trifásico 380 V e 4 pólos e com potência máxima nominal de 132 kW (em 1785 rpm). As soldas podem ser realizadas aplicando uma velocidade rotacional máxima de até 2000 rpm devido à possibilidade de acréscimo de rotação no controle do inversor. As principais características estão na Figura 3.3, na linha destacada.

Potência		Carcaça	rpm	Corrente nominal em 220 V (A)	Corrente com rotor bloqueado $I_p / I_n$	Conjugado nominal $C_n$ (kgfm)	Conjugado com rotor bloqueado $C_p / C_n$	Conjugado máximo $C_{max} / C_n$	Rendimento $\eta$ %			Fator de potência $\cos \varphi$			Fator de serviço FS	Momento de inércia J (kgm <sup>2</sup> )	Tempo máx. com rotor bloqueado (s) a quente	Nível médio de pressão sonora dB (A)	Peso aprox (kg)
cv	kW								% da potência nominal										
									50	75	100	50	75	100					
4 Pólos - 60 Hz																			
125	90	280S/M	1785	293	7,8	50,14	2,5	2,9	92,7	93,8	93,8	0,74	0,82	0,86	1,00	1,92711	23	80	632,5
150	110	280S/M	1785	353	8,0	60,17	2,6	2,7	93	94	94,1	0,77	0,84	0,87	1,00	2,56947	20	80	706,7
175	132	315S/M	1785	428	7,2	70,20	2,5	2,7	93	94,1	94,2	0,78	0,84	0,86	1,00	2,64977	15	82	819,1
200	150	315S/M	1785	484	7,5	80,22	2,4	2,6	93	94,5	94,6	0,75	0,83	0,86	1,00	3,21184	19	82	910,4
250	185	315S/M	1785	597	8,3	100,28	2,8	2,8	93	94,6	94,6	0,76	0,84	0,86	1,00	3,77391	17	82	997,5

Figura 3.3 – Principais características do catálogo de motores elétricos <sup>(41)</sup>.

Conforme os dados obtidos do fabricante WEG <sup>(41)</sup> a corrente elétrica nominal para a rotação de 1785 rpm em 380 V é obtida multiplicando-se o valor da corrente em 220 V por 0,577. Assim, para o motor elétrico selecionado, a corrente em 380 V é aproximadamente 247 A. Para o controle da rotação do motor foi utilizado um inversor de frequência programável CFW 09 marca WEG com alimentação de 380 V e corrente de saída de até 300 A.

Para uma melhor compreensão de como é constituído o equipamento de solda por fricção projetado é necessário observar o fluxograma da Figura 3.4.

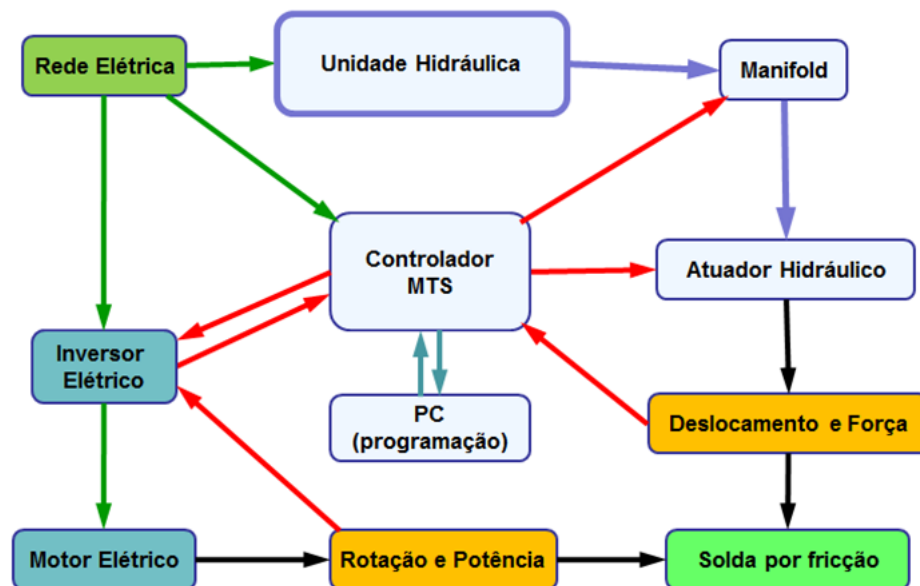


Figura 3.4 – Fluxograma do equipamento de solda por fricção.

O fluxograma apresenta como é realizada a solda por fricção. O controlador é quem faz a leitura e ajuste dos parâmetros, fazendo aquisição direta de deslocamento e força e, indiretamente através do inversor, o torque e a rotação. O controlador comunica-se com um computador onde está a interface com o usuário.

### 3.1.1 Projeto da constituição do equipamento.

No projeto da máquina foi utilizando o software *CAD 3D SolidWorks* e todos componentes projetados foram dimensionados utilizando simulações pelo método de elementos finitos com do *software ABAQUS* versão 6.9-2.

Para determinação da configuração da máquina foram considerados os seguintes fatores: posição de soldagem, aproveitamento do maior espaço do pórtico existente e facilidades para modificações futuras no equipamento. Após várias projeções, a composição final do equipamento de soldagem está na Figura 3.5.

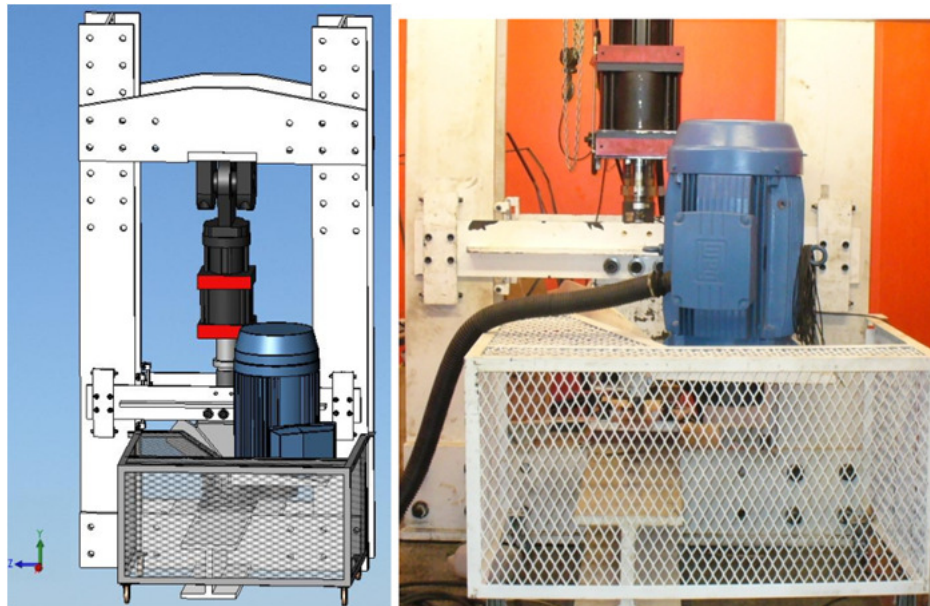


Figura 3.5 - Projeto virtual do equipamento e foto do equipamento fabricado.

O motor elétrico foi montado de modo que sua posição ficasse paralela ao eixo de deslocamento do atuador e se movimentasse com o mesmo. Assim o sistema de reação à rotação pode ser configurado no mesmo sistema de guiamento. A posição da solda é na vertical, sendo que a chapa ou material de base é preso à base de reação do pórtico e o pino consumível preso por um sistema concêntrico na parte superior. Deste modo, a base para a

solda permanece parada e o pino é quem rotaciona e se desloca verticalmente. Essa configuração permite o estudo de uma futura solda por fricção submersa.

Por segurança foi criado um módulo removível fabricado com chapa expandida protegendo as peças móveis e evitando que algum componente seja arremessado caso ocorra alguma falha.

A rotação é transferida por um sistema de transmissão por correia dentada através de duas polias com relação de transmissão de 1:1. Foi inserido um tensionador com mola e amortecedor para evitar vibrações e para manter sempre a mesma tensão na correia, conforme a Figura 3.6.

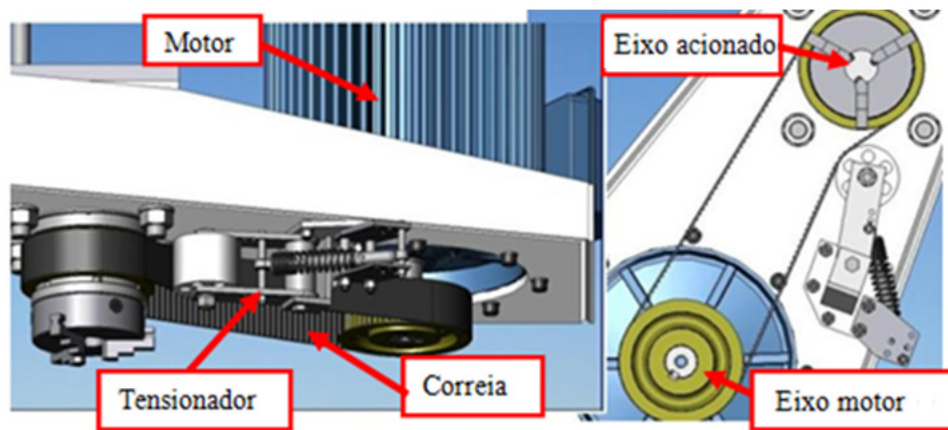


Figura 3.6 – Sistema de transmissão sincronizado com tensionador.

Para aplicação da força, no pino consumível, foi montado um sistema com um eixo apoiado em dois rolamentos cônicos em um bloco, destacado na Figura 3.7. Este sistema permite que haja uma boa rigidez axial e lateral permitindo a rotação do eixo. Outra vantagem deste sistema, além de ser compacto, é a possibilidade de lubrificar os rolamentos com óleo, uma vez que com a alta pressão induzida na soldagem por atrito, a lubrificação com graxas se torna pouco eficiente.

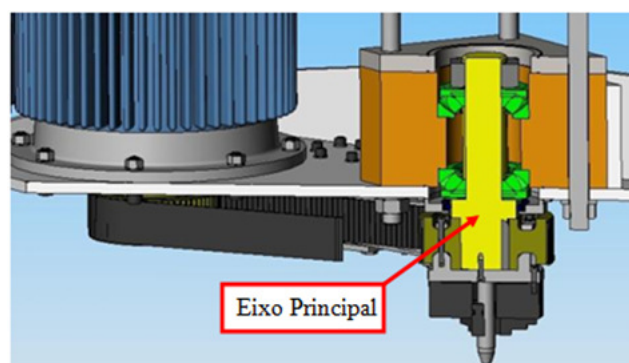


Figura 3.7 – Montagem do eixo de rotação no bloco mancal.

No eixo fica montada uma polia conectada por uma chaveta e na polia uma placa universal com um sistema de castanhas para prender o pino consumível. Para reduzir o comprimento deste conjunto, o próprio flange que prende a placa na polia serve como batente do pino consumível. Na Figura 3.8 tem-se uma vista em corte com a indicação dos componentes do conjunto.

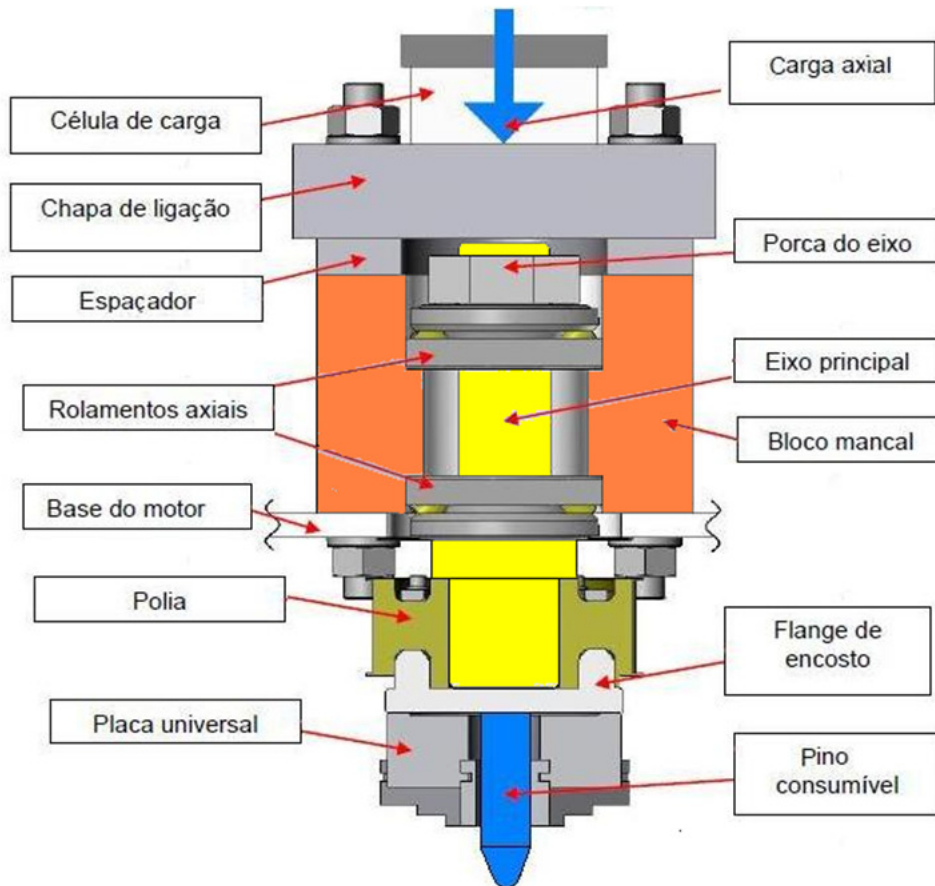


Figura 3.8 – Vista em corte com descrição dos componentes <sup>(42)</sup>.

O conjunto de lubrificação é constituído por um reservatório de óleo externo e por uma caixa de lubrificação. A caixa fica interligada com o reservatório externo por meio de dois canais de ligação, sendo um superior e outro inferior. Desta maneira, ocorre uma circulação de óleo impulsionada pela rotação dos rolamentos. A caixa de lubrificação serve para manter os rolamentos banhados em óleo constantemente.

A composição da caixa de lubrificação é o bloco mancal, a base do motor e a chapa de ligação e entre estas peças é colocado um *o-ring*. Quando as peças são parafusadas os *o-rings* são prensados nos condutos e assim ocorre a vedação. Na parte inferior da base é fixado um flange com uma gaxeta interna e deste modo ocorre a vedação na parte inferior do eixo. Na Figura 3.9 pode ser observada a posição da gaxeta no conjunto e os *o-rings*.



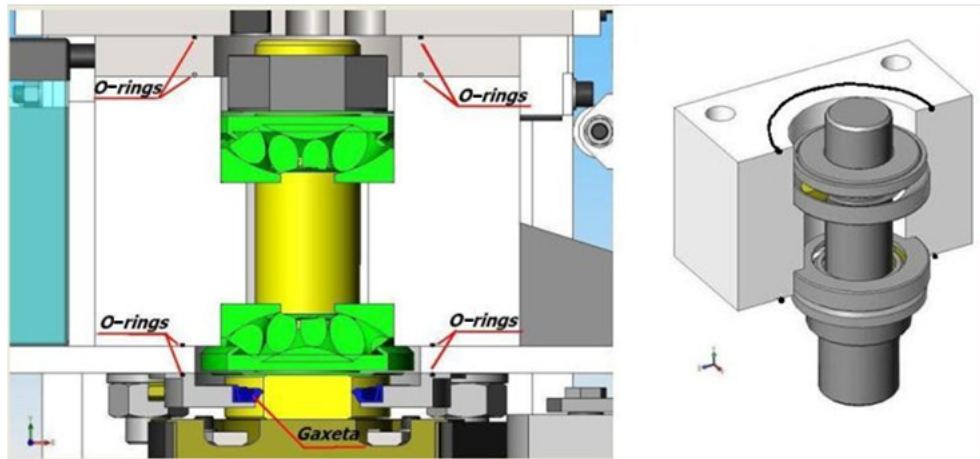


Figura 3.9 – Vedação da caixa de óleo lubrificante <sup>(42)</sup>.

A Figura 3.10 apresenta um detalhe do sistema: a transmissão, o conjunto do eixo de rotação, esticador, motor e as quatro barras que faz a fixação.

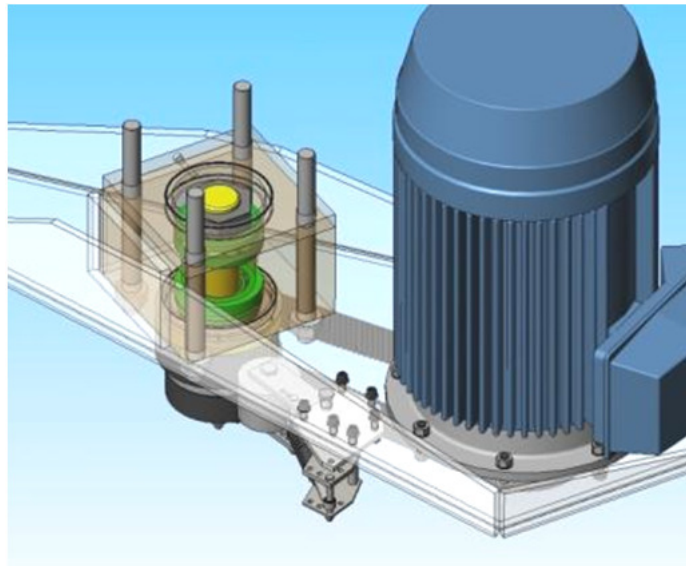


Figura 3.10 – Detalhe do posicionamento do eixo no bloco mancal.

Para permitir a rigidez do conjunto durante a solda é utilizado um sistema de guiamento. O sistema de guiamento utiliza como guias as próprias vigas de sustentação do pórtico. São utilizadas oito linhas de guia com dois pontos de apoio que servem para restringir os graus de liberdade do eixo de rotação e impedir a rotação da célula de carga. Chapas laterais são utilizadas para interligar as guias e prender a chapa de ligação com a célula de carga. O sistema de guiamento permite somente deslocamentos verticais, ou seja, somente no eixo z, como na Figura 3.11. Os eixos x e y são restringidos por roletes de *nylon 6/6* parafusados em chapas com regulagem de força por aperto.

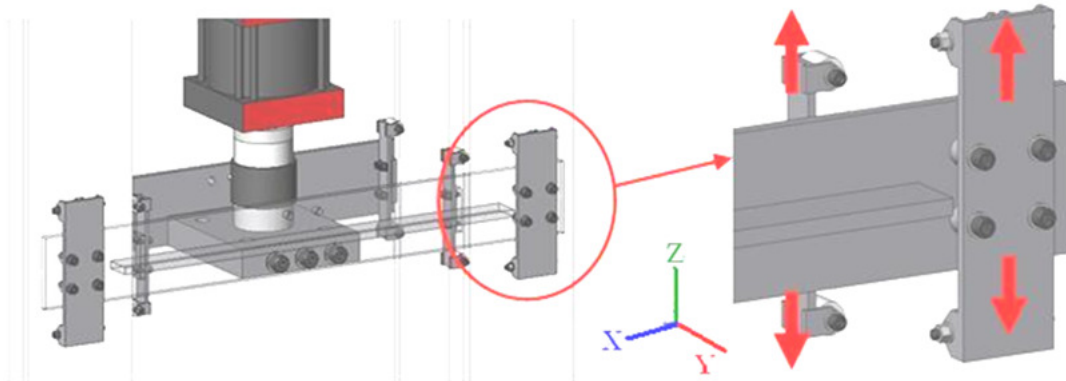


Figura 3.11 – Sistema de guiamento restringindo movimentos em X e Y.

### 3.1.2 Dimensionamento e simulação dos componentes.

Para dimensionamento dos rolamentos foi utilizado o catálogo *SKF*<sup>(43)</sup>. A posição, a força máxima em rotação e a força estática foram determinantes para a escolha dos mesmos. Os rolamentos axiais selecionados possuem limite de rotação de 3000 rpm, carga dinâmica de 980 kN e estática de 2500 kN.

Rolamentos de rolos cônicos foram escolhidos, pois além da força axial também toleram forças laterais. Outra característica destes rolamentos é de serem autocompensadores para que qualquer desalinhamento na usinagem da fabricação do bloco mancal não cause prejuízos à vida útil dos rolamentos. Na Figura 3.12 estão as capacidades e dimensões principais dos rolamentos.

Rolamentos axiais autocompensadores de rolos

**SKF**

Dimensões principais			Capacidades de carga		Carga limite de fadiga $P_u$	Fator de carga mínima	Velocidades de referência	Velocidade limite	Massa
d	D	H	C	$C_0$					
mm			kN		kN	-	r/min		kg
100	210	67	980	2500	275	0,59	1700	3000	10,5

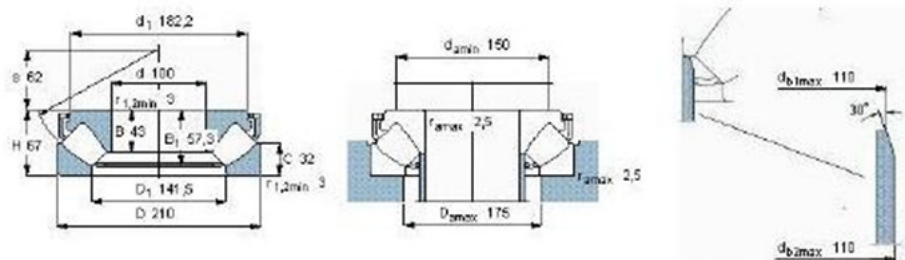


Figura 3.12 – Dimensões e capacidades dos rolamentos selecionados<sup>(43)</sup>.

Para a análise estrutural dos componentes foram considerados o peso do motor, as forças envolvidas na soldagem e as reações no pórtico e o item mais crítico analisado é o eixo onde é aplicada a força de recalque.

Para o bloco mancal e a base do motor foi utilizado um carregamento de uma força equivalente ao peso do motor e flange de adaptação total de 995 kg, aplicada no flange do motor apoiado na base e uma força simulando o torque no motor tracionando a correia. Os vínculos de restrição foram aplicados no bloco na posição de ligação dos parafusos.

Na Figura 3.13 podem ser observadas as condições de contorno e os elementos aplicados nas análises.

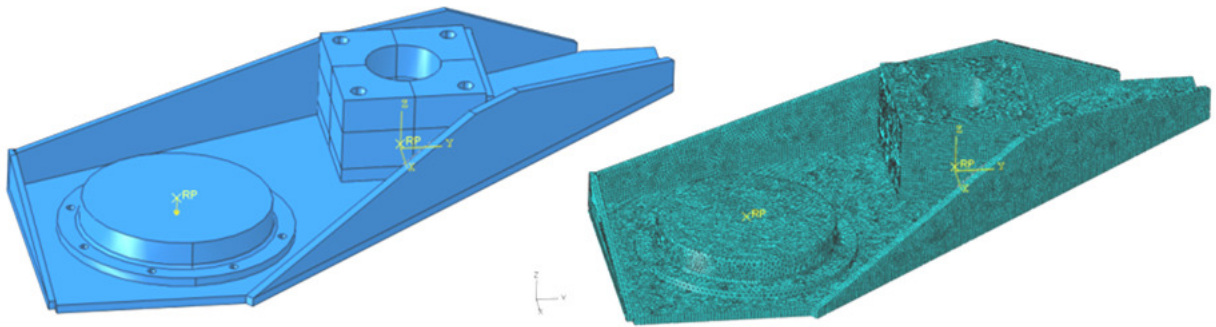


Figura 3.13 – Condições de contorno na base do motor e bloco mancal.

Nas Figura 3.14 e Figura 3.15 são apresentados os resultados finais mostrando tensões máximas e as tensões equivalentes segundo o critério de Von Mises. O bloco principal e o flange do motor são simulados como componentes rígidos fazendo contato com a base.

Nas tensões simuladas os valores máximos obtidos não passaram de 30 MPa, assim o aço selecionado para este componente foi o ASTM A36 e assim constituindo uma estrutura com alta rigidez.

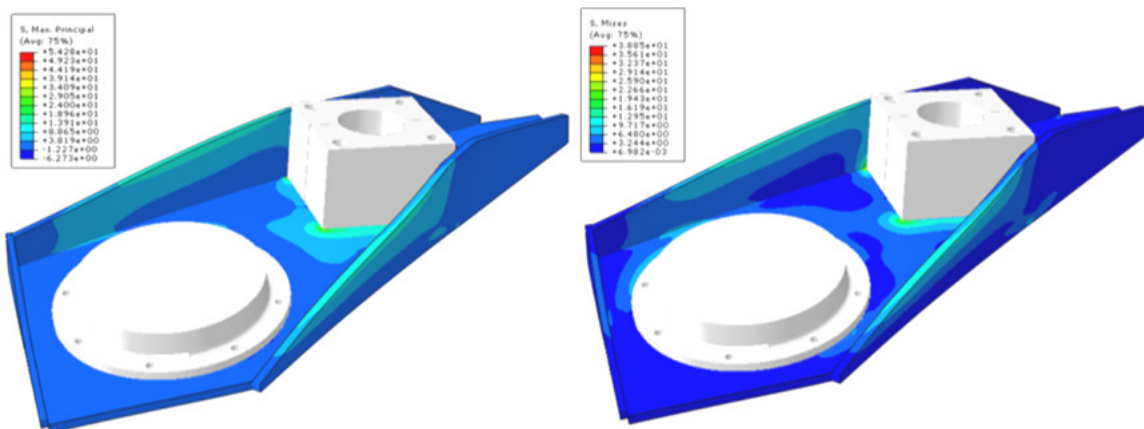


Figura 3.14 - Tensões máximas e equivalentes segundo Von Mises.

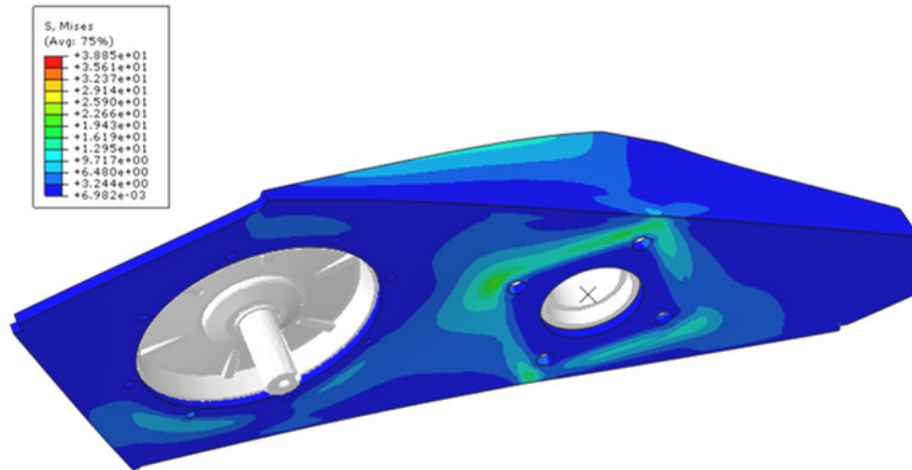


Figura 3.15 - Tensões equivalentes segundo Von Mises (vista inferior).

Na Figura 3.16 são mostrados os deslocamentos máximos no eixo vertical os quais não ultrapassam 0,75 mm, este deslocamento é causado pelo peso do motor e pelos esforços ocasionados pelo torque aplicado.

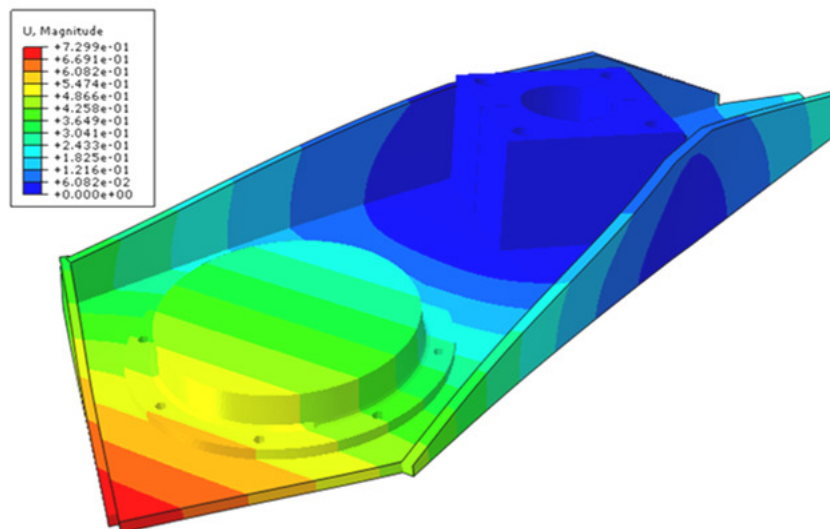


Figura 3.16 – Deslocamentos verticais simulados.

Nas simulações foram aplicadas a força máxima de recalque igual a 1 MN sendo a força máxima da bancada de ensaios e o torque máximo de 1060 Nm que é o torque máximo de tabela do motor. A força foi aplicada na face de apoio do rolamento e o torque foi aplicado na polia. Uma restrição de engaste foi aplicada na região do flange que fica em contato direto com o pino consumível. Os carregamentos, vínculos adotados e os elementos estão representados nas geometrias do eixo na Figura 3.17.

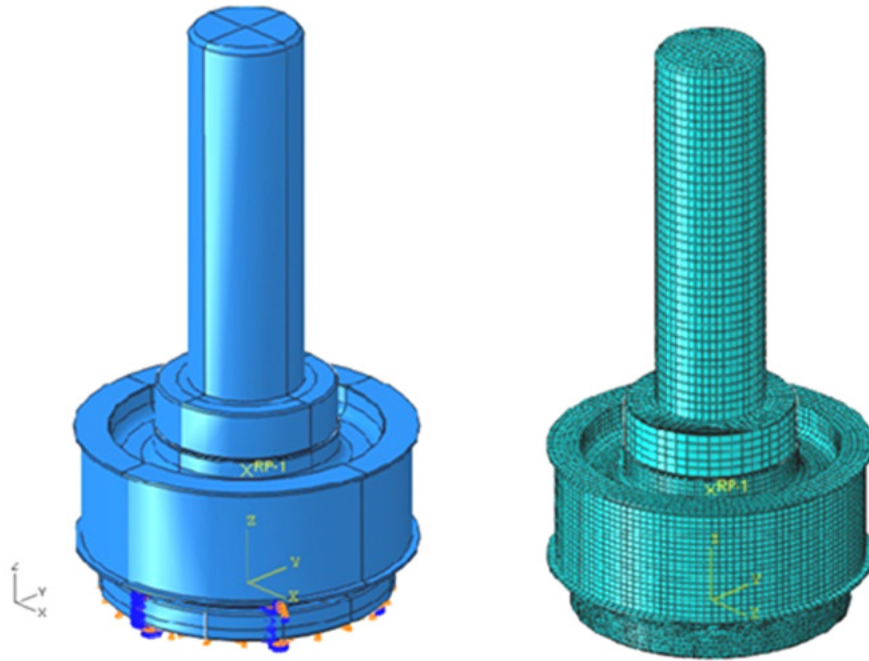


Figura 3.17 - Condições de contorno e malha para simulação.

O resultado da análise para as tensões equivalentes de Von Mises do eixo está representado na Figura 3.18 no lado esquerdo. Na direita são representados os deslocamentos máximos obtidos (próximos a 0,05mm).

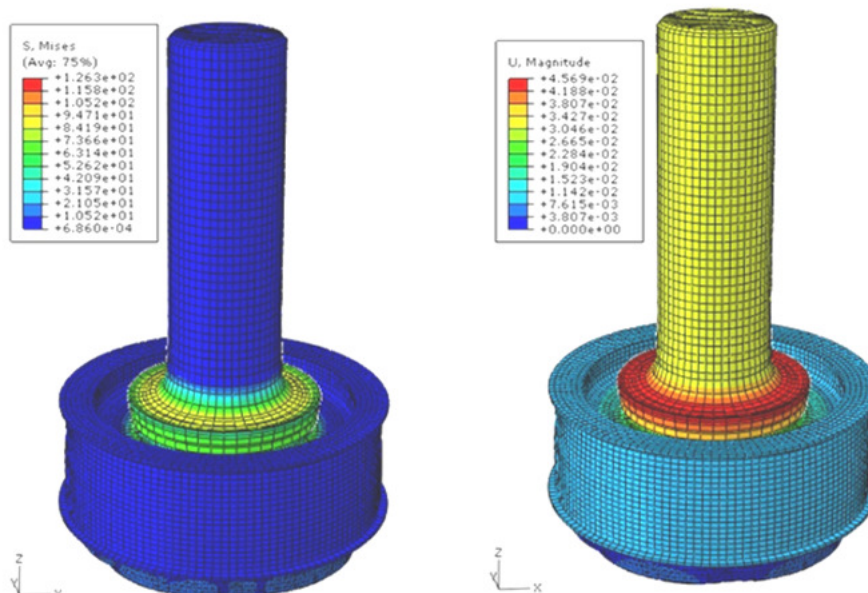


Figura 3.18 – Tensões equivalentes obtidas no eixo e a deformação máxima.

Os níveis de tensões encontrados no eixo são próximos a 110 MPa. O eixo foi fabricado em SAE 4340 com escoamento aproximado de 700 MPa, tratado termicamente com

têmpera e revenido, conferindo ao componente um coeficiente de segurança superior a 6. Na Figura 3.19 são representadas as tensões máximas principais.

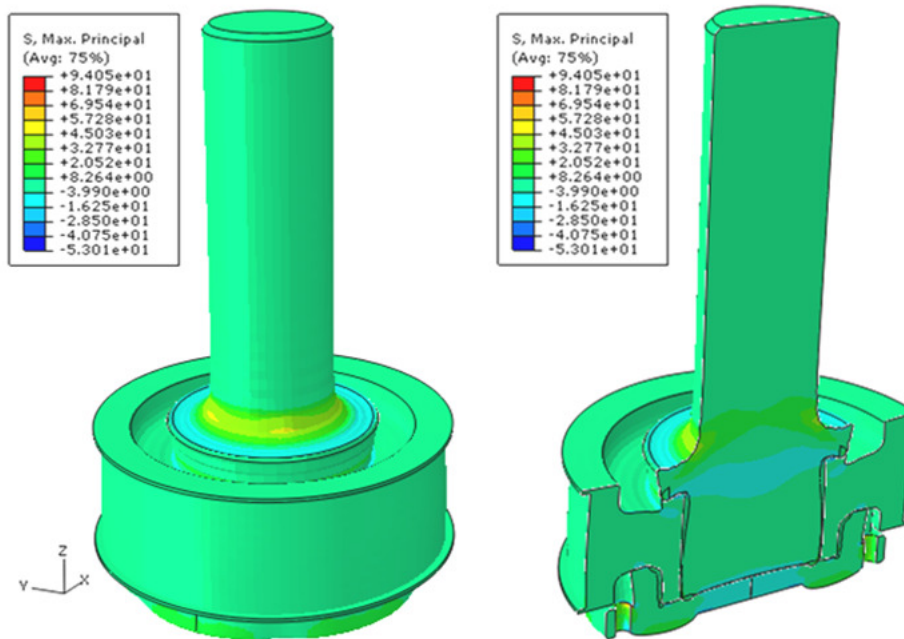


Figura 3.19 – Tensões máximas principais do eixo.

Na Figura 3.20 é mostrado o eixo e o flange de ligação com uma vista em corte para visualização da distribuição das tensões.

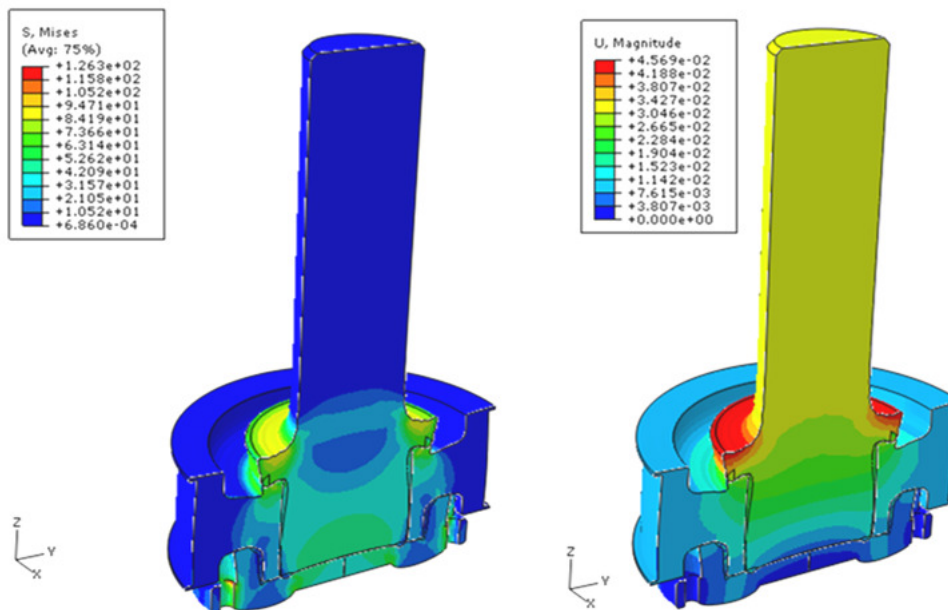


Figura 3.20 – Vista da simulação do eixo em corte vertical.

Na Figura 3.21 é apresentada a distribuição das tensões máximas e as tensões equivalentes de Von Mises obtidas na simulação do flange. O material selecionado para fabricação foi o mesmo do eixo.

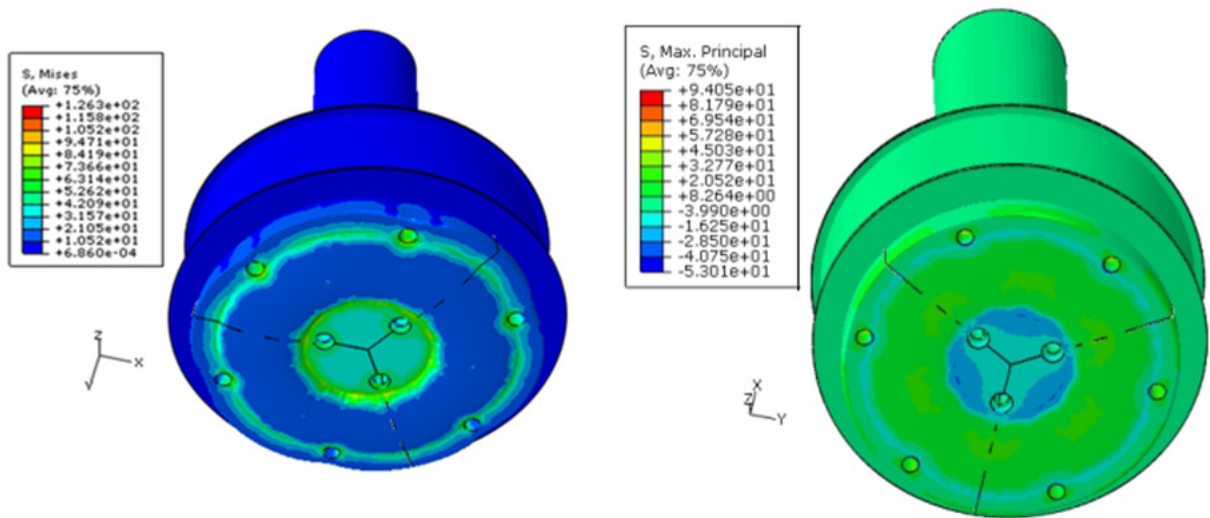


Figura 3.21 - Tensões equivalentes obtidas no flange.

Na Figura 3.22 estão representadas as tensões de Von Mises aplicadas no flange. Nesta figura nota-se que há uma região em que os níveis de tensão são mais elevados. Os níveis de tensões encontrados no flange são próximos a 130 MPa, ficando o coeficiente de segurança superior a 5.

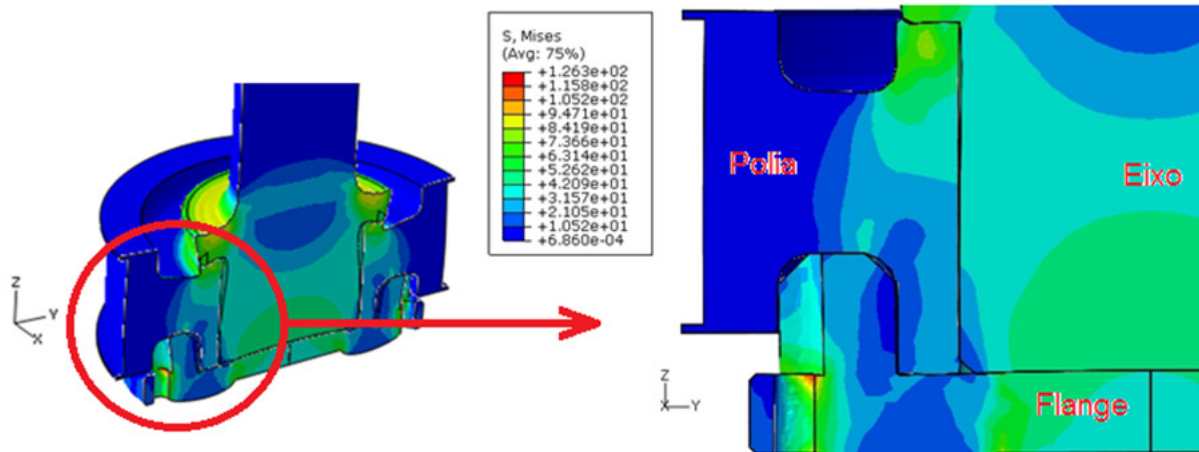


Figura 3.22 – Tensões aplicadas no flange.

A fixação da base de soldagem, Figura 3.23 e Figura 3.24 é obtida com um conjunto parafusado através de quatro fusos unindo com a base do pórtico. Um fixador com a espessura de 25,4 mm prende a base dos corpos de prova impedindo que os mesmos girem durante a soldagem.

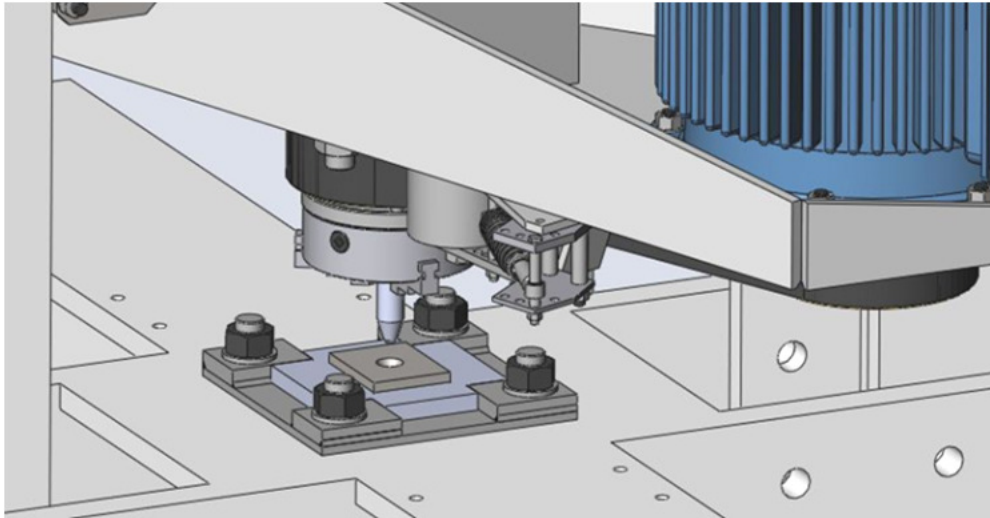


Figura 3.23 – Sistema de fixação da base e do pino para a soldagem.

Na fixação do pino consumível na máquina foi selecionada uma placa universal comercial para tornos de usinagem, com sistema de fixação por três castanhas. O pino fica apoiado no flange que prende a placa universal e a mesma agarra o pino impedindo o escorregamento em rotação.



Figura 3.24 – Foto do sistema de fixação da base e do pino.

Para impedir que os pinos escorregassem na placa foi realizada uma soldagem com eletrodo de modo que o cordão de solda formasse uma linha longitudinal ao pino e este era montado na placa apoiado em uma das castanhas.



### 3.2 Programa do Sistema de Controle da MPF1000

Para o controle do equipamento de soldagem foi utilizado o *software* de controle 793 versão 4.0 de 2008 da MTS <sup>(40)</sup>. No *software* pode ser feita uma programação de parâmetros, leitura e inserção de limites de segurança (*interlocks*). A Figura 3.25 mostra a tela do computador interligado com o controlador.

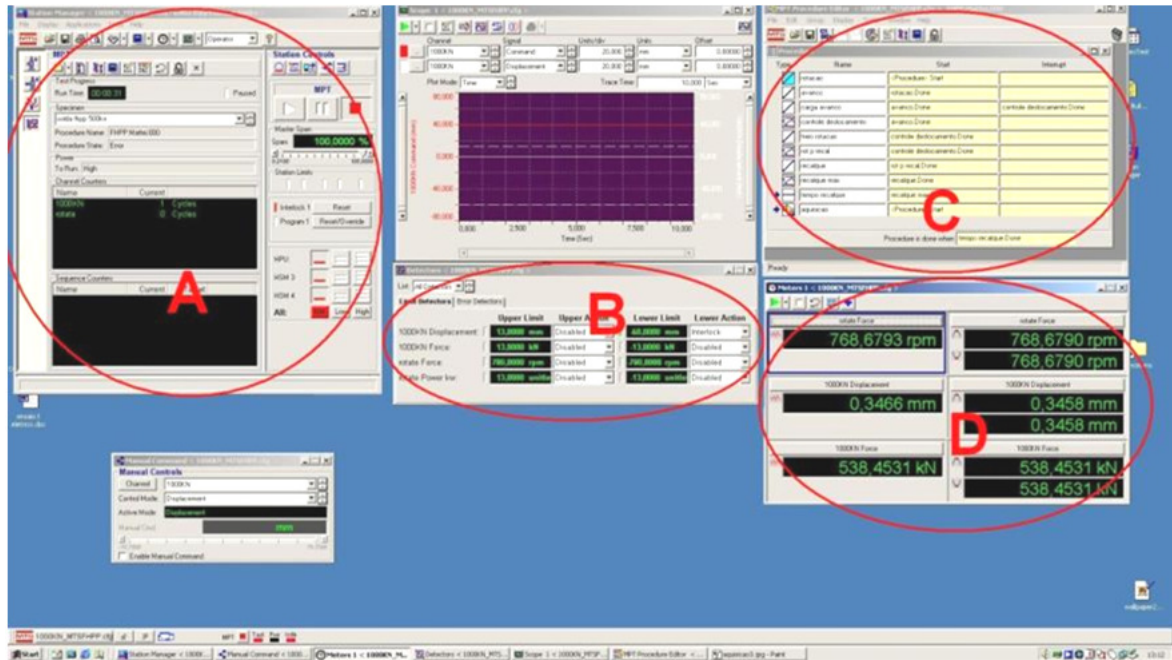


Figura 3.25 - Tela do computador mostrando o programa do controlador.

Nas áreas circuladas estão as principais funções de controle. A área “A” mostra os controles de alimentação das válvulas solenóides do *manifold* e liberação para a rotação do inversor. Nesta mesma área é executado o comando de início, pausa e fim de procedimento. Na área “B” são inseridos os limites de segurança (*interlocks*). É necessário colocar limites de segurança para impedir que, em caso de alguma falha na soldagem, o avanço do atuador não provoque contato entre a placa de rotação e a base da solda, ou que a rotação exceda o limite máximo de rotação do motor.

Na área C, está o MPT (*Multi Purpose Testline*), sendo um campo onde é realizado todo procedimento de programação. Nele são inseridos os passos de soldagem, forças, rotação e comprimento de queima. Na área “D” é apenas a medição do que está ocorrendo com o atuador e o motor. O *software* ainda possui um comando manual que permite um posicionamento do atuador para inserir e retirar os corpos de prova.

### 3.2.1 Setup da máquina de soldagem.

Inicialmente a placa do material base da solda deve estar fixada na base da máquina e o pino preso na placa universal. Com o controle manual, o pino é posicionado tocando a base com uma pequena força de contato. O deslocamento é zerado nesta posição e depois afastado entre 1 a 2 mm da base. Após estes passos a máquina está em condições para ser iniciada (*start*) a solda por atrito.

O controlador faz a leitura do procedimento seguindo a programação inserida. O procedimento apresentado para a programação de solda por fricção foi dividido em seis linhas de controles, três linhas de detectores e uma linha de aquisição, conforme a Figura 3.26.

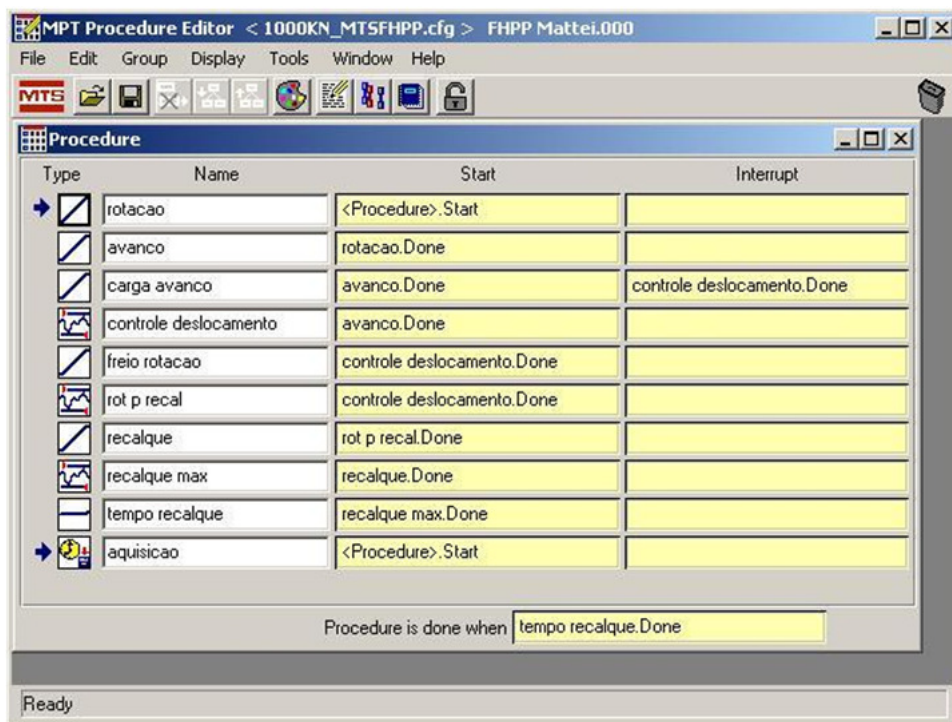


Figura 3.26 - Programa para a soldagem por fricção.

Cada linha de programação comanda um evento no tempo de soldagem e pode interromper outra linha de comando. No exemplo da Figura 3.26 quando é dado o “*start*” no controle, o procedimento é iniciado na linha ou linhas de comando em que estão selecionadas para “*start*”. O procedimento possui três colunas, sendo que na primeira é possível nomear as linhas de comando como desejado. Na segunda coluna deve-se selecionar o comando de início de cada linha e a na terceira coluna pode-se optar quando interromper a linha de comando antes que ela tenha atingido o objetivo.

O procedimento programado faz iniciar a linha de comando “rotação” e “aquisição de dados” ao mesmo tempo, conforme a seta de indicação na Figura 3.26.

A Figura 3.27 mostra a linha de comando de rotação. A indicação “A” é o tipo de comando, no caso é uma rampa ascendente com incremento de 1800 rpm/min. (30 rpm/s) por controle (*Control Mode*) de força (pelo fato de que a rotação está ligada ao controlador simulando uma conexão de uma célula de carga). O controlador envia sinal para o inversor para começar a rampa nesta taxa. A indicação “B” é o objetivo da linha de comando, sendo que o objetivo desta é a rotação atingir 1000 rpm.

A vantagem deste tipo de programação é que se pode escolher a taxa de incremento de rotação e, além disso, a rotação que será empregada na soldagem.

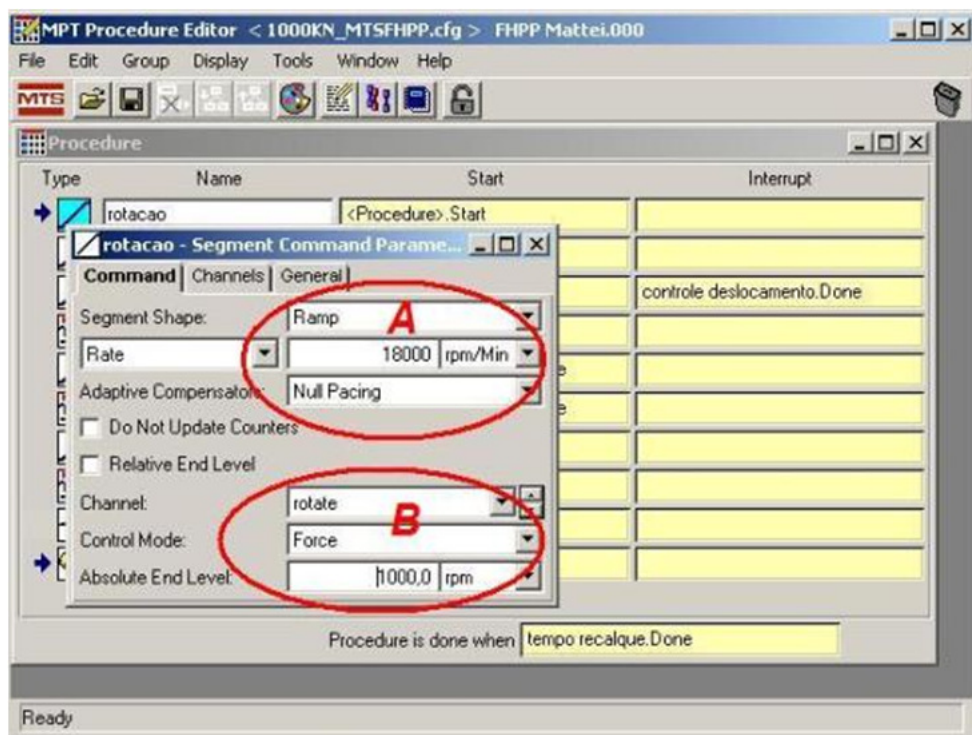


Figura 3.27 - Comando inicial de rotação na solda por fricção.

No momento em que a rotação atinge o valor determinado, a linha de comando é encerrada e o procedimento segue para a linha seguinte.

A linha de comando de avanço, Figura 3.28, faz com que o atuador comece avançar em direção à base de soldagem. Esta linha de comando é uma rampa com controle de força, onde a taxa de carregamento é de 2400 kN/min. (40kN/s) e o objetivo, no caso, é atingir a força de soldagem de 250 kN. O valor objetivo da força está em valor negativo, pois para o controlador é uma força de compressão e assim, pelo sistema interno do controlador, a direção do eixo é negativa.

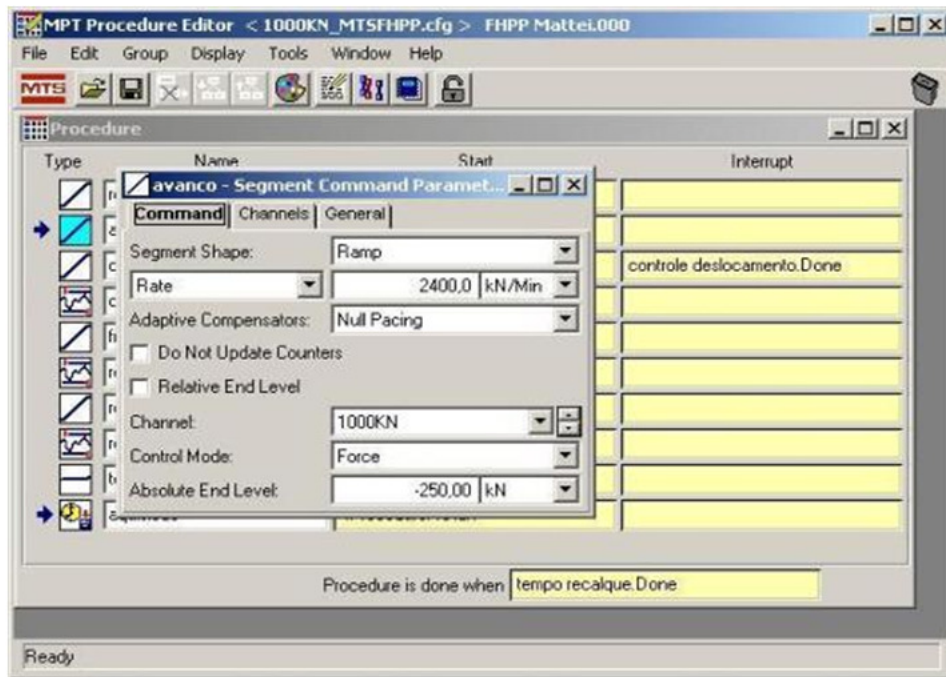


Figura 3.28 - Comando de força para avanço.

Quando a força de soldagem atingir a força determinada pelo comando esta se encerra e o controle passa para a linha seguinte Neste momento é iniciado o comando “carga avanço” e a linha de detecção “controle de deslocamento”, na Figura 3.29.

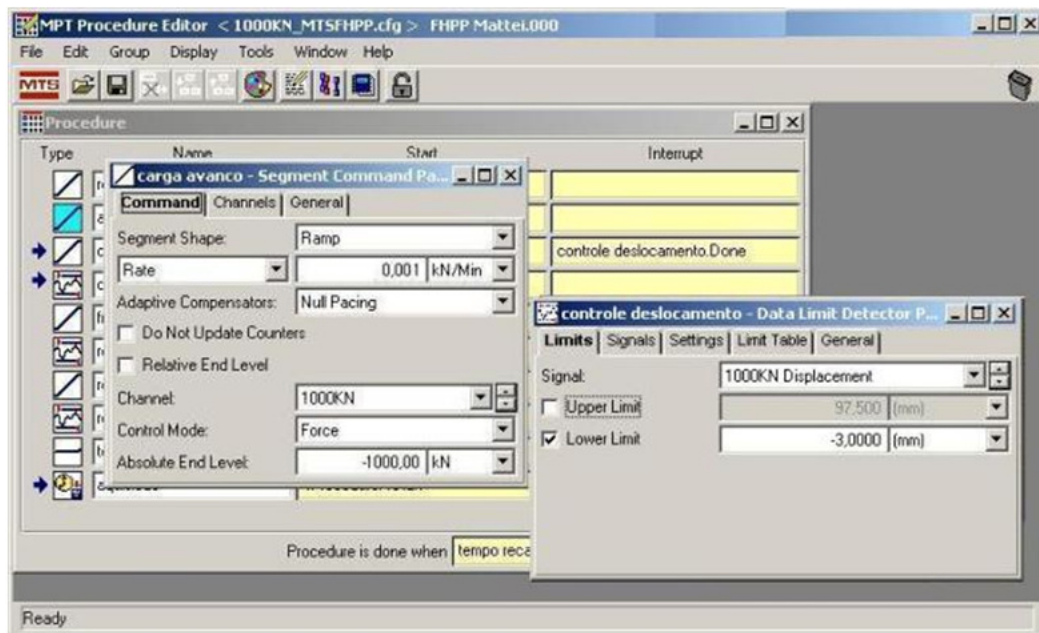


Figura 3.29 - Comando de força de avanço e detecção de deslocamento.

O comando de força nesta linha é um controle de força com uma taxa muito pequena e o objetivo é uma força muito alta. Esta linha serve para manter praticamente a força da linha

anterior, enquanto que o detector de “controle deslocamento” mede um valor para consumo do pino. O limite para o deslocamento é de 3,0 mm e este detector encerra o controle “carga avanço”

Até o momento, o equipamento aplicou a força de solda e quando esta foi atingida manteve-se pelo período de consumo de 3 mm do pino. Sendo tudo realizado com a rotação de 1.000 rpm.

Interrompida a linha “carga avanço”, o controlador segue para a linha de controle “freio rotação” e o detector “rotação para recalque”, da Figura 3.30. Estas linhas servem para a frenagem da rotação e a determinação de quando será iniciado o recalque.

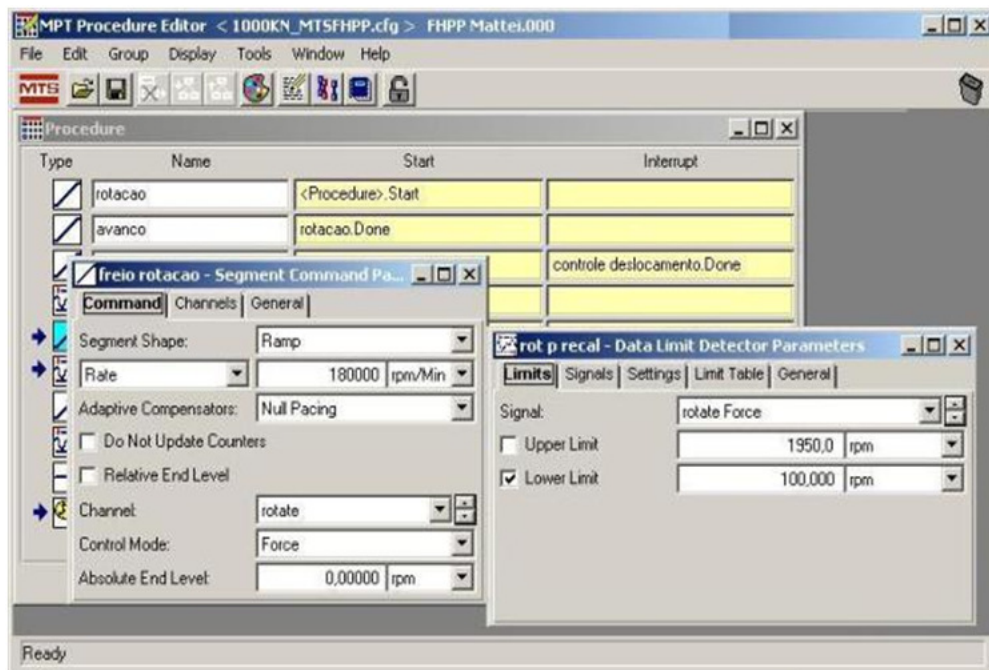


Figura 3.30 – Linhas de comando de frenagem e detecção para recalque.

No comando de frenagem pode-se modificar a soldagem alterando o tipo de parada. Ao inserir uma baixa taxa de frenagem haverá uma parada influenciada pela inércia do sistema caracterizando uma máquina para solda por fricção por inércia. Ao utilizar uma alta taxa de frenagem o motor será freado, freando a rotação do pino, caracterizando uma máquina de soldagem por fricção com acionamento direto. Com a configuração projetada do equipamento pode-se caracterizar como um equipamento híbrido, utilizando ambos os modos de soldagem.

Outra característica está no modo de início para a força de recalque. Se o recalque iniciar antes da parada da rotação será obtida uma soldagem influenciada pelo torque

produzindo uma força de torção na solda. Se o recalque iniciar após a parada da rotação será obtida uma soldagem afetada apenas pela força axial, sem envolvimento das forças em torção.

No detector “rotação para recalque” quando a rotação atinge 100 rpm será interrompida a frenagem e o comando segue para a próxima linha.

A próxima leitura está na Figura 3.31, onde se observa a linha de comando “recalque” e o detector “recalque máximo”.

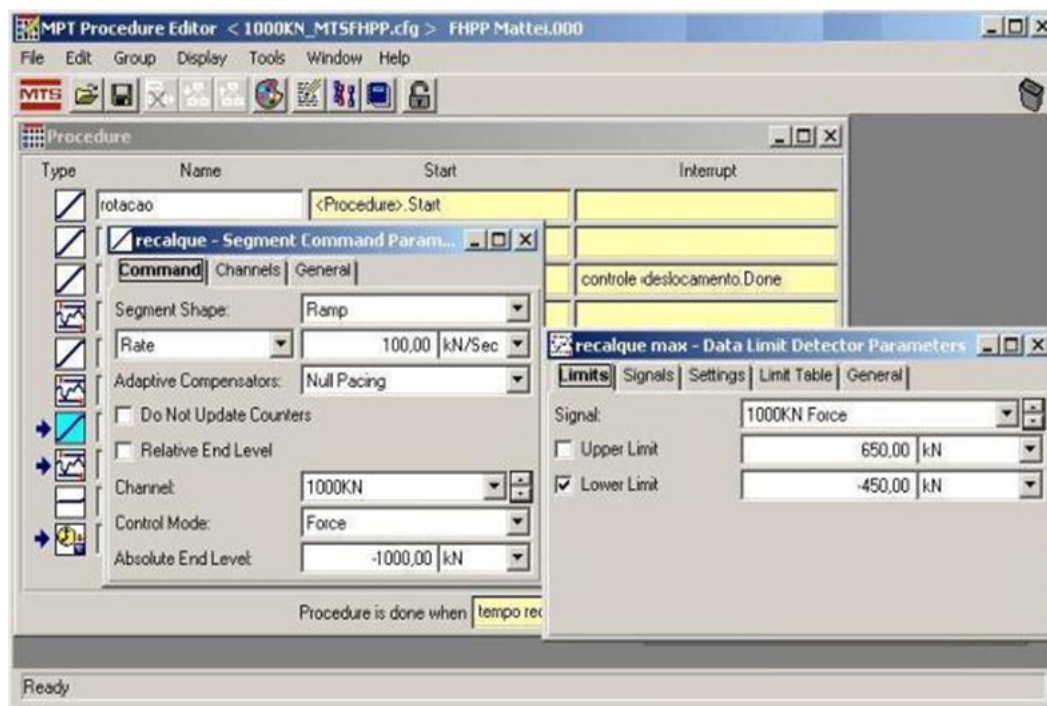


Figura 3.31 - Comando de força de recalque e detecção de força de recalque.

O recalque é aplicado com uma taxa de 100 kN/s e o mesmo é interrompido quando atingido o detector “recalque máximo” de 450 kN (força de forjamento).

Depois de atingida a força de recalque o controle segue para a próxima linha que é um controle força por um período de tempo de 5 s, visto na Figura 3.32. Neste comando o controlador mantém a mesma força da linha anterior pelo período determinado.

Quando é aplicada a força de forjamento com o material ainda na temperatura de soldagem ocorre um acúmulo de energia. Para evitar a descolagem pela liberação desta energia é acrescentado este tempo para o resfriamento da junta.

Encerrado o comando “tempo de recalque” o controle interrompe a aquisição de sinais e deixa o controle no modo parado (*stop*), encerrando a soldagem.

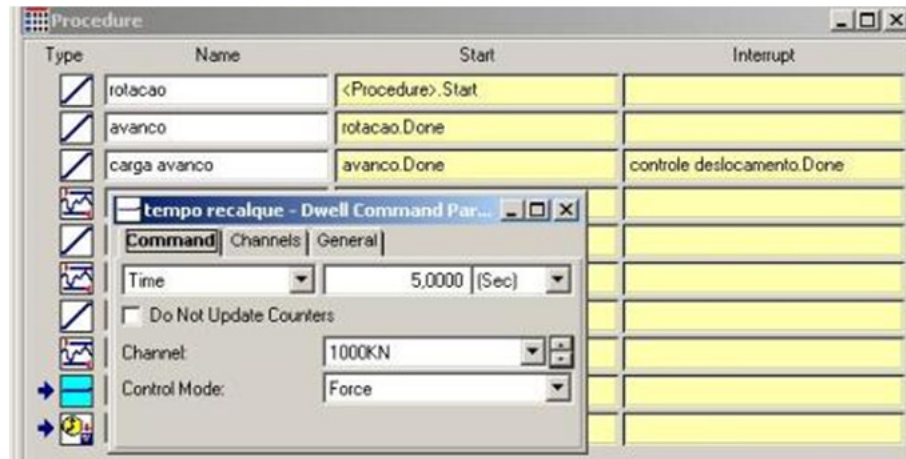


Figura 3.32 - Comando de tempo de espera após recalque.

No caso de ser efetuada uma soldagem sem o uso de recalque, o programa pode ser interrompido após a frenagem. São excluídas as linhas de detector de “rotação recalque”, a linha de comando “recalque” e o detector “recalque máximo”. Neste caso, após a frenagem, o comando segue para o tempo de espera.

Para a aquisição de sinais, Figura 3.33, foi programado que a partir do início da soldagem sejam gravadas dez aquisições por segundo das medidas de tempo, deslocamento, força, rotação e potência.

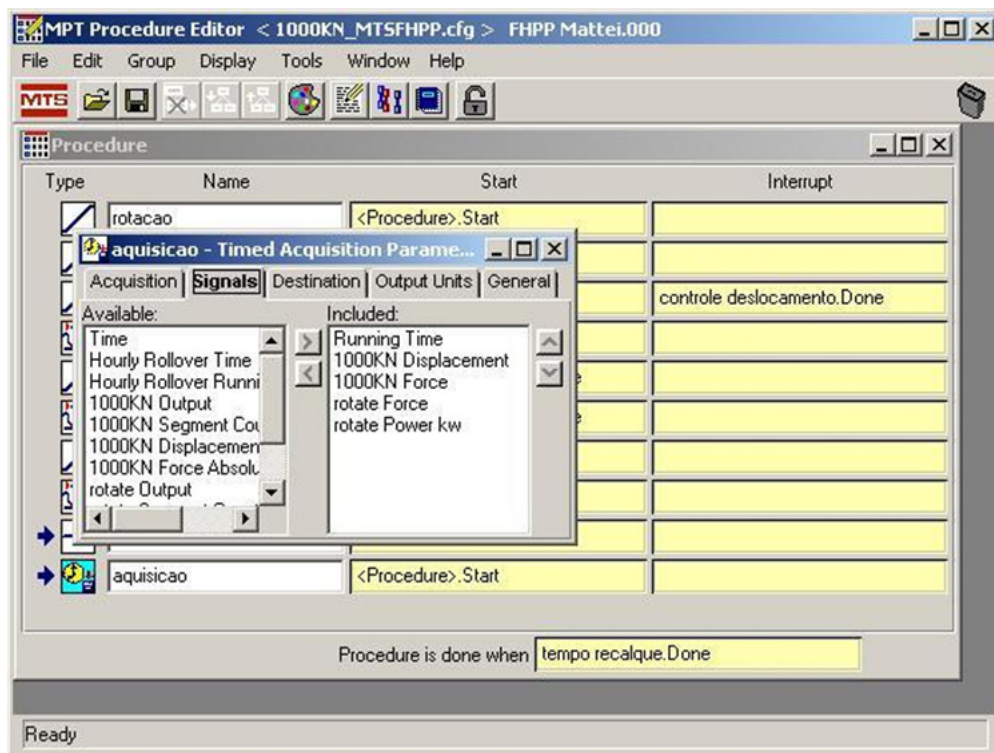


Figura 3.33 - Aquisição de sinais pela MTS.

### 3.2.2 Limitações de programação da máquina.

As limitações da máquina são a velocidade de avanço do atuador que influencia a taxa de carregamento em força e principalmente a taxa de frenagem.

Para uma frenagem rápida, o inversor diminui ou inverte a corrente elétrica de alimentação do motor elétrico e este por sua vez acaba funcionando como um gerador de energia causando uma sobrecarga no inversor. O inversor quando é sobrecarregado automaticamente desconecta a ligação com o motor e este passa a funcionar no modo livre (girando apenas pela inércia) e o inversor retorna o valor erro de sobrecarga.

Para evitar a sobrecarga no inversor é necessário instalar uma resistência elétrica para dissipação de energia em forma de calor e assim consegue-se processar soldas por fricção com maiores taxas de frenagem, ou ainda, instalação de um sistema de freio.

### 3.3 Fabricação dos corpos de prova.

Para fabricação dos corpos de prova foram utilizados pinos fabricados a partir de barras trefiladas com 38,1 mm (1,5 pol.) de diâmetro e comprimento total de 150 mm. Para a base uma chapa retangular com 120x150 mm e 40 mm de espessura. As dimensões do cone do pino e do furo da chapa estão na Figura 3.34.

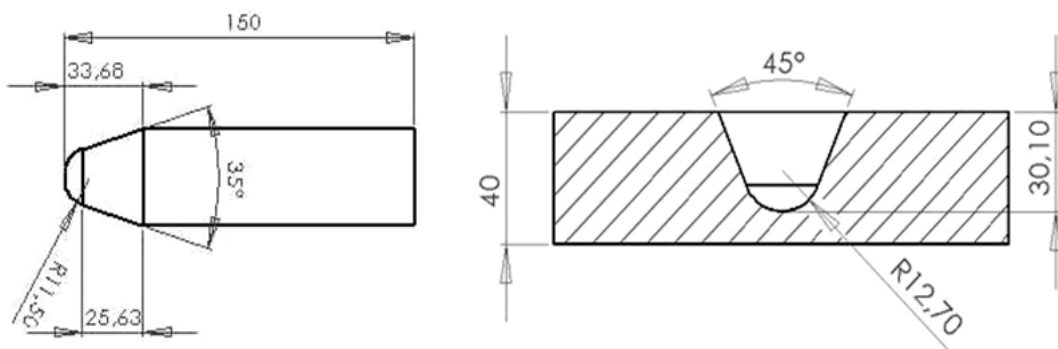


Figura 3.34 - Dimensões para fabricação dos corpos de prova.

O material utilizado na fabricação da chapa de base e do pino consumível foi o aço ABNT A36, que por ser um material de fácil usinagem, com custo baixo e de fácil aquisição. A composição química do pino e da base deste material encontra-se na Tabela 3.1. Os valores



foram obtidos através de um espectrômetro de emissão óptica marca *Spectro* modelo *Spectrolab*, observado na Figura 3.35.

Tabela 3.1 - Composição química dos materiais utilizados.

Elemento	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Sn</i>
Pino (% em peso)	0,149	0,146	0,639	0,017	0,016	0,074	0,025	0,059	0,01
Base (% em peso)	0,153	0,143	0,642	0,016	0,015	0,076	0,026	0,055	0,01



Figura 3.35. - Espectrômetro óptico *Spectrolab*.

Foi calculado o volume de material para preenchimento do furo para os corpos de prova fabricados conforme a geometria do desenho da Figura 3.34 através do *software SolidWorks*, conforme a Figura 3.36.

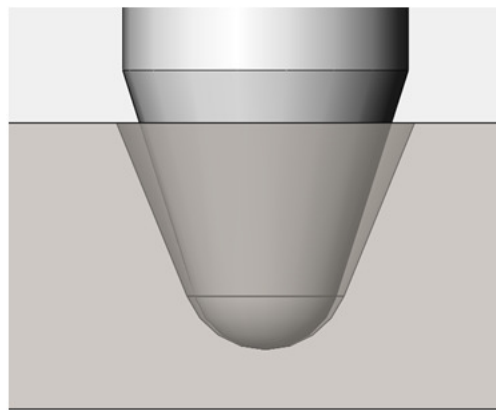


Figura 3.36 – Diferenças de volumes entre o pino e a base.

No *software* existe uma ferramenta que revela diretamente o volume de uma peça. Para a base foi calculado o volume do furo considerando-se a uma base sem o furo e diminuindo-se o volume de uma base com o furo.

Para a base, o volume necessário para preencher o furo com profundidade 30,1 mm é de 20.779 mm<sup>3</sup>. Para preencher este mesmo furo é imprescindível consumir pelo menos 4 mm do pino que equivale a um volume de 20.854 mm<sup>3</sup>. Nesse cálculo não está incluso o material que é expelido em forma de rebarba, assim é imprescindível um consumo maior de pino.

Na Figura 3.37 é possível observar a base e o pino, após o processo de usinagem, prontos para serem soldados.

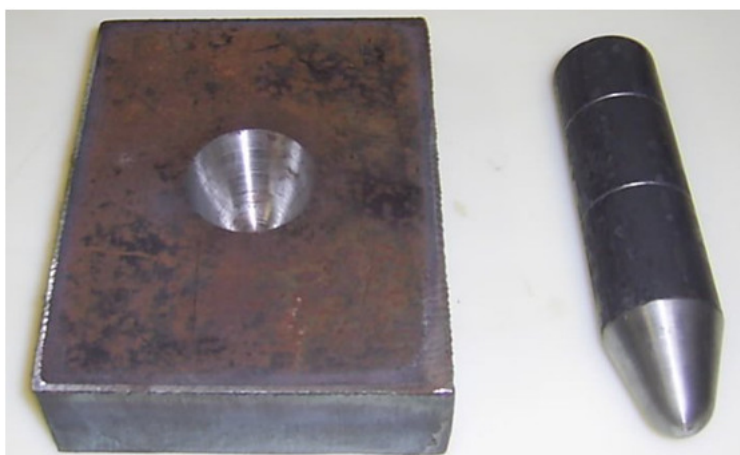


Figura 3.37 – Corpos de prova depois de usinados.

Primeiramente é necessário estabelecer um padrão para a máquina, ou seja, as soldas devem ser passíveis de repetitividade e de fácil reprodução. Depois deve ser inspecionado o efeito de preenchimento para garantir que os parâmetros escolhidos não estão gerando soldas com má qualidade.

Após os parâmetros resultantes terem sido coerentes e com um preenchimento total do furo é que as etapas seguintes de caracterização foram realizadas. As caracterizações metalúrgicas e mecânicas foram realizadas através de metalografias das microestruturas, medições de durezas, aquisição de temperatura durante a soldagem e testes de dobramento.

Foram utilizados vários conjuntos de pino e base e à medida que foram processados os corpos de prova, foram modificados os parâmetros com a intenção de melhoria no processo de fricção. As condições de soldagem por fricção e os parâmetros aplicados estão nos Anexos nas Tabela 9.1 e Tabela 9.2.

Primeiramente no “programa 1” foram fixados os controles de deslocamentos para o início da frenagem em até 3,0 mm, mas pelos resultados obtidos e com um excesso de rebarba

este deslocamento foi diminuído para 2 mm e posteriormente para 1 mm. As taxas de avanço, incremento de força, recalque e frenagem foram mantidas constantes e com os valores apresentados nas figuras do capítulo 0.

Após isso, foi modificada a programação para o “programa 2” para melhorar o parâmetro de consumo de pino e impedir que houvesse uma rebarba excessiva. A nova programação limita o *burnoff* antes da frenagem, assim é possível um melhor controle para iniciar a frenagem obtendo-se melhores resultados de consumo de pino.

Os corpos de prova foram divididos em dois grupos (G01 e G02) diferenciados pelas forças de soldagem e recalque. O grupo G01 é soldado com forças de 300 kN e recalque com 600 kN e o G02 com forças de 350 kN e 400 kN e recalque com 600 kN e 800 kN.

Uma geometria secundária G03 de pino e furo foi processada (Tabela 9.3 e Figura 9.1 dos Anexos) e destas soldas, foram utilizados apenas os parâmetros da aquisição de dados de soldagem, ou seja, com o objetivo de uma avaliação comparativa entre estes dados para verificar a quantidade de consumo de pino processado e o tempo do ciclo, sem considerar os outros parâmetros. Posteriormente, foram processados pinos desta geometria para aquisição de temperatura da rebarba.

A taxa de força de soldagem foi variada para ser observada a influência no preenchimento do furo. O deslocamento para início de recalque foi variado para observar a influência na rebarba.

A velocidade superficial foi calculada com a equação 2.4 do capítulo 2 página 49, para o diâmetro dos pinos de soldagem utilizados a velocidade periférica calculada é de 119 m/min. em 1000 rpm .

As pressões aplicadas para os corpos de prova considerando apenas a seção transversal do pino estão na Tabela 3.2 e Tabela 3.3.

Tabela 3.2 – Tabela da relação de forças de soldagem com pressões aplicadas.

<b>Força de soldagem</b>	<b>Pressão de soldagem</b>
200 kN	175,5 MPa
250 kN	219 MPa
300 kN	263 MPa
350 kN	307 MPa
400 kN	350 MPa

Tabela 3.3 – Tabela de relação de forças de recalque com pressões aplicadas.

<b>Força de recalque</b>	<b>Pressão de recalque</b>
600 kN	526 MPa
800 kN	701 MPa

Foram utilizadas pressões maiores que a literatura recomenda para soldagens de topo. Nas soldas com pino consumível com geometria cônica, a pressão aplicada na interface de soldagem é menor que a pressão aplicada na secção do pino e o cálculo desta pressão não está neste estudo.

### 3.3.1 Análise do efeito de preenchimento.

Para análise das soldas efetuadas foram cortadas seções transversais dos corpos de prova e visualizado o preenchimento e adesão do pino na base.

As amostras foram retiradas dos corpos de prova, conforme a Figura 3.38, em fatias com aproximadamente 5 mm.

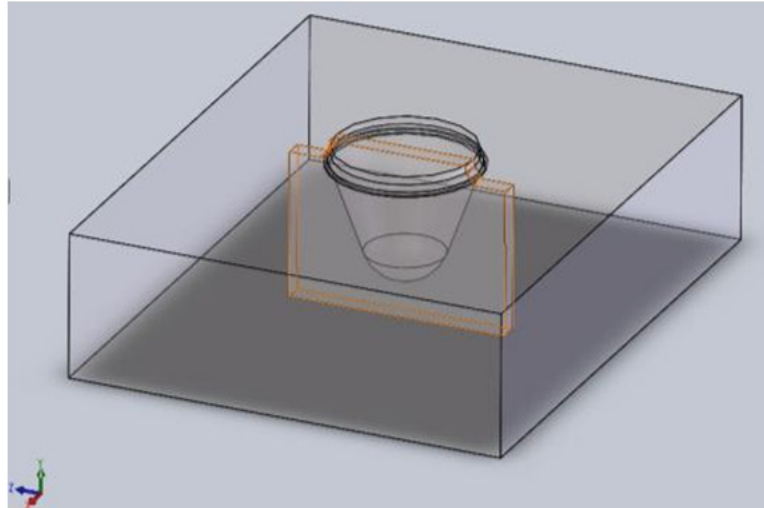


Figura 3.38 - Posição de retirada de amostras.

Para visualização do preenchimento do furo, foram observadas três zonas onde podem ocorrer os defeitos, conforme Figura 3.39. Essas zonas são divididas em zona de fundo do furo (A), zona de parede lateral (B) e zona de acabamento (C).

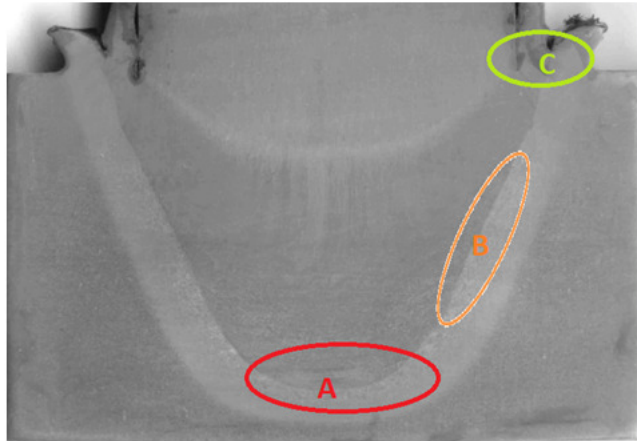


Figura 3.39 - Divisão das zonas onde podem ocorrer defeitos.

Para a verificação do preenchimento, as superfícies de corte dos corpos, foram lixadas, inicialmente com uma lixa com granulometria 80 Mesh, posteriormente com uma lixa 120 no sentido transversal à lixa anterior e assim sucessivamente com 220 e com 320 Mesh.

Após, para ser verificada a presença de defeitos por falta de preenchimento, o corpo de prova foi inspecionado visualmente com uma lupa com aumento de 4 vezes.

### 3.3.2 Corpos de prova para ensaio de dobramento.

Para o teste de dobramento foi construído um dispositivo baseado na norma *ASTM E190 - "Teste de ductilidade para soldas pelo método de dobramento"* <sup>(44)</sup>. Este dispositivo foi acoplado em uma máquina de testes com capacidade para até 100 kN de força no atuador e deslocamento de 150 mm. O dispositivo e o posicionamento da amostra estão na Figura 3.40.

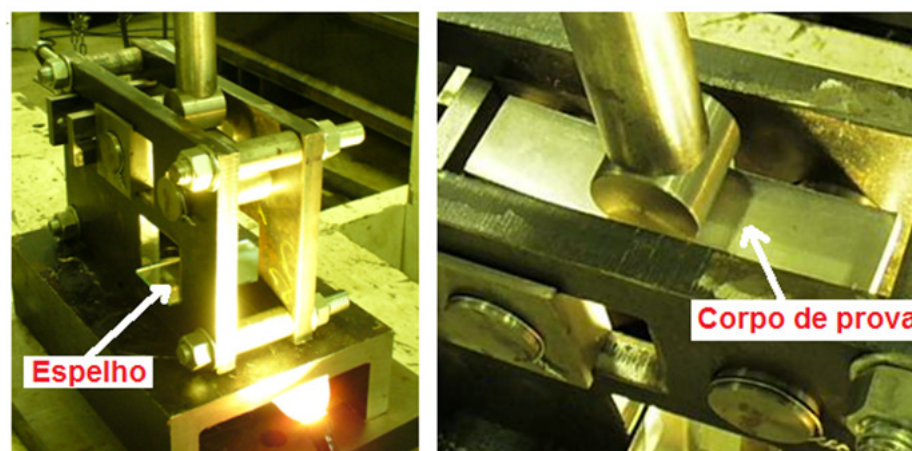


Figura 3.40 - Dispositivo para dobramento e posicionamento da amostra.

Com o dispositivo utilizado é possível regular a distância entre os roletes permitindo a sua utilização para vários tamanhos de corpos de prova para dobramento. O dispositivo possui uma abertura onde se insere um espelho para observar a trinca que surge com o dobramento..

A velocidade de dobramento é de 10 mm/s e o ângulo de dobramento determinado através de duas linhas imaginárias tangentes à superfície de apoio, conforme Figura 3.41.

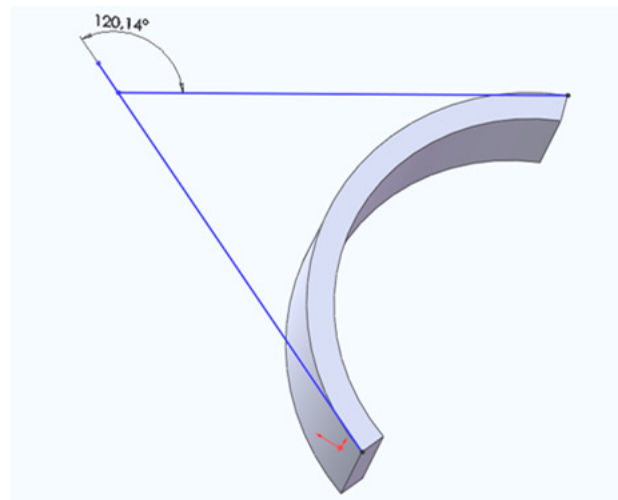


Figura 3.41 – Determinação do ângulo de dobramento.

A metodologia utilizada para este teste é que quando ocorre uma ruptura, ou o aparecimento de alguma trinca na amostra o teste é interrompido e posteriormente é medido o ângulo máximo de dobramento. Para amostras em que não há aparecimento de trincas o ângulo de dobramento máximo foi 180°.

Os corpos de prova foram retirados na posição transversal lateral da solda, conforme item 7.1.1 da norma ASTM E190 <sup>(44)</sup> para o ensaio de dobramento. O posicionamento e as dimensões para as amostras para o ensaio de dobramento estão na Figura 3.42.

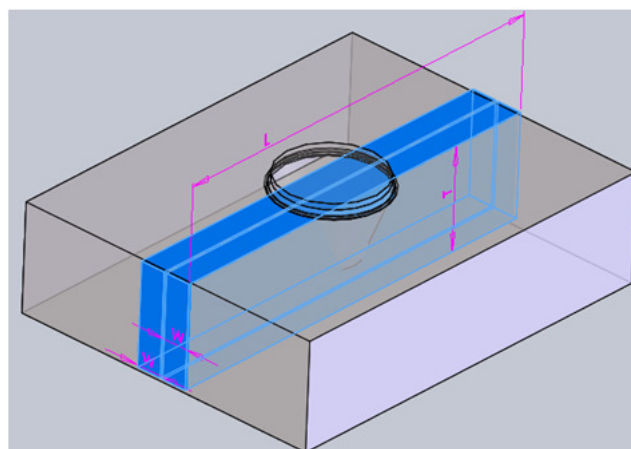


Figura 3.42 - Posição de retirada das amostras para ensaio de dobramento.

Foram retirados dois retângulos com L de aprox. 150 mm (6 pol.) de comprimento máximo e altura T com 38,1 mm. (1,5 pol.) e a largura W com 9,53 mm (3/8 pol.) As amostras foram retiradas do centro do corpo de prova. Foram realizados os ensaios de modo que o centro da solda ficou posicionado no lado de tração.

Antes da realização do teste de dobramento foram medidas as dimensões principais de todos os corpos de prova. Para cada amostra dos ensaios de dobramento foram realizadas as aquisições de força e deslocamento e, posteriormente foram calculadas as tensões aplicadas para observação da região de flexão elástica.

Para o cálculo da tensão foram utilizadas as dimensões médias das amostras e a medida de distância entre os apoios da amostra no teste, conforme a Figura 3.43

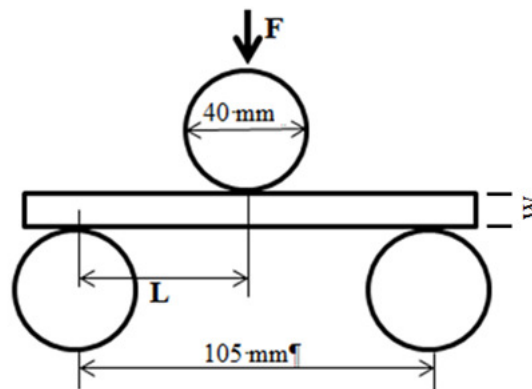


Figura 3.43 – Medidas principais para o teste de dobramento.

Para o cálculo de tensão<sup>(45)</sup> aplicada na flexão no dobramento, a equação utilizada foi:

$$\sigma = \frac{F L w}{4 J} \quad (3.1)$$

Sendo F a força aplicada, L a distância de aplicação da força até o apoio, w a espessura da amostra e J o momento de inércia da amostra.

Para um corpo de prova retangular a equação para o cálculo do momento de inércia é dada por:

$$J = \frac{t w^3}{12} \quad (3.2)$$

Sendo t a medida da largura do retângulo da seção e w a espessura da amostra.

### 3.3.3 Perfil de dureza.

Uma etapa importante deste trabalho é a caracterização do perfil de dureza na interface de solda. A realização de medição dos perfis de micro dureza a fim de buscar uma correlação da dureza com as regiões da soldagem e a micrografia das mesmas.

Para os perfis de micro dureza, os corpos de prova foram lixados e submetidos ao ataque químico de Nital a 2% para localização da solda e interfaces de soldagem. A medição do perfil de dureza foi realizada com um microdurômetro automático da marca *Instron* modelo *Tukon 2100B* que pode ser observado na Figura 3.44.



Figura 3.44 – Microdurômetro automático *Instron* modelo *Tukon 2100B*.

No microdurômetro utilizado foram realizadas medições de dureza a cada 0,5 mm distância entre os pontos de endentação e com 300 gramas de força. A medição foi realizada na seção longitudinal (medição vertical) e na seção transversal (medição horizontal) do pino processado, conforme a Figura 3.45

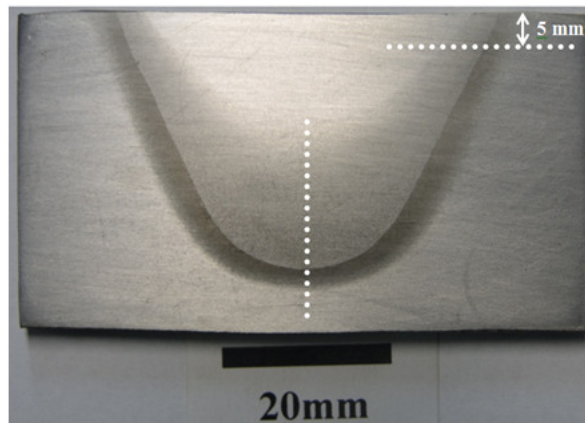


Figura 3.45 – Linhas de medição de pontos de dureza.



### 3.3.4 Aquisição de Temperatura

A aquisição da temperatura durante a soldagem é importante para o estudo das futuras soldagens de materiais com quantidades maiores de carbono. Altas temperaturas com variações bruscas possibilitam o surgimento de estruturas indesejáveis.

Foram realizadas aquisições em cinco corpos de prova que foram soldados com forças de 200 kN, 300 kN e 350 kN. A aquisição de temperatura interna dos corpos de prova foi através de seis termopares tipo K, conforme a Figura 3.46.

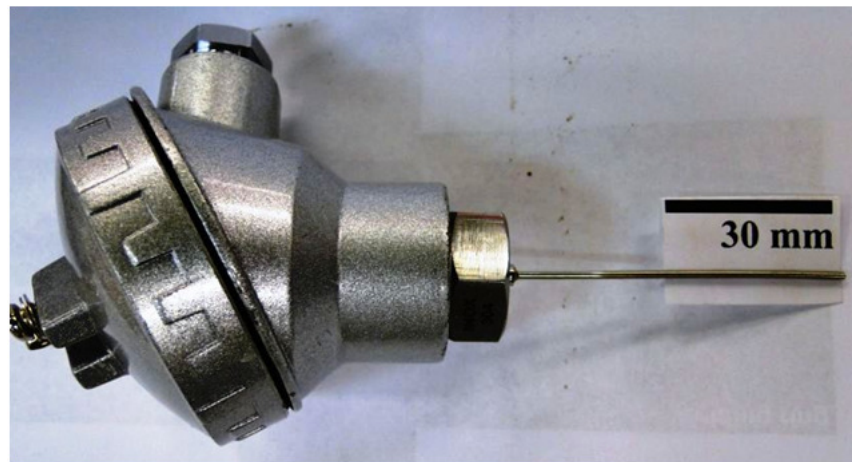


Figura 3.46 – Termopar utilizado na aquisição da temperatura.

Os termopares foram localizados na base dos corpos de prova conforme a Figura 3.47, onde foram usinados orifícios com 5 mm de diâmetro em 25 mm de profundidade sendo que o centro do primeiro localizado a 05 mm da face superior, o segundo a 15 mm e o terceiro a 25 mm. A partir destes uma continuação com orifícios de diâmetro 2 mm sendo que a profundidade da furação foi usinada de modo que o final localizava-se a aproximadamente 3 mm da face de soldagem.

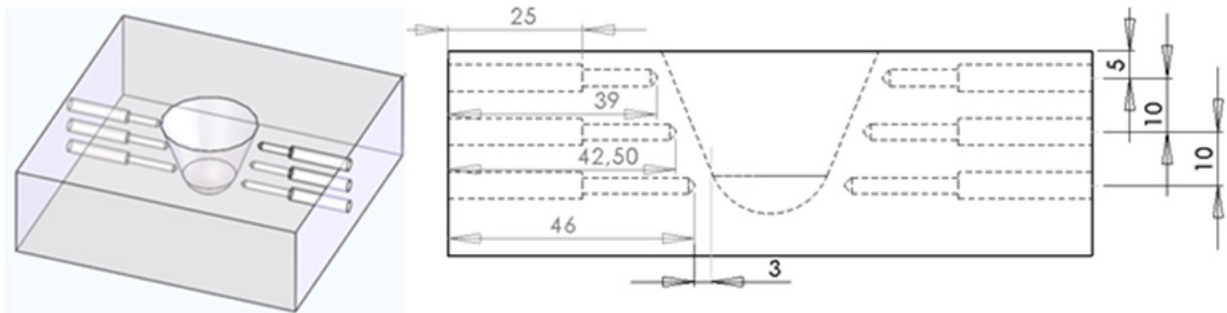


Figura 3.47 – Localização dos orifícios para instalação dos termopares.

Distâncias menores que 3 mm poderiam causar problemas na medição devido à pressão de soldagem que no caso pode destruir ou prender o termopar. Para distâncias maiores poderia ocorrer um erro na medição devido ao afastamento da fonte de calor.

Para a aquisição de temperatura, os termopares foram inseridos nos orifícios e ancorados com elastômeros de modo que os mesmos sofressem uma pequena força de compressão empurrando sua haste contra o fundo do orifício.

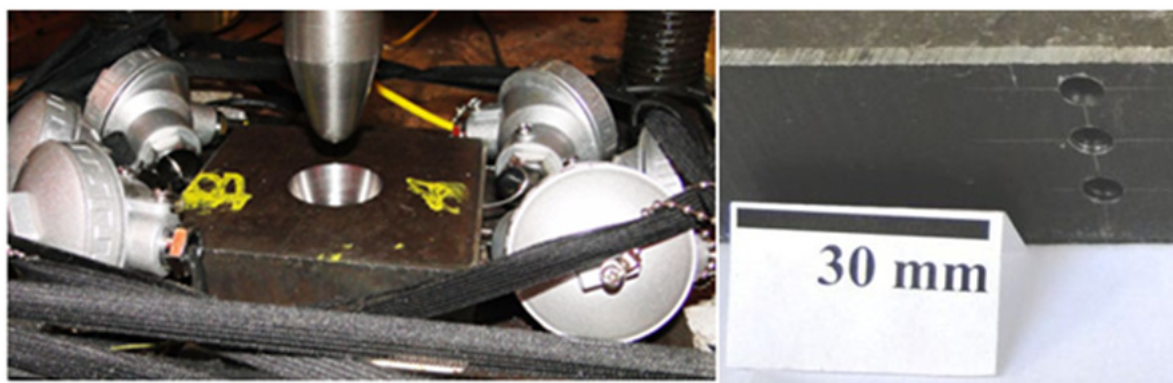


Figura 3.48 – Posicionamento dos termopares e os orifícios da base.

A aquisição da temperatura durante a soldagem dos corpos de prova foi realizada com um amplificador e conversor Analógico/Digital marca HBM <sup>(46)</sup> modelo *Spider 8*, conforme a Figura 3.49. Este conversor é conectado a um computador no qual através do *software Catman* é programada a frequência e o modo da aquisição dos dados.



Figura 3.49 – Amplificador e conversor A/D *Spider 8* da HBM <sup>(46)</sup>.

Foram soldados cinco corpos de prova e as amostras divididas em lado A e lado B, cada lado recebeu três termopares divididos em AS (A Superior) para o termopar mais próximo à superfície de inserção do pino, AM (A Médio) e AI (A Inferior), do mesmo modo do lado B numerados em BS, BM e BI.

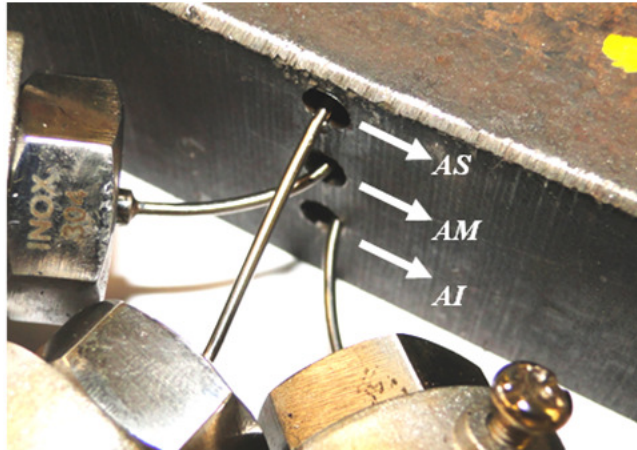


Figura 3.50 – Posicionamento dos termopares na amostra.

Após a aquisição de temperatura os corpos de prova foram cortados na linha longitudinal da furação dos termopares em uma eletroerosão a fio que pode ser observado na Figura 3.51, possibilitando medir as distâncias dos orifícios com a interface de soldagem.

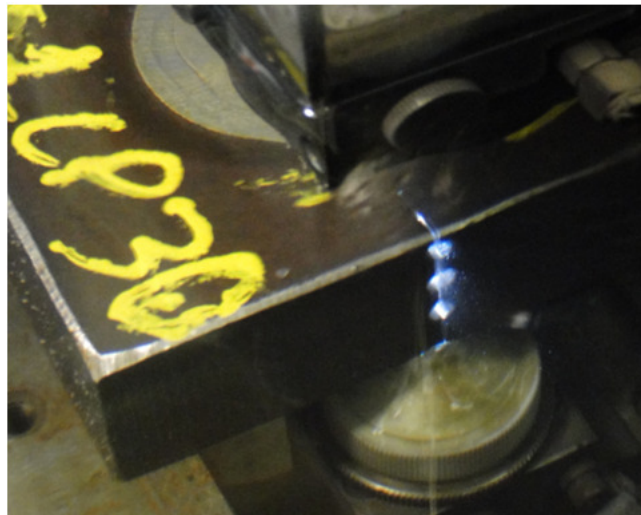


Figura 3.51 - Corte dos corpos de prova na eletroerosão a fio.

Devido aos pontos de aquisições realizadas com os termopares nos orifícios não poderem se aproximar muito da interface de soldagem, foram realizadas medições externas ao corpo de prova. O local escolhido foi a rebarba, pois devido à sua grande deformação ocorrerá uma maior temperatura durante a soldagem.

Para a medição da temperatura da rebarba foram utilizados dois métodos de aquisição. Uma aquisição foi realizada com um pirômetro marca *Raytek* modelo MX4 com mira a laser, conforme a Figura 3.52 em (a) e com uma câmera foi filmado o mostrador para registrar os valores máximos de temperatura atingidos em (b).



Figura 3.52 – Pirômetro em (a) e a filmagem do visor do pirômetro em (b).

Simultaneamente foi realizada a aquisição da temperatura com quatro termopares posicionados ao redor do pino e presos na superfície da base de soldagem. O posicionamento dos termopares permite que o material expelido encontre a ponta de medição e assim medindo a temperatura máxima atingida através da condução de calor. Na Figura 3.53 está mostrada a configuração dos termopares e a mira laser do pirômetro na região do surgimento da rebarba.



Figura 3.53 – Aquisição da temperatura da rebarba.

Na aquisição de temperatura da rebarba foram realizadas soldagens com forças de 200, 250, 300 e 350 kN de força de soldagem e 600 kN na força de recalque.

### 3.3.5 Metalografia

A metalografia é importante para a análise da estrutura do material e para poder correlacionar as propriedades físicas, processos de fabricação e composição química. Deste modo, prever o seu comportamento em determinada aplicação. A metalografia é realizada com o auxílio de um microscópio (micrografia) ou à vista desarmada (macrografia) <sup>(47)</sup>.

A macrografia mostra de uma forma geral, um aspecto de conjunto sobre a homogeneidade do material da amostra, pode-se observar a distribuição, a natureza e a quantidade de impurezas, ou ainda o processo de fabricação utilizado para produzir a peça ou corpo de prova<sup>(47)</sup>.

Na micrografia é possível observar a granulação do material, a natureza, quantidade, distribuição e forma dos diversos constituintes e certas inclusões<sup>(47)</sup>.

Para a análise macrográfica foram utilizadas as mesmas amostras em que foram realizadas as medições de temperatura interna com os termopares e as amostras em que foram realizadas as microdurezas. As amostras oriundas da aquisição de temperatura foram cortadas e lixadas com lixas de granulometria 80 e 120 Mesh para a retirada da camada afetada pelo corte com o fio da eletroerosão e depois fotografadas.

Para a análise micrográfica as amostras foram retiradas dos corpos de prova dobrados e foram embutidas em baquelite com uma embutidora da marca *Struers* modelo *LaboPress 3*, Figura 3.54 à esquerda e posteriormente submetidas ao processo de lixamento da superfície com lixas de granulometrias iniciando em 80 depois a 120, 220, 320, 400 e 600 Mesh. Após as amostras foram polidas na politriz da marca *Struers* modelo DP10, conforme a Figura 3.54 à direita.



Figura 3.54 - Embutidora *LaboPress 3* e politriz modelo DP10.

Após o polimento as amostras foram submetidas ao reagente químico Nital com concentração de 2% para observação da microestrutura em microscópio óptico. As amostras foram observadas e fotografadas em um microscópio óptico marca *Olympus* modelo *BX51M*, observado na Figura 3.55.

Foram observadas as microestruturas do material base do pino e da base, da interface de soldagem e da zona afetada pelo calor.



Figura 3.55 - Microscópio óptico marca *Olympus* modelo *BX51M*.

#### 3.4 Validação da Máquina para outras Geometrias

Para aperfeiçoar o trabalho e analisar a capacidade de soldagem da máquina foram realizadas soldagens com outras geometrias. As geometrias testadas foram tubo com chapa, tubo com tubo e tubo-anel-tubo. Todas as soldagens que envolveram tubos foram realizadas utilizando-se tubos com diâmetros externos de 115 mm e paredes de 8,0 mm.

## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Soldagem de Corpos de Prova com Geometria Cônica

Inicialmente, para validação da máquina foram escolhidos alguns parâmetros de controle e observados os resultados de preenchimento do furo das bases, o volume de material expulso em forma de rebarba e a resposta da máquina ao controle. Destes valores foram processadas soldas com diferentes parâmetros e na Figura 4.1 é possível observar alguns pinos processados.



Figura 4.1 – Foto de algumas soldas processadas.

#### 4.1.1 Aquisição de dados e efetividade da máquina.

O sistema de controle MTS permite que sejam realizadas aquisições de dados durante o processo de realização de ensaios. As aquisições dos sinais dos parâmetros de resposta das

soldagens foram realizadas com dez aquisições por segundo para não gerar arquivos de difícil pós-processamento. Foram adquiridos sinais de tempo, deslocamento, força, rotação e potência do motor. Os arquivos gerados foram tratados utilizando o programa Excel do Microsoft Office e depois criados gráficos para análise e validação dos parâmetros.

Para uma comprovação da efetividade da máquina de soldagem é necessário verificar se a mesma consegue reproduzir as soldas com boa repetitividade. Para isso foram efetuados grupos de soldagens com a mesma programação de comando, rotação de 1000 rpm e recalque de 600 kN e somente forças de soldagens diferentes. Foram realizadas soldagens em quatorze corpos de prova divididos em três grupos conforme a Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Grupos de soldagem para estudo da efetividade da máquina.

<b>Grupo</b>	<b>Identificação</b>	<b>Força de soldagem (kN)</b>	<b>Consumo do pino (mm)</b>	<b>Média do grupo (mm)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Grupo A	G01CP12	300	23,52	22,93	1,18 mm (4,8%)
Grupo A	G01CP13	300	24,25		
Grupo A	G01CP14	300	23,38		
Grupo A	G01CP28	300	22,07		
Grupo A	G01CP29	300	21,43		
Grupo B	G01CP15	200	26,50	24,50	1,15 mm (5,0 %)
Grupo B	G01CP16	200	23,67		
Grupo B	G01CP30	200	23,91		
Grupo B	G01CP31	200	24,59		
Grupo B	G01CP32	200	23,83		
Grupo C	G02CP08	350	23,00	21,96	0,75 mm (3,4%)
Grupo C	G02CP09	350	21,42		
Grupo C	G02CP11	350	21,42		
Grupo C	G02CP12	350	22,01		

Nesta tabela pode-se observar o consumo do pino em cada solda realizada. No primeiro grupo com soldagem com força de 300 kN a diferença entre os consumos de pino é de 2,82 mm, com desvio padrão de 1,18 mm (4,8%). Para o segundo grupo com soldagem em 200 kN a diferença é de 2,85 mm, o desvio padrão de 1,15 mm (5,0%). Para o terceiro grupo com soldagem em 350 kN a diferença é de 1,58 mm e o desvio padrão de 0,75 mm (3,4%).



A maior diferença observada é de 5,08 mm entre os corpos de prova G01CP15 com soldagem a 200 kN e G02CP09 com soldagem a 350 kN.

A visualização dos gráficos de soldagens adquiridos para o Grupo A com soldagem a 300 kN estão na Figura 4.2 à Figura 4.6.

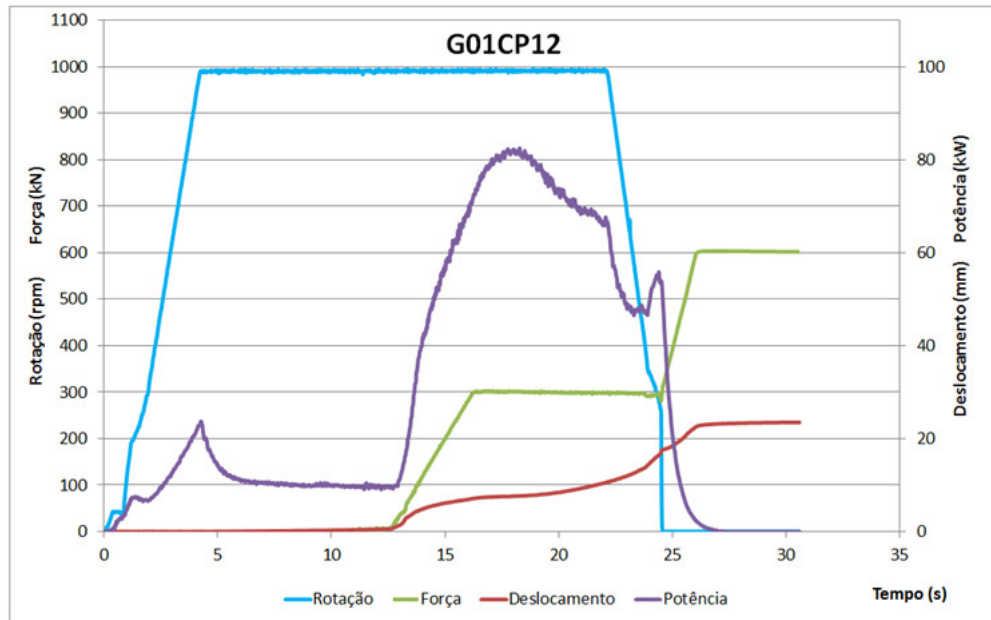


Figura 4.2 – Soldagem no corpo de prova G01CP12.

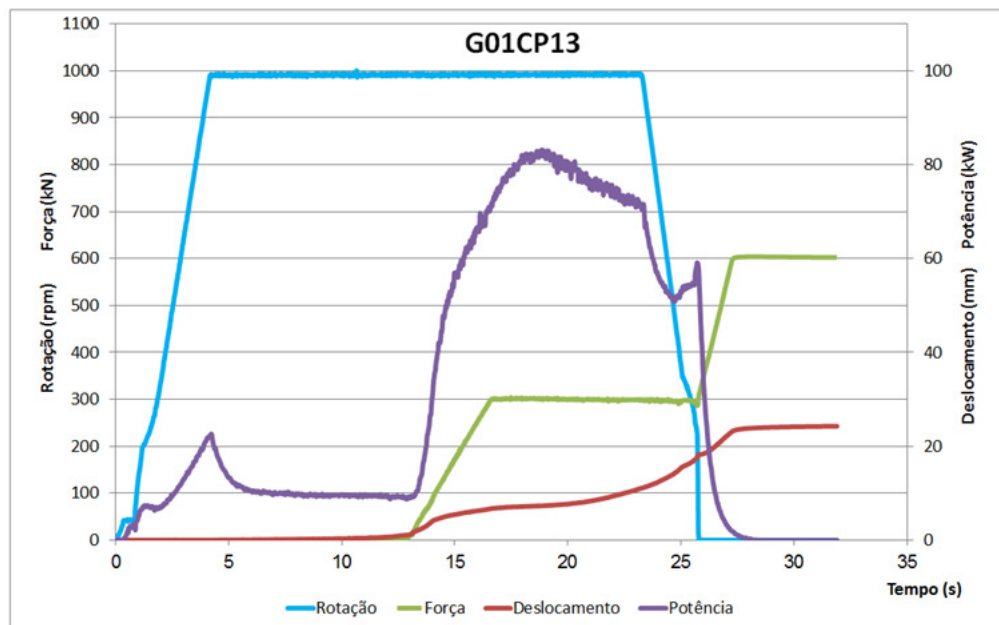


Figura 4.3 - Soldagem no corpo de prova G01CP13.

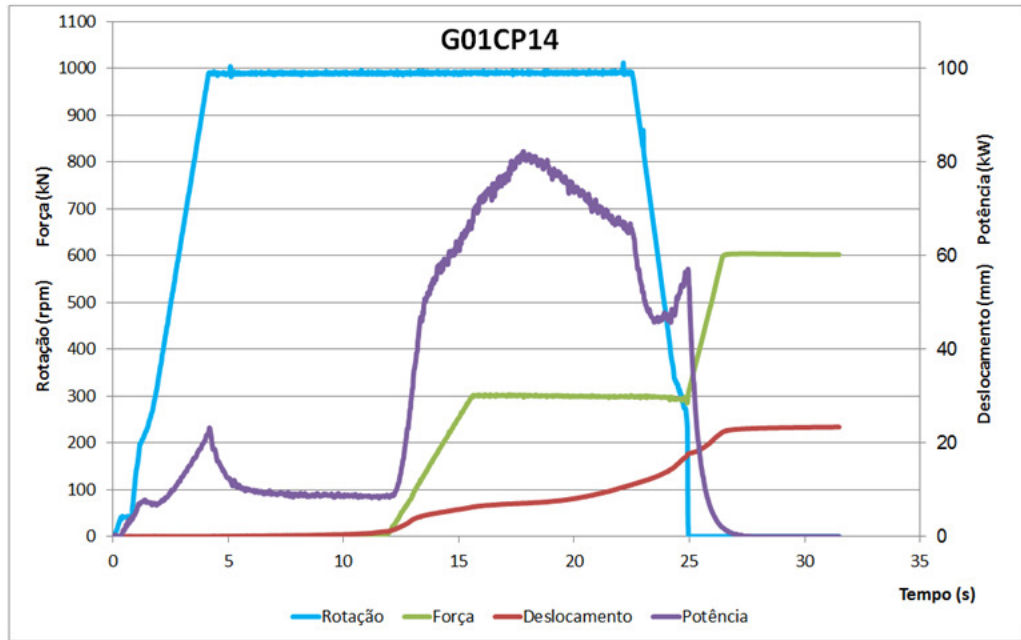


Figura 4.4 - Soldagem no corpo de prova G01CP14.

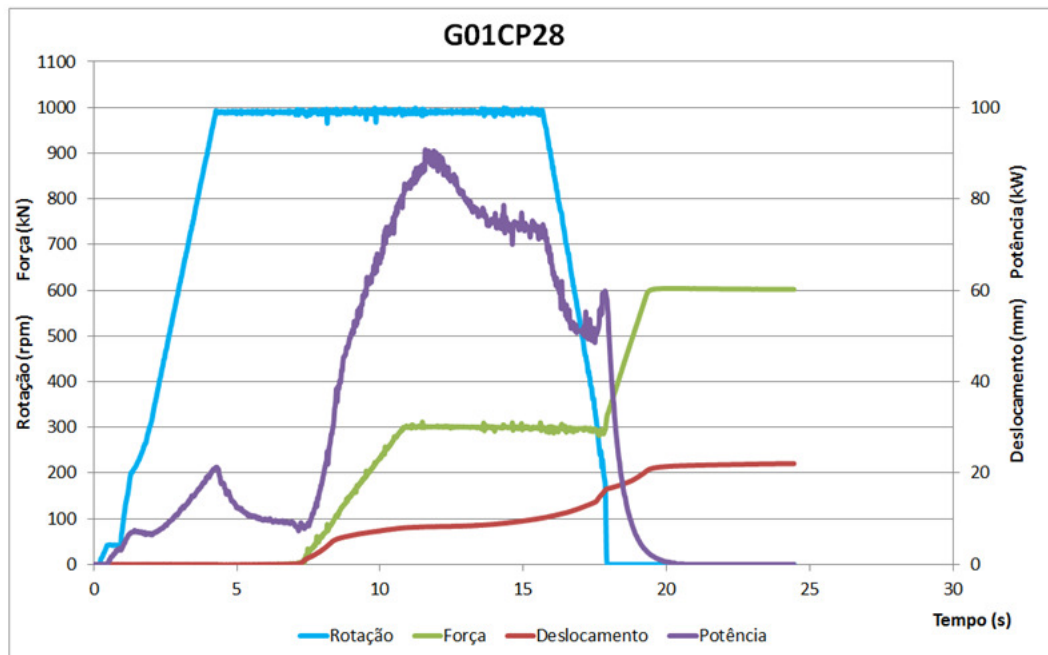


Figura 4.5 - Soldagem no corpo de prova G01CP28.

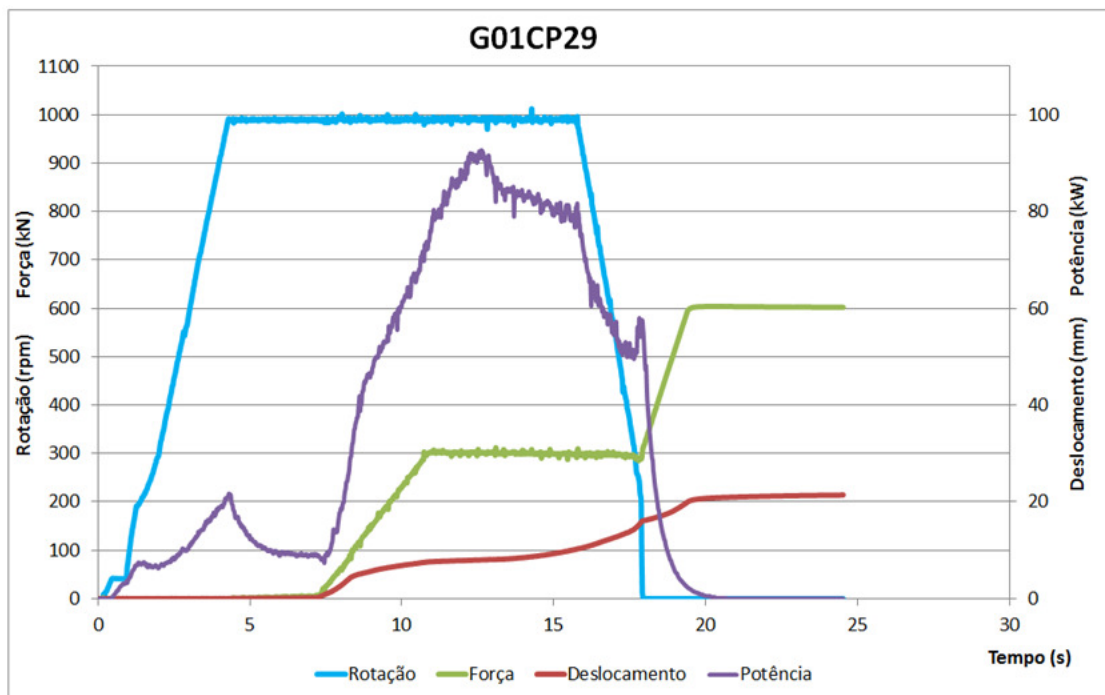


Figura 4.6 - Soldagem no corpo de prova G01CP29.

Pela análise das aquisições resultantes pode-se observar que há muita semelhança entre os gráficos obtidos nas soldagens com 300 kN de força.

No grupo seguinte (Grupo B) foram realizadas soldas com força de soldagem de 200 kN. Os gráficos destas soldas estão nas Figura 4.7 à Figura 4.11.

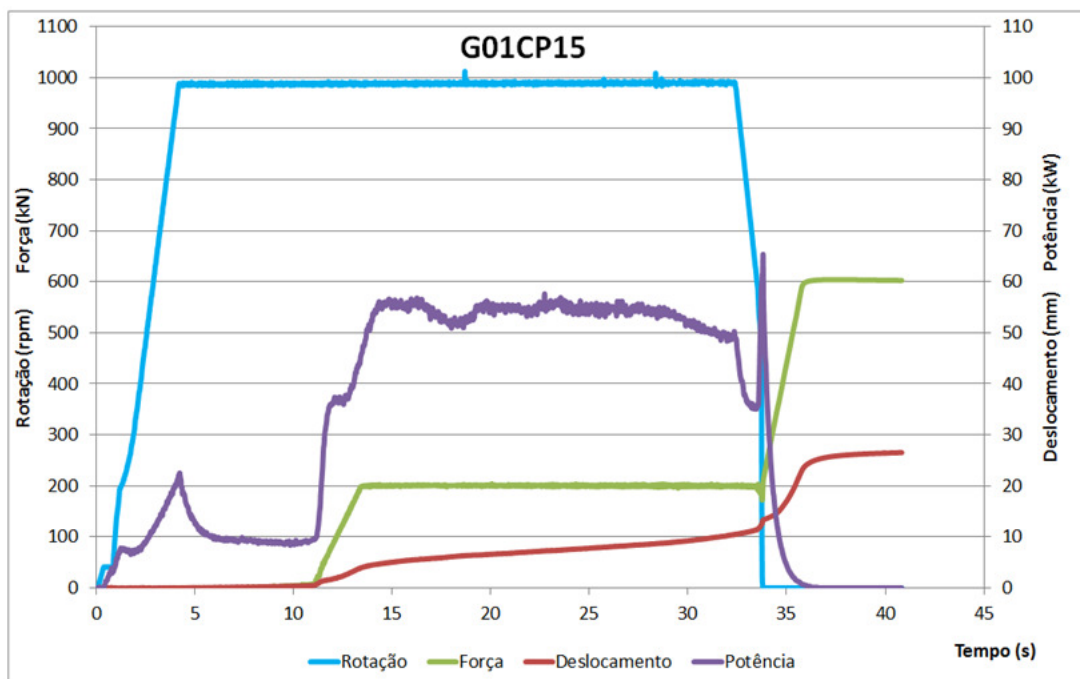


Figura 4.7 - Soldagem no corpo de prova G01CP15.

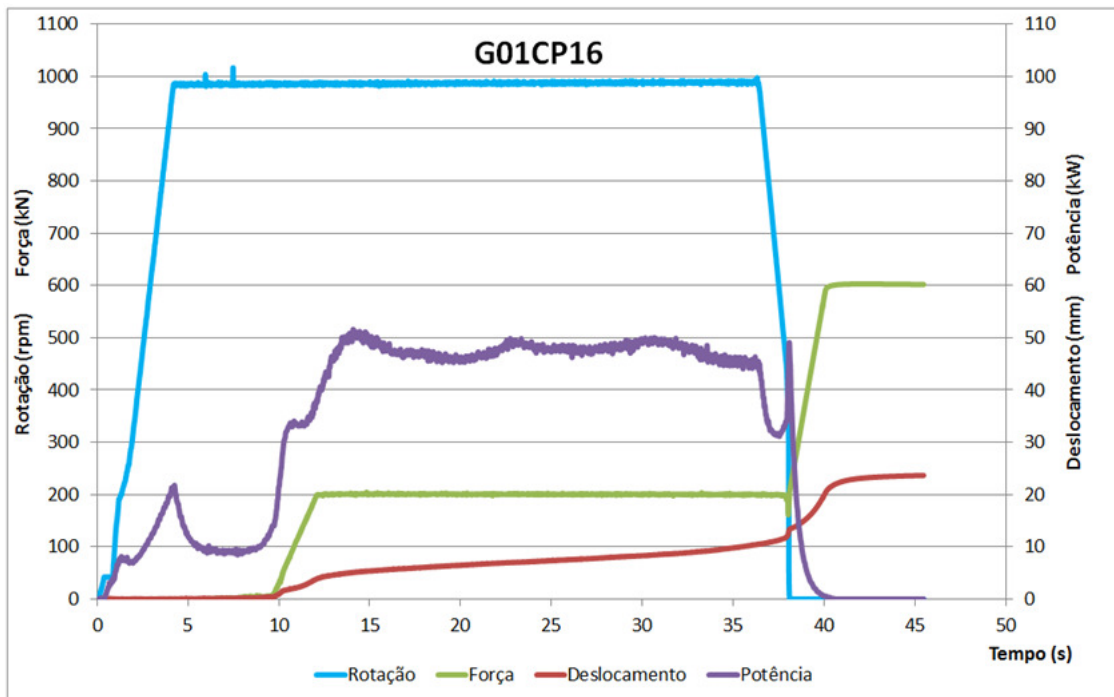


Figura 4.8 - Soldagem no corpo de prova G01CP16.

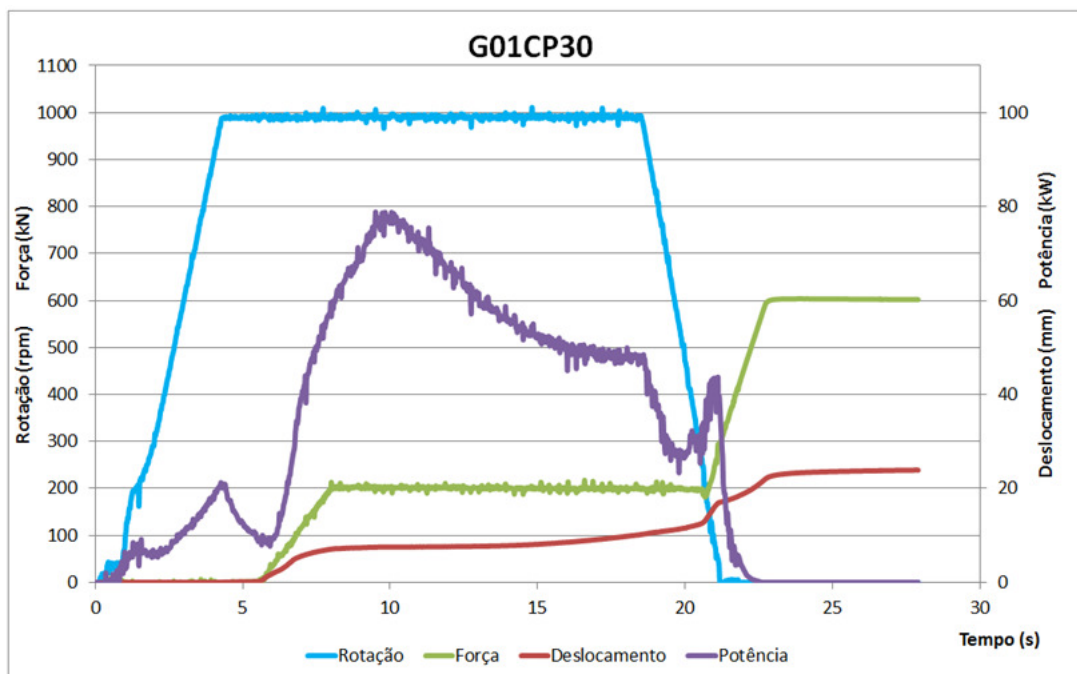


Figura 4.9 - Soldagem no corpo de prova G01CP30.

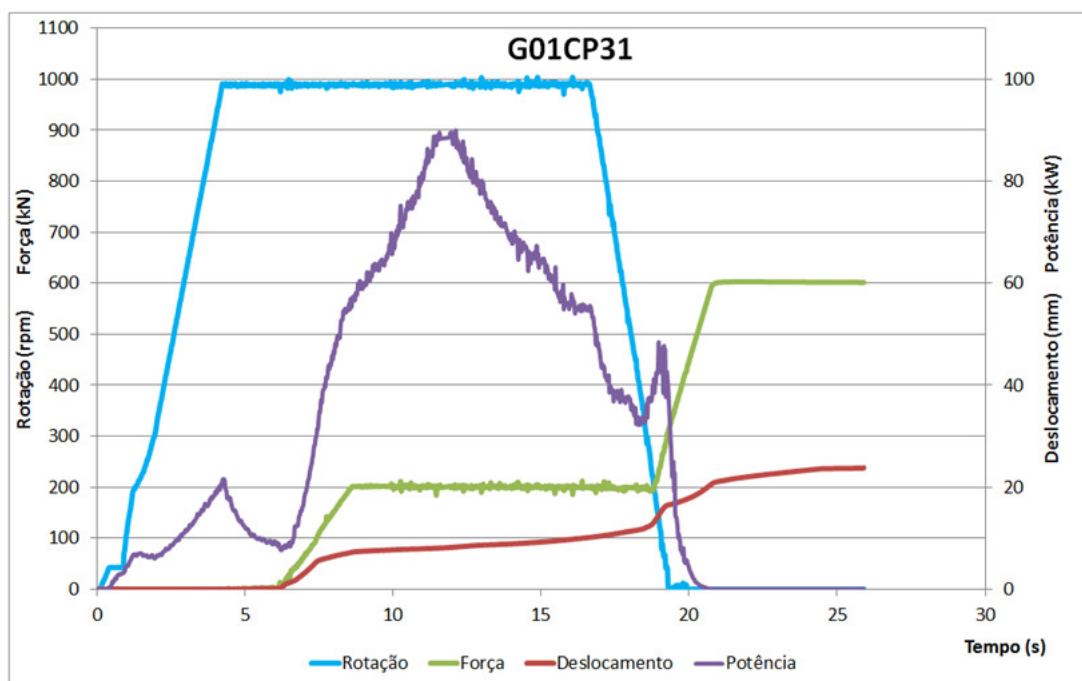


Figura 4.10 - Soldagem no corpo de prova G01CP31.

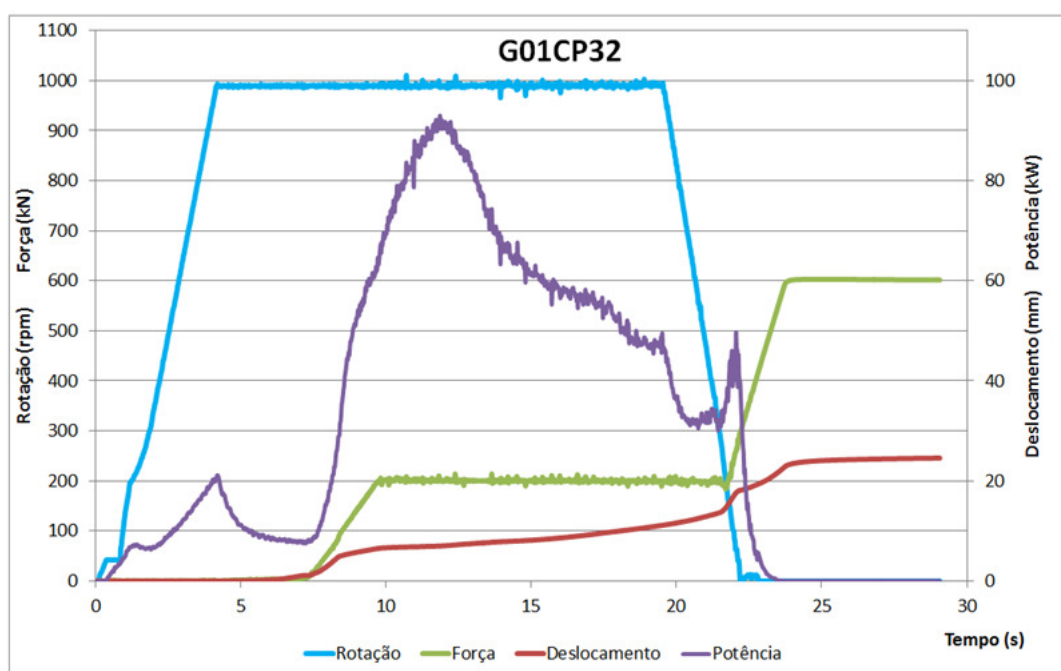


Figura 4.11 - Soldagem no corpo de prova G01CP32.

Nos gráficos das amostras processadas com 200 kN pode-se observar pequenas diferenças apenas entre os valores de deslocamento e potência.

Para o terceiro grupo (Grupo C) de repetitividade das soldas, as soldagens foram realizadas com força de 350 kN. Os gráficos gerados pela aquisição durante as soldas estão nas Figura 4.12 a Figura 4.15.

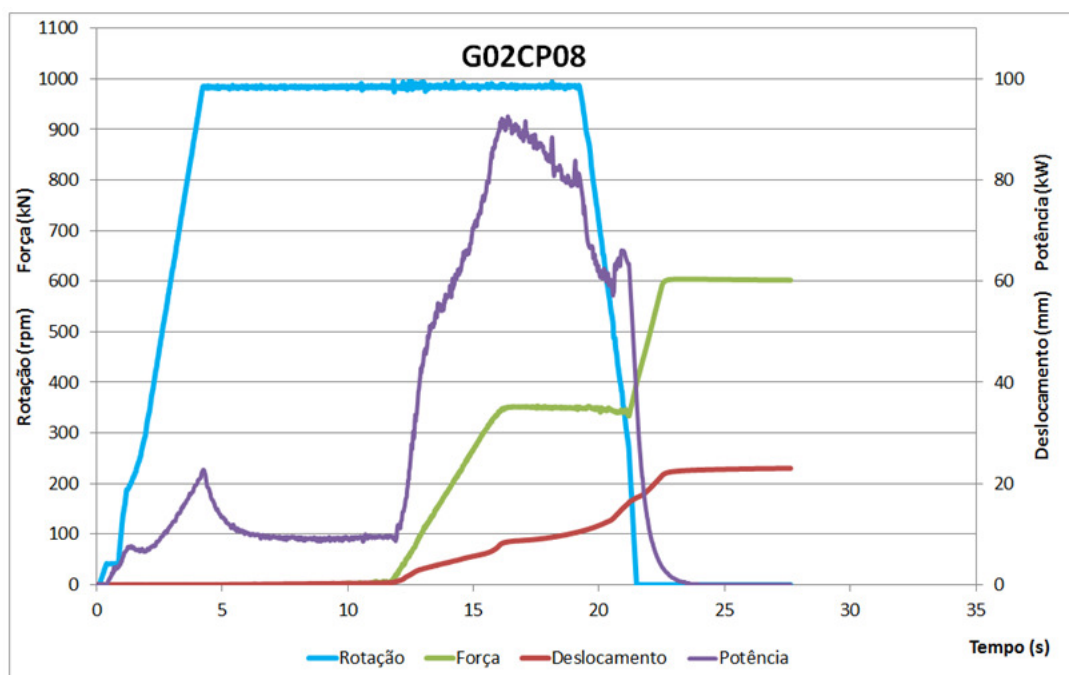


Figura 4.12 - Soldagem no corpo de prova G02CP08.

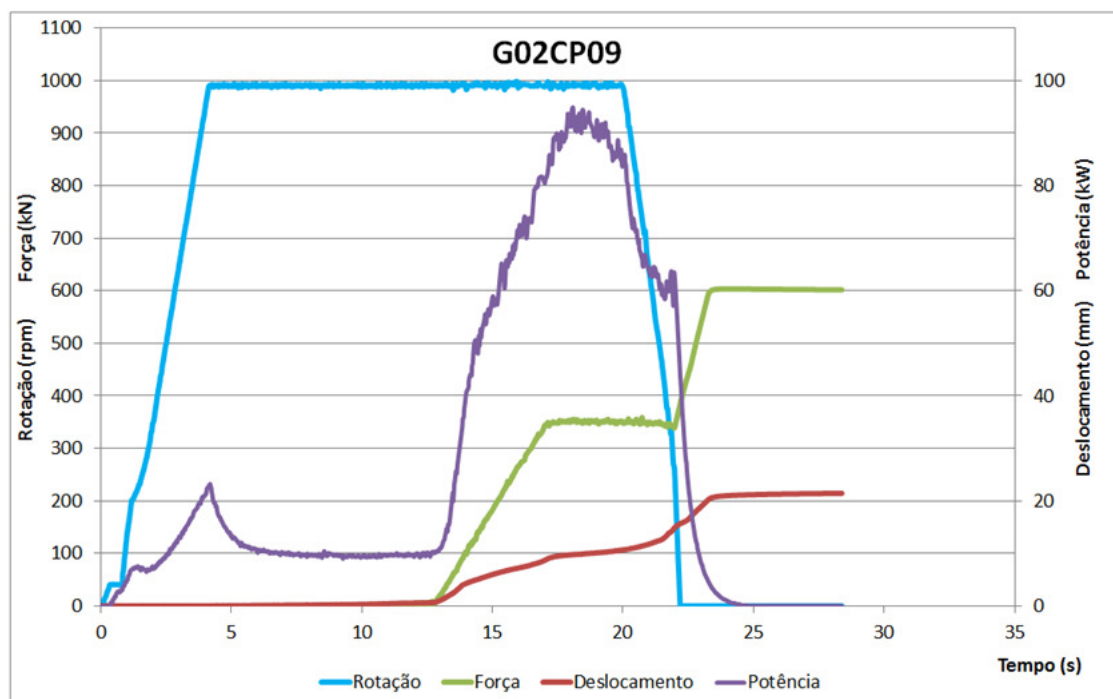


Figura 4.13 - Soldagem no corpo de prova G02CP09.

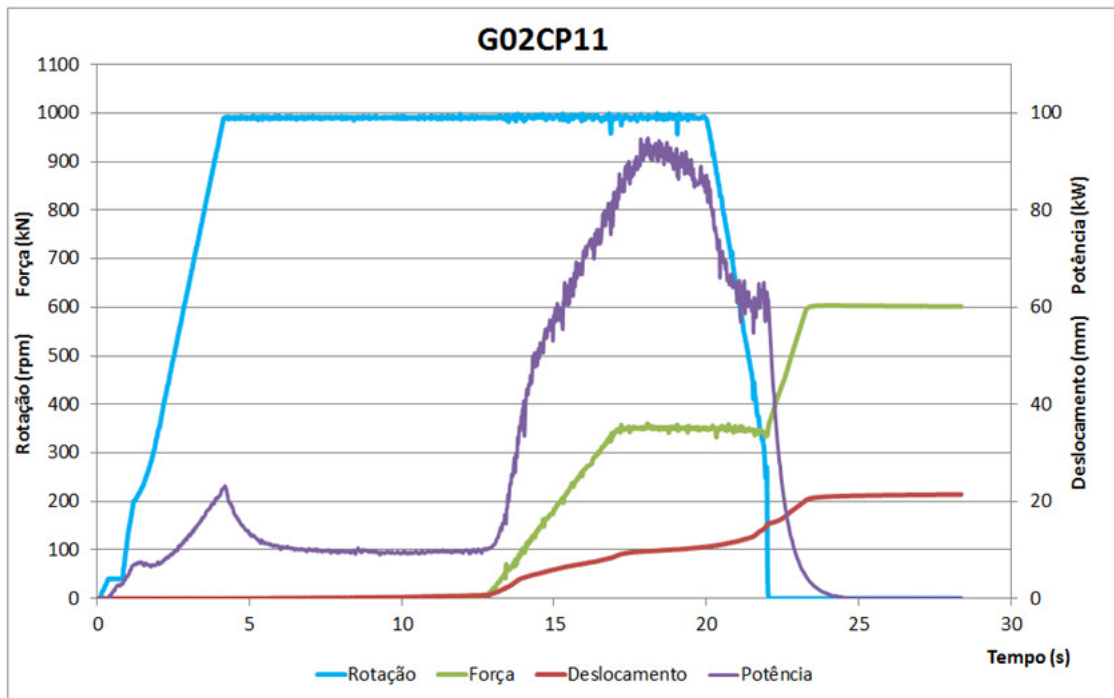


Figura 4.14 - Soldagem no corpo de prova G02CP11

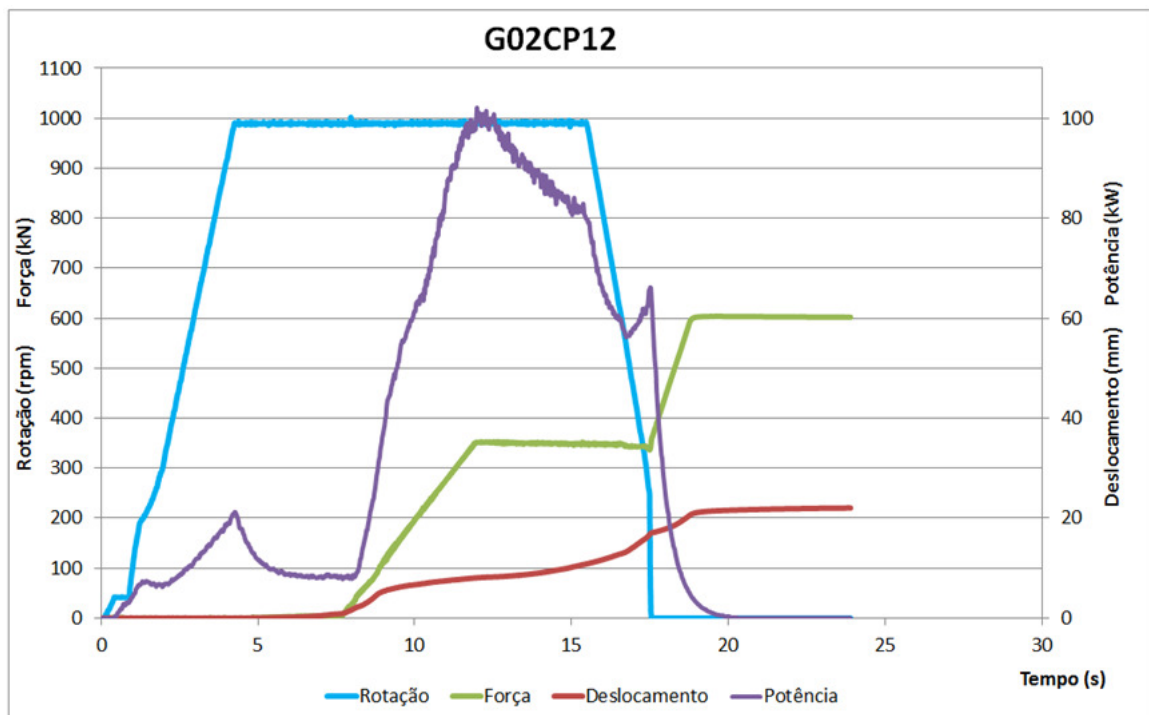


Figura 4.15 - Soldagem no corpo de prova G02CP12

Nas soldas realizadas nos grupos é possível comprovar a repetição dos resultados, através de sua semelhança entre grupos dos dados obtidos. Em cada grupo, as forças de soldagem e recalque permaneceram iguais e estáveis, o deslocamento ocasionado pelo consumo foi praticamente o mesmo para cada conjunto de corpos de prova soldados. A diferença de tempo entre o início da rotação até o momento em que se inicia o atrito de soldagem depende da distância em que o pino encontra-se da base, quanto maior a distancia maior o tempo necessário.

#### 4.1.2 Análise dos parâmetros.

Para análise dos parâmetros de soldagem foi realizado um exame dos parâmetros adquiridos durante o processo de soldagem. Como há variações de parâmetros de controle ao longo do tempo é necessária uma análise passo a passo observando o que ocorre em cada etapa e sua influência no processo de solda.

Pela complexidade do processo e sua grande alteração de comandos e de respostas os parâmetros foram divididos conforme sua ocorrência em função do tempo. Na Figura 4.16 é possível observar cinco regiões distintas e listadas em ordem alfabética de “A” até “F”.

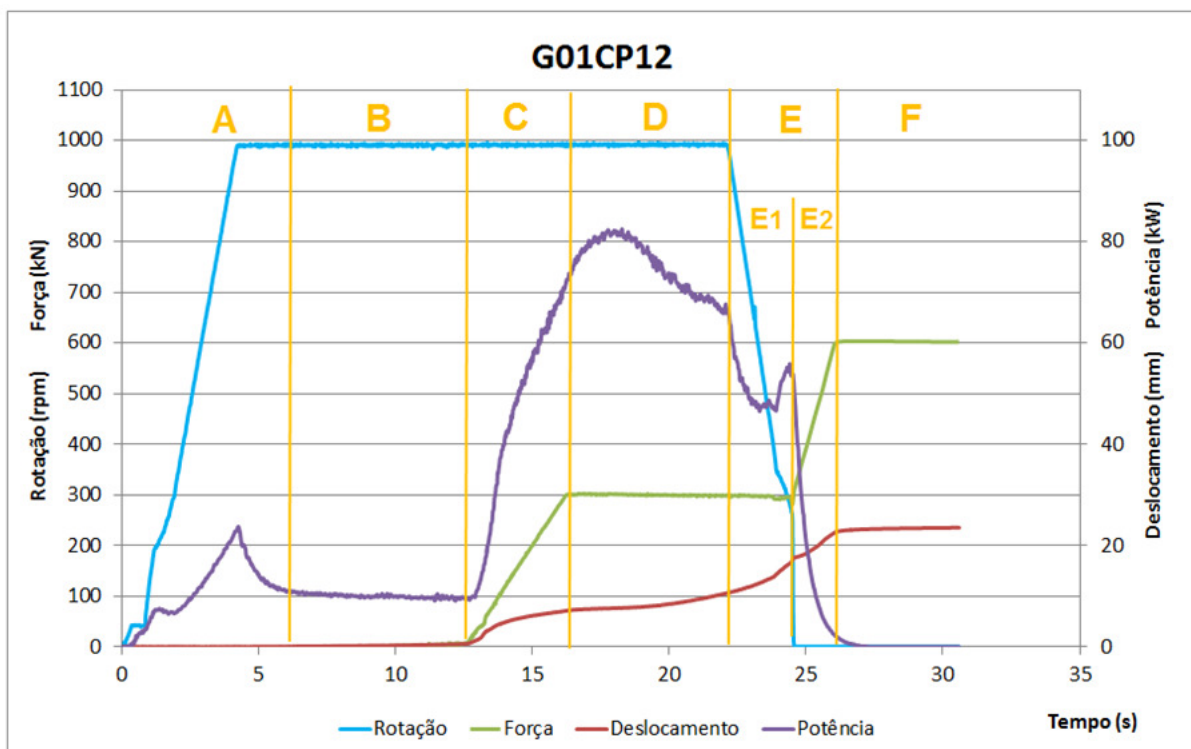


Figura 4.16 - Gráfico de aquisição do corpo de prova G01CP012.



Na região “A” é onde a máquina é acelerada até a rotação de soldagem. Neste ponto observa-se um pico na potência devido a esta aceleração. A potência se estabiliza imediatamente após a rotação de soldagem ser atingida. Esta é a única região em que não há influencia na soldagem, pois o pino ainda não sofreu atrito. A máquina apenas foi acelerada para a rotação em que ocorrerá a soldagem.

Na região “B” ocorre o início de atrito do pino com a base. Nesta região há um pequeno incremento de força para que o pino comece seu atrito na base com pouca pressão de contato. Se a taxa for muito elevada não haverá tempo suficiente para ocorrer as microligações. As tensões serão elevadas a ponto de haver uma plastificação intensa por trabalho mecânico e, com temperatura baixa, não havendo atrito suficiente, ocorrendo a formação de uma “solda fria” ou aparecimento de vazios.

Na região “C” é iniciada a taxa de incremento de força axial. É a partir deste ponto que o deslocamento do pino de consumo é controlado para o *burnoff*.

A região “D” é a estabilização da força de soldagem e haverá o maior atrito entre as superfícies. Nesta região haverá o maior consumo do pino (*burnoff*) até o deslocamento máximo pré-determinado. A potência atinge o seu máximo no início desta região e tende a cair devido a estabilização da solda e aquecimento do material. Se a pressão de soldagem for muito baixa o atrito será baixo e novamente ocorre formações de ligações indesejadas ou vazios.

A região “E” é onde ocorre a frenagem e início da taxa de aplicação do recalque. Dependendo como será a programação da máquina, ela pode ser dividida em duas partes. Uma região “E1” é apenas a frenagem sem início da taxa para recalque e, “E2” é a aplicação de uma taxa de recalque com a rotação parada.

Na potência aparece um pico devido ao travamento do motor no final da frenagem, sendo que este pico será maior à medida que a taxa de recalque se aproxima do início da frenagem. Essas duas variações no modo de aplicação de recalque e frenagem podem ser observadas nas Figura 4.17 e Figura 4.18. Este tipo de parada influencia na solda aplicando-se maior ou menor torque durante a frenagem e início de recalque.

A região “F” serve para ser mantida a força de recalque para que haja um esfriamento da solda e finalização das ligações.

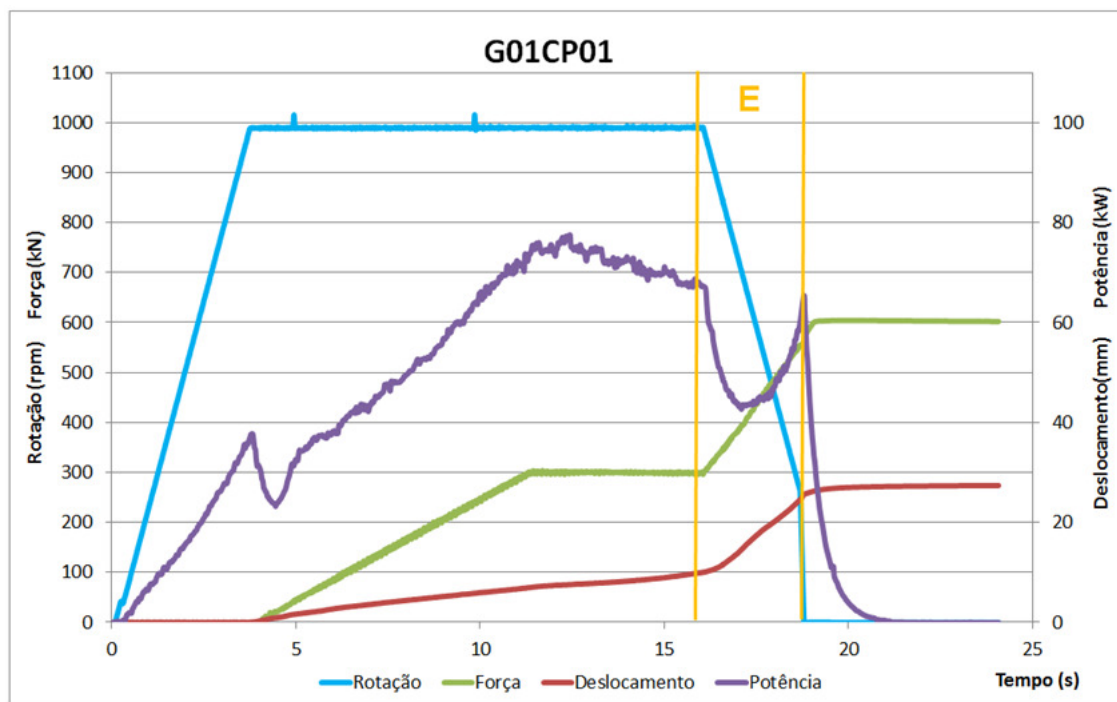


Figura 4.17 - Gráfico da aquisição do corpo de prova G01CP01.

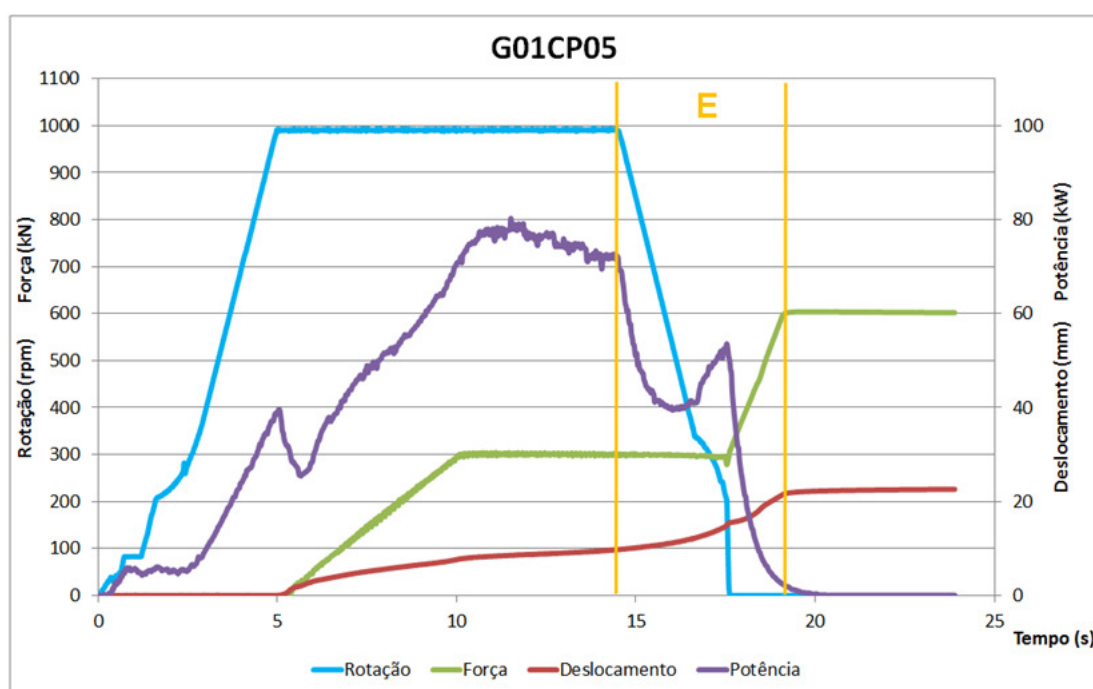


Figura 4.18 - Gráfico da aquisição do corpo de prova G01CP05.

Um fato importante que foi observado é se a força do patamar de soldagem for variada sem a variação dos outros parâmetros e geometria, haverá uma influência no tempo e no

comprimento de queima final do pino. Para diferenças de geometrias, neste caso, influencia apenas na porcentagem de tempo e do consumo de pino. Nas Figura 4.19 e Figura 4.20 os corpos de prova G03CP18, 19, 20 e 21 com forças de soldagem 200, 250, 300 e 350 kN obtiveram diferenças de até 11 mm no consumo de pino.

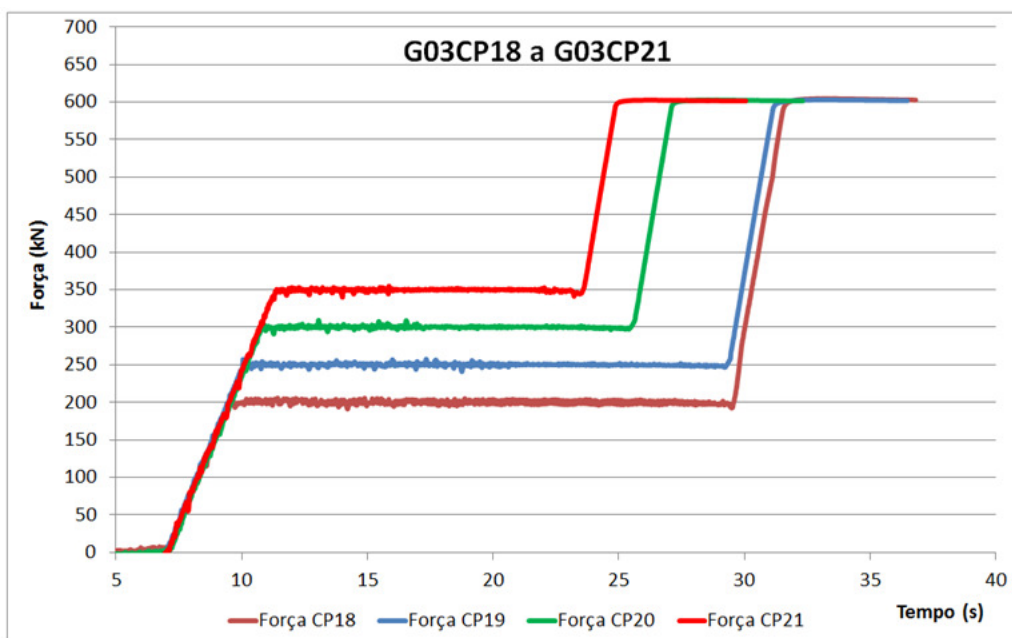


Figura 4.19 - Patamares de variação na força de soldagem.

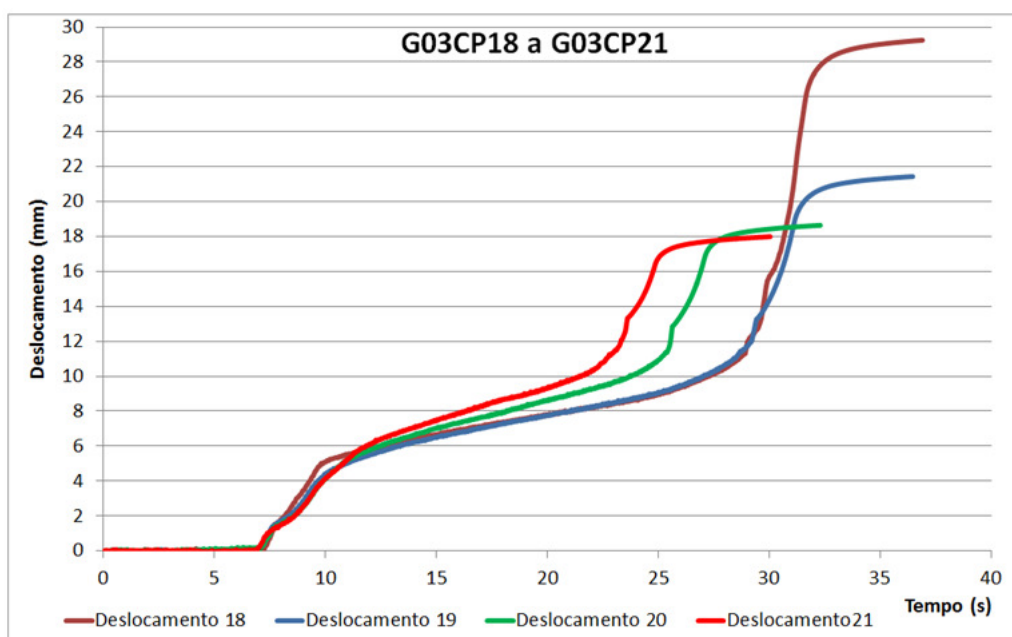


Figura 4.20 - Comprimento de queima total do pino pela força de soldagem.

O material consumido no pino é expulso na rebarba (*flash*), isso pode ser observado na diferença de rebarba do corpo de prova G03CP18 (Figura 4.21) com força de 200 kN, comparado com o corpo de prova G03CP21 (Figura 4.22) com força de soldagem de 350kN.

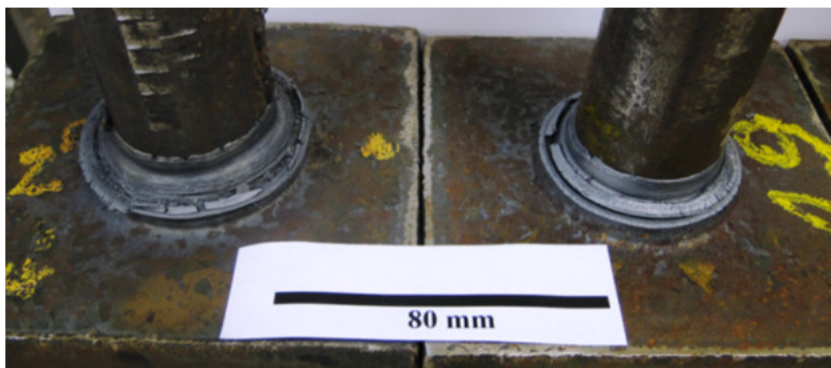


Figura 4.21 – Solda no corpo de prova G03CP18 e G03CP19.

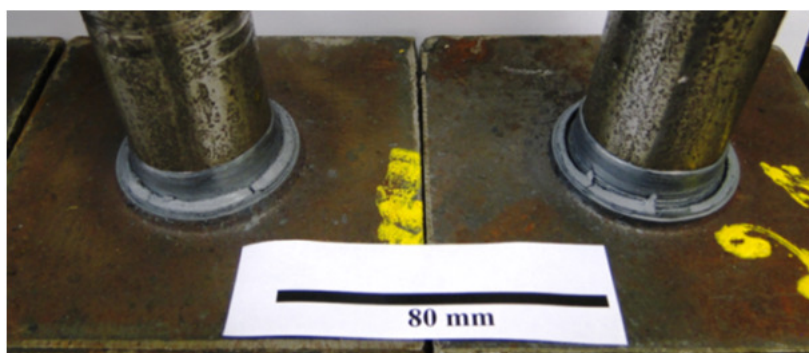


Figura 4.22 – Solda no corpo de prova G03CP20 e G03CP21.

#### 4.1.3 Efeito de preenchimento.

Alguns corpos de prova não considerados neste trabalho, porém soldados nos primeiros testes do equipamento e com forças abaixo de 200 kN resultaram em um tempo de soldagem longo ocasionando um grande aporte de calor na soldagem. Com o aquecimento excessivo resulta que no recalque o pino ocorre uma maior plasticidade no material da base promovendo defeitos na região “C” como pode ser observado na Figura 4.23

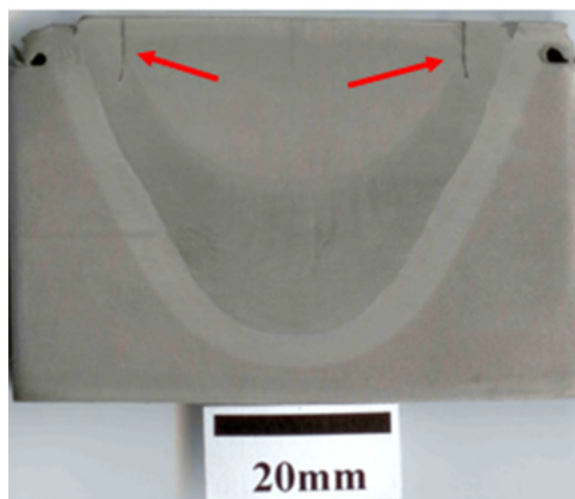


Figura 4.23 – Defeitos na soldagem na região “C”.

Nas soldagens subsequentes com forças de 300 kN observou-se na região “A” o aparecimento de pontos com falta de ligação (solda fria na Figura 4.24).



Figura 4.24 – Aparecimento de defeitos na região “A” da soldagem

Foi observado que o surgimento destes pontos de vazios eram provocados pelas pressões excessivas nos primeiros contatos entre o pino e o furo, Figura 4.25. Por ser uma região de contato muito pequena, pelo raio de giro também ser pequeno e a velocidade tangencial baixa ocorre uma deformação plástica localizada com temperatura baixa. Essa deformação a frio impede a ligação dos materiais. Com a continuação da soldagem e o aumento do atrito ocorre o aquecimento e através da deformação na circunvizinhança criando um espaço vazio com falta de ligação.

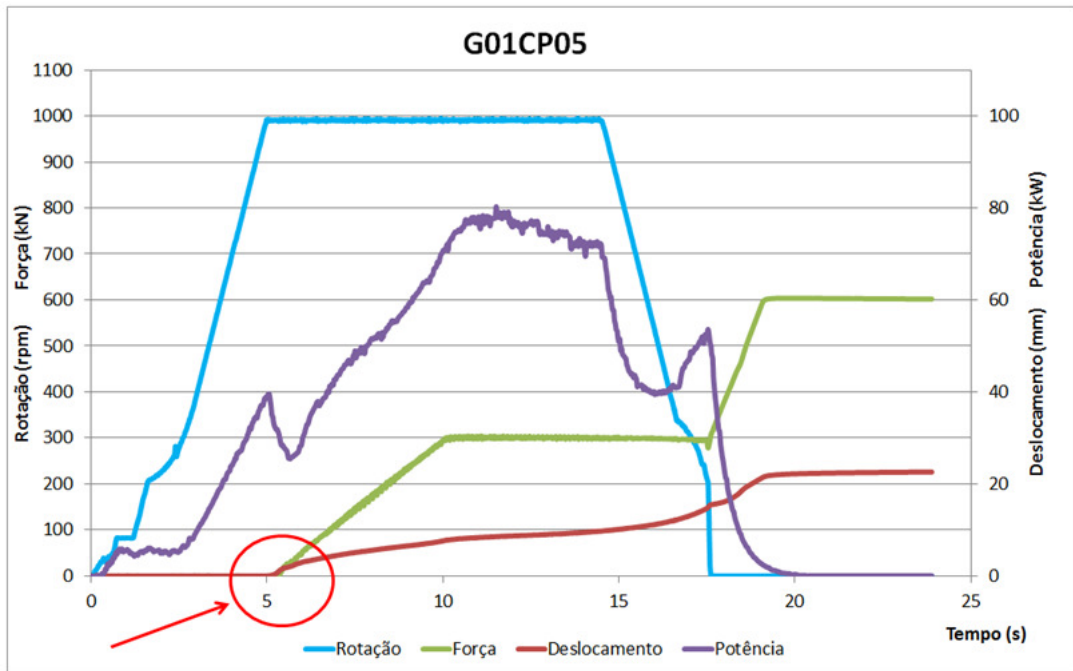


Figura 4.25 – Contato inicial entre o pino e o furo.

Com uma mudança na programação foi inserido um período onde há uma taxa de carregamento (pré-carga) para evitar a deformação excessiva inicial, Figura 4.26.

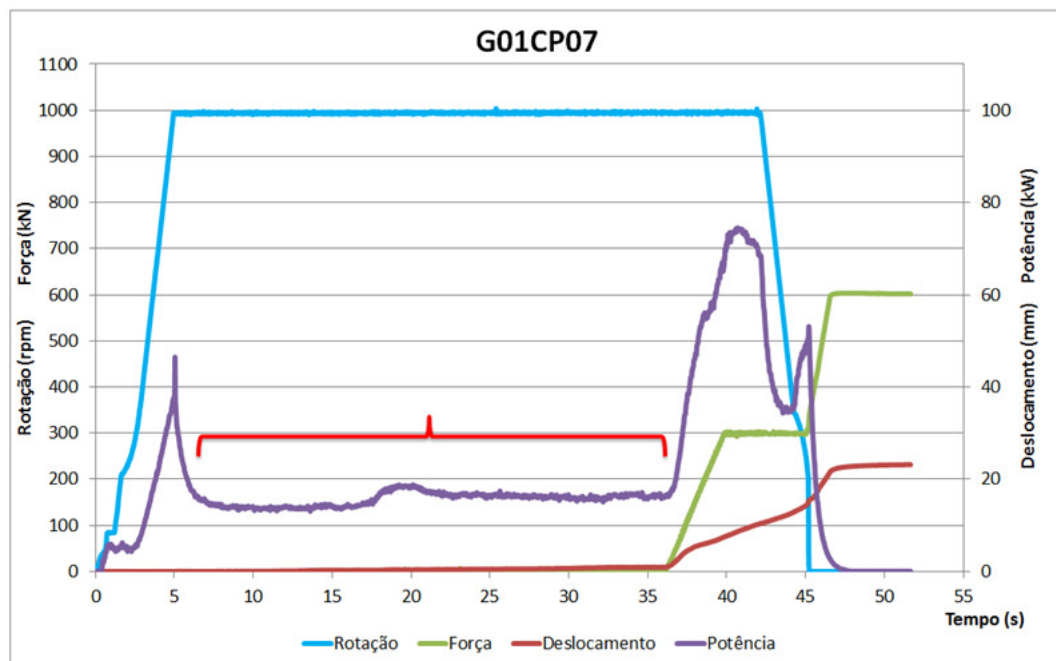


Figura 4.26 - Corpo de prova G01CP07 tempo do incremento pré-carga.

Com a taxa de incremento de pré-carga muito baixa, resulta em um tempo muito longo, agravando os defeitos da região “A” e aparecendo defeitos na região “B”, Figura 4.27.

A explicação estaria associada ao fato do material iniciar a união na região “A”, porém pela força baixa a região descola-se, uma região de *flash* é jogada para essa região e para a região “B”, este material tem tempo suficiente para se resfriar e aderir em alguns pontos, um novo *flash* “empurra” e se sobrepõe ao anterior criando uma zona com defeitos.

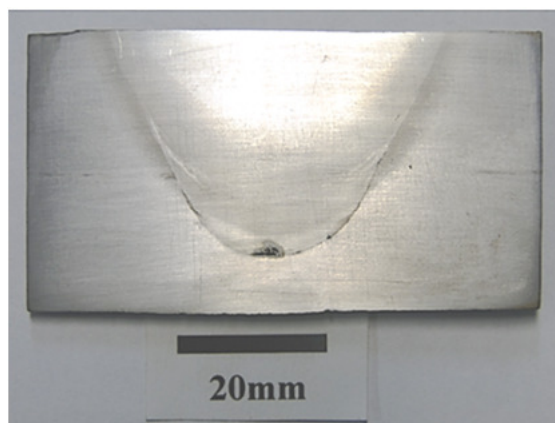


Figura 4.27 – Defeitos derivados pela baixa força inicial.

Para resolver este problema foi diminuído o tempo e aumentado o valor de pré-carga inicial. Com este incremento o material do pino entra em atrito com o material da base gerando um atrito com menor pressão. Com o pequeno aumento da taxa de soldagem ocorre um período de tempo necessário para a união dos dois materiais, resolvendo o problema do ponto de falta de ligação, conforme a Figura 4.28 e Figura 4.29.

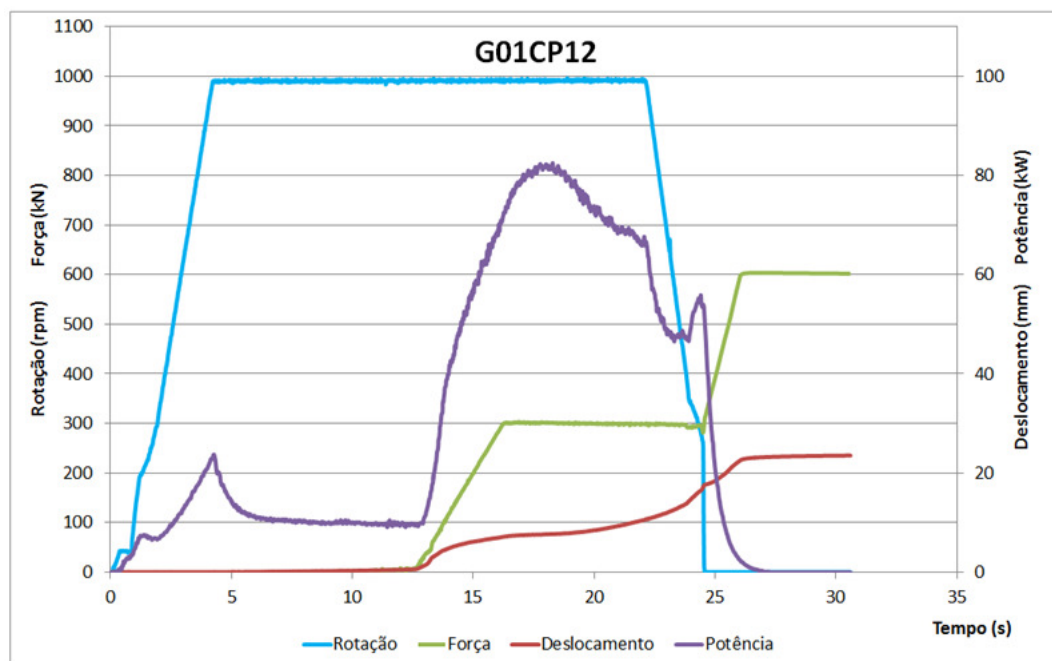


Figura 4.28 – Gráfico do incremento de pré-carga na amostra G01CP12.

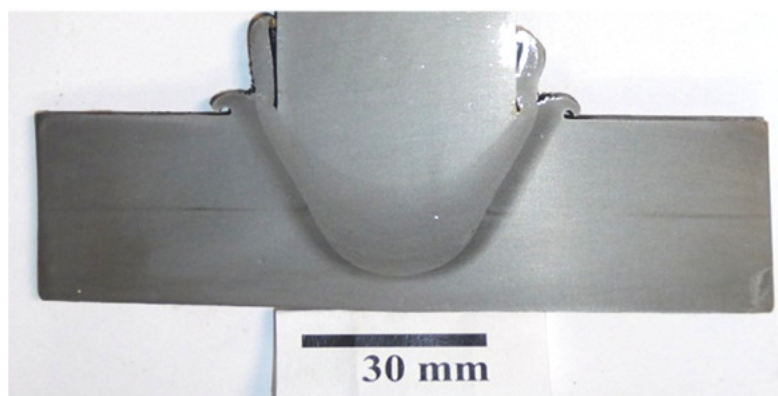


Figura 4.29 – Soldagem resultante com incremento da pré-carga.

Os corpos de prova com força de 400 kN de soldagem e 800 kN de recalque foram descartados. Nestas soldas o valor de consumo de pino foi equivalente ao necessário para um bom preenchimento de soldagem, porém com a deformação do pino isto não ocorreu. O pino sofreu uma grande deformação plástica em seu corpo acima da soldagem mascarando o resultado de consumo do pino medido na máquina. Na Figura 4.30 é apresentada a deformação do pino ocasionada pela alta força de soldagem e recalque.



Figura 4.30 – Rebarba e diferença no diâmetro do pino após a soldagem.

#### 4.1.4 Dobramento.

Foram realizadas três medições de largura e de altura das amostras e depois calculada a média entre as três dimensões. Os valores encontram-se na Tabela 9.5 do Anexo.

Na aquisição de força e deslocamento os corpos de prova dobrados apresentaram resultados semelhantes entre si. A Figura 4.31 mostra o exemplo de uma curva de força *versus* deslocamento para os corpos de prova soldados com 200 kN.



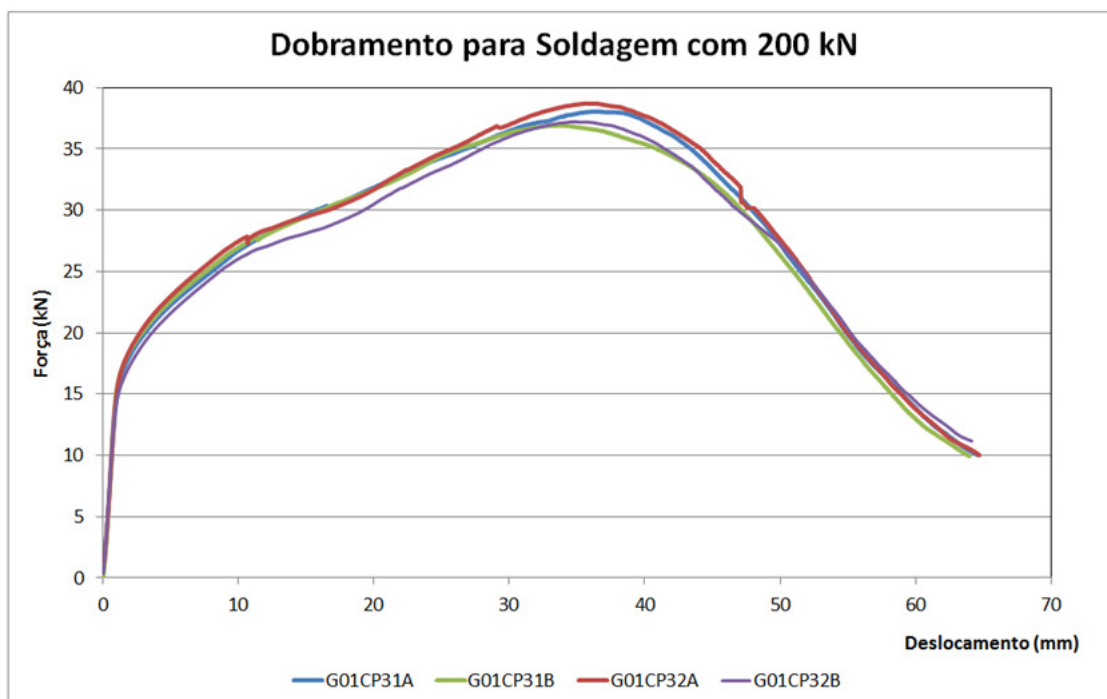


Figura 4.31 – Força de dobramento para as amostras soldadas com 200 kN.

Para os corpos de prova que ultrapassaram 60 mm de deslocamento no dobramento indicam 180° de ângulo de dobramento. Os ângulos de dobramento e a força máxima atingida das amostras soldadas com força de soldagem de 200 kN encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Ângulos das amostras com força de soldagem de 200 kN.

Identificação	Força de Soldagem	Ângulo de Dobramento	Força Máxima	Localização dos Defeitos:
G01CP31A	200 kN	180	38,04 kN	Trinca na interface de soldagem;
G01CP31B	200 kN	180	36,91 kN	Trinca na interface de soldagem;
G01CP32A	200 kN	180	38,68 kN	Sem trincas;
G01CP32B	200 kN	180	35,79 kN	Sem trincas.

A aquisição de dobramento dos corpos de prova com força de soldagem de 200 kN foram inseridos em um gráfico que mostra a tensão exercida no corpo de prova para efetuar o dobramento, conforme a Figura 4.32, a Figura 4.33 apresenta os corpos de prova dobrados.

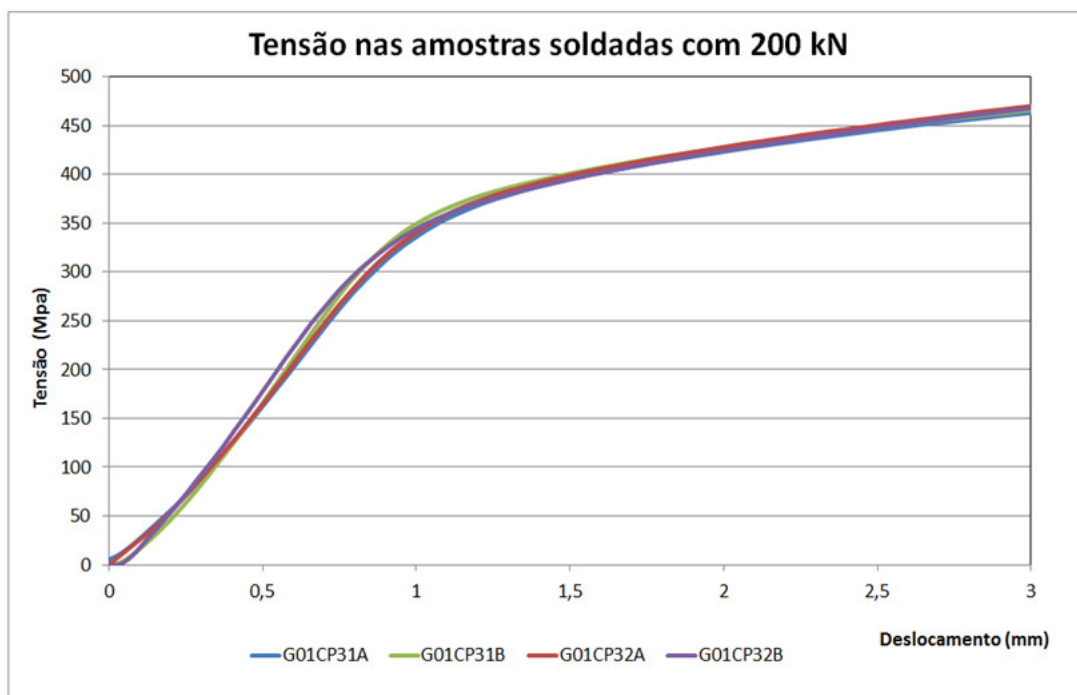


Figura 4.32 - Tensão para dobramento das amostras com soldagem a 200 kN.



Figura 4.33 - Dobra das amostras G01CP31A e B, G01CP32A e B.

Nas soldagens com 200 kN os corpos de prova G01CP31A e G01CP31B apresentaram trincas no dobramento. As trincas foram localizadas na interface de soldagem e a Figura 4.34 apresenta estas trincas.

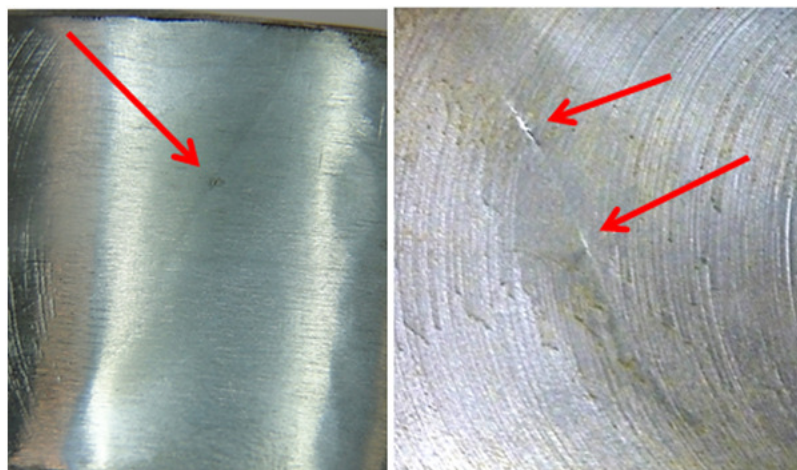


Figura 4.34 – Trincas das amostras G01CP31A e G01CP31B

As tensões dos corpos de prova com força de soldagem de 300 kN foram inseridas no gráfico da Figura 4.35.

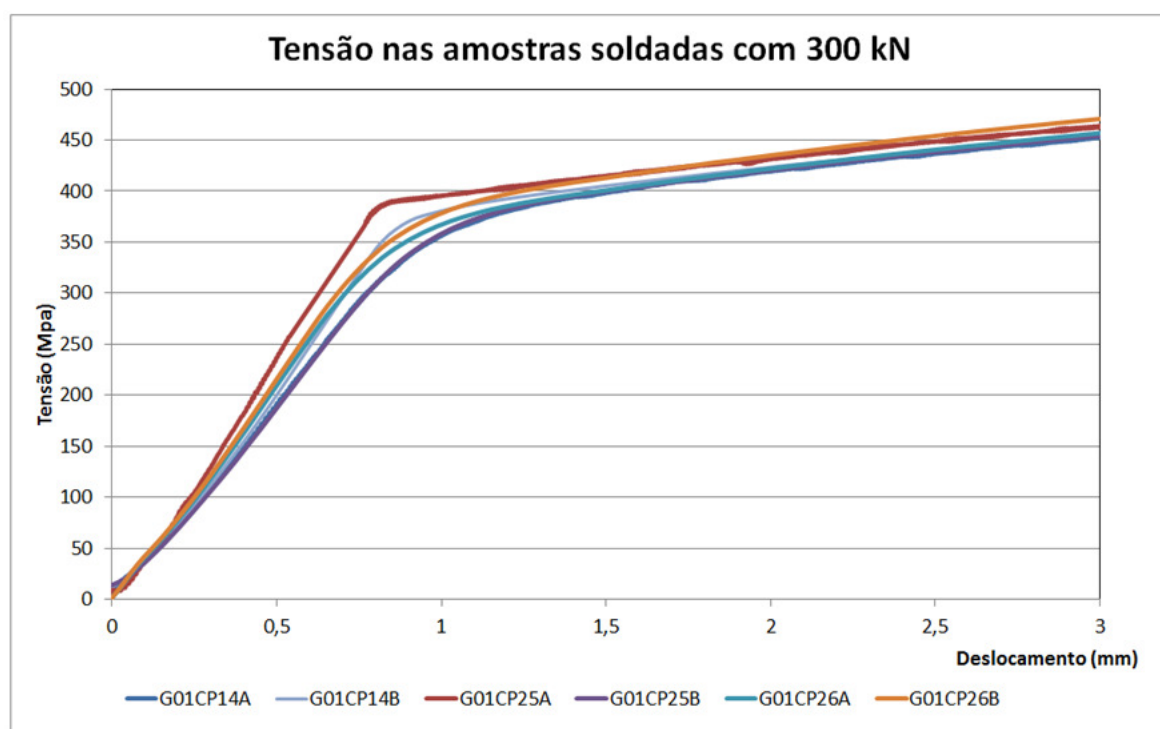


Figura 4.35 – Tensão de dobramento das amostras com soldagem a 300 kN.

Os ângulos de dobramento e força máxima atingida das amostras soldadas encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Ângulos das amostras com força de soldagem de 300 kN.

Identificação	Força de Soldagem	Ângulo de Dobramento	Força Máxima	Localização dos Defeitos:
G01CP14A	300 kN	180°	39,92 kN	Sem trincas;
G01CP14B	300 kN	180°	35,85 kN	Trinca na ZAC do pino e interface;
G01CP25A	300 kN	180°	41,27 kN	Sem trincas;
G01CP25B	300 kN	180°	37,14 kN	Sem trincas;
G01CP26A	300 kN	180°	41,59 kN	Sem trincas;
G01CP26B	300 kN	180°	37,50 kN	Sem trincas.

As amostras foram dobradas até 180° e mostraram bons resultados de dobramento conforme mostrado na Figura 4.36 e Figura 4.37, porém o corpo de prova G01CP14B apresentou trincas. As trincas localizam-se na ZAC do pino e na interface, próxima a região inferior do pino de soldagem, conforme a Figura 4.38

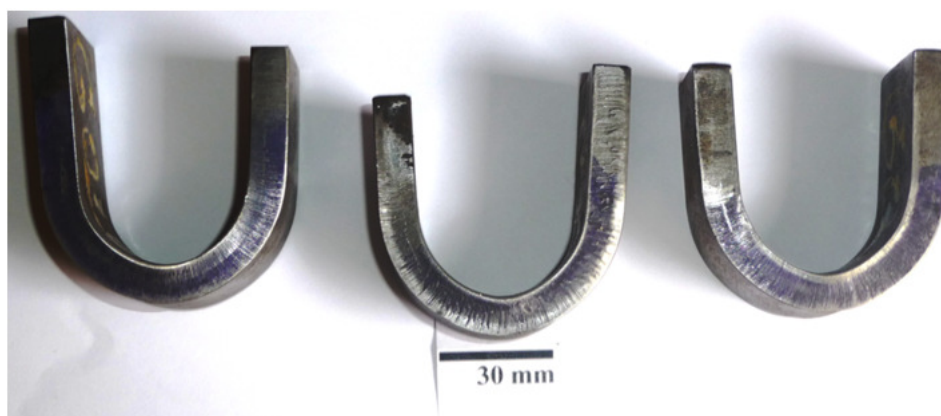


Figura 4.36 – Dobra das amostras G01CP14A, G01CP25A e G01CP26A.



Figura 4.37 - Dobra das amostras G01CP14B, G01CP25B e G01CP26B.



Figura 4.38 - Trincas na amostra G02CP14B soldada com 300 kN.

O gráfico de tensão no dobramento para os corpos de prova que foram soldados com força de 350 kN encontra-se na Figura 4.39 e a relação de ângulos atingidos no dobramento encontra-se na Tabela 4.4.

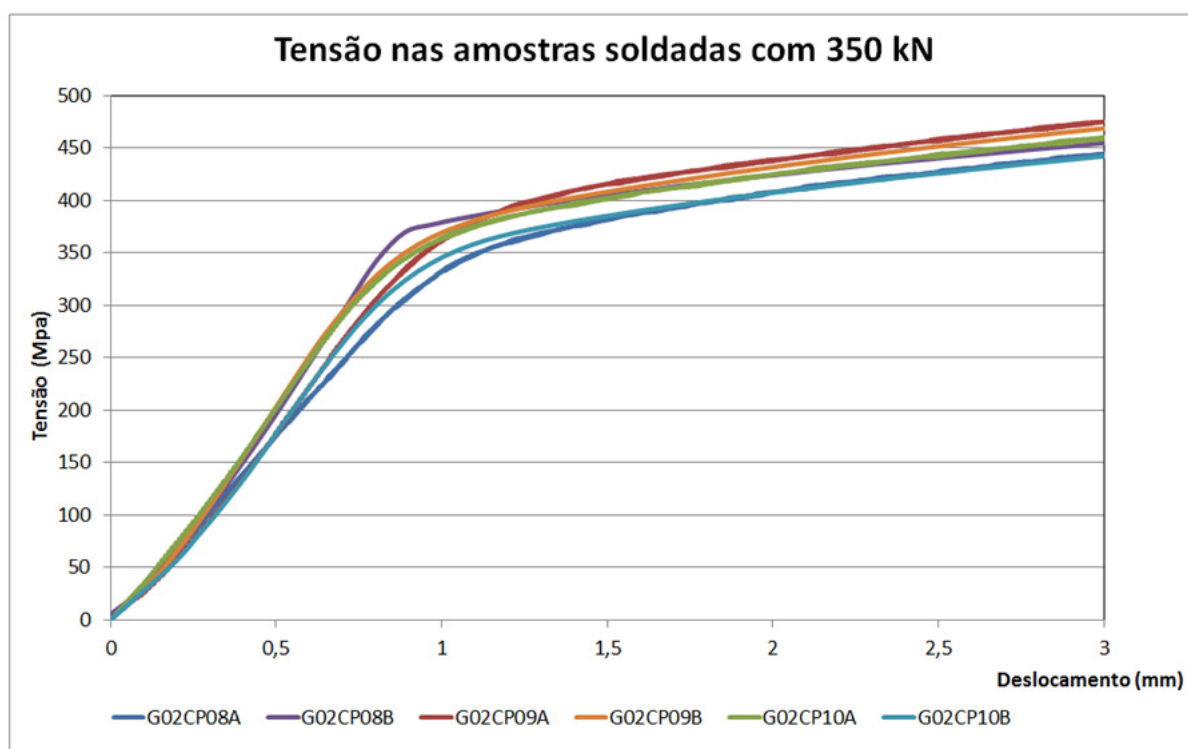


Figura 4.39 - Tensão para dobramento das amostras com soldagem a 350 kN.

Tabela 4.4 - Ângulos das amostras com força de soldagem de 350 kN.

Identificação	Força de Soldagem	Ângulo de Dobramento	Força Máxima	Localização dos Defeitos:
G02CP08A	350 kN	180°	40,66 kN	Sem trincas;
G02CP08B	350 kN	180°	37,82 kN	Trinca na interface de soldagem;
G02CP09A	350 kN	180°	45,06 kN	Trinca na ZAC do pino;
G02CP09B	350 kN	180°	34,83 kN	Trinca na ZAC do pino e interface;
G02CP10A	350 kN	89°	37,63 kN	Trinca na interface de soldagem;
G02CP10B	350 kN	180°	37,85 kN	Sem trincas.

No dobramento das amostras soldadas com 350 kN de força somente a G02P08A e a G02CP10B não apresentaram trincas. Na amostra G02CP10A o teste foi finalizado quando não havia atingido o ângulo de 90° devido ao surgimento da trinca. As amostras dobradas estão na Figura 4.40 e Figura 4.41.

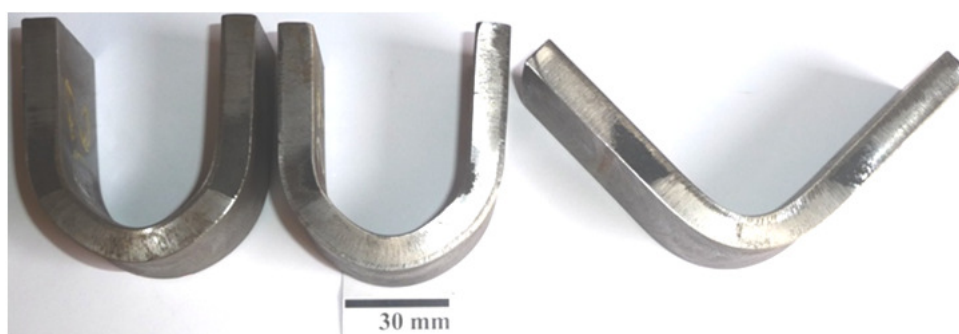


Figura 4.40 – Dobras das amostras G02CP08A, G02CP09A e G02CP10A.



Figura 4.41 - Dobras das amostras G02CP08B, G02CP09B e G02CP10B.

As amostras G02CP09A, G02CP10A G02CP08B e G02CP09B apresentaram trincas, sendo que estas trincas ocorreram na interface de união entre o pino e base, ou na ZAC do pino, conforme a Figura 4.42 e Figura 4.43.

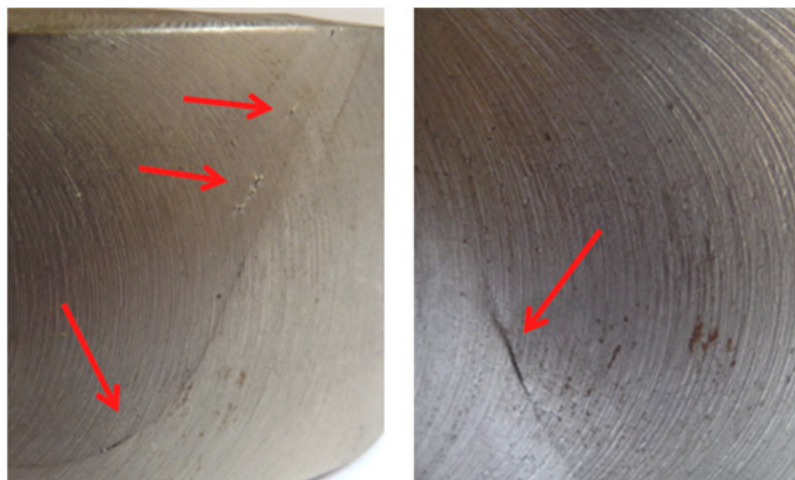


Figura 4.42 – Trincas nas amostras G02CP09A e G02CP10A.

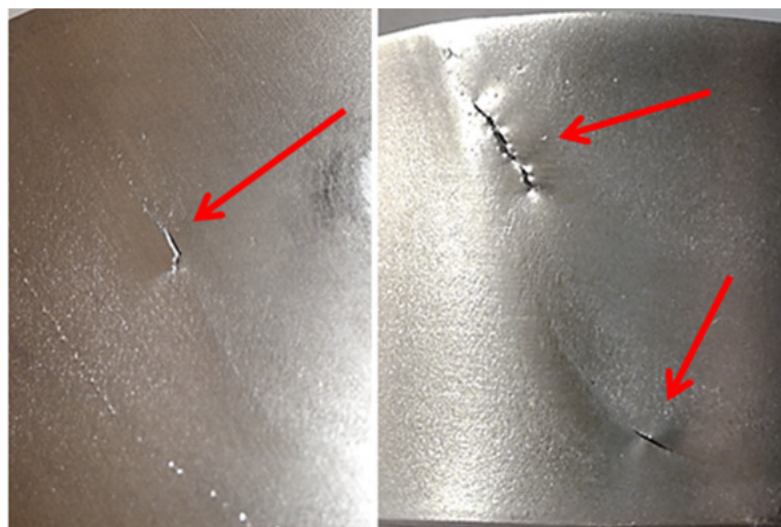


Figura 4.43 - Trincas nas amostras G02CP08B e G02CP09B.

Foram calculadas as médias das tensões dos corpos de prova para observar a diferença entre as tensões de dobramento para as amostras com mesma força de soldagem, resultando uma média para os quatro corpos de prova de 200 kN, uma para os seis corpos de prova de 300 kN e uma para os seis para os corpos de prova de 350 kN. As médias foram inseridas no gráfico da Figura 4.44.

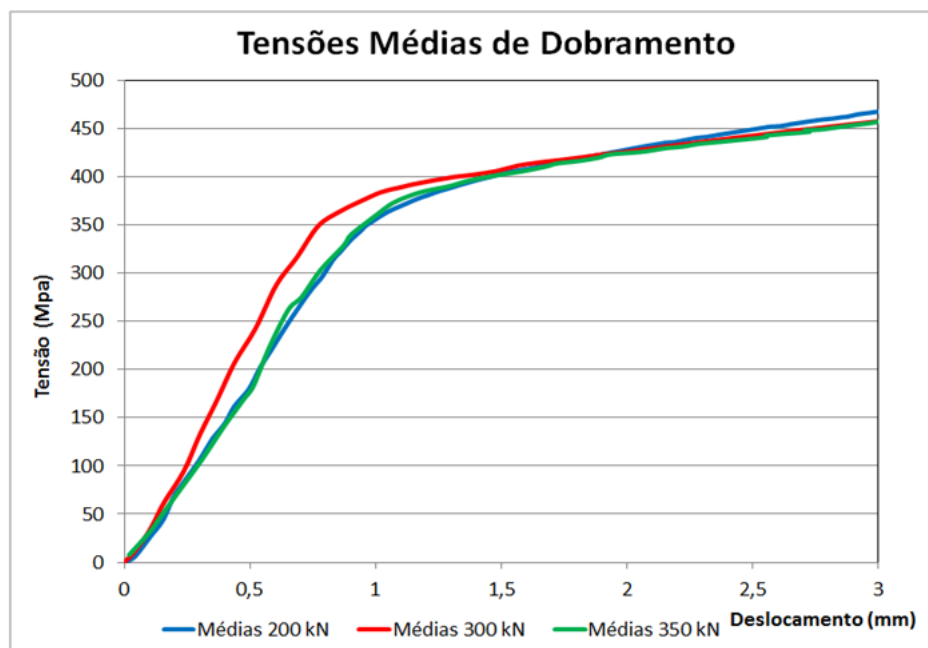


Figura 4.44 - Tensões médias de dobramento das amostras dobradas.

#### 4.1.5 Perfis de dureza.

Para o perfil de dureza foram utilizadas três amostras retiradas de corpos de prova soldados com força de 200 kN, 300 kN e com 350 kN. As medições longitudinais ao pino (medições verticais) foram realizadas de modo a abranger o material do pino, material base e a interface de soldagem. Os valores adquiridos foram inseridos em gráficos que estão na Figura 4.45, Figura 4.46 e Figura 4.47.

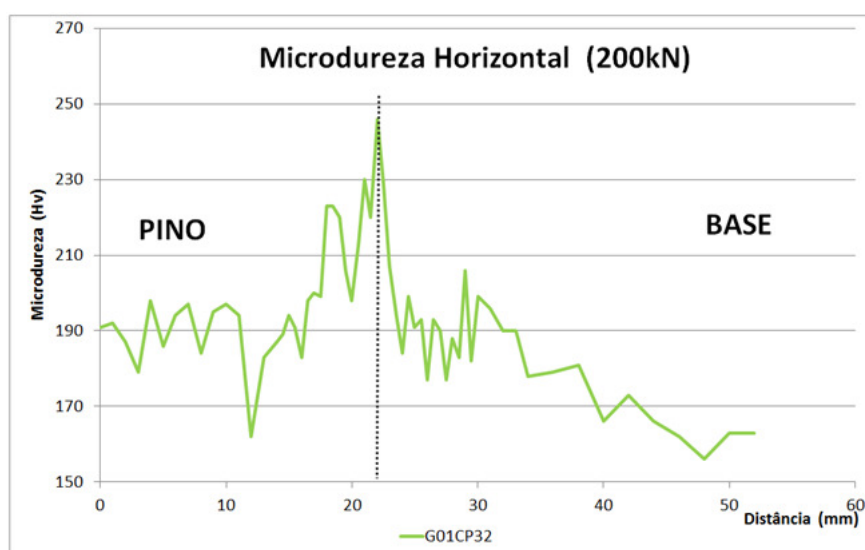


Figura 4.45 - Microdureza vertical para amostras soldadas com 200 kN.



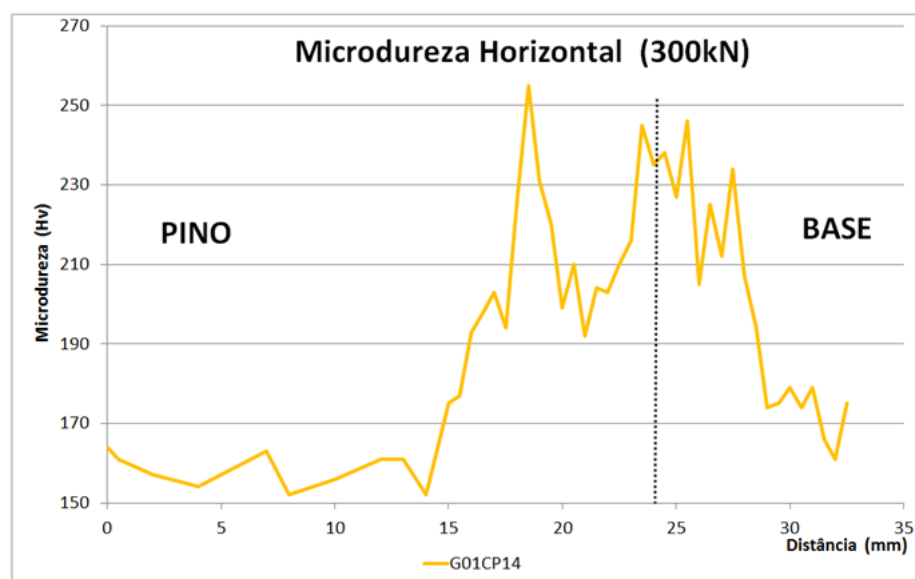


Figura 4.46 - Microdureza vertical para amostras soldadas com 300 kN.

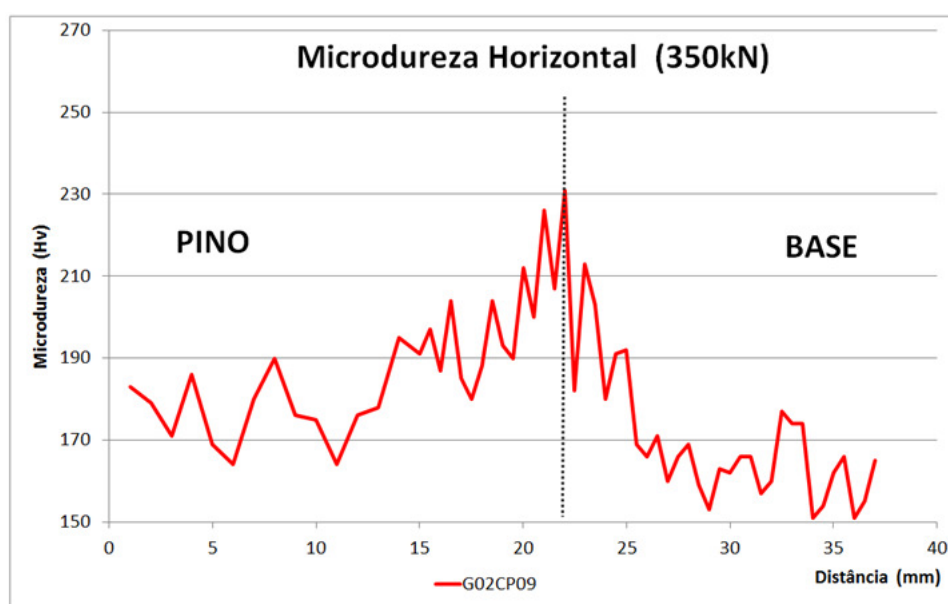


Figura 4.47 - Microdureza vertical para amostra soldada com 350 kN

As medições transversais ao pino (medições horizontais) foram realizadas abrangendo a zona de ligação, material do pino e material da base. Os valores adquiridos estão nas Figura 4.48, Figura 4.49 e Figura 4.50.

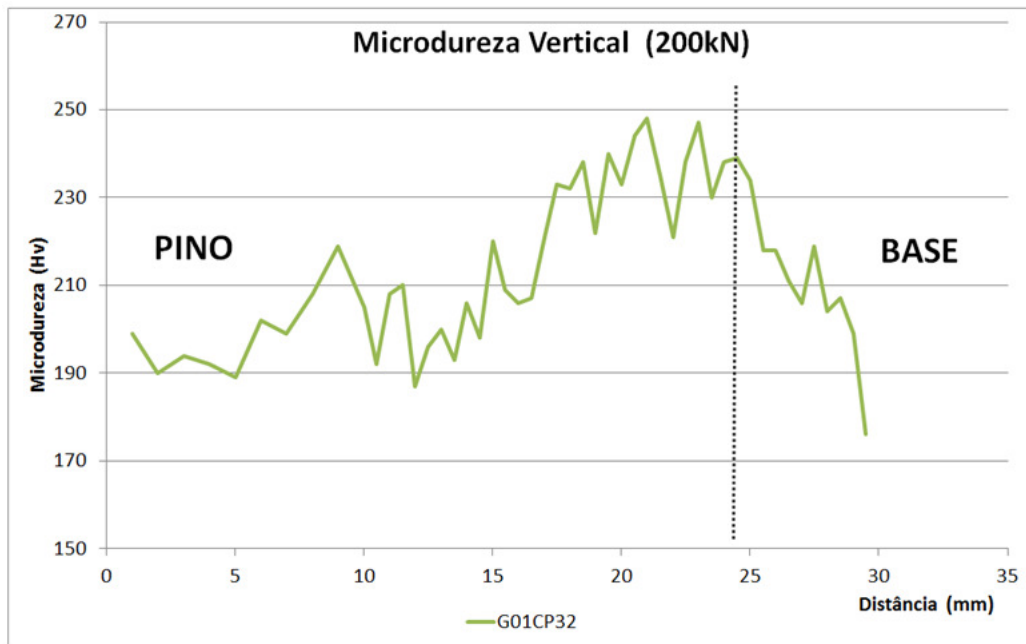


Figura 4.48 - Microdureza horizontal para amostra soldada com 200 kN.

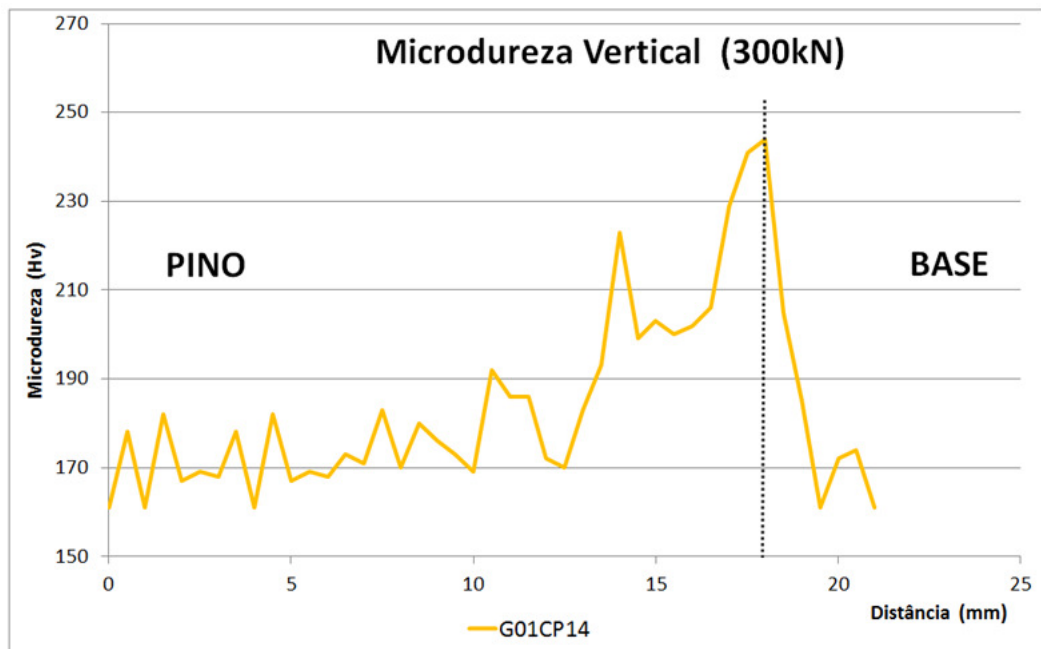


Figura 4.49 - Microdureza horizontal para amostra soldada com 300 kN.

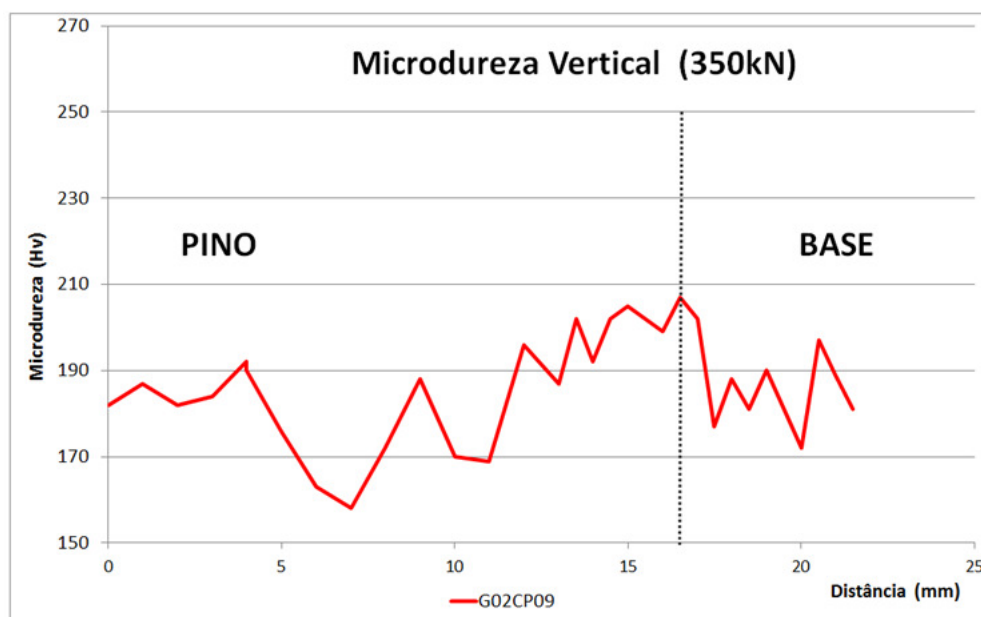


Figura 4.50 - Microdureza horizontal para amostra soldada com 350 kN.

#### 4.1.6 Aquisição de temperatura.

Os corpos de prova foram soldados com forças diferentes para que fosse observada a variação de temperatura durante esta soldagem. As amostras soldadas com suas forças de soldagem e recalque encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Amostras soldadas para a aquisição de temperatura.

<b>Amostra</b>	<b>Força de soldagem</b>	<b>Força de recalque</b>
G01CP28	300 kN	600 kN
G01CP29	300 kN	600 kN
G01CP30	200 kN	600 kN
G02CP11	350 kN	600 kN
G02CP12	350 kN	600 kN

As temperaturas máximas adquiridas e sua posição correspondente encontram-se na Tabela 4.6, em alguns termopares houve a perda de sinal e foram desconsiderados. Na mesma tabela é calculada uma média dos dados válidos de cada corpo de prova independente da

posição dos termopares, o objetivo é observar a temperatura média aproximada a uma região de três mm da interface de soldagem do corpo de prova.

Tabela 4.6 - Temperaturas máximas de soldagem e posição da medição.

Descrição	AS	AM	AI	BS	BM	BI	Média
G01CP28 Temperatura (°C)	-	592	543	612	530	510	543
Distância do termopar (mm)	-	4,83	-	3,30	5,45	4,63	4,73
G01CP29 Temperatura (°C)	580	460	547	582	583	-	580
Distância do termopar (mm)	3,70	4,77	4,63	3,35	4,73	-	4,63
G01CP30 Temperatura (°C)	840	735	-	736	672	731	735
Distância do termopar (mm)	2,97	4,20	-	4,65	4,73	3,82	4,20
G02CP11 Temperatura (°C)	-	-	477	579	408	506	492
Distância do termopar (mm)	-	-	4,87	3,17	4,78	4,60	4,69
G02CP12 Temperatura (°C)	603	-	435	514	-	489	502
Distância do termopar (mm)	3,38	-	4,97	3,88	-	5,05	4,43

Os valores médios mudaram inversamente proporcional à força de soldagem. Os gráficos de aquisição que mostram as mudanças de temperaturas encontram-se nas Figura 4.52 a Figura 4.56. Em cada gráfico estão inseridos os valores máximos com uma ampliação como o exemplo da Figura 4.51.

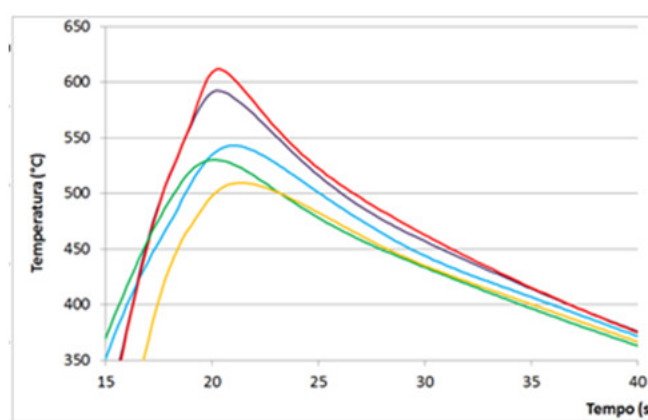


Figura 4.51 - Ampliação dos dados de temperatura adquiridos.

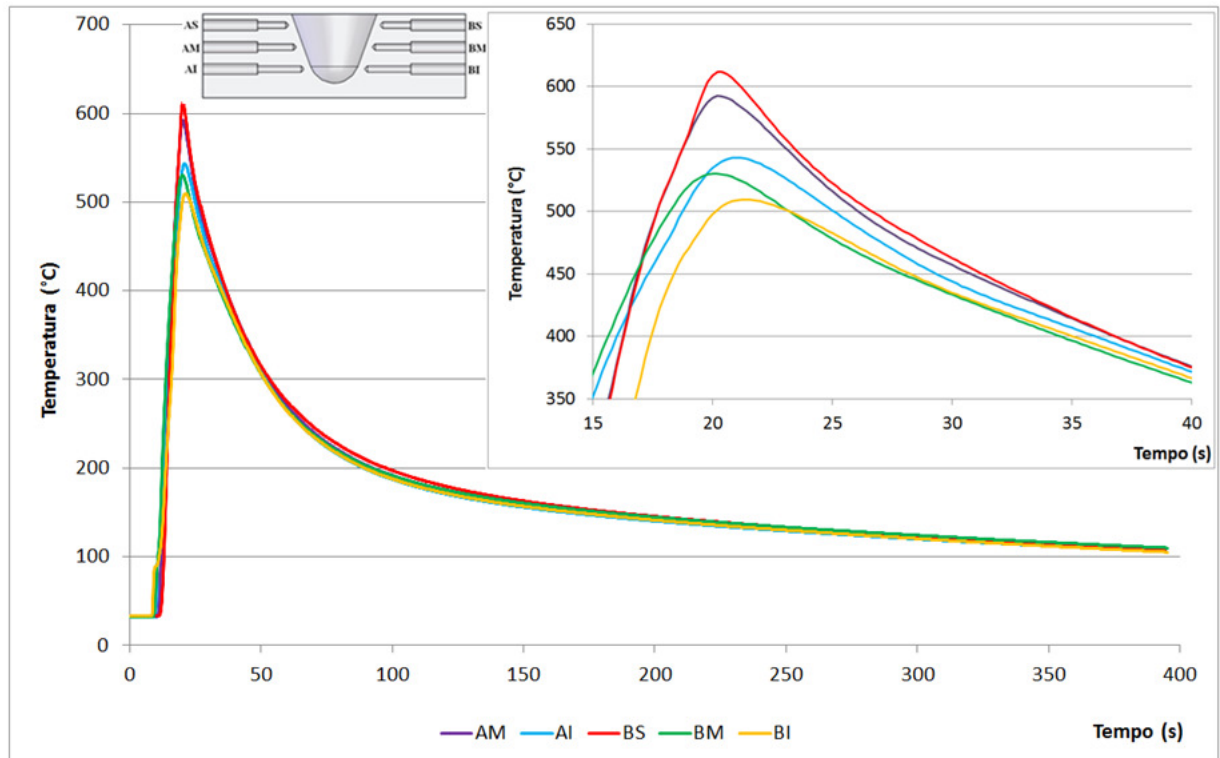


Figura 4.52 - Temperaturas da amostra G01CP28 soldada com 300 kN.

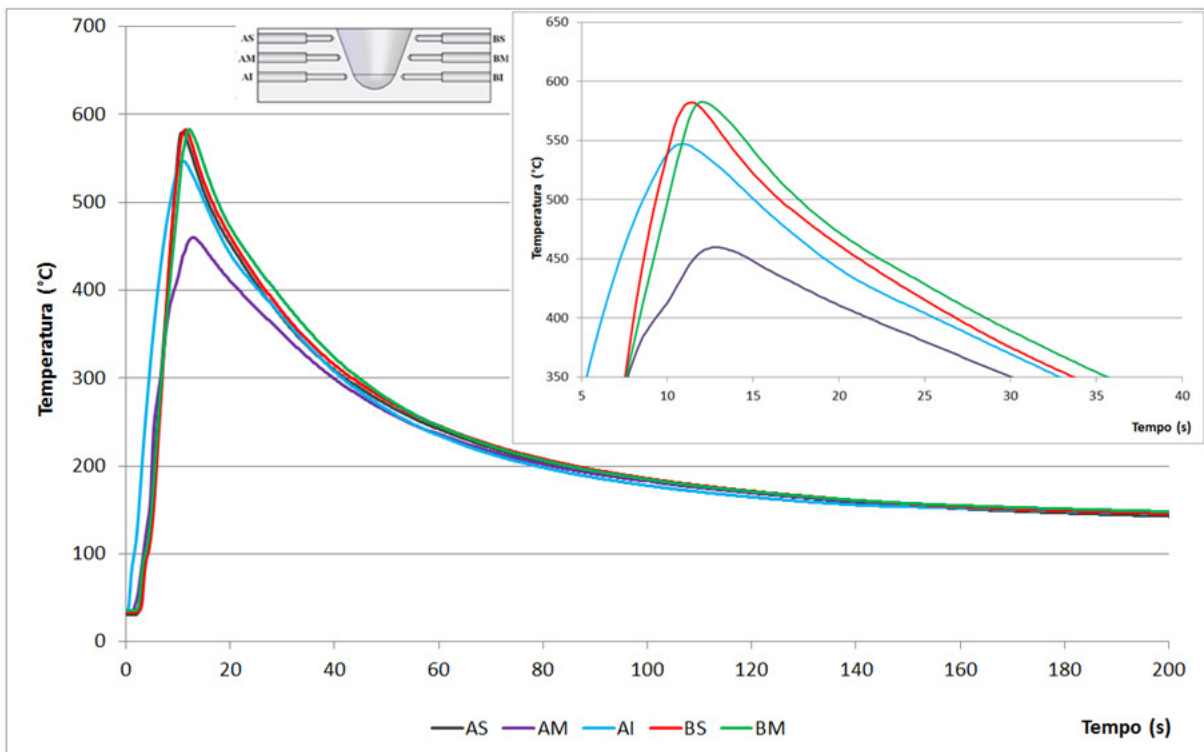


Figura 4.53 - Temperaturas da amostra G01CP29 soldada com 300 kN.

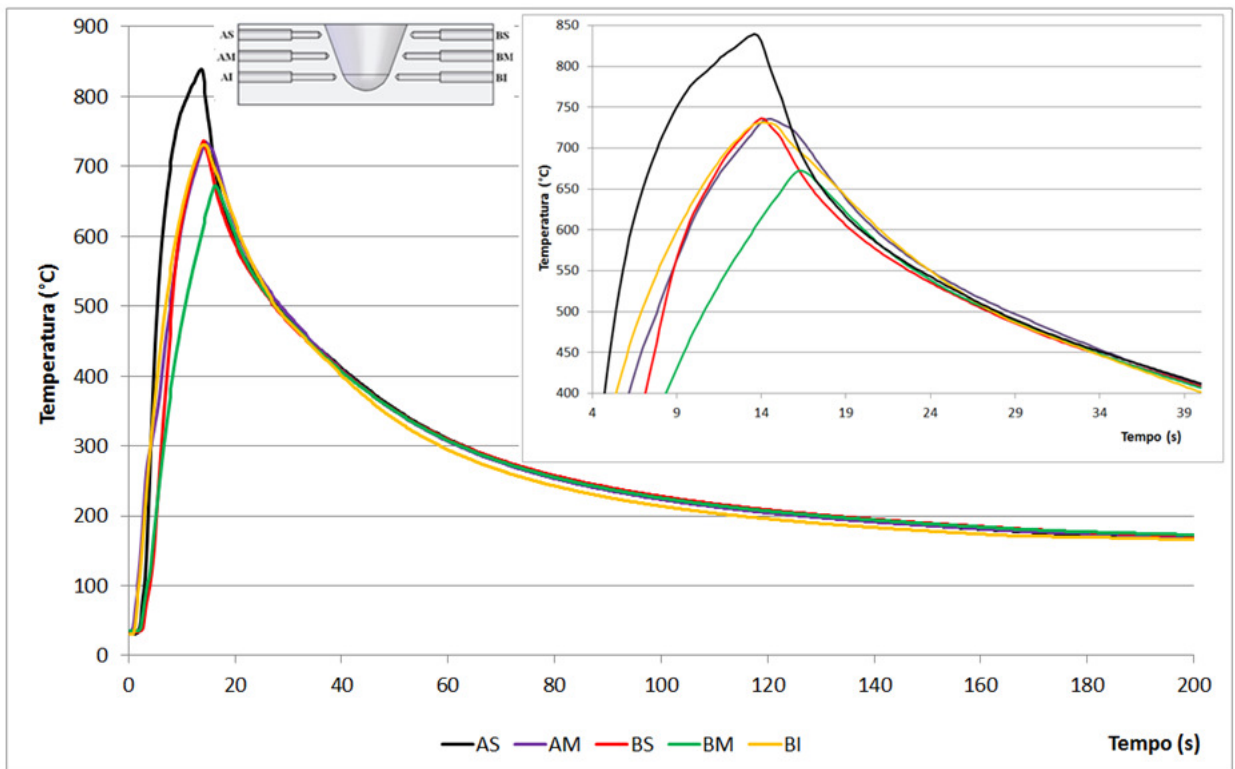


Figura 4.54 - Temperaturas da amostra G01CP30 soldada com 200 kN.

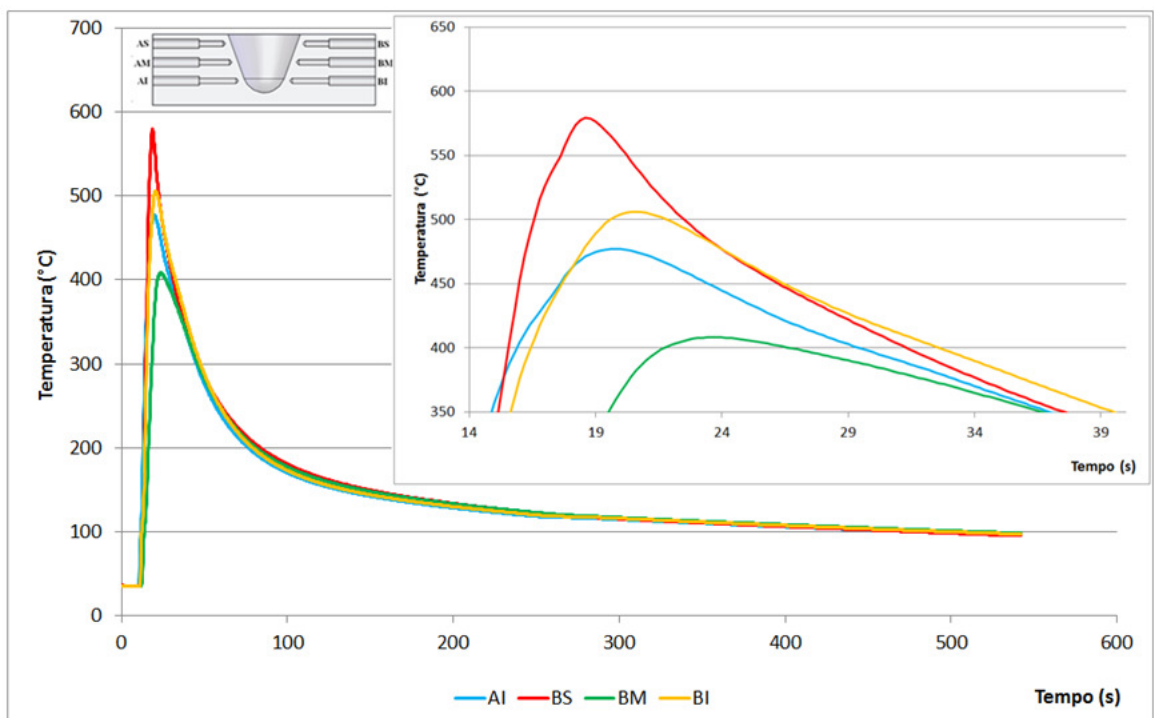


Figura 4.55 - Temperaturas da amostra G02CP11 soldada com 350 kN.

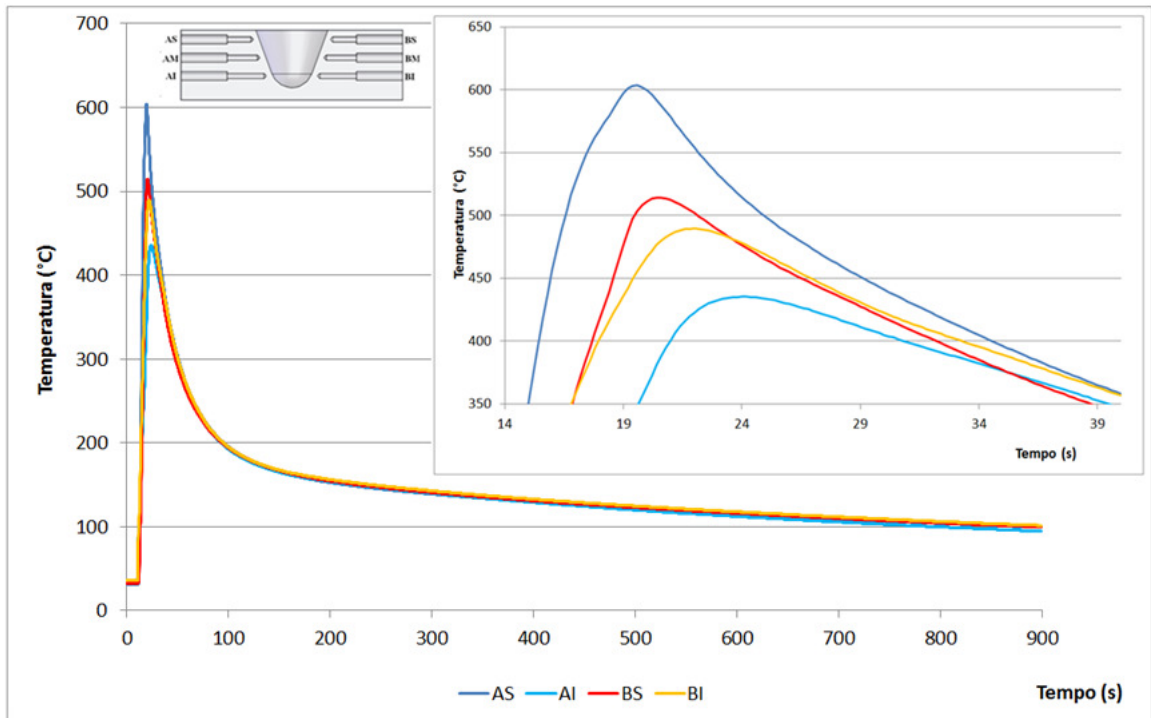


Figura 4.56 - Temperaturas da amostra G02CP12 soldada com 350 kN.

Para um efeito comparativo, foi realizado o cruzamento dos dados de aquisição de temperatura e os dados de rotação e força de soldagem, conforme a Figura 4.57.

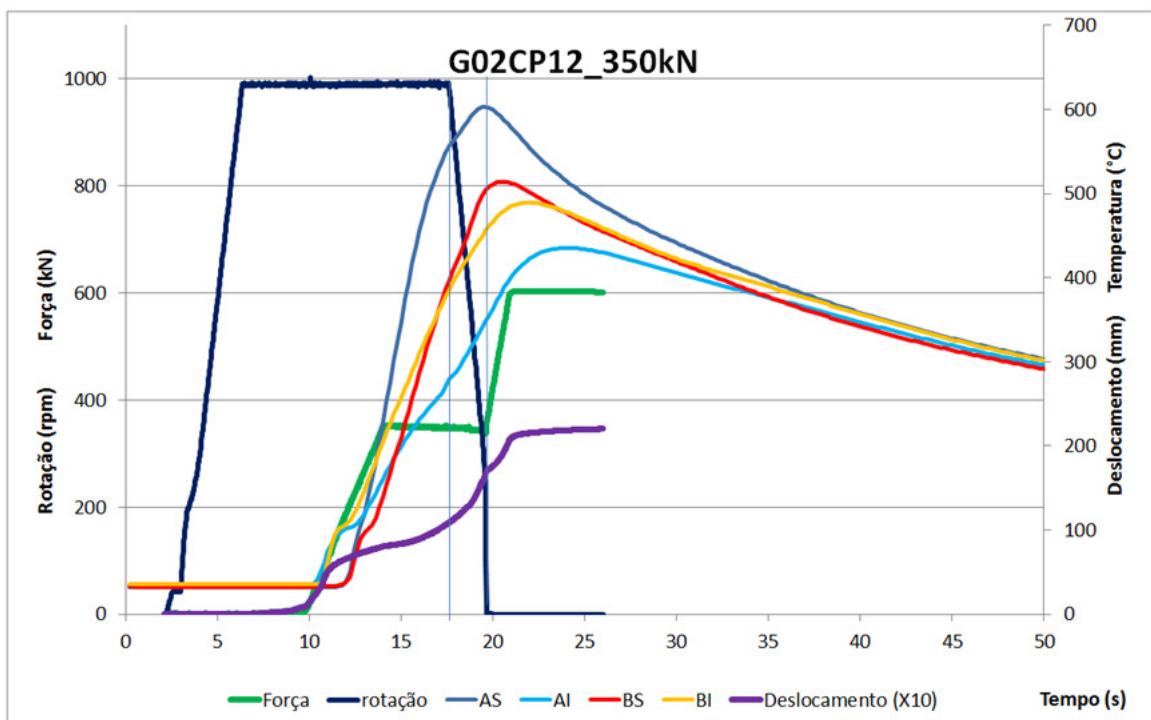


Figura 4.57 - Cruzamento de dados de temperatura força e rotação.

Nesta figura pode-se observar que a inflexão da curva de temperatura do termopar AS ocorre momentos antes da parada da rotação, aproximadamente 0,2 s, e a frenagem demorou em torno de 2 s. No resfriamento os termopares superiores começam a medir o decaimento de temperatura antes dos termopares médios e inferiores.

Para início da soldagem, os termopares inferiores começam a medir temperatura momentos antes dos médios e superiores, como observado na Figura 4.58.

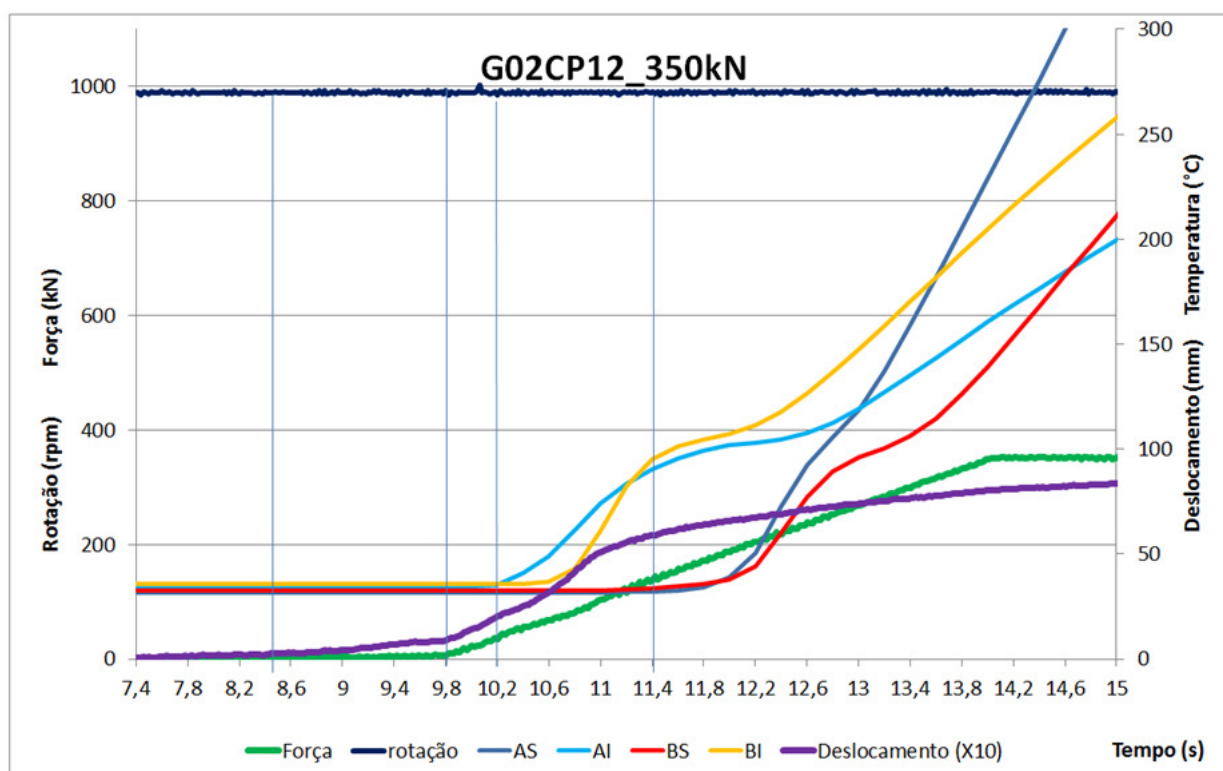


Figura 4.58 – Ampliação da região de início de soldagem.

Nestas figuras pode-se observar que no início da pré-carga ocorreu em 8,5 s e o início da rampa ocorreu em 9,8 s, depois de 0,4 s houve um aumento da temperatura nos termopares AI e BI e posteriormente em 11,4 s os outros termopares começam a medir o aumento na temperatura. Isto ocorre porque o início de soldagem há apenas uma região de aquecimento que é a região inferior da base e mais próxima dos termopares inferiores. Com o aumento da área de soldagem os termopares superiores começam a medir uma diferença na temperatura em aproximadamente 1,2 s após os termopares da base.

Na aquisição da temperatura da rebarba com o pirômetro foram gerados vídeos para a captação dos valores máximos mostrados no visor em cada soldagem. A Figura 4.59 mostra o momento em que a rebarba começa a sair da região de solda durante uma soldagem e na Figura 4.60 observa-se a captação da temperatura máxima no visor do pirômetro.



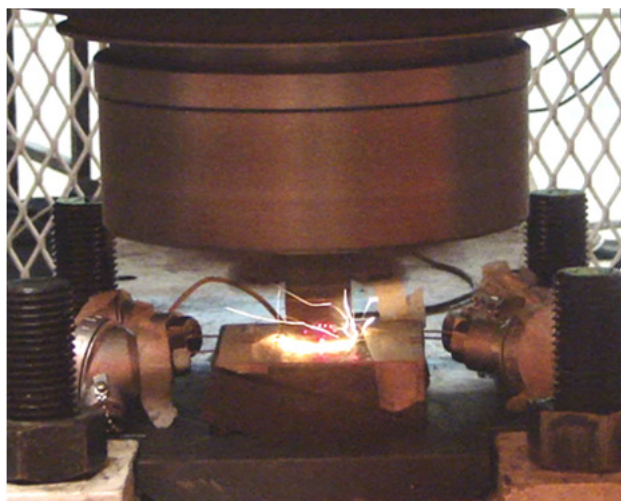


Figura 4.59 – Surgimento da rebarba durante a soldagem.



Figura 4.60 - Máxima temperatura na soldagem do G03CP08.

A temperatura mostrada é 874,9 C durante a soldagem do corpo de prova G03CP08 e foi a maior temperatura registrada nas soldagens em que houve aquisição de temperatura com pirômetro.

As temperaturas adquiridas com o pirômetro encontram-se na Tabela 4.7, onde se pode observar a temperatura relacionada com força de soldagem. Esta tabela foi gerada a partir dos dados adquiridos dos corpos de provas válidos. Os corpos de prova válidos foram os que geraram rebarba suficiente para que a posição da mira do pirômetro permitisse uma aquisição satisfatória.

Tabela 4.7 - Temperaturas observadas em vídeo e adquiridas com pirômetro.

Identificação	Força (kN)	Temp. Max (°C)
G03CP08	250	875
G03CP10	350	552
G03CP12	250	872
G03CP14	350	620
G03CP22	350	524

A aquisição da temperatura da rebarba através dos termopares é mais complexa, pois para uma boa aquisição os termopares devem manter um contato com a rebarba na finalização da solda. Das aquisições realizadas os melhores gráficos gerados foram os dos corpos de prova da Figura 4.61 e Figura 4.62. No primeiro, os termopares mantiveram o contato e no segundo corpo de prova o termopar do canal CH02 ficou aderido à rebarba.

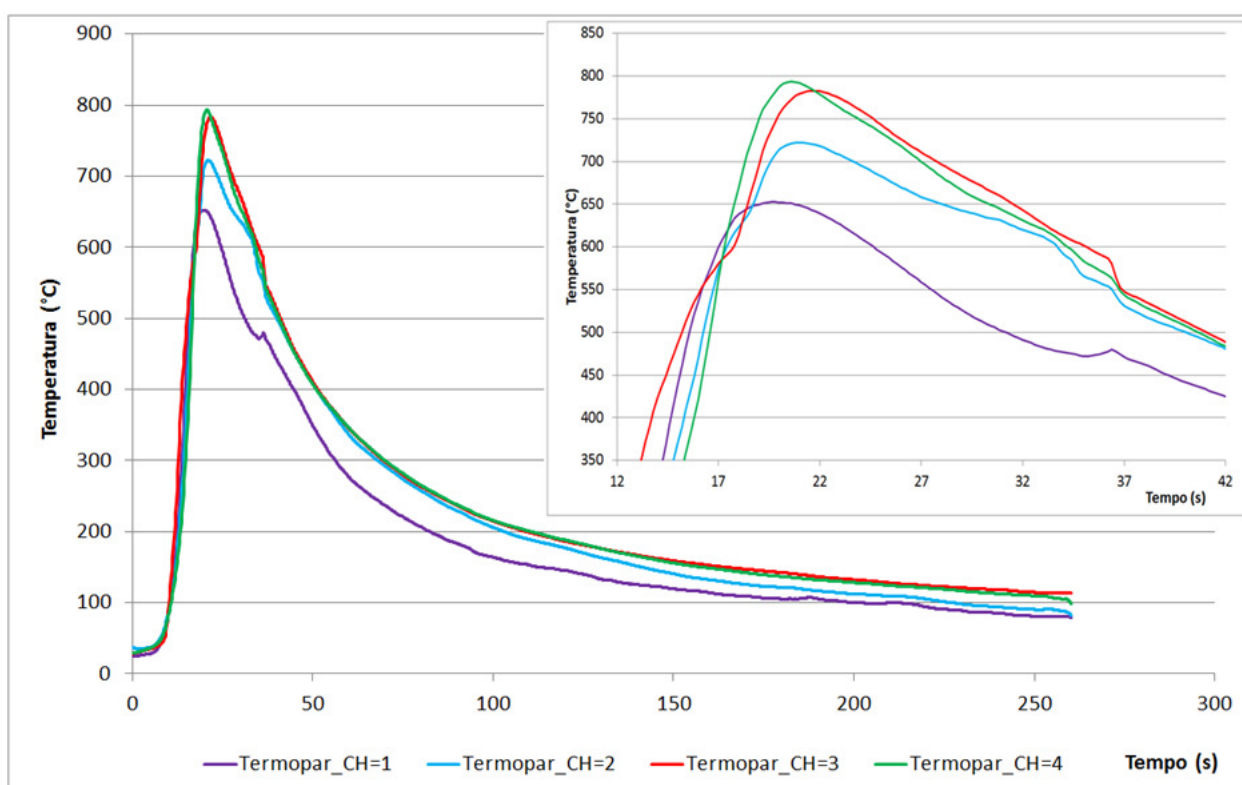


Figura 4.61 –Temperaturas da amostra G03CP08 soldada com 250 kN.

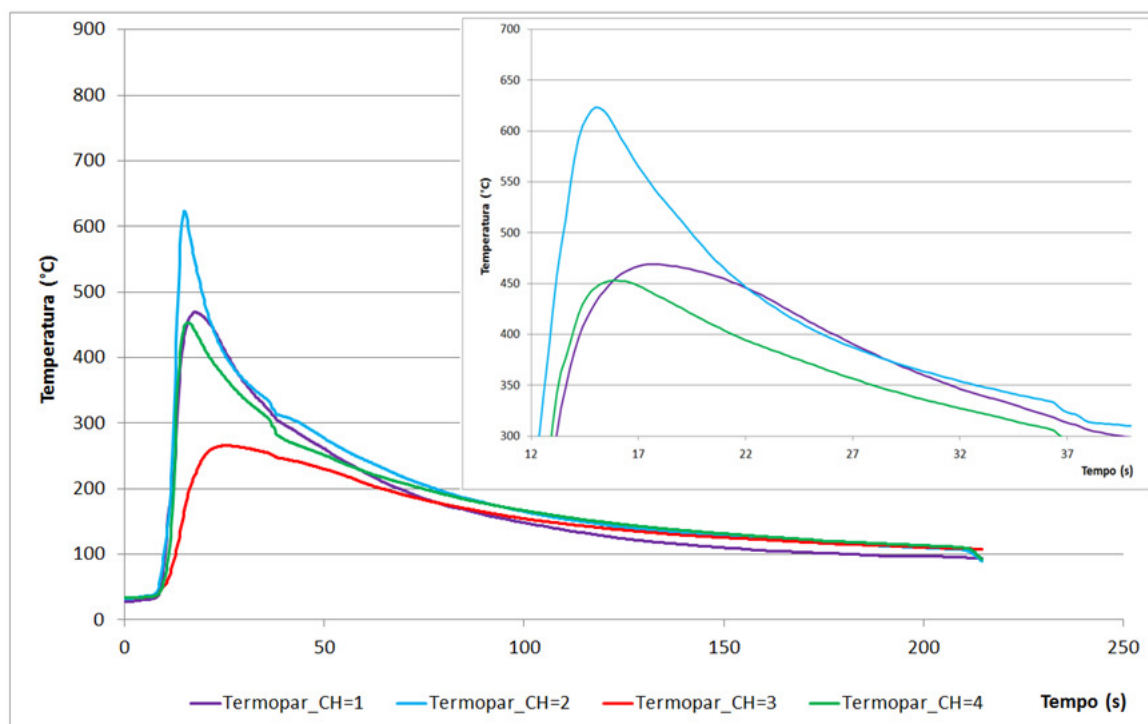


Figura 4.62 – Temperatura da amostra G03CP14 soldada com 350 kN.

#### 4.1.7 Metalografia.

Inicialmente são apresentadas as macrografias dos corpos de prova. Estas foram obtidas a partir dos corpos de prova utilizados na aquisição de temperatura e mostradas na Figura 4.63 onde aparecem as amostras soldadas com força de 300 kN em (a) e 350 kN em (b). Nestas macrografias pode-se observar a diferença entre as zonas afetadas pelo calor. O corpo de prova soldado com força baixa possui uma ZAC maior que o soldado com a força mais alta.

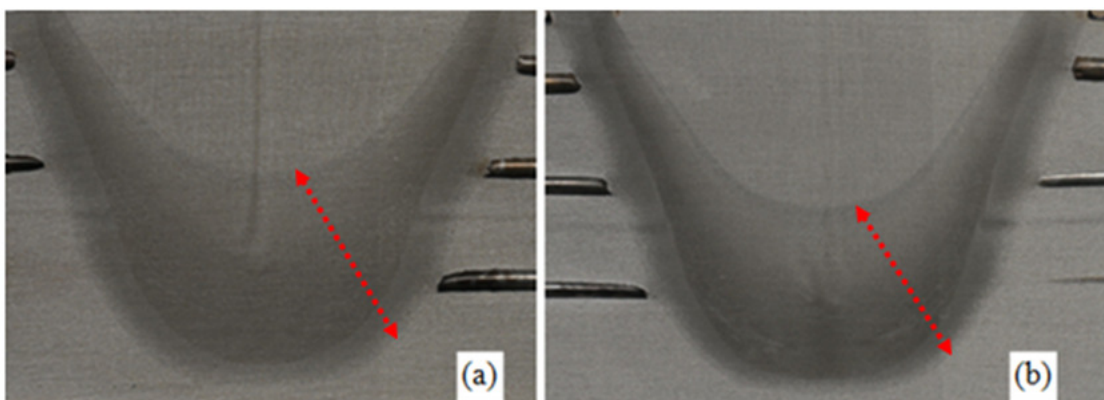


Figura 4.63 - Macrografia G01CP29 (a) e G01CP11 (b).

Para o corpo de prova soldado com 200 kN, Figura 4.64, pode-se observar uma ZAC maior que as amostras anteriores. Nesta figura pode-se observar em (b) que o fluxo de material deformou plasticamente a terminação do furo. Para o furo do termopar inferior a deformação do material da base foi descendente e para o furo superior a deformação foi ascendente.

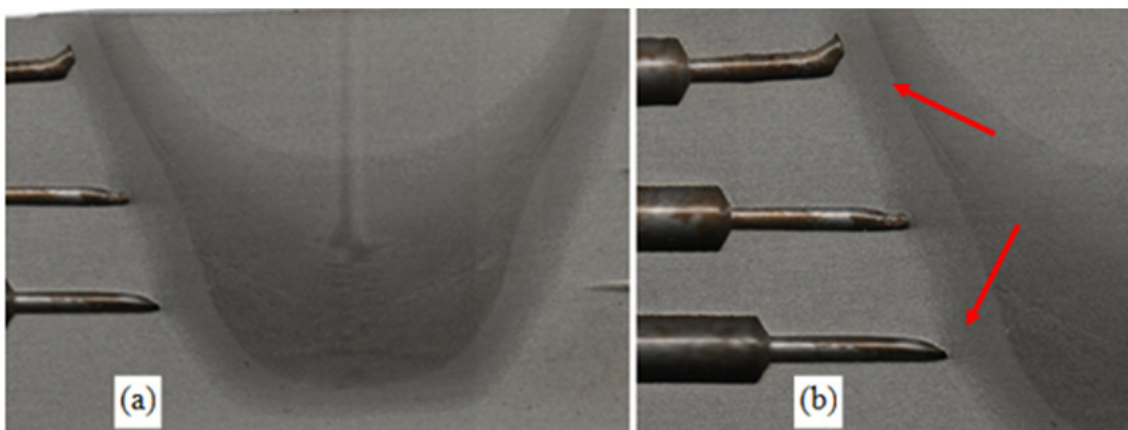


Figura 4.64 - Macrografia G01CP30 (a) e as deformações na furação em (b).

Na macrografia apresentada na Figura 4.65 é possível observar as linhas de segregação do material. Em “A” a linha de segregação proveniente da trefilação do pino e em “B” a linha de segregação proveniente da laminação da chapa.

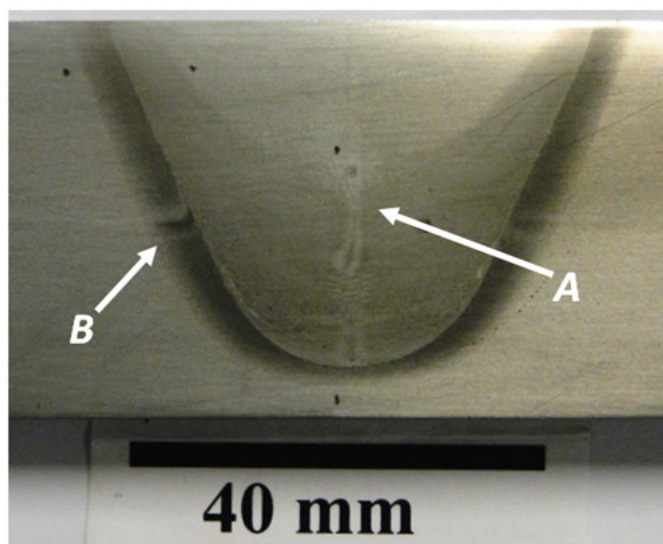


Figura 4.65 - Segregação originária da produção dos materiais.

Para as micrografias primeiramente foram realizadas as micrografias dos materiais utilizados para a confecção da base e do pino. A Figura 4.66 mostra a micrografia destes materiais com 100 vezes de aumento.

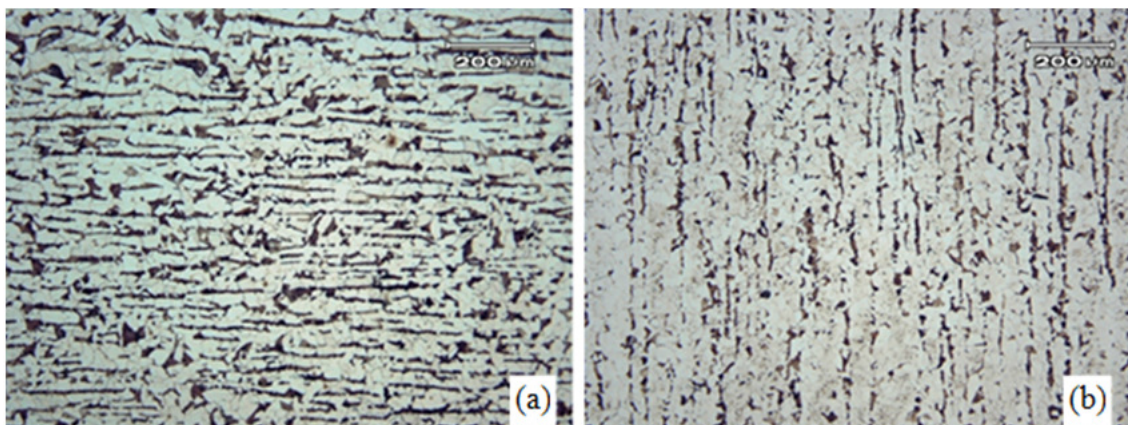


Figura 4.66 - Metalografia da base (a) e metalografia do Pino (b).

Basicamente encontra-se nestas micrografias perlita e ferrita, com grãos achatados e alinhados mostrando o sentido da laminação e da trefilação.

As micrografias das soldagens foram divididas em grupos de acordo com a força utilizada na soldagem, os grupos foram divididos nas amostras das soldagens com 200 kN, 300 kN e 350 kN

#### Micrografia das amostras soldadas com 200 kN.

Para as micrografias das amostras soldadas com 200 kN foram realizadas fotografias com aumento de 100 vezes para mostrar a zona de ligação entre o pino e a base, Figura 4.67.

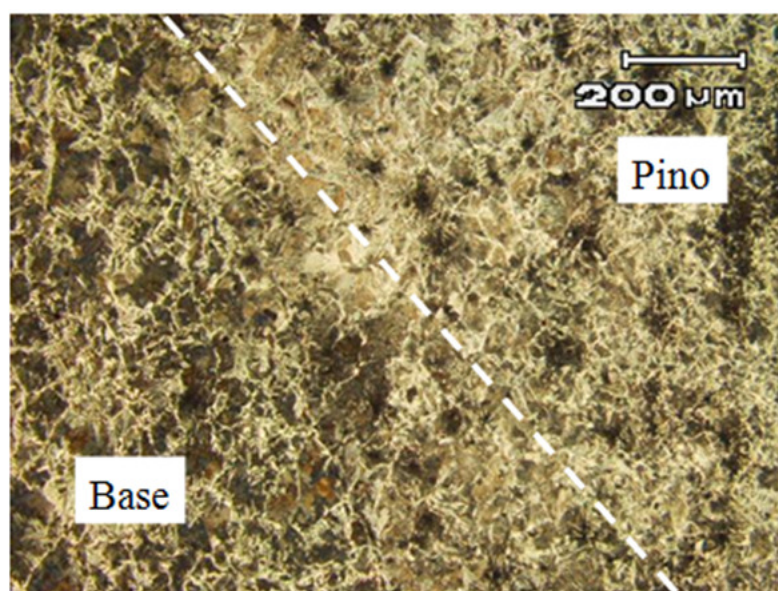


Figura 4.67 - Zona de ligação G01CP32 soldado com 200 kN.

Para uma visualização da morfologia encontrada nesta soldagem foram realizadas fotografias com aumento de 500 vezes como visto na Figura 4.68.



Figura 4.68 - G01CP32 ZAC do pino soldado com 200 kN.

Estas mesmas morfologias são encontradas no material da base e no pino da amostra G01CP31 soldada com 200 kN, conforme a Figura 4.69.

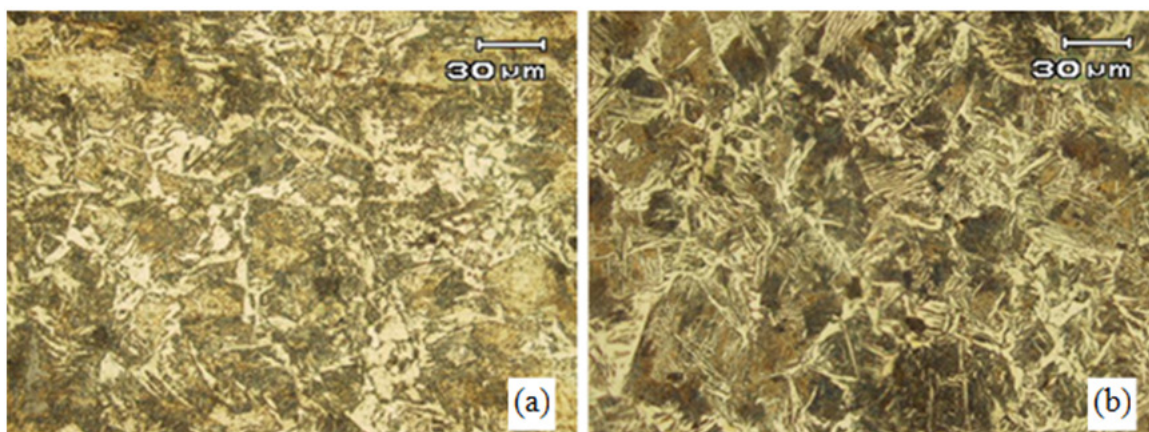


Figura 4.69 - G01CP31 ZAC do pino (a) e G01CP31 ZAC da base em (b).

#### Micrografia das amostras soldadas com 300 kN.

Para as micrografias das amostras soldadas com 300 kN, a fotografia com aumento de 100 vezes mostrando a zona de ligação entre o pino e a base está na Figura 4.70.

A Figura 4.71 mostra uma fotografia com aumento de 500 vezes da zona afetada pelo calor do pino G01CP14.

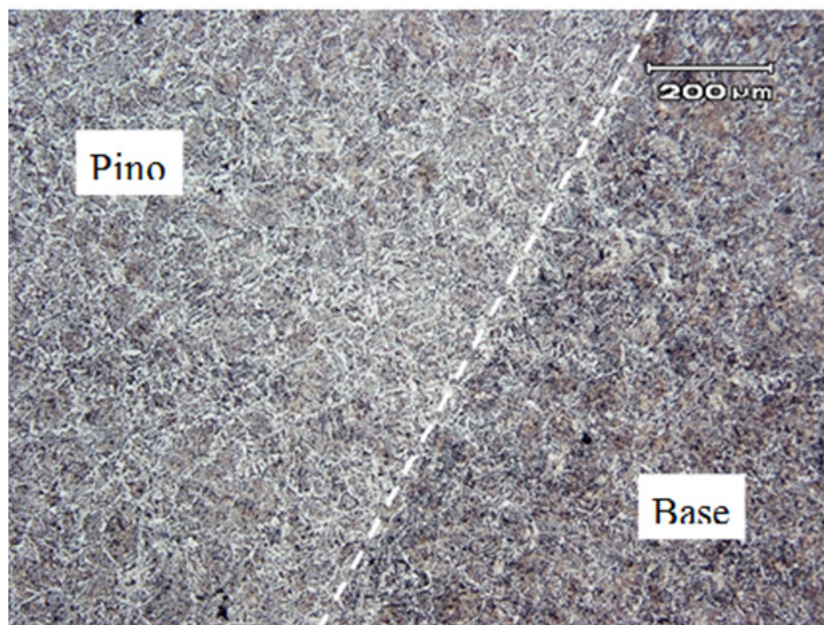


Figura 4.70 - Zona de ligação G01CP14 soldado com 300 kN.



Figura 4.71 - G01CP14 ZAC do pino soldado com 300 kN.

Estas mesmas morfologias são encontradas tanto no material da base quanto no pino do corpo de prova G01CP25 soldado com 300 kN, conforme a Figura 4.72.

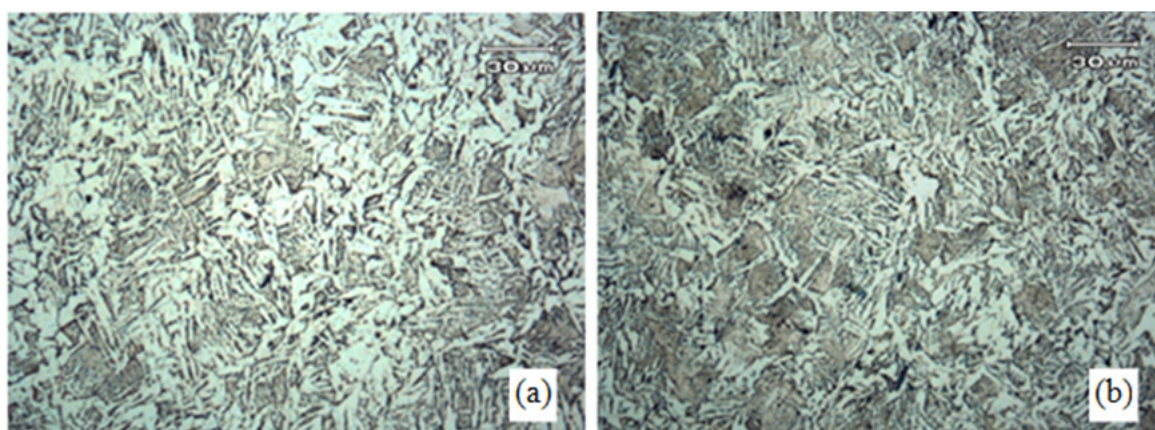


Figura 4.72 - G01CP25 ZAC do pino (a) e G01CP25 ZAC da base em (b).

#### Micrografia das amostras soldadas com 350 kN.

Nas micrografias das amostras soldadas com 350 kN a zona de ligação entre o pino e a base é revelada através de uma fotografia com aumento de 200 vezes, conforma a Figura 4.73.

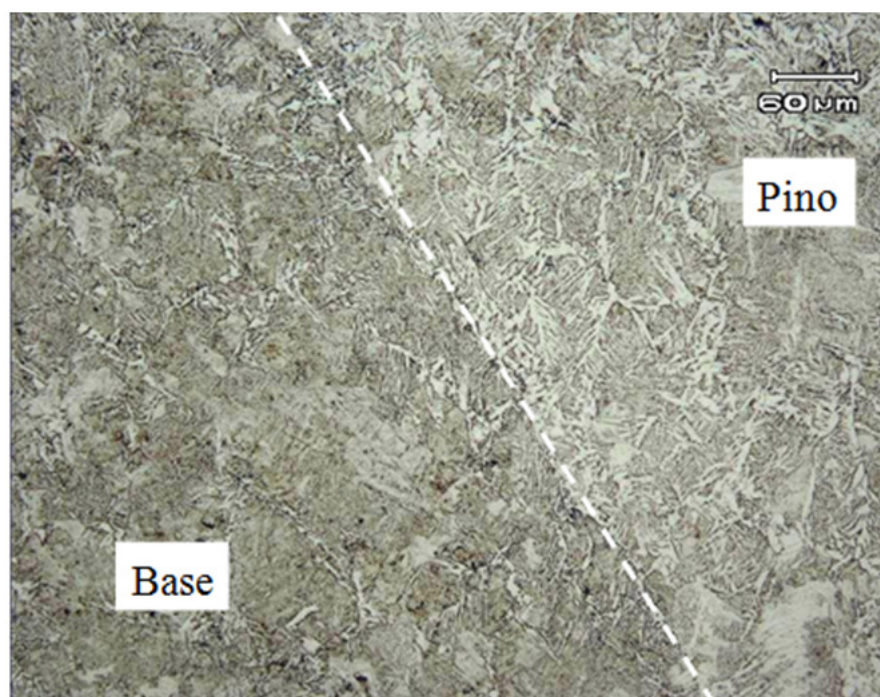


Figura 4.73 – Zona de ligação do G01CP09 soldado com 350 kN.

A fotografia com aumento de 500 vezes da zona afetada pelo calor do pino G02CP09 está na Figura 4.74. Estas mesmas morfologias são encontradas tanto no material da base quanto no pino do corpo de prova G01CP10 soldado com 350 kN, conforme a na Figura 4.75.





Figura 4.74 - G02CP09 ZAC pino soldado com 350 kN.

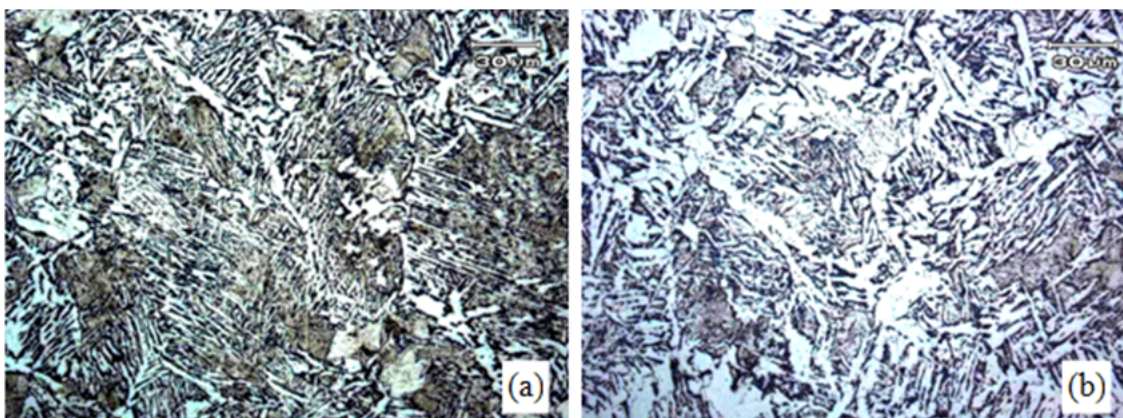


Figura 4.75 - G02CP10 ZAC pino em (a) e G02CP10 ZAC da base em (b).

## 4.2 Validação da Máquina para outras Geometrias

A seguir serão apresentados os testes realizados para outras geometrias, que no caso, foi a utilização da MPF1000 para a realização de soldagens para união de tubos.

### 4.2.1 Tubo com chapa.

A soldagem de tubo e chapa foi realizada através de uma chapa com espessura de 25 mm, onde foi usinado um canal que serve como guia para o tubo. Na Figura 4.76 observa-se o tubo e a chapa.

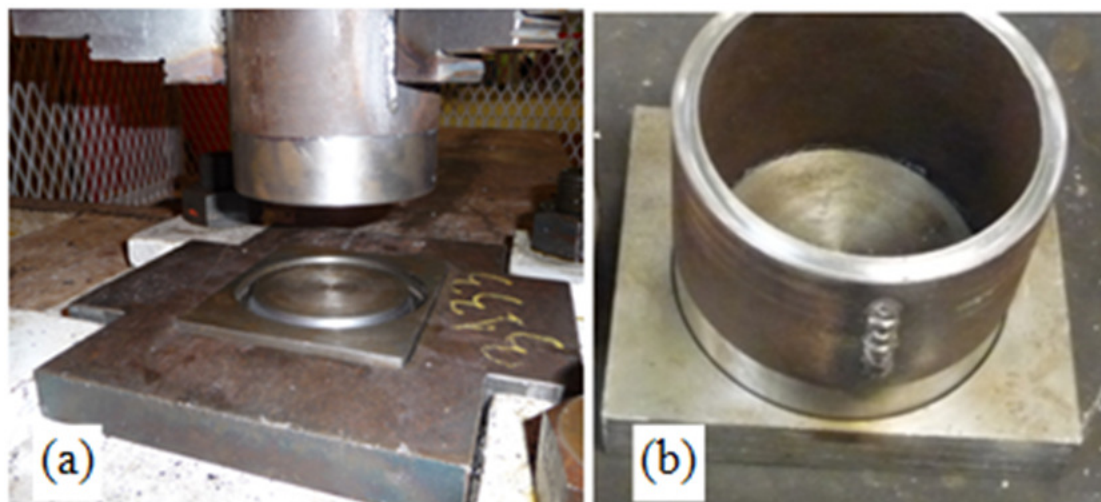


Figura 4.76 – Fixação na máquina em (a) e tubo soldado com chapa em (b).

A soldagem não foi bem sucedida devido a um erro na programação. O erro cometido está no parâmetro de consumo (*burnoff*) sendo muito pequeno. Antes que o tubo atingisse o patamar de soldagem já ocorreu o consumo do material, assim o tubo sofreu um travamento antes do esperado. Na Figura 4.77 pode-se observar a aquisição dos parâmetros para esta configuração.

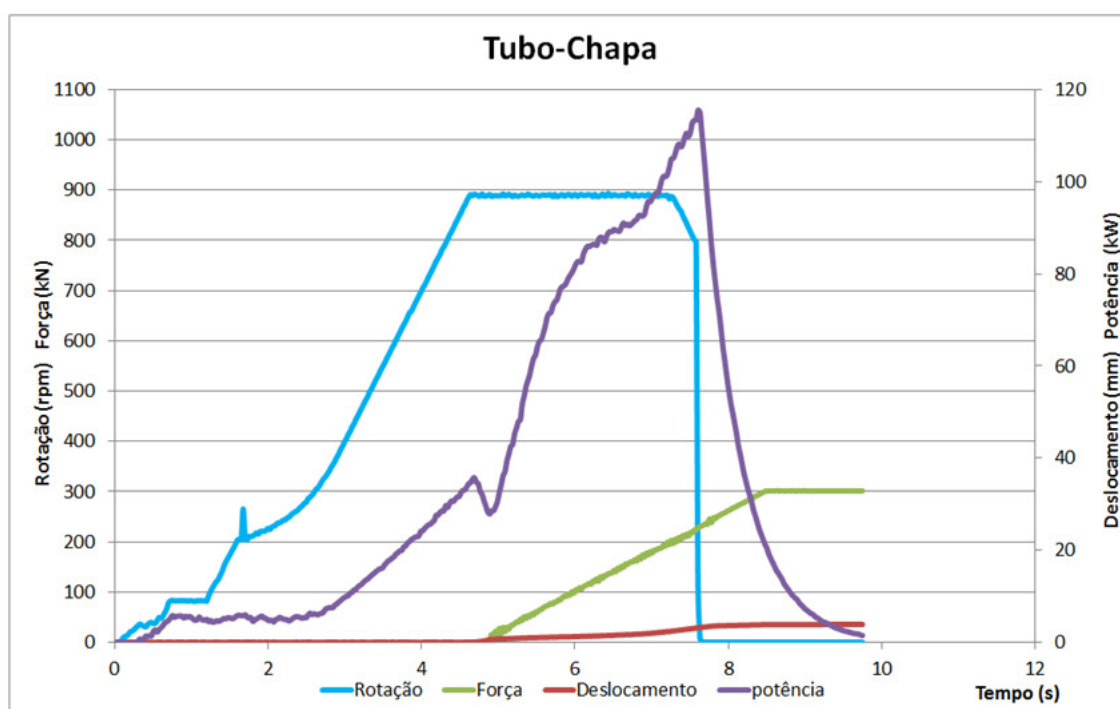


Figura 4.77 – Soldagem de amostra com tubo e chapa.

#### 4.2.2 Tubo com tubo.

Para a realização da soldagem entre tubos foi realizada uma usinagem nos tubos de modo que houvesse um chanfro em “V” positivo em um tubo e negativo no outro, formando um encaixe entre os mesmos, conforme a Figura 4.78.



Figura 4.78 – Usinagem dos tubos para soldagem tubo com tubo.

Esta soldagem também não foi bem sucedida, mas com o erro oposto ao anterior. O erro neste caso foi o excesso de *burnoff*. Na Figura 4.79 pode-se observar a soldagem entre tubos. Em (a) inicia-se o processo de soldagem, em (b) o consumo de material foi em excesso e pela falta de rigidez lateral da máquina houve um desalinhamento entre os tubos.

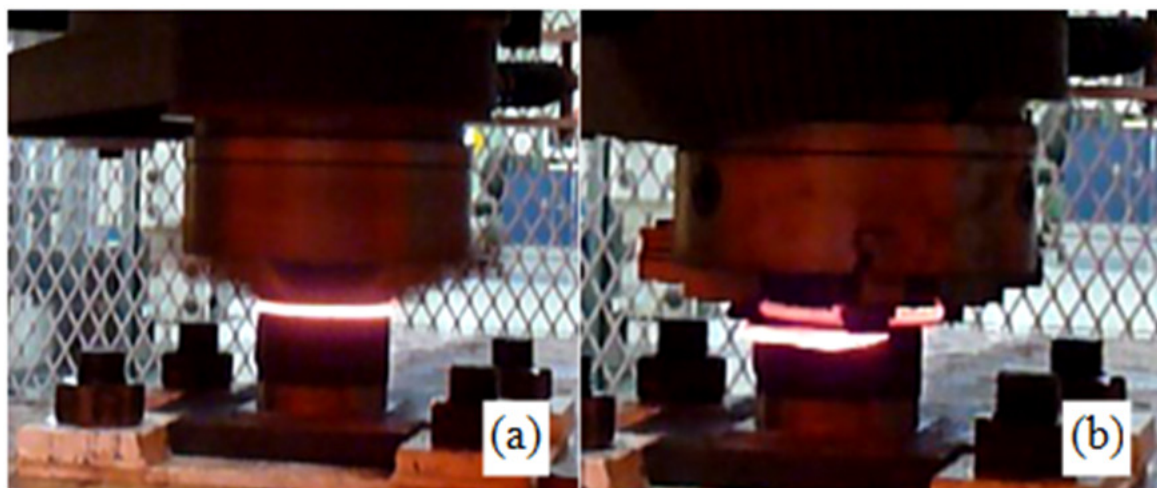


Figura 4.79 – Início da soldagem (a) e desalinhamento da máquina (b).

Na Figura 4.80 pode-se observar a aquisição dos parâmetros para a soldagem de tubo com tubo.

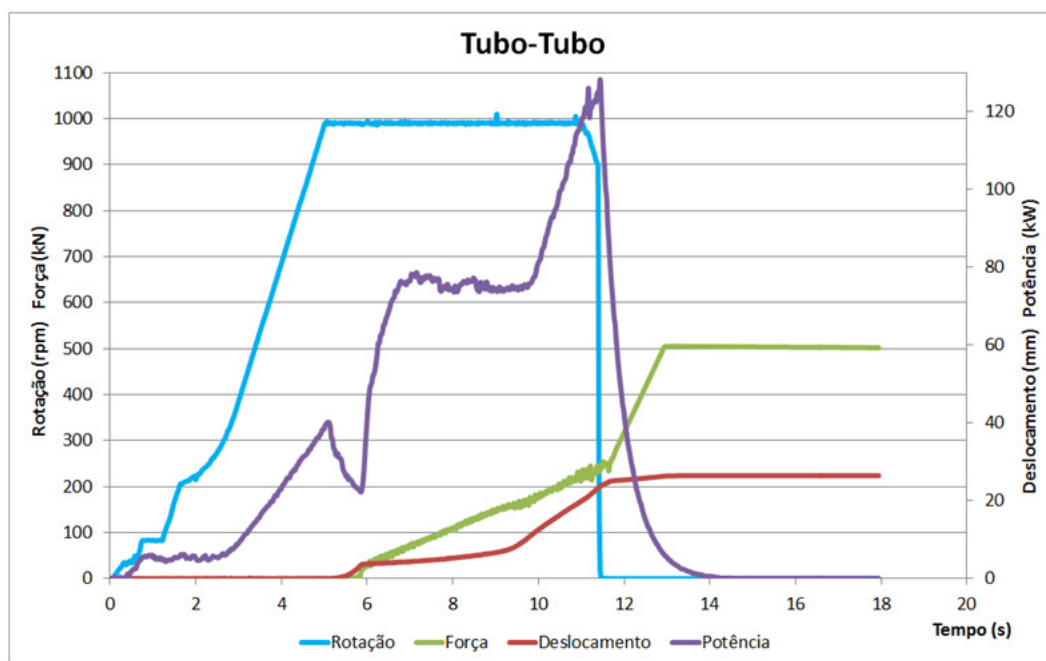


Figura 4.80 - Aquisição dos parâmetros de soldagem de tubo com tubo.

#### 4.2.3 Tubo anel tubo.

Antes da realização das soldas entre tubo-anel-tubo a máquina foi modificada. Para a modificação foram projetadas novas estruturas das guias de deslocamento vertical da máquina, aumentando-se a rigidez lateral e possibilitando as soldagens com tubos.

O objetivo da soldagem de tubo-anel-tubo é a união entre os tubos. Para a realização destas soldas entre os tubos foi inserido um anel que serve como consumível. O anel utilizado foi produzido a partir de uma chapa retangular e com usinagem de sulcos para servirem de guias para o tubo, conforme a Figura 4.81.



Figura 4.81 – Usinagem do anel para a soldagem tubo-anel-tubo.

A base da máquina foi modificada. Foi usinado um furo do diâmetro do tubo, onde é inserido o tubo inferior, após coloca-se o anel a ser soldado sobre ele e por fim é inserido o tubo superior na máquina, como pode ser observado na Figura 4.82. Esta configuração foi projetada de modo que a montagem permita a soldagem de um tubo no anel enquanto que o outro tubo sirva como apoio. Posteriormente inverte-se a posição e o tubo soldado servirá de apoio para que o segundo tubo seja soldado realizando-se assim as duas soldas de tubos no anel.



Figura 4.82 – Sequencia de montagem do tubo-anel-tubo.

Para estas soldagens foram utilizadas rotações de 1200 rpm, forças de 200 kN para a soldagem e 300 kN para o recalque.

Para a soldagem do primeiro tubo no anel foi utilizado um parâmetro de consumo de material (*burnoff*) de 2 mm Na Figura 4.83 está o gráfico da aquisição dos parâmetros utilizados.

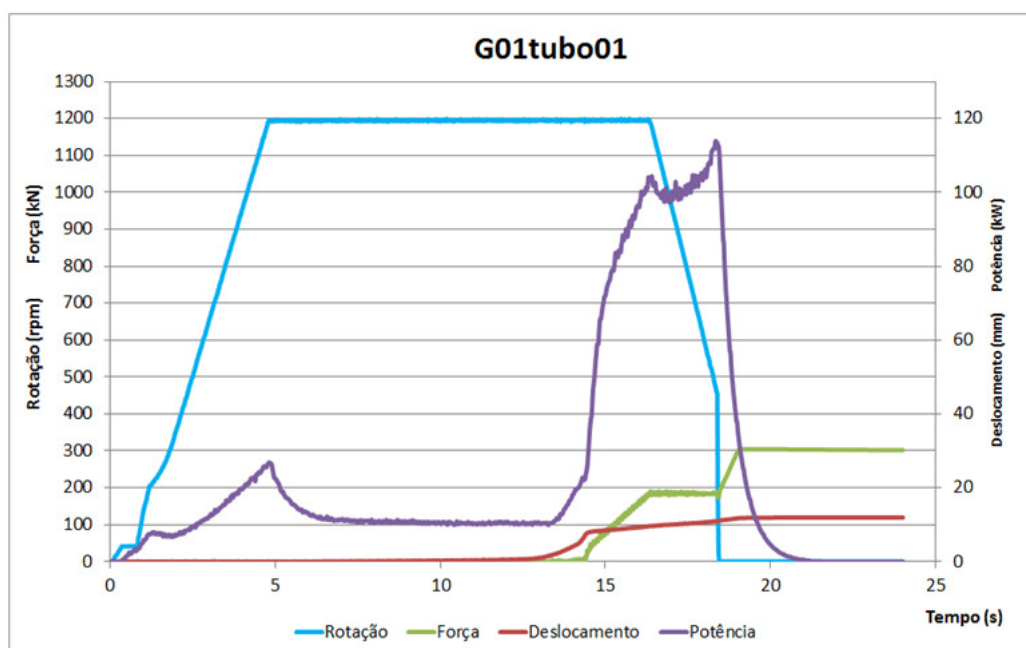


Figura 4.83 - Soldagem do primeiro tubo no anel.

Para a soldagem do segundo tubo no anel foi utilizado um parâmetro de consumo de material de 5 mm. Na Figura 4.84 observa-se o gráfico da aquisição dos parâmetros utilizados.

Neste gráfico pode-se observar que a potência utilizada para a soldagem praticamente atingiu a potência máxima do motor (132 kW). A frenagem ocorreu de forma abrupta provocando uma sobrecarga no sistema e rompendo a correia dentada.

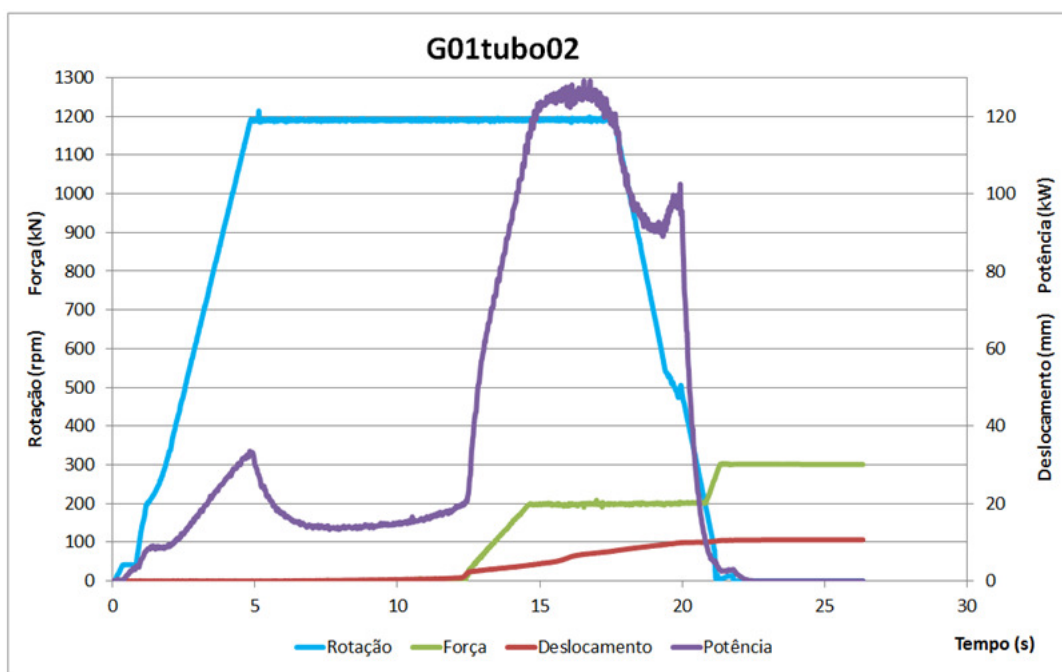


Figura 4.84 - Soldagem do segundo tubo no anel.

Na Figura 4.85 em (a) quase não é possível observar-se a rebarba da primeira solda realizada. Em (b) como o consumo de material foi maior a rebarba é nitidamente saliente.



Figura 4.85 – Rebarba para soldas com 2 mm em (a) e com 5 mm em (b).

Nas Figura 4.86 e Figura 4.87 encontram-se as macrografias do perfil de solda entre os tubos e o anel. Nestas figuras pode-se perceber a diferença entre as rebarbas e a forma com que o material foi projetado para fora da zona de soldagem.

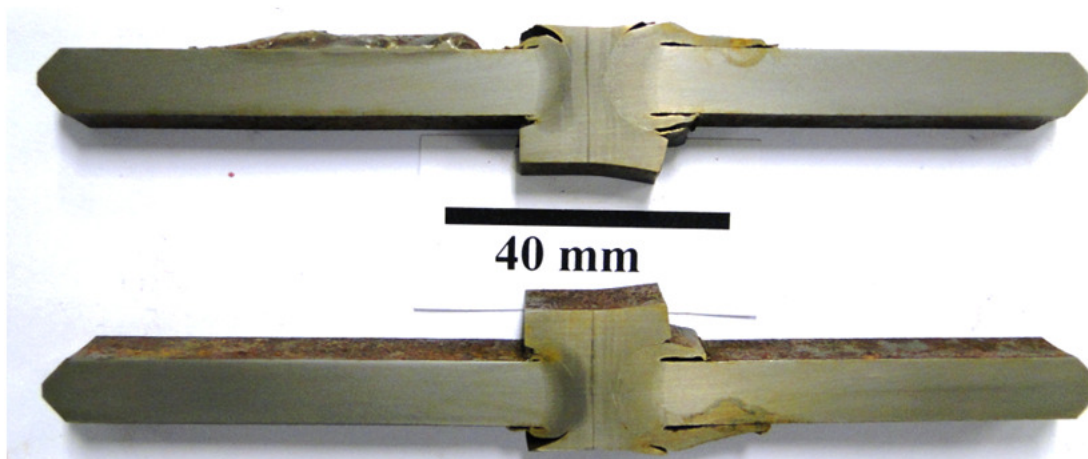


Figura 4.86 – Macrografia do perfil de soldagem entre tubo-anel-tubo.

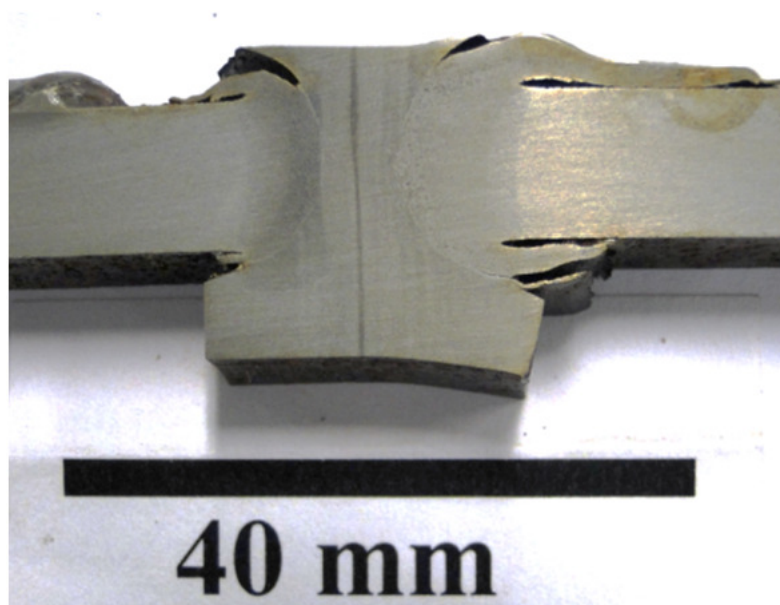


Figura 4.87 – Diferenças entre as rebarbas na soldagem entre tubo-anel-tubo.

## 5.0 AVALIAÇÃO GLOBAL DOS RESULTADOS

Pelas análises realizadas com diferentes programações foi possível verificar que a programação e controle do processo são os fatores mais importantes para a soldagem por fricção entre os materiais.

Nos resultados observados, parâmetros como rampa de carregamento de força influenciam no fluxo do material deformado e no atrito, podendo criar defeitos nas interfaces de soldagem.

Os parâmetros de força de soldagem influenciaram no tempo de soldagem e na formação de rebarba e, como consequência, na temperatura atingida durante o processo. A temperatura por sua vez, influencia na morfologia da microestrutura dos materiais.

Através de análises dos corpos de prova utilizados, pode-se constatar que soldas com força de 300 kN apresentaram melhores resultados do que os corpos de prova soldados com forças de 350 kN e 200 kN.

Nesta máquina, soldas com pinos consumíveis de 38,1 mm e utilização de forças abaixo de 100 kN, os resultados sofrem interferências do atrito no sistema de deslizamento e guiamento, gerando medidas falsas de leitura da célula de carga. Para forças elevadas (acima de 350 kN) a pressão aplicada no pino provoca a sua deformação plástica, assim os valores medidos no *lvdt* sofrem esta influência registrando valores incorretos. Estes resultados influenciam na dispersão dos valores de consumo do pino e repetitividade e produtividade das soldas. Para isto, nas soldagens devem ser consideradas as tensões aplicadas nos materiais.

Nas soldas realizadas, quanto maior a força de soldagem menor será o tempo do ciclo, ou seja, quanto maior a pressão, maior o atrito do pino com a base, e assim haverá um consumo mais intensificado do pino. Isto foi observado nas análises das aquisições de dados dos corpos de prova soldados com forças de soldagem 200, 250, 300 e 350 kN, nas quais



demonstraram diferenças de até 11 mm no consumo de pino. Para forças menores, a pressão de atrito se torna pequena, em resultado o tempo do ciclo será prolongado para se atingir o consumo do pino até o deslocamento previsto. O atrito gera calor que aumenta a temperatura do corpo de prova. Quando é realizado o recalque haverá uma maior penetração do pino na base pela decorrência da plastificação provocada pela temperatura.

Nas aquisições de temperatura foi possível observar algumas particularidades. A primeira é que quando o pino inicia a pré-carga de soldagem há um aumento nas temperaturas dos termopares posicionados na região inferior da base (AI e BI) devido ao atrito de contato inicial resultante da geometria utilizada. Para as temperaturas dos termopares superiores (AS e BS) só haverá um aumento expressivo quando se inicia a rampa de soldagem e por fim a temperatura continua em elevação até que haja inexistência da rotação.

Nos dados de microdureza um fato importante ocorrido é que para a maioria dos corpos de prova a dureza do pino foi aumentada em relação ao material base. Esse fato deve-se pela deformação aplicada durante o recalque. A força de 600 kN aplicada equivale a 526 MPa considerando-se apenas a seção transversal do pino. Este valor está acima da tensão de escoamento do material do pino. Geralmente para aços ABNT A36 a tensão de escoamento está em torno de 250 MPa.

Na metalografia realizada nas três forças de soldagens foram observadas as mesmas morfologias, estas morfologias tendem a ser decorrentes pelo efeito da temperatura e deformação plástica e com a alta taxa de resfriamento.

Nas soldagens com 200 kN a temperatura atinge valores mais elevados e próximos a 900°C como mostrado pelas aquisições de temperatura. Por ser uma soldagem mais demorada há um grande aporte de calor e isto pode ser o que influenciou a micrografia a ter uma microestrutura menos dúctil. O resultado foram as trincas observadas nos ensaios de dobramento. Para as soldagens com 300 kN há um menor aporte de calor podendo ser a resposta para os bons resultados no dobramento dos quais apenas em uma amostra ocorreu a trinca. Nas soldagens com 350 kN o aporte de calor é baixo, porém ocorre uma alta taxa de resfriamento entre a interface de soldagem com a base. Esta alta taxa de resfriamento pode ser a causa de uma microestrutura que origine trincas nas interfaces de soldagem e na ZAC, mostrando ser a causa principal da grande quantidade de trincas observadas nos corpos de prova submetidos ao dobramento.

Nas geometrias soldadas com tubos foi percebida a excessiva potência na rotação utilizada para serem produzidas as soldas. A consequência desta potência elevada foi o rompimento da correia de transmissão.

Para este tipo de soldagem é necessária uma modificação na relação de transmissão da rotação entre o motor e o eixo de rotação. Para um cálculo aproximado a relação de velocidade superficial em um pino de 38,1 mm a 1.000 rpm é de 119 m/min. Para utilizar a mesma velocidade superficial em um tubo com 114 mm de diâmetro a rotação deveria ser aproximadamente 330 rpm. Sendo assim, a relação de transmissão deveria ser reduzida em pelo menos três vezes. Com uma transmissão mais reduzida a força aplicada na correia será reduzida, sendo possível este tipo de soldagem.

## 6.0 CONCLUSÕES

A Máquina de Soldagem por Fricção (MPF1000) é um equipamento desenvolvido que representa ser uma importante ferramenta capaz de proporcionar uma grande variabilidade de programações para a realização de soldagens por fricção.

Pela análise das soldas realizadas e as mudanças de parâmetros obtidos para as geometrias soldadas é aceitável que a máquina de soldagem por fricção MPF 1000 é capaz de realizar soldagens com múltiplas possibilidades na programação, sendo assim é um importante equipamento voltado para a pesquisa e para a descoberta de novos métodos e processos de união de materiais.

A Máquina de Processos por Fricção (MPF1000) produziu bons resultados nas soldagens processando-se pinos em chapas. Através do aprimoramento do programa de controle foi possível produzir soldas por fricção, sem defeitos de falta de preenchimento e com boa adesão entre pino e base.

A MPF100 possui elevada rigidez estrutural observado nas simulações dos componentes, esta rigidez é importante para a soldagem, pois vibrações na estrutura da máquina podem ocasionar defeitos na soldagem ou desalinhamento entre os componentes a serem unidos.

Os resultados e análises das soldagens realizadas, a repetitividade e possibilidade de reprodução das soldas, comprovam a eficiência do equipamento projetado.

O controle dos parâmetros da MPF1000 é muito versátil e pela sua programação é possível planejar soldagens em diversos componentes. A velocidade de processamento no comando e leitura de resposta a garantem uma admirável precisão nestas soldagens.

A MPF 1000 é uma importante ferramenta para estudos em soldagens por atrito. A capacidade da força de soldagem, rotações e a grande disponibilidade e possibilidade de

recursos de programação ainda permitem que a MPF 1000 promova estudos com outras geometrias, abrindo caminho para estudos futuros ainda não explorados.

## 7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Abaixo são listadas possibilidades para estudos futuros:

- Continuação dos testes e realização de ensaios de tração;
- Modificações na máquina para estudos em outras geometrias de soldagem;
- Modificações na relação de transmissão para soldagens com maior diâmetro;
- Modificações da máquina com a adaptação de um sistema de embreagem para evitar torque abrupto na frenagem evitando a sobrecarga da correia;
- Estudos com materiais com teor de carbono mais elevado e materiais microligados;
- Estudos com outras forças de soldagem;
- Estudos com outras geometrias de pinos e furos;
- Estudos com soldagem utilizando pré-aquecimento;
- Reparos de componentes mecânicos utilizando a MPF1000;
- Modificações na programação para realização de outras soldagens;
- Soldagens aplicando somente força de soldagem sem recalque.

## 8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Modenesi, Prof. Paulo J. e Marques, Prof. Paulo Villani.** *Soldagem I - Introdução aos Processos de Soldagem.* Belo Horizonte : Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
2. <http://www.weldinghistory.org/whistoryfolder/welding/index.html>. [Online] 23 de 11 de 2009. [Citado em: 23 de 11 de 2009.]
3. [www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br). *Infosolda*. [Online] [Citado em: 12 de 11 de 2009.] [www.infosolda.com.br/download/15dam.pdf](http://www.infosolda.com.br/download/15dam.pdf) - <http://www.infosolda.com.br/download/61den.pdf>.
4. <http://www.mecatronicafacil.com.br/artigos/soldagem01>. [Online] [Citado em: 26 de 03 de 2008.] <http://www.mecatronicafacil.com.br/artigos/soldagem01>.
5. **UFMG.** [Online] [Citado em: 06 de 12 de 2006.] <ftp://www.demec.ufmg.br/ema097solda/1-FundSold1.pdf>.
6. **Ramalho, José Pinto.** [infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br). <http://www.infosolda.com.br>. [Online] [Citado em: 17 de 06 de 2009.] <http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol03.pdf>.
7. *ASM Metals Handbook, Vol 6- Welding, Brazing and Soldering.* 1993.
8. **Marques, Paulo V., Modenesi, Paulo J. e Bracarense, Alexandre Q.** *Soldagem - Fundamentos e Tecnologia.* Belo Horizonte : UFMG, 2009.
9. **Kou, Sindo.** *Welding Metallurgy - Second Edition.* New Jersey : A JOHN WILEY & SONS, INC., 2003.
10. **Universidade de Brasilia.** [www.unb.br](http://www.unb.br). *Universidade de Brasilia*. [Online] [Citado em: 25 de 11 de 2009.] [http://vsites.unb.br/ft/enm/vortex/ftp/TecMec2 /Selecao.pdf](http://vsites.unb.br/ft/enm/vortex/ftp/TecMec2/Selecao.pdf).

11. **Modenesi, Paulo J.** Normas e Qualificação em Soldagem. [Online] 01 de 2000. [Citado em: 27 de 11 de 2009.] [http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/procedimento\\_soldagem.pdf](http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/procedimento_soldagem.pdf).
12. **SubsTech.com.** <http://www.substech.com>. *www.substech.com*. [Online] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance\\_welding\\_r](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_r).
13. *Un video de automatización, brazos robóticos en un proceso industrial (robotic arms in an industrial process)*. [Online] <http://www.youtube.com/watch?v=CGzcK0JiV3c&feature=related>.
14. *Butt welding for wire*. [Online] [www.sohal.org](http://www.sohal.org). <http://www.youtube.com/watch?v=1SU6CoKPITU>.
15. <http://www.thefabricator.com>. *www.thefabricator.com*. [Online] <http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/comparing-flash-and-butt-welding>.
16. <http://facens.br>. *www.facens.br*. [Online] [http://facens.br/site/alunos/disciplinas/quimica/seminarios/2002/solda/INTRODUCAO\\_AOS\\_PROCESSOS\\_DE\\_SOLDAGEM.ppt](http://facens.br/site/alunos/disciplinas/quimica/seminarios/2002/solda/INTRODUCAO_AOS_PROCESSOS_DE_SOLDAGEM.ppt).
17. <http://www.dema.puc-rio.br>. *www.dema.puc-rio.br*. [Online] [http://www.dema.puc-rio.br/download/MET%202841\\_programa.pdf](http://www.dema.puc-rio.br/download/MET%202841_programa.pdf).
18. **Bracarense, Alexandre Q.** Soldagem por Centelhamento - Flash welding. *novell.demec.ufmg.br*. [Online] [ftp://novell.demec.ufmg.br/lrss/ProcessosSoldagem\\_Pos/TEXTOS/23Texto\\_FlashWelding.pdf](ftp://novell.demec.ufmg.br/lrss/ProcessosSoldagem_Pos/TEXTOS/23Texto_FlashWelding.pdf).
19. <http://www.thefabricator.com>. *www.thefabricator.com*. [Online] <http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/flash-butt-welding-of-pipe>.
20. <http://www.stcu.int>. *www.stcu.int*. [Online] [http://www.stcu.int/documents/publications/Current/Developing\\_High-Technology\\_Products.pdf](http://www.stcu.int/documents/publications/Current/Developing_High-Technology_Products.pdf).
21. **2009 FPE & Gatwick Fusion.** [www.fpe.co.uk](http://www.fpe.co.uk). *www.fpe.co.uk*. [Online] <http://www.fpe.co.uk/processes/friction-welding>.
22. **2010 KUKA Systems GmbH.** <http://www.kuka-systems.com>. *www.kuka-systems.com*. [Online] [http://www.kuka-systems.com/br/products/job\\_order\\_prod/devices/](http://www.kuka-systems.com/br/products/job_order_prod/devices/).
23. **Manufacturing Technology, Inc.** <http://www.mtiwelding.com/>. [Online] [Citado em: 18 de 10 de 2008.] <http://www.mtiwelding.com/>.
24. **Faria, Paulo E. e Bacarense, Alexandre Q.** *infosolda*. [www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br). [Online] 2003. [www.infosolda.com.br/artigos/prosol03.pdf](http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol03.pdf).
25. [www.wnplace.com](http://www.wnplace.com). *wnplace*. [Online] *wnplace design*. [http://www.wnplace.com/index\\_arquivos/friction01.htm](http://www.wnplace.com/index_arquivos/friction01.htm).

26. **Pinheiro, Gustavo A.** *Local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanisms and Assessment of Joint Properties*. Geesthacht : GKSS-Institute of Materials Research, 2008.
27. **Meyer, Axel.** *Friction Hydro Pillar Processing - Bonding Mechanism and Properties*. Geesthacht : GKSS Forschungszentrum - Institute for Materials Research, 2003. Dissertação.
28. **Bracarense, Alexandre Queiroz.** *Processo de Soldagem por Fricção*. s.l. : Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
29. **Nicholas, E.D.** *Friction Processing Technologies*. UK : Friction and Forge Processes Group, TWI Ltd, 2003.
30. **Faes, Koen, et al.** Springer-Verlag London Limited 2008. *springerlink Int J Adv Manuf Technol (2009) 43:982–992*. [Online] [Citado em: 11 de 12 de 2009.] <http://www.springerlink.com/content/t0364536k3625004/?p=97de7ddcc65645d4bdb050f7a09cadad&pi=0>.
31. **Thompson Co.** <http://www.thompson-friction-welding.co.uk>. [Online] Thompson Co. [Citado em: 13 de 12 de 2009.] [http://www.thompson-friction-welding.co.uk/pages/linear\\_friction\\_welding.html](http://www.thompson-friction-welding.co.uk/pages/linear_friction_welding.html).
32. **Frictec Co.** <http://www.frictec.co.uk>. [Online] Frictec Co. [Citado em: 13 de 12 de 2009.] <http://www.frictec.co.uk/frictec-whatifr.html>.
33. [www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk). [Online] The Welding Institute. [Citado em: 25 de 11 de 2009.] [http://www.twi.co.uk/content/friction\\_index.html](http://www.twi.co.uk/content/friction_index.html).
34. **Sederstrom, Jack H.** *Spot Friction Welding of Ultra High-Strength Automotive Sheet Steel*. s.l. : Brigham Young University, 2007.
35. **Wichita State University.** *Evaluation of Friction Stir Weld Process and Properties for Aircraft Application*. [The Joint Advanced Materials and Structures Center of Excellence]
36. **Gibson, Dave.** Brite-Euram ROBHAZ Project. [Online] [Citado em: 12 de 12 de 2009.] <http://www.gibo.demon.co.uk/robhaz/welding.html>.
37. **Pires, Raphael R.** *Efeito da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito*. Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
38. <http://www.abmbrasil.com.br>. [Online] [Citado em: 22 de 04 de 2008.] <http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/914237.pdf>.



39. **Kowalski, Guilherme V., et al.** *Efeito da carga axial nas soldas por fricção com pino consumível em aços*. [64° Congresso Anual da ABM – Internacional – Belo Horizonte] Porto Alegre : UFRGS, 2009.
40. **MTS**. <http://www.mts.com>. [Online] MTS Systems Corporation. [http://www.mts.com/downloads/100-123-143\\_FlextestSEandGT.pdf](http://www.mts.com/downloads/100-123-143_FlextestSEandGT.pdf).
41. **Weg Industrias SA**. Weg. <http://www.weg.net>. [Online] 2007. <http://www.weg.net/files/products>.
42. **Avancini, Luis G. F.** *Projeto de máquina para fabricar corpos de prova atravésde solda por fricção*. [Trabalho de diplomação] Porto Alegre : UFRGS, 2008.
43. **SKF do Brasil Ltda**. [www.skf.com.br](http://www.skf.com.br). *Rolamentos axiais autocompensadores de rolos*. [Online] [http://www.skf.com/skf/productcatalogue/jsp/extra/menuProductTables.jsp?link2=1\\_11\\_1&maincatalogue=1&lang=pt](http://www.skf.com/skf/productcatalogue/jsp/extra/menuProductTables.jsp?link2=1_11_1&maincatalogue=1&lang=pt).
44. **Materials, The American Society for Testing and**. *ASTM: E190 -Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds*. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States : The American Society for Testing and Materials, 92 (Reapproved 1997).
45. **Global**. [www.globalst.com.br](http://www.globalst.com.br). [Online] [http://www.globalst.com.br/bvg/en\\_mec/8.pdf](http://www.globalst.com.br/bvg/en_mec/8.pdf).
46. **HBM**. [Online] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. <http://www.hbm.com>. HBM.
47. **Colpaert, Prof. Hubertus**. *Metalografiados Produtos Siderúrgicos Comuns*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 6° Reimpressão-2000.

## 9.0 ANEXOS

Tabela 9.1 - Parâmetros para confecção de amostras com força menor.

Identificação	Programa	Rotação (rpm)	Força soldagem (kN)	Taxa de soldagem (kN/s)	Taxa de recalque (kN/s)	Deslocamento para início do recalque (mm)	Rot. p/ início recalque (rpm)	Recalque (kN)
G01cp01	1	1.000	300	40	100	força +(-3)	1000	600
G01cp02	1	1.000	300	60	100	força +(-2)	1000	600
G01cp03	1	1.000	300	60	100	força +(-1)	1000	600
G01cp04	1	1.000	300	80	200	força +(-1)	300	800
G01cp05	1	1.000	300	60	200	força +(-2)	200	600
G01cp06	2	1.000	300	80	200	zero a -10	200	600
G01cp07	2	1.000	300	80	200	zero a -10	200	600
G01cp12	2	1.000	300	80	200	zero a -10	200	600
G01cp13	2	1.000	300	80	200	zero a -10	200	600
G01cp14	2	1.000	300	80	200	zero a -10	200	600
G01cp25	2	1.000	300	80	300	zero a -10	200	600
G01cp26	2	1.000	300	80	300	zero a -10	200	600
G01cp28	2	1.000	300	80	300	zero a -10	200	600
G01cp29	2	1.000	300	80	300	zero a -10	200	600
G01cp30	2	1.000	200	80	300	zero a -10	200	600

Tabela 9.2 - Parâmetros para confecção das amostras de força maior.

Identificação	Programa	Rotação (rpm)	Força soldagem (kN)	Taxa de soldagem (kN/s)	Taxa de recalque (kN/s)	Deslocamento para início de recalque (mm)	Rot. p/ início recalque (rpm)	Recalque (kN)
G02CP01	1	1.000	400	40	100	força +(1)	1000	800
G02CP02	1	1.000	400	40	100	força +(1)	1000	800
G02CP03	1	1.000	400	100	200	força +(1)	100	800
G02CP07	2	1.000	400	80	200	zero a -10	200	800
G02CP08	2	1.000	350	80	200	zero a -10	200	600
G02CP09	2	1.000	350	80	200	zero a -10	200	600
G02CP10	2	1.000	350	80	200	zero a -10	200	600
G02CP11	2	1.000	350	80	200	zero a -10	200	600
G02CP12	2	1.000	350	80	200	zero a -10	200	600

Tabela 9.3 - Parâmetros de soldagem com a geometria secundária.

Identificação	Programa	Rotação (rpm)	Força soldagem (kN)	Taxa de soldagem (kN/s)	Taxa de recalque (kN/s)	Deslocamento para início recalque (mm)	Rot. p/ início recalque (rpm)	Recalque (kN)
G03CP08	2	1.000	250	80	200	zero a -10	200	600
G03CP09	2	1.000	300	80	200	zero a -10	200	600
G03CP10	2	1.000	350	80	200	zero a -10	200	600
G03CP11	2	1.000	200	80	200	zero a -10	200	600
G03CP11B	2	1.000	200	80	200	zero a -10	200	600
G03CP12	2	1.000	250	80	200	zero a -10	200	600
G03CP13	2	1.000	300	80	200	zero a -10	200	600
G03CP14	2	1.000	350	80	200	zero a -10	200	600
G03CP15	2	1.000	200	80	200	zero a -10	200	600
G03CP16	2	1.000	200	80	200	zero a -10	200	600
G03CP17	2	1.000	350	80	200	zero a -10	200	600
G03CP18	2	1.000	200	80	200	zero a -10	200	600
G03CP19	2	1.000	250	80	200	zero a -10	200	600
G03CP20	2	1.000	300	80	200	zero a -10	200	600
G03CP21	2	1.000	350	80	200	zero a -10	200	600
G03CP22	2	1.000	200	80	200	zero a -10	200	600
G03CP23	2	1.000	250	80	200	zero a -10	200	600
G03CP24	2	1.000	300	80	300	zero a -10	200	600

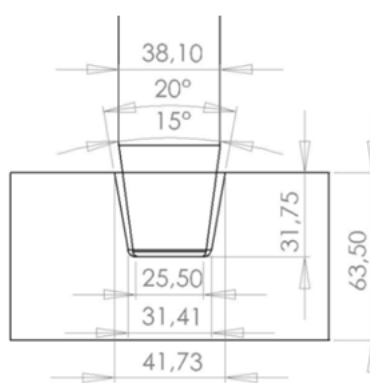


Figura 9.1 - Geometria de pino e base secundários.

Tabela 9.4 – Posicionamento dos termopares com a interface de soldagem

<b>corpo de prova</b>	<b>G01cp28</b>					
termopar	AS	AM	AI	BS	BM	BI
medida 1	*	4,9	*	3,4	5,45	4,5
medida 2	*	4,8	*	3,3	5,4	4,75
medida 3	*	4,8	*	3,2	5,5	4,65
<b>média</b>	*	4,83	*	3,3	5,45	4,63
<b>corpo de prova</b>	<b>G01cp29</b>					
termopar	AS	AM	AI	BS	BM	BI
medida 1	3,7	4,8	4,65	3,35	4,7	*
medida 2	3,8	4,65	4,6	3,4	4,8	*
medida 3	3,6	4,85	4,65	3,3	4,7	*
<b>média</b>	3,7	4,77	4,63	3,35	4,73	*
<b>corpo de prova</b>	<b>G01cp30</b>					
termopar	AS	AM	AI	BS	BM	BI
medida 1	2,8	4,35	*	4,65	4,75	3,8
medida 2	3,05	4,2	*	4,75	4,8	3,85
medida 3	3,05	4,05	*	4,55	4,65	3,8
<b>média</b>	2,97	4,2	*	4,65	4,73	3,8
<b>corpo de prova</b>	<b>G01cp11</b>					
termopar	AS	AM	AI	BS	BM	BI
medida 1	*	*	5	3,1	4,9	4,5
medida 2	*	*	4,9	3,3	4,65	4,75
medida 3	*	*	4,7	3,1	4,8	4,55
<b>média</b>	*	*	4,87	3,17	4,78	4,6
<b>corpo de prova</b>	<b>G02cp12</b>					
termopar	AS	AM	AI	BS	BM	BI
medida 1	3,4	*	4,9	3,8	*	5,05
medida 2	3,35	*	5,1	3,85	*	4,95
medida 3	3,4	*	4,9	4	*	5,15
<b>média</b>	3,38	*	4,97	3,88	*	5,05

(\* a medição da temperatura foi descartada).

Tabela 9.5 – Médias das principais medições das amostras de dobramento

<b>Identificação</b>	<b>Largura “T” (mm)</b>	<b>Altura “W” (mm)</b>
G02 CP08 A	37,72	9,50
G02 CP08 B	37,77	9,43
G02 CP09 A	37,58	9,50
G02 CP09 B	37,68	9,27
G02 CP10 A	37,70	9,50
G02 CP10 B	37,65	9,48
G01 CP14 A	37,67	9,50
G01 CP14 B	37,65	9,38
G01 CP25 A	37,33	9,53
G01 CP25 B	37,27	9,45
G01 CP26 A	37,22	9,53
G01 CP26 B	37,28	9,38
G01 CP31 A	37,30	9,50
G01 CP31 B	37,32	9,55
G01 CP32 A	37,33	9,57
G01 CP32 B	37,23	9,28