

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

ANTÔNIO CÉSAR VALADARES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO
PARA MÁQUINA DE SOLDA DE
TOPO POR TERMOFUSÃO**

UBERLÂNDIA-MG

2020

ANTÔNIO CÉSAR VALADARES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO
PARA MÁQUINA DE SOLDA DE
TOPO POR TERMOFUSÃO**

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

Área de concentração: dinâmica dos sólidos e vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Valério Luiz Borges

UBERLÂNDIA-MG

2020

ANTÔNIO CÉSAR VALADARES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO
PARA MÁQUINA DE SOLDA DE
TOPO POR TERMOFUSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de BACHAREL em ENGENHARIA MECÂNICA.

Área de concentração: dinâmica dos sólidos e vibrações.

Uberlândia, 18 de dezembro de 2020

COMISSÃO AVALIADORA

Prof. Dr. Valério Luiz Borges - FEMEC-UFU

Prof. Dr. Marcelo Braga dos Santos - FEMEC-UFU

Walter Walsh Siefer - Diretor da Complastec



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
 Rodovia BR 050, KM 78, Bloco 1D, 2º andar - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 2512-6773 - www.mecanica.ufu.br - cocme@ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	FEMEC41100 - Projeto de Fim de Curso				
Data:	18/12/2020	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	11511EMC001				
Nome do Discente:	Antônio César Valadares de Oliveira				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento de Algoritmo para Máquina de Solda de Topo por Termofusão				

Reuniu-se, em ambiente virtual, pelo link <https://meet.google.com/adp-orrp-cjm>, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, em 18/12/2020, assim composta: Professores: Prof. Dr. Marcelo Braga dos Santos – Faculdade de Engenharia Mecânica FEMEC/UFU; Diretor Walter Walsh Siefer – Complastec - Ind. e Com. de Plásticos Técnicos e Prof. Dr. Valério Luiz Borges – Faculdade de Engenharia Mecânica FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Valério Luiz Borges, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

(x) Aprovado sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Valério Luiz Borges, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/12/2020, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Braga dos Santos, Professor(a) do Magistério**



Superior, em 18/12/2020, às 10:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Walter Walsh Siefer, Usuário Externo**, em 23/12/2020, às 13:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2454504** e o código CRC **4576849C**.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus, a meus pais, Vanuza e Wesley, e às minhas irmãs, Thamayne e Mariana, pelo amor, carinho e por me ensinarem que é sempre fazendo o meu melhor que se conquista a felicidade. Muito Obrigado!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças para que vencesse meus próprios limites.

Agradeço à minha família que esteve sempre ao meu lado, que é a razão e inspiração da minha vida e a qual dedico essa conquista.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica da UFU, por compartilhar comigo todos os seus conhecimentos e experiências, em especial ao Prof. Dr. Valério Luiz Borges, meu orientador, aos professores Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho e Dra. Ana Marta de Souza, com os quais tive a oportunidade de participar de excelentes projetos e que contribuíram muito para a minha formação, e por último ao Prof. Dr. Marcelo Braga dos Santos, que me auxiliou no desenvolvimento deste trabalho e que se tornou um verdadeiro guia e exemplo para mim. Agradeço por tudo que me ensinaram, pela paciência que demonstraram e por tudo que aprendi com e graças a eles.

À Complastec, na figura do seu Diretor Sr. Walter Walsh Siefer, que junto ao Prof. Marcelo me permitiu e me incentivou a desenvolver este trabalho.

À EMBRAPPII pelo fomento e apoio a este projeto.

Aos amigos de faculdade, por tudo que compartilhamos e aprendemos juntos. Em especial ao Marcos, Hélio, Elias e Gabriel, que nos momentos de maior dificuldade me ajudaram imensamente. Irmãos que a vida me deu de presente, a amizade e o companheirismo de vocês foram essenciais!

Aos amigos de república, Jeferson e Philippe, pelo apoio e pelas alegrias que vivemos juntos.

Enfim, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, obrigado!

EPÍGRAFE

“Mesmo quando tudo parece desabar, cabe a mim decidir entre rir ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar; porque descobri, no caminho incerto da vida, que o mais importante é o decidir”. (Cora Coralina)

RESUMO

O processo de solda de topo por termofusão é um processo de união de tubos e conexões, estes feitos de materiais poliolefinicos, baseado na fusão das extremidades a serem soldadas e posterior união das mesmas ao submetê-las a pressões e temperaturas específicas por tempos controlados. Para a realização do processo é utilizada uma máquina de solda que deve ser capaz de controlar ou se permitir controlar todos os parâmetros necessários para a obtenção de uma união de qualidade. O presente trabalho tem por objetivos levantar as etapas do processo de solda por termofusão a fim de possibilitar o desenvolvimento de um algoritmo que automatize o processo e que será posteriormente implementado na máquina produto do projeto Embrapii/UFU/Complastec - NFEM - 2005.00038. O levantamento bibliográfico foi realizado baseando-se nas principais normas e literaturas de referência e então foi especificado o algoritmo a ser implementado e as etapas a serem automatizadas. Ademais, foi estabelecida uma metodologia para a detecção automática da pressão de arraste, a qual apresentou resultados satisfatórios para o caso estudado, possibilitando que a máquina realize o processo atendendo às tolerâncias especificadas pelas normas de soldagem. Tal metodologia possibilitará a redução da interferência humana e o aumento da confiabilidade do processo de união por termofusão.

Palavras-chave: PEAD, solda de topo de termofusão, automatização, pressão de arraste.

ABSTRACT

The butt-welding process is a process of joining polyolefinic tubes and fittings based on the melting of their ends which will be melted and this subsequent pressing one against other using specific pressures and temperatures during specific times. To carry out the process, a specific welding machine is used, which must be able to control or allow the control by the operator of all the parameters necessary to obtain a good joint. The present work aims to identify the stages of the butt-welding process permitting the development of an algorithm that automates the process and which will be implemented on the machine product of the Embrapii / UFU / Complastec project - NFEM - 2005.00038. The bibliographic survey was carried out based on the main standards and reference literature and then the algorithm and each welding step to be automated were specified. In addition, a methodology was established for the automatic detection of drag pressure, which presented satisfactory results for the case studied, allowing the machine to carry out the process inside the tolerances specified by the welding standards. Such methodology will make it possible to reduce human interference and increase the reliability of the butt-welding process.

Keywords: HDPE, butt welding, automation, drag pressure.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PEAD	Polietileno de alta densidade
ABPE	Associação Brasileira de Tubos Poliolefinicos e Sistemas
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
DE	Diâmetro externo nominal do tubo
SDR	Standard Dimension Ratio
e	Espessura da parede do tubo
PTFE	Politetrafluoretileno
DVS	Deutscher Verband für Schweißen
ISO	International Organization for Standardization
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NTS	Norma Técnica SABESP
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
F	Força aplicada na interface de contato entra as extremidades dos tubos
P	Pressão de contato normatizada
D	Diâmetro externo do tubo
d	Diâmetro interno do tubo
A	Área da seção transversal do tubo
P _B	Pressão da bomba da unidade de comando
A _C	Área útil da seção transversal dos cilindros hidráulicos
D _c	Diâmetro interno da camisa do cilindro hidráulico
d _c	Diâmetro da haste do cilindro hidráulico
ΔP _B	Variação da pressão da bomba admitida de acordo com a norma
\dot{P}_B	Taxa de variação de P _B com relação ao tempo
P _{SP}	Tensão aplicada à válvula reguladora de pressão
P _{BV}	Sinal de saída do transdutor de pressão em Volts
t ₀	Instante de início da elevação de pressão da bomba
t ₁	Instante de início do arraste
t ₂	Momento de estabilização da pressão da bomba
t ₃	Instante de término do arraste
t ₄	Momento de estabilização da pressão da bomba após o arraste
P _A	Pressão de arraste calculada para uma dada condição
P _{AS}	Pressão de arraste do sistema
PID	Controlador proporcional integral derivativo

P1	Pressão de pré-aquecimento
P2	Pressão de aquecimento
P3	Pressão de solda
t1	Tempo para formação do bulbo mínimo durante o pré-aquecimento
t2	Tempo de aquecimento
t3	Tempo de resfriamento
CPU	Central Process Unit
N	Quantidade de cilindros hidráulicos do sistema de transmissão de força

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. VALORES DE P_B (BAR/S) PARA CADA UMA DAS CONDIÇÕES TESTADAS EM DIFERENTES MOMENTOS.	49
--	----

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA SOLDA DE TOPO POR TERMOFUSÃO.	17
FIGURA 2. CHASSI DE UMA MÁQUINA DE SOLDA DE TOPO POR TERMOFUSÃO.	19
FIGURA 3. UNIDADE DE FORÇA.	20
FIGURA 4. FACEADOR.	20
FIGURA 5. PLACA DE AQUECIMENTO.	21
FIGURA 6. FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE SOLDA POR TERMOFUSÃO.	23
FIGURA 7. PARÂMETROS DE SOLDA CONFORME DVS 2207-1 - UNIÃO POR BAIXA PRESSÃO.	25
FIGURA 8. PARÂMETROS DE SOLDA CONFORME ISO 21307 - UNIÃO POR ALTA PRESSÃO.	26
FIGURA 9. TABELA COM OS PARÂMETROS DE SOLDA DE UMA MÁQUINA DO FABRICANTE ROTHENBERGER.	29
FIGURA 10. AVALIAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE FRESTAS ENTRE OS COMPONENTES.	32
FIGURA 11. AVALIAÇÃO DO DESALINHAMENTO ENTRE OS COMPONENTES.	32
FIGURA 12. TEMPERATURA DA PLACA DE AQUECIMENTO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA PAREDE DO TUBO.	34
FIGURA 13. EXEMPLOS DE BULBOS E OS DEFEITOS CARACTERÍSTICOS A ELAS RELACIONADOS.	36
FIGURA 14. REPRESENTAÇÃO DA FORÇA APLICADA NA SUPERFÍCIE A SER SOLDADA.	39
FIGURA 15. P_B EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE A DETECÇÃO DA PRESSÃO DE ARRASTE.	41
FIGURA 16. COMPORTAMENTO DE $\dot{P}_B = dP_B/dt$ DURANTE A DETECÇÃO DA PRESSÃO DE ARRASTE.	41
FIGURA 17. LAYOUT DE INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE COMANDO.	42
FIGURA 18. FOTOGRAFIA DO ARRANJO EXPERIMENTAL.	43
FIGURA 19. ABRAÇADEIRAS MÓVEIS SE MOVIMENTANDO.	44
FIGURA 20. P_{BV} E P_{SP} AO LONGO DO TEMPO PARA A CONDIÇÃO SIMULADA.	44
FIGURA 21. P_B E P_{SP} EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS CONDIÇÕES 1 A 6.	45
FIGURA 22. COMPORTAMENTO DE P_B E \dot{P}_B PARA AS CONDIÇÕES 1 A 6.	46
FIGURA 23. ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DE \dot{P}_B PARA A CONDIÇÃO 6.	47
FIGURA 24. COMPORTAMENTO DE P_B E \dot{P}_B PARA A CONDIÇÃO 6 APÓS A APLICAÇÃO DE FILTRO.	48
FIGURA 25. VALORES DE P_A PARA AS CONDIÇÕES 1 A 6 E AVALIAÇÃO DE ATENDIMENTO À TOLERÂNCIA.	50
FIGURA 26. INTERVALO DE CÁLCULO PARA A CONDIÇÃO 6.	50
FIGURA 27. NOVO INTERVALO DE CÁLCULO CONSIDERADO PARA A CONDIÇÃO 6.	51
FIGURA 28. VALORES DE P_A PARA AS CONDIÇÕES 1 A 6 - CÁLCULO PARA UM INTERVALO DE 0,8 S.	51
FIGURA 29. DIFERENÇA ENTRE OS VALORES DE P_A OBTIDOS PELOS DOIS MÉTODOS DE CÁLCULO.	52
FIGURA 30. LAYOUT DA UNIDADE DE COMANDO.	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1 CRISTALIZAÇÃO	16
2.2 PROCEDIMENTO DE UNIÃO POR TERMOFUSÃO	16
2.2.1 Princípio	16
2.2.2 Máquina de solda de topo por termofusão	18
2.2.3 Procedimento de solda e controle de qualidade	21
2.2.3.1 Análise e escolha do local onde os trabalhos serão executados	27
2.2.3.2 Acomodar a máquina de solda em superfície plana	27
2.2.3.3 Os equipamentos estão em uma superfície plana e acessível?	27
2.2.3.4 Os equipamentos estão em boas condições de trabalho?	28
2.2.3.5 O espaço é suficiente para o posicionamento das barras de tubo ou conexões?	28
2.2.3.6 A máquina de solda está com a calibração em dia?	28
2.2.3.7 Possui os parâmetros corretos de solda?	29
2.2.3.8 Inserir e ajustar tubos/conexões na máquina de solda.	30
2.2.3.9 As superfícies externas da região onde ocorrerá a solda estão livres de trincas e riscos?	30
2.2.3.10 Os tubos / conexões estão alinhados?	30
2.2.3.11 Existe espaço suficiente para inserir o faceador e permitir o posterior fechamento?	30
2.2.3.12 Realização do faceamento.	31
2.2.3.13 As fitas estão saindo inteiriças e constantes?	31
2.2.3.14 As faces estão perfeitamente paralelas e/ou com frestas dentro do permitido?	31
2.2.3.15 Os componentes estão alinhados?	32
2.2.3.16 Determinar a pressão de arraste.	32
2.2.3.17 Limpeza das faces e da placa de aquecimento.	33
2.2.3.18 Realizar o aquecimento das faces a unir.	33
2.2.3.19 A placa aquecedora está na temperatura de acordo com os parâmetros de solda?	34
2.2.3.20 O bulbo inicial está no tamanho de acordo com os parâmetros de solda?	34
2.2.3.21 O tempo de aquecimento está de acordo com os parâmetros de solda?	35
2.2.3.22 Realizar o fechamento.	35
2.2.3.23 A pressão utilizada foi conforme parâmetros de solda?	35
2.2.3.24 Foi respeitado o tempo de resfriamento conforme parâmetros de solda?	35
2.2.3.25 O bulbo está no formato ideal?	36
2.2.3.26 Controle de qualidade e relatório de soldagem.	36
2.2.4 Definição das etapas a serem automatizadas	37
3 METODOLOGIA	38
3.1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ARRASTE	38
3.2 MODELO TEÓRICO	40

3.3 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	42
4 RESULTADOS	45
4.1 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	45
4.2 ALGORITMO PARA A REALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DA SOLDA	53
5 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

O polietileno é um material versátil e que foi descoberto em 1898, mas que teve a sua primeira aplicação industrial durante a segunda guerra mundial na fabricação de conduítes e eletrodutos subaquáticos. Atualmente, possui grande aplicação na área de adução e distribuição de água, distribuição de gás, redes coletoras de esgoto e águas pluviais, mineração, entre outros. Para tais aplicações o material mais utilizado é o PEAD (Polietileno de Alta Densidade), que possui ótimas características, dentre as quais: flexibilidade, leveza, elevada resistência ao impacto e à abrasão e baixo efeito de incrustações. (ABPE, 2020).

Todas essas características positivas se somam à facilidade de instalação do PEAD. Este polímero é um material termoplástico, isto é, que se funde sem desintegrar a sua estrutura molecular, podendo ser reprocessado em um novo ciclo de temperatura e pressão. Esta característica é de grande importância econômica e, principalmente, técnica, pois possibilita a soldagem por termofusão de peças do mesmo material (DANIELETTO, 2007).

Este processo consiste na união de dois componentes ao elevar a temperatura do material que os compõe até a fusão e comprimir uma extremidade contra a outra sob condições controladas até que as ligações moleculares se reestabeleçam. Para tal, é utilizada uma máquina específica que garante o controle do processo.

Para assegurar a qualidade da junta soldada se faz necessário o controle dos parâmetros pressão de contato, tempo e temperatura, principalmente. Caso ocorra descontrole de qualquer um desses ao longo do ciclo de soldagem a união resultará em inadequada e não será possível garantir a estanqueidade ou vida útil da mesma. Neste sentido, o soldador termoplástico tem papel fundamental na observância dos padrões estabelecidos pelas normas de soldagem, ou, no caso das máquinas automáticas, o sistema de controle deve ser robusto e capaz de controlar os parâmetros de soldagem sob as mais diversas condições.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento teórico e a validação experimental dos conceitos necessários na implantação de um algoritmo que visa controlar o processo de solda de topo por termofusão e que será posteriormente implementado na máquina produto do projeto Embrapii/UFU/Complastec - NFEM - 2005.00038.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Cristalização

Uma propriedade de destaque do polietileno é a capacidade de se “cristalizar”. É de grande importância pois a resistência do material é diretamente dependente dela. Uma vez que o material fundido começa a se resfriar, as moléculas que o constituem começam a se arranjar de forma alinhada formando as estruturas chamadas de cristalitos, que são consideradas cristais imperfeitos, ou paracristais. Sendo este um processo incompleto de cristalização, certa quantidade de matéria permanece no estado amorfo ao fim da cristalização, residindo entre os cristalitos.

A fração cristalizada apresenta uma maior densidade e é diretamente responsável pela resistência do material. Já a elasticidade, maciez e a flexibilidade advêm da parcela amorfa. Diferentes propriedades são obtidas alterando-se as condições de resfriamento do processo de produção. Quanto mais lento o resfriamento, mais tempo as moléculas têm para se arranjam em estruturas propícias à formação dos cristalitos, conferindo assim resistência ao produto final, bem como um aumento da densidade do mesmo. Já resfriamentos acelerados diminuem a densidade do material e a sua resistência significativamente, bem como possibilita a aparição de tensões internas, as quais diminuem ainda mais a resistência final, podendo levar à ocorrência, inclusive, de fraturas espontâneas (DANIELETTO, 2007).

Por este motivo o controle do resfriamento da junta soldada por termofusão se faz necessário, pois somente sob as condições adequadas a união apresentará as propriedades mecânicas desejadas. Todas as principais normas especificam um tempo mínimo durante o qual a junta soldada deverá permanecer imóvel, conforme será exposto adiante.

2.2 Procedimento de União por Termofusão

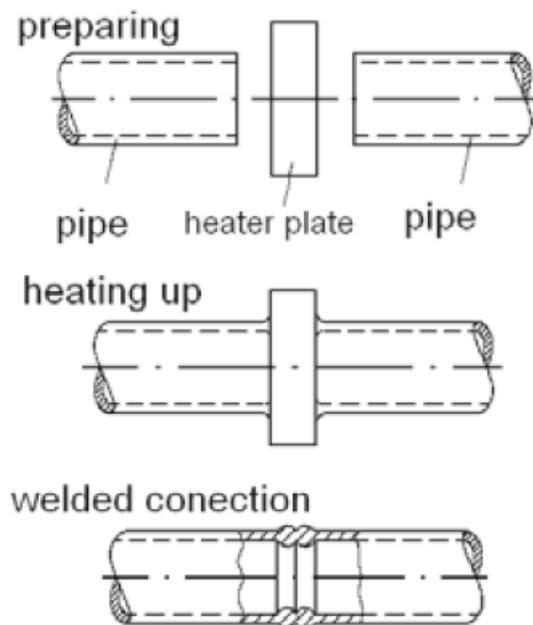
2.2.1 Princípio

O processo de união de tubos plásticos por termofusão consiste na elevação da temperatura do material das extremidades a serem unidas até o ponto de fusão, seguida da compressão das mesmas uma contra a outra sob pressão controlada, de forma a promover a interação molecular e conseqüente ligação química, e por fim o resfriamento das peças sob a temperatura ambiente até que os materiais completem o processo de recristalização. Neste

procedimento o calor necessário para a fusão dos materiais vem de uma fonte externa, como uma placa de aquecimento, a qual aquece as extremidades a serem soldadas por um tempo pré-estabelecido, e é daí que advém o nome termofusão. A fonte de calor é o que diferencia o processo de termofusão do de eletrofusão, o qual segue basicamente o mesmo princípio físico, entretanto nele o elemento de aquecimento é uma resistência incorporada à luva de união e que é um consumível, sendo necessário um elemento para cada solda (DANIELETTO, 2007).

A solda de termofusão recebe diferentes denominações de acordo com a geometria do elemento de aquecimento e das extremidades a serem soldadas, podendo ser de soquete, de sela e de topo, sendo este último o tipo mais comum. Na solda de topo por termofusão as extremidades a serem unidas são as pontas dos tubos ou conexões, dispostos face a face e aquecidos por uma placa de aquecimento plana. A Figura 1 exibe uma representação de uma solda de topo por termofusão.

Figura 1. Representação esquemática de uma solda de topo por termofusão.



Fonte: DVS 2207-1 (GERMAN WELDING SOCIETY, 2007)

Durante o processo de união ocorre a formação de bulbos provenientes da expulsão de material fundido da região de solda em ambas as extremidades a serem unidas, formando cordões de soldas tanto externa quanto internamente. Por este motivo o procedimento de solda de topo é aplicado para tubos de diâmetro externo $DE \geq 63$ mm, uma vez que em tubos com diâmetros externos menores que 63 mm os cordões de solda provocam perdas de carga

significativas no transporte do fluido. Ademais, para a realização do processo se faz necessário que os componentes possuam a mesma espessura de parede, bem como sejam de materiais compatíveis entre si (DANIELETTO, 2007). A Equação 1 traz a relação entre as dimensões características de um tubo de PEAD.

$$\text{SDR} = \frac{DE}{e} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: SDR = razão dimensional padrão, do inglês, *Standard Dimension Ratio*; e = espessura nominal do tubo e DE = diâmetro externo do tubo. Através da Equação 1 fica explícito que se faz necessário que os componentes a serem soldados possuam os mesmos valores de DE e SDR.

2.2.2 Máquina de solda de topo por termofusão

Para a realização do procedimento utiliza-se um equipamento específico denominado de máquina de solda de topo por termofusão. O mesmo deve ser capaz de garantir o cumprimento de todos os requisitos necessários para assegurar a qualidade da união soldada, devendo obedecer às normas locais ou internacionais vigentes. A máquina de solda é composta por 4 unidades básicas, sendo elas:

- **Estrutura Básica:** também conhecida como chassi ou berço, a estrutura básica tem por função suportar e prender os componentes a serem unidos. Isto é feito por meio de abraçadeiras, que normalmente são peças bipartidas e cuja parte superior é removida manualmente pelo soldador. Entretanto, para equipamentos capazes de soldar tubos de DE elevados estas partes podem ser controladas por cilindros hidráulicos também. Além das abraçadeiras, o chassi possui uma unidade de transmissão de força, a qual pode ser mecânica, hidráulica ou pneumática, e que é a responsável pelo movimento de afastar e aproximar as peças horizontalmente, bem como transmitir a força necessária para a obtenção da correta pressão de contato durante a realização da solda. Para tal, normalmente um jogo de abraçadeiras é fixo e o outro é móvel. Também é através do chassi que se garante as condições de alinhamento e paralelismo dos eixos das peças a serem unidas, conforme especificações das normas de soldagem. Na Figura 2 é possível observar um chassi de uma máquina da marca *George Fischer* composta por 4 abraçadeiras, sendo duas móveis e duas fixas, bem como um sistema de transmissão de

força hidráulico, observado através dos cilindros hidráulicos e que são os responsáveis pela movimentação das abraçadeiras móveis presas a eles;

Figura 2. Chassi de uma máquina de solda de topo por termofusão.



Fonte: GF PIPING SYSTEMS (GFPS, 2020)

- Unidade de Força ou Unidade de Comando: este componente é responsável pelo fornecimento de energia ao processo de solda e pode ser mecânico, hidráulico ou pneumático, sendo constituído por uma alavanca equipada com torquímetro ou dinamômetro, no primeiro caso, ou numa bomba hidráulica ou compressor, nos demais casos. Este equipamento deve ser capaz de fazer ou se permitir fazer o controle da pressão de solda na interface de contato entre as superfícies a serem unidas dentro da tolerância especificada pela norma de soldagem adotada. A Figura 3 traz um exemplo de unidade de força hidráulica, na qual é possível observar o painel de comando e os engates das mangueiras do sistema hidráulico;

Figura 3. Unidade de força.



Fonte: GF PIPING SYSTEMS (GFPS, 2020)

- Faceador: é o componente responsável pelo faceamento das extremidades a serem unidas, garantindo a planicidade e o paralelismo entre as faces dos tubos necessários para que, durante o processo de aquecimento do material, ocorra o devido contato entre as faces e a placa de aquecimento. Para tal fim, o faceador consiste basicamente em uma plaina rotativa de acionamento manual, via catraca, ou elétrico. É possível observar um exemplo de faceador com acionamento elétrico na Figura 4.

Figura 4. Faceador.



Fonte: GF PIPING SYSTEMS (GFPS, 2020)

- Placa de Aquecimento: é o componente que fornece a energia térmica necessária à fusão do material das extremidades a serem unidas. Deve ser plana e revestida com material anti-aderente a fim de possibilitar a fusão do material sem que ocorra o desprendimento do mesmo da peça soldada. Este revestimento pode ser substituído a cada solda ou pode ser permanente, e normalmente é feito de PTFE (Teflon).

Figura 5. Placa de aquecimento.



Fonte: GF PIPING SYSTEMS (GFPS, 2020)

Adicionalmente a estes quatro componentes somam-se itens auxiliares para a realização da solda, tais como suporte para o faceador e a placa de aquecimento, roletes para apoio dos tubos, adaptadores de diâmetro (casquilhos), entre outros.

2.2.3 Procedimento de solda e controle de qualidade

O procedimento para a realização de uma solda de topo por termofusão é composto por poucos passos extremamente simples, mas tal simplicidade não se traduz em falta de controle ou cuidado. Cada etapa é de suma importância para a garantia da qualidade final da união soldada, e um único erro pode resultar em uma união não adequada, a qual precisará ser removida e refeita ou, no pior dos casos, acabará por inutilizar as peças unidas. Portanto, o soldador termoplástico deve realizar a solda seguindo fielmente cada um dos passos e a verificação de todos os requisitos de qualidade estabelecidos pela norma a ser utilizada.

Existem diversas normas que regulamentam o procedimento de solda de topo por termofusão, diversas delas conhecidas internacionalmente, tais como a *DVS 2207-1* e a *ISO 21307*. Tais normas diferem com relação a alguns valores adotados para os parâmetros de soldagem, tais como tempo e pressão, ou quanto a critérios de avaliação relativos a pontos de controle da qualidade. Apesar de tais diferenças, todas seguem uma estrutura básica em comum que inclui 4 etapas: preparação, aquecimento, solda e resfriamento.

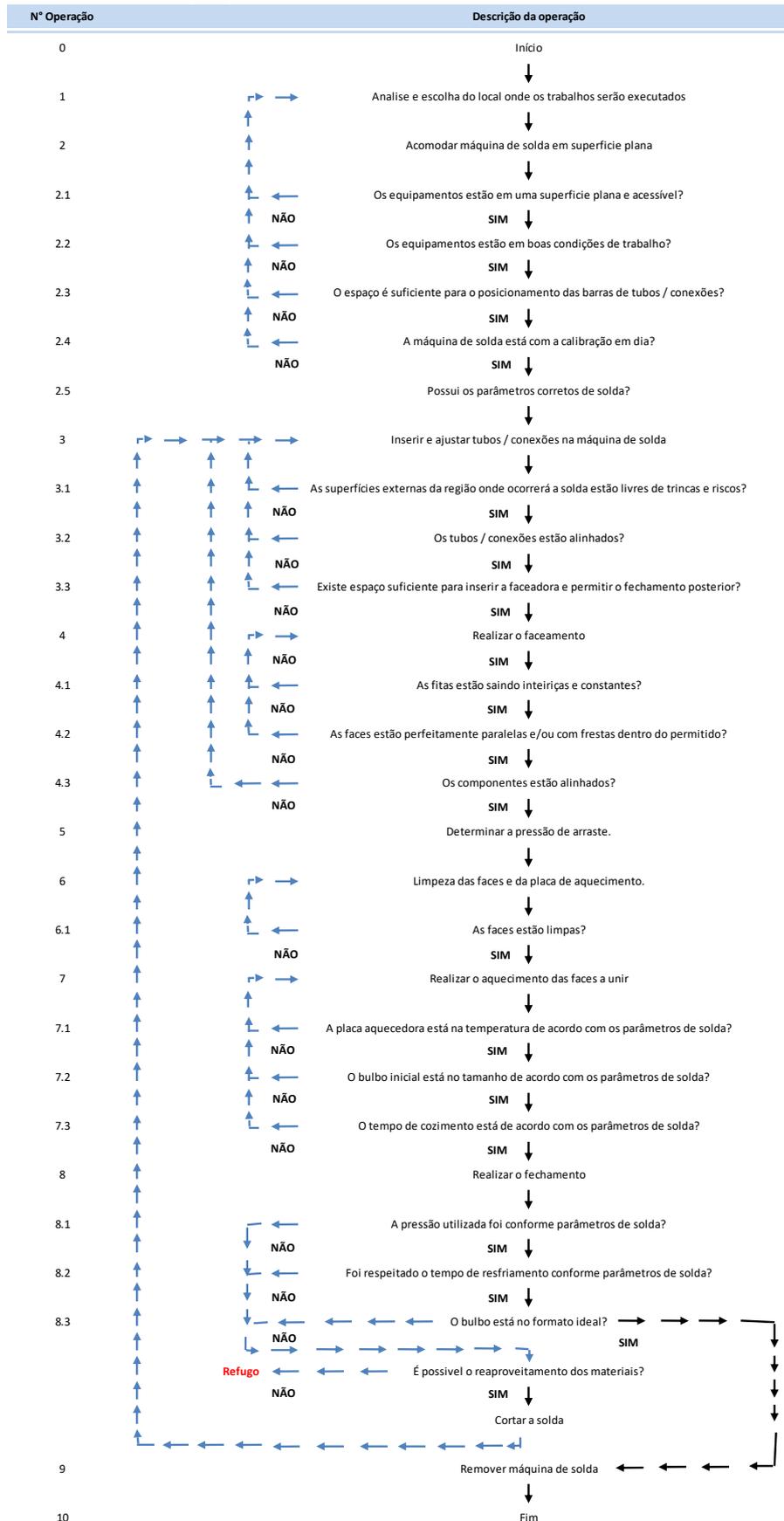
A preparação consiste no alinhamento dos eixos das peças a serem unidas, no faceamento e na limpeza das extremidades a serem soldadas. O aquecimento tem duas fases, sendo a primeira a de pré-aquecimento, onde os componentes são pressionados com elevada pressão contra a placa de aquecimento por um curto período de tempo a fim de garantir que toda a área a ser fundida encontre-se em contato com a placa de aquecimento. O pré-aquecimento pode ser interpretado também como um segundo faceamento, tendo em vista o

seu objetivo. Já a segunda fase consiste no aquecimento em si das superfícies a serem soldadas, elevando a temperatura do material até o seu ponto de fusão através da manutenção do contato das extremidades com a placa de aquecimento por um determinado período de tempo sob baixa pressão de contato (praticamente zero).

Após o aquecimento é realizada a solda, que nada mais é que a junção das extremidades fundidas sob pressão suficiente para que ocorra a penetração e a interligação molecular de ambas as partes, e mantida por tempo suficiente até que a temperatura caia abaixo da temperatura de fusão do material. Uma vez finalizada esta etapa, inicia-se o resfriamento. Durante o resfriamento o conjunto deve permanecer imóvel até o fim do ciclo de cristalização do material soldado (temperatura menor que 110 °C para o polietileno), após o qual as características de resistência do material já se encontram estabelecidas, sendo possível a remoção do conjunto da máquina e a sua movimentação. Entretanto, o conjunto só pode ser posto em operação, isto é, só pode ser aplicada pressão interna, após a junta soldada atingir a temperatura ambiente (DANIELETTO, 2007).

A Figura 6 traz um fluxograma esquemático das etapas que compõem o procedimento de solda de topo, bem como os pontos de verificação da qualidade. O fluxograma é baseado nas diretrizes apresentadas nas normas *DVS 2207-1* (GERMAN WELDING SOCIETY, 2007), NBR 14464 (ABNT, 2016), NTS 060 (SABESP, 2019), *ISO 11414* (ISO, 2009), *ISO 12176-1* (ISO, 2006), *ISO 21307* (ISO, 2011) e NBR 16302 (ABNT, 2018).

Figura 6. Fluxograma do Processo de Solda por Termofusão.

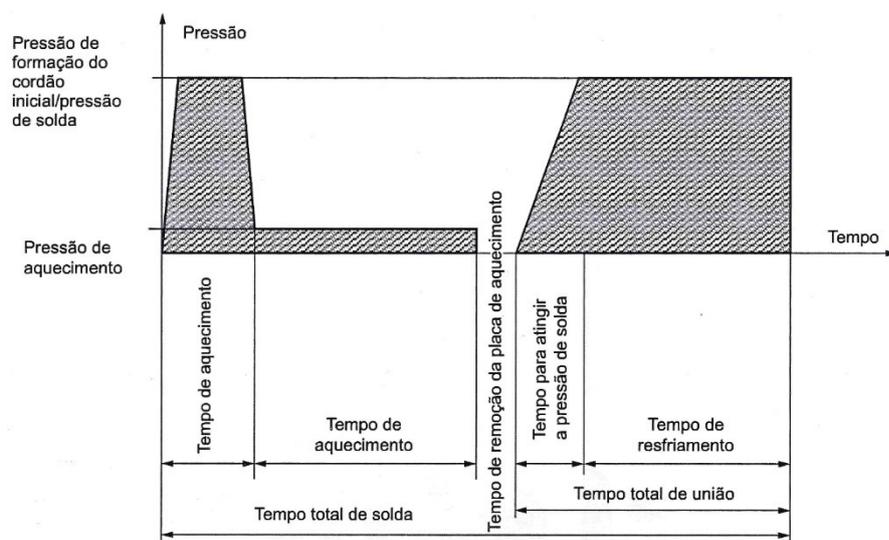


Fonte: Autoria própria

Quanto aos parâmetros de solda, os tempos de execução de cada uma das etapas são determinados em função da espessura da parede das peças a serem unidas, já as pressões da interface de contato das extremidades fundidas variam entre 0,15 MPa e 0,60 MPa. As normas apresentam em geral dois ciclos de pressões distintos e passíveis de serem adotados: o ciclo de baixa pressão e o de alta pressão. A Figura 7 apresenta os parâmetros característicos de um ciclo de baixa pressão e a Figura 8 apresenta os relativos a um ciclo de alta pressão, conforme NBR 14464 (ABNT, 2016). Ademais, os parâmetros de solda variam também em função do material a ser soldado.

Figura 7. Parâmetros de solda conforme DVS 2207-1 - União por baixa pressão.

Temperatura da placa de aquecimento: 200 °C a 220 °C					
1	2	3	4	5	
Espessura nominal da parede	Preaquecimento ou cordão inicial	Aquecimento	Retirada da placa de aquecimento	União	
	Altura do cordão na ferramenta aquecida no final do tempo de formação do cordão inicial (utilizando-se a pressão de 0,15 MPa)	Tempo de aquecimento = 10 x espessura de parede (utilizando-se a pressão $\leq 0,02$ MPa) ($10 \times e_n$)		Tempo de união	Tempo de resfriamento com a união sob pressão (utilizando-se a pressão de 0,15 MPa $\pm 0,01$ MPa)
mm	mm (valores mínimos)	s	s (tempo máximo)	s	min. (valores mínimos)
Até 4,5	0,5	45	5	5	6
4,5 – 7	1,0	45 – 70	5 – 6	5 – 6	6 – 10
7 – 12	1,5	70 – 120	6 – 8	6 – 8	10 – 16
12 – 19	2,0	120 – 190	8 – 10	8 – 11	16 – 24
19 – 26	2,5	190 – 260	10 – 12	11 – 14	24 – 32
26 – 37	3,0	260 – 370	12 – 16	14 – 19	32 – 45
37 – 50	3,5	370 – 500	16 – 20	19 – 25	45 – 60
50 – 70	4,0	500 – 700	20 – 25	25 – 35	60 – 80

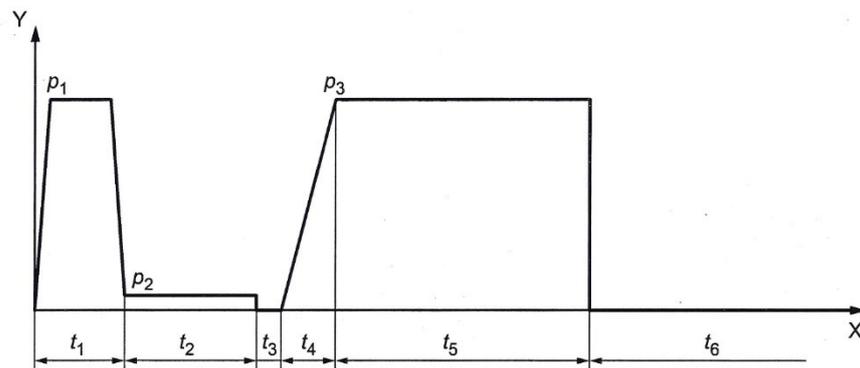


Fonte: NBR 14464 (ABNT, 2016)

Figura 8. Parâmetros de solda conforme ISO 21307 - União por alta pressão.

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura da placa de aquecimento	200 a 230	°C
Pressão para formação do cordão inicial (p_1)	$0,52 \pm 0,1^a$	MPa
Altura mínima do cordão inicial (h_1)	$0,15 \times e_n + 1$	mm
Tempo para formação do cordão inicial (t_1)	Em função de h_1	s
Tempo de aquecimento (t_2)	$(11 \pm 1) \times e_n$	s
Pressão de aquecimento (p_2)	De zero até a pressão de arraste	MPa
Tempo máximo para remoção da placa de aquecimento (t_3)	$0,1 \times e_n + 8$	s
Pressão de solda (p_3)	$0,52 \pm 0,1^a$	MPa
Tempo máximo para alcançar a pressão de solda (t_4)	$0,4 \times e_n + 2$	s
Tempo mínimo para resfriamento sob pressão na máquina (t_5)	$0,43 \times e_n$	min
Tempo mínimo para resfriamento sem pressão dentro ou fora da máquina (t_6)	$0,43 \times e_n$	min

^a Acrescentar a pressão de arraste



Legenda

Eixo X Tempo

Eixo Y Pressão

t_1 Tempo de formação de cordão inicial

t_2 Tempo de aquecimento

t_3 Tempo de remoção da placa de aquecimento

t_4 Tempo para atingir a pressão de solda para fusão das juntas

t_5 Tempo de resfriamento sob pressão

t_6 Tempo de resfriamento sem pressão

p_1 Pressão para formação do cordão inicial

p_2 Pressão de aquecimento

p_3 Pressão de solda

Fonte: NBR 14464 (ABNT, 2016)

Comparando os dois tipos de união verificam-se duas diferenças principais: a pressão de solda, que muda de 0,15 Mpa para 0,52 Mpa, e o tempo de resfriamento com a união sob pressão que no método de baixa pressão é consideravelmente maior. Para efeitos de comparação, a solda de tubos de DE 110 mm e SDR 11, que possui 10 mm de espessura de parede, precisa se resfriar por aproximadamente 14 minutos quando realizada de acordo com o método de baixa pressão, enquanto no método de alta pressão o resfriamento na máquina leva pouco mais de 4 minutos, mais de três vezes mais rápido, o que resulta em ganhos de produtividade.

A seguir será apresentado o resumo de cada uma das operações e verificações realizadas de acordo com a Figura 6, destacando-se pontos nos quais é possível realizar a automatização do procedimento objetivando segurança, qualidade ou produtividade.

2.2.3.1 Análise e escolha do local onde os trabalhos serão executados

A operação 1 consiste em escolher local com espaço suficiente para posicionamento dos equipamentos e materiais, livre de sujeira e protegido de intempéries climáticas. No processo de soldagem é muito importante verificar as condições ambientais antes do início do processo, devendo sempre evitar as influências negativas da atmosfera, como umidade e temperatura abaixo de 0°C. A temperatura nas paredes dos tubos a serem soldados devem sempre ser mantidas constantemente, para isso, deve-se tomar as medidas necessárias, sendo algumas delas construir cabanas para armazenamento das máquinas ou manter sempre em local onde o clima não possa prejudicar.

2.2.3.2 Acomodar a máquina de solda em superfície plana

Durante a operação 2 deve-se assentar o equipamento sobre uma base regular ou terreno plano e consistente. Nesta etapa são realizadas cinco verificações, sendo elas apresentadas em 2.2.3.3 a 2.2.3.7

2.2.3.3 Os equipamentos estão em uma superfície plana e acessível?

Os equipamentos devem estar em uma base plana e acessível para melhor funcionamento e permitindo o acesso à área de solda, a fim de evitar acidentes e facilitar todo o processo de solda.

2.2.3.4 Os equipamentos estão em boas condições de trabalho?

Deve-se realizar a verificação das condições da máquina de solda a fim de certificar os seguintes itens:

- Integridade e estanqueidade das conexões hidráulicas;
- Integridade dos cabos de interligação de energia elétrica;
- Funcionamento da placa de aquecimento (temperatura uniforme e integridade do revestimento), utilizando-se de termômetro laser ou lápis térmico;
- Funcionamento do faceador;
- Funcionamento do berço (abertura e fechamento dos pistões).

Algumas normas, como a NTS 060 (SABESP, 2019), apresentam requisitos mais exigentes relacionados inclusive à fonte de alimentação de energia da máquina de solda, especificando questões como potência, tensão e corrente de geradores utilizados no processo. De toda forma, caso algum dos itens citados não estejam em condições adequadas, as correções necessárias devem ser realizadas antes de iniciar o processo de solda.

2.2.3.5 O espaço é suficiente para o posicionamento das barras de tubo ou conexões?

Os tubos geralmente são em barras de 6 m ou 12 m, quando a máquina é posicionada para a realização da solda é necessário espaço suficiente para que duas barras sejam posicionadas em linha e que o movimento de abrir e fechar a unidade de transmissão de força da máquina seja realizado sem obstruções.

2.2.3.6 A máquina de solda está com a calibração em dia?

Durante o processo deve ser realizado o controle da temperatura da placa de aquecimento e da pressão de contato entre as extremidades a serem unidas. Para tal, utilizam-se um sensor de temperatura do tipo PT100 na placa de aquecimento e um manômetro para unidades de comando do tipo hidráulica e pneumática. Tais instrumentos devem estar calibrados adequadamente, de acordo com a norma adotada para o procedimento.

2.2.3.7 Possui os parâmetros corretos de solda?

Neste momento o soldador termoplástico deve consultar o manual do fabricante a fim de obter os parâmetros de solda referentes às peças a serem unidas, obtendo-os a partir dos valores de DE, SDR, do tipo de material a ser soldado e da norma a ser utilizada. Os fabricantes das máquinas fornecem os parâmetros na forma de tabelas, conhecidas como tabelas de solda, e que possuem todos os dados necessários para a execução da solda. Nelas, as pressões de união das extremidades a serem soldadas são convertidas na pressão a ser realizada nos cilindros hidráulicos ou pneumáticos pela unidade de comando no sistema de transmissão de força, ou na força a ser desempenhada, quando o sistema de transmissão de força é do tipo manual. A Figura 9 apresenta um exemplo de tabela de solda de uma máquina do fabricante *Rothenberger* (ROTHENBERGER, 2020).

Figura 9. Tabela com os parâmetros de solda de uma máquina do fabricante *Rothenberger*.

ROWELD® P 160-200 B PP T = 210°C / 410°F DVS 2207/T11(02/17)

Azyl = 3,53cm²

D [mm]	SDR	S [mm]	P ₁ [bar]		P ₂ [bar]		P ₃ [bar]		P ₄ [bar]			
			t ₁ [sec]	t ₂ [sec]	t ₃ [sec]	t ₄ [min]	< 15°C	15°...25°C	25°...40°C			
90	41	2,2	1,7	0,5	0,2	28	5	6	1,7	4	5	7
	33	2,8	2,2	0,5	0,2	33	5	6	2,2	4	5	7
	26	3,5	2,7	0,5	0,3	41	5	6	2,7	4	5	7
	22	4,1	3,1	0,5	0,3	48	5	6	3,1	4	5	7
	21	4,3	3,3	0,5	0,3	51	5	6	3,3	4	5	7
	17,6	5,1	3,9	0,5	0,4	60	5	6	3,9	5	6	8
	17	5,4	4,1	0,5	0,4	63	5	6	4,1	5	6	8
	13,6	6,7	5,0	0,5	0,5	78	6	7	5,0	6	8	10
	11	8,2	6,0	1,0	0,6	94	6	8	6,0	7	9	11
	9	10,1	7,2	1,0	0,7	114	7	9	7,2	9	11	14
	7,4	12,3	8,5	1,0	0,9	138	7	11	8,5	10	13	16
	7,25	12,5	8,6	1,0	0,9	140	7	11	8,6	10	13	17
110	41	2,7	2,0	0,5	0,3	32	5	6	2,6	4	5	7
	33	3,4	3,2	0,5	0,3	40	5	6	3,2	4	5	7
	26	4,2	4,0	0,5	0,4	49	5	6	4,0	4	5	7
	22	5,0	4,7	0,5	0,5	59	5	6	4,7	5	6	8
	21	5,3	4,9	0,5	0,5	62	5	6	4,9	5	6	8
	17,6	6,3	5,8	0,5	0,6	73	6	7	5,8	6	7	9
	17	6,8	6,1	0,5	0,6	77	6	7	6,1	6	8	10
	13,6	8,1	7,3	1,0	0,7	93	6	8	7,3	7	9	11
	11	10,0	8,9	1,0	0,9	113	7	9	8,9	9	11	14
	9	12,3	10,7	1,0	1,1	138	7	11	10,7	10	13	16
	7,4	15,1	12,8	1,0	1,3	166	8	14	12,8	12	15	20
	7,25	15,2	12,8	1,0	1,3	167	8	14	12,8	12	15	20
125	41	3,1	3,4	0,5	0,3	37	5	6	3,4	4	5	7
	33	3,9	4,2	0,5	0,4	46	5	6	4,2	4	5	7
	26	4,8	5,1	0,5	0,5	56	5	6	5,1	5	6	7
	22	5,7	6,1	0,5	0,6	66	5	6	6,1	5	7	8
	21	6,0	6,4	0,5	0,6	70	6	7	6,4	6	7	9
	17,6	7,1	7,4	1,0	0,7	82	6	7	7,4	7	8	10
	17	7,4	7,7	1,0	0,8	85	6	7	7,7	7	8	10
	13,6	9,2	9,5	1,0	0,9	105	6	9	9,5	8	10	13
	11	11,4	11,5	1,0	1,2	129	7	11	11,5	10	12	15
	9	14,0	13,8	1,0	1,4	155	8	13	13,8	11	14	18
	7,4	17,1	16,4	1,0	1,6	187	8	15	16,4	13	17	22
	7,25	17,3	16,6	1,0	1,7	189	9	16	16,6	13	17	22
140	41	3,5	4,3	0,5	0,4	41	5	6	4,3	4	5	7
	33	4,3	5,2	0,5	0,5	51	5	6	5,2	4	5	7
	26	5,4	6,5	0,5	0,6	63	5	6	6,5	5	6	8
	22	6,4	7,6	0,5	0,8	74	6	7	7,6	6	7	9
	21	6,7	7,9	0,5	0,8	78	6	7	7,9	6	8	10
	17,6	8,0	9,4	1,0	0,9	92	6	8	9,4	7	9	11
	17	8,3	9,7	1,0	1,0	95	6	8	9,7	7	9	12
	13,6	10,3	11,9	1,0	1,2	117	7	10	11,9	9	11	14
	11	12,7	14,4	1,0	1,4	142	7	12	14,4	10	13	17
	9	15,7	17,4	1,0	1,7	173	8	14	17,4	12	16	20
	7,4	19,2	20,6	1,5	2,1	208	9	17	20,6	15	19	25
	7,25	19,4	20,8	1,5	2,1	210	9	17	20,8	15	19	25

Fonte: *Rothenberger* (ROTHENBERGER, 2020).

Esta etapa do processo pode ser automatizada e inclusive é um dos critérios para uma máquina ser considerada automática, conforme a norma *ISO 12176-1* (*ISO*, 2006). Segundo a mesma, para que uma máquina seja considerada automática o operador deve inserir somente os dados da norma a ser utilizada, do material, o DE e o SDR do tubo, sendo todos os demais parâmetros automaticamente computados pelo software de controle da máquina. Há também equipamentos semiautomáticos nos quais o operador insere os tempos e pressões de *setpoint*, conforme tabela de solda, e o equipamento realiza o controle dos mesmos.

2.2.3.8 Inserir e ajustar tubos/conexões na máquina de solda.

A integridade dos tubos e conexões deve ser verificada, os componentes devem ser cortados nas medidas necessárias, seus dados identificadores para rastreabilidade devem ser coletados/registrados e então inseridos na máquina de solda para início do processo de soldagem.

2.2.3.9 As superfícies externas da região onde ocorrerá a solda estão livres de trincas e riscos?

As superfícies externas da região onde ocorrerá a solda devem ser verificadas quanto à existência de trincas e riscos. Em caso positivo, a parte afetada deve ser descartada procedendo com o corte da mesma, caso possível. Riscos superficiais não requerem descarte do tubo. Como referência, considera-se risco superficial aquele que não ultrapassa 10% da espessura da parede do tubo, conforme NBR 14464 (ABNT, 2002).

2.2.3.10 Os tubos / conexões estão alinhados?

O alinhamento dos eixos das peças a serem unidas é fundamental para a execução da solda. Um pré-alinhamento dos componentes deve ser realizado, providenciando bases para o alinhamento das peças como roletes. As braçadeiras da máquina de solda devem ser usadas para conferir um ajuste fino do alinhamento das geratrizes das peças.

2.2.3.11 Existe espaço suficiente para inserir o faceador e permitir o posterior fechamento?

Cada tamanho ou modelo de máquina de solda possui um modelo diferente de faceador. O espaço que deve ser deixado entre as extremidades dos componentes deve levar em

consideração a largura deste faceador, a fim de permitir o seu posicionamento e o posterior faceamento. Outro cuidado importante é que este espaço não pode ser muito grande, pois depois que realizado o faceamento, o faceador será removido e o cilindro hidráulico deve ter curso suficiente para permitir o fechamento da solda.

2.2.3.12 Realização do faceamento.

Após os componentes serem inseridos na máquina, o faceador deve ser posicionado no chassi e o faceamento iniciado. As extremidades das peças devem ser faceadas de forma a garantir o paralelismo entre as mesmas e a remoção de toda a camada de material oxidado.

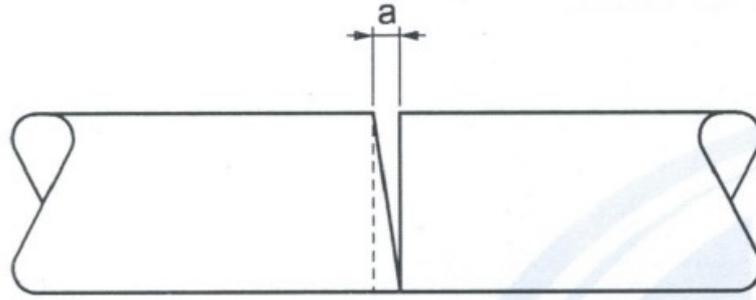
2.2.3.13 As fitas estão saindo inteiriças e constantes?

O faceamento de todo o perímetro do tubo ou conexão é fundamental para garantir a qualidade da solda. A obtenção desta condição é caracterizada pela formação de uma fita homogênea e contínua de material usinado. O operador deve fazer a inspeção visual do cavaco produzido a fim de detectar a obtenção da condição de faceamento desejada.

2.2.3.14 As faces estão perfeitamente paralelas e/ou com frestas dentro do permitido?

Após a realização do faceamento, o faceador deve ser removido dos chassis e as faces a soldar devem ser unidas para verificar a condição de paralelismo das mesmas e a existência de frestas. Para a medição de frestas deve ser utilizado um calibre de folga. Caso haja qualquer fresta ao longo do perímetro com medida superior à permitida pela norma de soldagem, o processo de faceamento deve ser refeito até que se atinja a condição adequada. As medidas máximas para frestas variam em função do diâmetro externo do tubo e da norma adotada. Dentre as normas comumente utilizadas no Brasil, a NTS 060 é a que aplica os critérios mais exigentes quanto à existência de frestas, devendo estas não serem maiores que 0,3 mm para tubos de $DE \leq 125$ mm e menores que 0,5 mm para tubos de $DE > 125$ mm (SABESP, 2019). A Figura 10 apresenta a forma de avaliação da existência de frestas entre os componentes

Figura 10. Avaliação da existência de frestas entre os componentes.

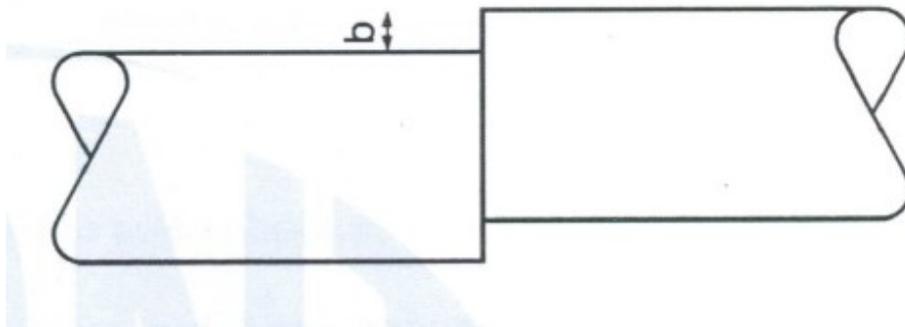


Fonte: NBR 14464 (ABNT, 2016)

2.2.3.15 Os componentes estão alinhados?

O alinhamento dos componentes é fundamental para garantir a qualidade da solda. Após a medição da fresta entre as faces, a medição do desalinhamento deve ser feita conforme representado na Figura 11 utilizando um paquímetro no processo. O desalinhamento não deve ser maior do que 10% da espessura nominal das paredes do tubo, conforme NBR 14464 (ABNT, 2016).

Figura 11. Avaliação do desalinhamento entre os componentes.



Fonte: NBR 14464 (ABNT, 2016).

2.2.3.16 Determinar a pressão de arraste.

Nesta operação deve ser determinada a pressão de arraste, que é a pressão mínima, a ser exercida pela unidade de comando, hidráulica ou pneumática, necessária para que se inicie a movimentação da peça presa às abraçadeiras móveis da máquina. Esta etapa é muito importante, pois a pressão de arraste deverá ser somada às pressões de solda e aquecimento a fim de que se

estabeleça a pressão de contato determinada pela norma de soldagem em cada uma das respectivas etapas do processo. Quando realizada através de uma unidade de comando manual, o operador da máquina eleva a pressão da máquina lentamente enquanto monitora as abraçadeiras móveis. Quando o movimento das mesmas se inicia, o operador registra a pressão aplicada pela unidade de comando, sendo esta a pressão de arraste.

As normas de soldagem estabelecem tolerâncias estreitas com relação à pressão de contato aplicada entre as peças, como no caso da *DVS 2207-1 (GERMAN WELDING SOCIETY, 2007)*, a qual admite uma variação de $\pm 0,01$ Mpa somente, conforme pode ser visto na Figura 7. Assim sendo, esta etapa acaba por consistir em um ponto crítico do processo. Caso o soldador erre no momento de verificação da pressão de arraste de modo a minorar a mesma, a pressão de contato final será menor que o recomendado, podendo resultar em falha uma vez que pressões de solda menores que a normatizada constituem grave risco à qualidade da solda (DANIELETTO, 2007). Dessa forma, é de interesse automatizar esta operação, a fim de garantir a qualidade final da união e diminuir a interferência humana no processo.

2.2.3.17 Limpeza das faces e da placa de aquecimento.

Ao finalizar o posicionamento das peças e a detecção da pressão de arraste, deve ser realizada a limpeza das faces a serem unidas e da placa de aquecimento para que então seja iniciada a etapa de aquecimento. O aquecimento somente deve ser iniciado quando todas as superfícies envolvidas estiverem livres de impurezas. Para tal deve ser utilizado papel que não solte fibras ou tinta embebido em álcool isopropílico ou etílico 96° GL, ou ainda acetona (SABESP, 2019).

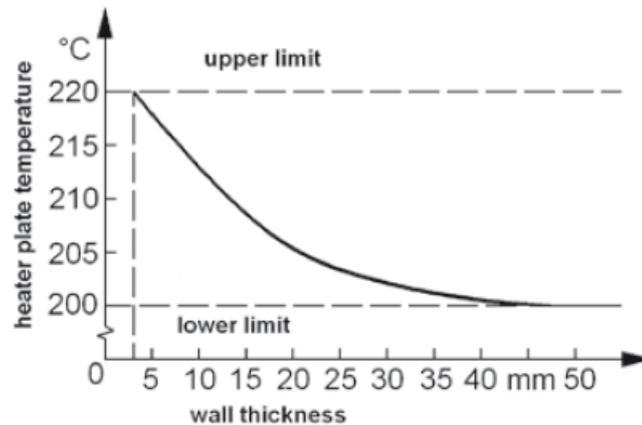
2.2.3.18 Realizar o aquecimento das faces a unir.

Nesta etapa, deve-se proceder com a adição da placa de aquecimento ao chassi da máquina a fim de que sejam realizadas as etapas de pré-aquecimento e aquecimento das faces a serem unidas, seguindo sempre todos os parâmetros indicados pela norma de soldagem e representados na tabela de solda do fabricante da máquina. As pressões e tempos devem ser respeitados, bem como a manutenção da temperatura do material dentro da faixa correta deve ser assegurada. Cabe ao operador controlar estes parâmetros através da unidade de comando quando esta for do tipo manual, em máquinas automáticas o controle e registro independe do operador.

2.2.3.19 A placa aquecedora está na temperatura de acordo com os parâmetros de solda?

A placa de aquecimento deve ter a sua temperatura verificada pelo operador através de um termômetro por radiação infravermelha ou através do controlador de temperatura da máquina. Para o polietileno esta temperatura deve estar compreendida entre 200 °C e 220 °C, sendo esta uma função da espessura da parede dos tubos. A Figura 12 apresenta o gráfico que correlaciona ambas as grandezas, conforme a norma *DVS 2207-1 (GERMAN WELDING SOCIETY, 2007)*.

Figura 12. Temperatura da placa de aquecimento em função da espessura da parede do tubo.



Fonte: *DVS 2207-1 (GERMAN WELDING SOCIETY, 2007)*.

2.2.3.20 O bulbo inicial está no tamanho de acordo com os parâmetros de solda?

Após a placa de aquecimento chegar até a temperatura necessária, a mesma deve ser posicionada na máquina de solda e as extremidades dos componentes devem ser pressionados contra a placa com a pressão de pré-aquecimento adicionada da pressão de arraste. O conjunto deve permanecer sob essa condição até que seja formado um bulbo na face a ser soldada com altura mínima de acordo com a indicada pela norma de soldagem. O bulbo deve ser perceptível ao redor de todo o perímetro do tubo, indicando assim que toda a extremidade se encontra em contato com a placa de aquecimento.

2.2.3.21 O tempo de aquecimento está de acordo com os parâmetros de solda?

Uma vez atingida a condição de altura mínima do bulbo para ambas as extremidades a serem soldadas, a pressão da máquina de solda deve ser reduzida para o valor da pressão de aquecimento, também adicionada da pressão de arraste. Uma vez feito, inicia-se a contagem do tempo de aquecimento, que deve ser de dez vezes a espessura da parede do tubo, conforme NBR 14464 (ABNT, 2016).

2.2.3.22 Realizar o fechamento.

Uma vez finalizado o aquecimento, as extremidades devem ser afastadas da placa de aquecimento, possibilitando a remoção da mesma do chassi da máquina. Então, as extremidades devem ser unidas sob o valor da pressão de solda, corrigida pela adição da pressão de arraste. Toda a operação deve ser feita o mais rápido o possível, de forma a não ultrapassar o tempo máximo estabelecido pela norma de soldagem. Caso o tempo da operação exceda o tempo definido pela norma, o processo de soldagem deve ser reiniciado.

2.2.3.23 A pressão utilizada foi conforme parâmetros de solda?

A pressão da máquina deve ser monitorada ao longo de todo o período de resfriamento no qual as peças ainda estão na máquina. A máquina deve ser capaz de reter a pressão por todo o resfriamento, conforme *ISO 12176-1 (ISO, 2006)*. Caso a pressão diminua ao longo desta etapa a solda poderá resultar em inadequada ao final do processo.

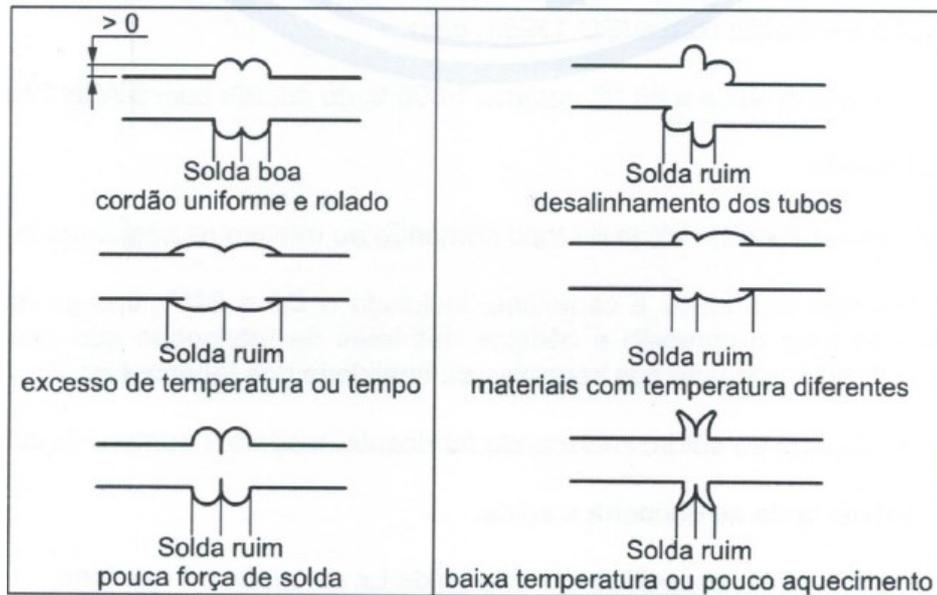
2.2.3.24 Foi respeitado o tempo de resfriamento conforme parâmetros de solda?

A união deve ser mantida imóvel e sob a pressão de união na máquina de solda pelo período de tempo para resfriamento estabelecido pelo fabricante da máquina de solda. Além disso, o processo de resfriamento não pode ser acelerado de nenhuma forma, sob o risco de acarretar em uma solda inadequada. Este requisito é necessário para garantir a formação dos cristalitos e evitar a ocorrência de tensões adicionais, a fim de que se estabeleça a resistência e a integridade da união (DANIELETTO, 2007).

2.2.3.25 O bulbo está no formato ideal?

Uma vez finalizado o resfriamento, o controle visual das soldas deve ser executado para garantir que a qualidade esteja em conformidade com os procedimentos aplicados. Os cordões de solda devem ser simétricos e uniformes em largura e altura em todo o perímetro do tubo. Com o auxílio de um paquímetro estas condições devem ser verificadas e inseridas no relatório da solda. A Figura 13 apresenta o aspecto típico de uma solda de topo executada conforme os padrões, bem como exemplos de soldas não conformes, segundo a NBR 14464 (ABNT, 2016).

Figura 13. Exemplos de bulbos e os defeitos característicos a eles relacionados.



Fonte: NBR 14464 (ABNT, 2016).

Algumas normas sugerem que, antes do início de cada processo de instalação de sistemas de tubulação de PEAD, por exemplo, seja realizada uma solda de referência sob a supervisão de um inspetor e que o bulbo da solda resultante seja utilizado como exemplo para inspeções visuais durante toda a execução da obra, como é o caso da NTS 060 (SABESP, 2019).

2.2.3.26 Controle de qualidade e relatório de soldagem.

Uma vez que o bulbo da solda esteja dentro dos padrões especificados e que todos os demais parâmetros tenham sido seguidos conforme as normas, finaliza-se o procedimento de soldagem com a retirada do conjunto da máquina e então é realizado o preenchimento do

relatório de solda. Este relatório tem todas as informações de identificação da solda, rastreabilidade das peças e execução do procedimento de solda, e pode ser mais ou menos completo de acordo com as necessidades do contratante. Em máquinas automatizadas, o relatório com os dados do procedimento e localização pode ser gerado pela própria máquina e então exportado ou impresso.

2.2.4 Definição das etapas a serem automatizadas

Uma vez finalizado o estudo das operações envolvidas durante a realização de uma solda de topo por termofusão, bem como dos requisitos necessários para o controle da qualidade estabelecido por normas e das principais práticas e tecnologias implementadas pelos fabricantes de máquinas existentes no mercado, é possível determinar as etapas do procedimento a serem automatizadas na máquina produto do projeto Embrapii/UFU/Complastec - NFEM - 2005.00038, sendo escolhidos os seguintes:

- Determinação dos parâmetros de soldagem: o operador irá inserir somente os dados do material a ser soldado, da norma a ser utilizada e os dados de DE e SDR das peças. Com isso, o software irá definir todos os tempos, pressões e temperaturas a serem estabelecidos em cada etapa do processo;
- Determinação da pressão de arraste: a máquina realizará automaticamente o processo de identificação da pressão de arraste, a fim de assegurar que a pressão de solda esteja dentro da tolerância especificada pelas normas de soldagem;
- Controle dos parâmetros de soldagem: a máquina será instrumentada para que o software da unidade de comando possa realizar o controle automático da temperatura de soldagem, das pressões e tempos de cada uma das etapas do processo de união, diminuindo a dependência do operador no processo;
- Otimização do tempo de resfriamento: a máquina determinará o tempo de resfriamento da solda em função da temperatura ambiente, a fim de conferir ganhos de produtividade ao processo sem prejudicar a qualidade da solda;
- Registro do procedimento: a máquina realizará o registro de todos os parâmetros pertinentes, conforme estabelecido pelas normas, e possibilitará a exportação dos dados para rastreabilidade e controle de qualidade.

Ademais, este trabalho focará no desenvolvimento do método para a detecção da pressão de arraste, o qual será detalhado nos próximos capítulos.

3 METODOLOGIA

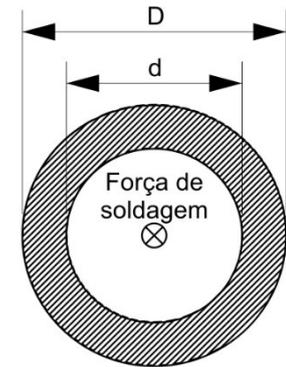
3.1 Avaliação da influência da Pressão de Arraste

Antes de iniciar a modelagem da detecção da pressão ou força de arraste, faz-se necessário a avaliação da influência da mesma no processo de solda. Conforme abordado em 2.2.3 e em 2.2.3.16, a pressão de contato a ser aplicada entre as peças apresenta tolerância relativamente estreita para o caso do procedimento de solda com baixa pressão. Neste caso, a pressão de união deve ser de $0,15 \pm 0,01$ MPa, o que corresponde a uma tolerância de aproximadamente $\pm 6,7\%$ do valor da pressão de união. Já no caso de o ciclo de solda ser de alta pressão, a pressão de união deve ser de $0,52 \pm 0,1$ MPa, o que corresponde a uma tolerância de $\pm 19,2\%$, quase três vezes maior quando comparada a do ciclo de baixa pressão. Do ponto de vista prático, percebe-se que a soldagem de tubos poliolefinicos admite uma variação da pressão de solda considerável. Para pressões de contato entre 0,15 MPa e 0,60 MPa a solda resulta em adequada, em contrapartida, pressões de solda baixas resultam em falha. Desta forma, a pressão de solda deve ser sempre ajustada com tolerância para cima (DANIELETTO, 2007).

Uma vez que o procedimento determina a pressão de contato entre as faces a serem unidas, a pressão a ser exercida pela unidade de transmissão de força, que é a pressão controlada de fato ao longo do processo, deve ser calculada com base nas características das peças e da máquina de solda. Primeiramente, determina-se a força a ser aplicada nas peças a serem soldadas de acordo com a Equação 2.

$$F = P * A = P * \frac{\pi}{4} * (D^2 - d^2) \quad \text{Eq. 2}$$

Figura 14. Representação da força aplicada na superfície a ser soldada.



Seção transversal do tubo

Fonte: Autoria própria.

Onde: F = força para a soldagem; P = pressão de contato entre as faces estabelecida pela norma de soldagem; D = diâmetro externo dos tubos e d = diâmetro interno dos tubos.

Em seguida deve ser realizada a conversão dessa força na pressão a ser exercida pela unidade de comando, que é dada pela Equação 3.

$$P_B = \frac{F}{A_c} = \frac{F}{N \cdot \frac{\pi}{4} (D_c^2 - d_c^2)} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: F = força para a soldagem; P_B = pressão a ser realizada pela bomba da unidade de comando; A_c = área útil da seção transversal dos cilindros da unidade de transmissão de força; N = quantidade de cilindros hidráulicos; D_c = diâmetro interno da camisa do cilindro hidráulico; d_c = diâmetro da haste do cilindro.

A máquina produto do projeto possui 2 cilindros hidráulicos em seu chassi, com $D_c = 32$ mm e $d_c = 25$ mm. Substituindo estes valores na Equação 3 e adotando os parâmetros especificados para o método de união com baixa pressão, obtém-se a Equação 4, que fornece P_B em função das peças a serem unidas.

$$P_B = 1,88 * 10^{-3} * (D^2 - d^2) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde P_B é expresso em Bar e D e d são expressos em mm.

Já a variação de P_B permitida pela norma, ΔP_B , é calculada da mesma forma, alterando apenas o valor da pressão na Equação 2 de 0,15 MPa para 0,01 MPa. Com isso obtém-se a Equação 5, que relaciona ΔP_B com D e d .

$$\Delta P_B = 1,25 * 10^{-4} * (D^2 - d^2) \quad \text{Eq. 5}$$

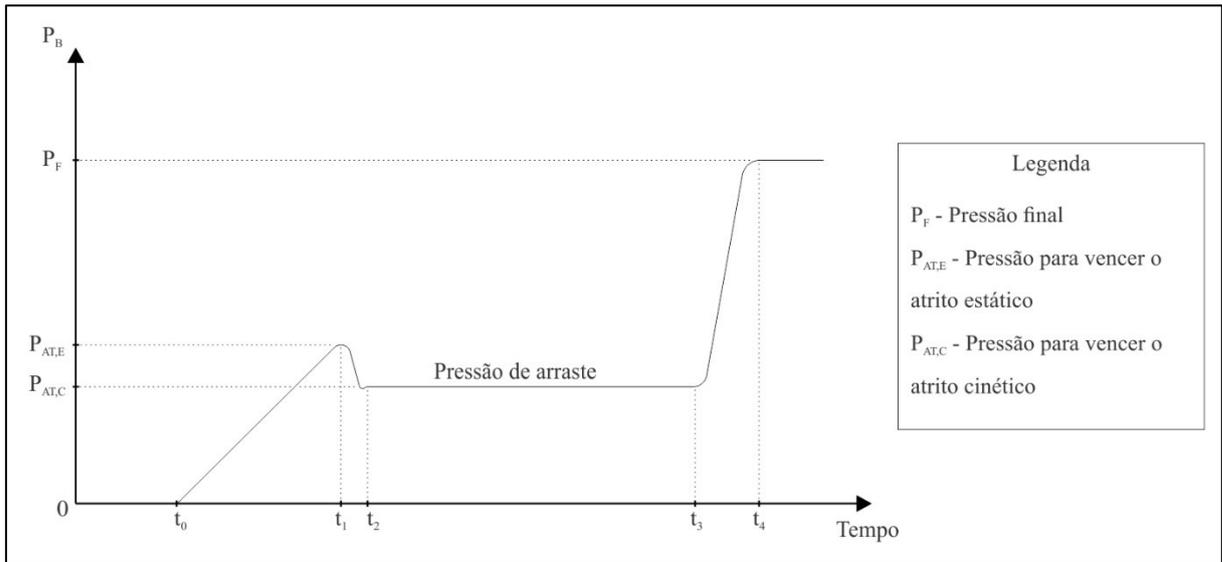
Através da Equação 5 percebe-se que ΔP_B varia em função das peças a serem soldadas. Para questões de projeto deve ser analisado o caso mais restritivo, que é obtido no caso da peça de menor DE e maior SDR possíveis de serem soldados. No caso da máquina produto, a combinação consiste em tubos de DE 250 mm e SDR 33, que possuem $D = 250$ mm e $d = 234,85$ mm. Neste caso, a pressão de solda P_B é igual a 13,8 Bar com uma tolerância $\Delta P_B = \pm 0,9$ Bar. Caso o procedimento utilizado na soldagem seja o de alta pressão, e avaliando para peças de mesmo DE e SDR, a pressão de solda P_B é igual a 47,9 Bar com uma tolerância $\Delta P_B = \pm 9,2$ Bar. Assim, faz-se necessário que o algoritmo de detecção da pressão de arraste a ser aplicado na máquina produto seja capaz de estimar a pressão de arraste respeitando $\Delta P_B = \pm 0,9$ Bar, pelo menos, e que o sistema de medição apresente resolução da ordem de 0,1 Bar. Este é o primeiro ponto em que este trabalho apresenta uma contribuição, isto é, os manômetros comumente empregados nas máquinas de solda disponíveis no mercado possuem resoluções menores que a exigida, com valores normalmente de 2 Bar, e, portanto, haverá erros decorrentes da leitura do operador.

3.2 Modelo Teórico

A pressão de arraste é a pressão mínima a ser exercida pela unidade de comando para que se inicie o movimento das abraçadeiras móveis da máquina. Ela advém das diversas forças de atrito presentes no sistema, como o atrito entre os tubos e o solo e o atrito entre as hastes e as vedações dos cilindros hidráulicos do sistema de transmissão de força. A forma de detecção manual consiste em elevar a pressão da bomba gradualmente até que a força exercida pela máquina supere o atrito estático do sistema. Neste momento, as abraçadeiras móveis começam a se movimentar, tendo como resistência ao movimento apenas o atrito cinético do sistema.

Com o atrito cinético mantendo-se constante ao longo do tempo, as abraçadeiras móveis irão se deslocar sob uma pressão constante aplicada pela unidade de comando até que os tubos se encontrem ou que os pistões dos cilindros cheguem ao fim de curso. Neste momento, o movimento cessará rapidamente e a pressão dentro dos cilindros aumentará até o valor estabelecido pelo operador através da válvula reguladora de pressão. A Figura 15 mostra os valores da pressão da bomba, P_B , ao longo do tempo de operação.

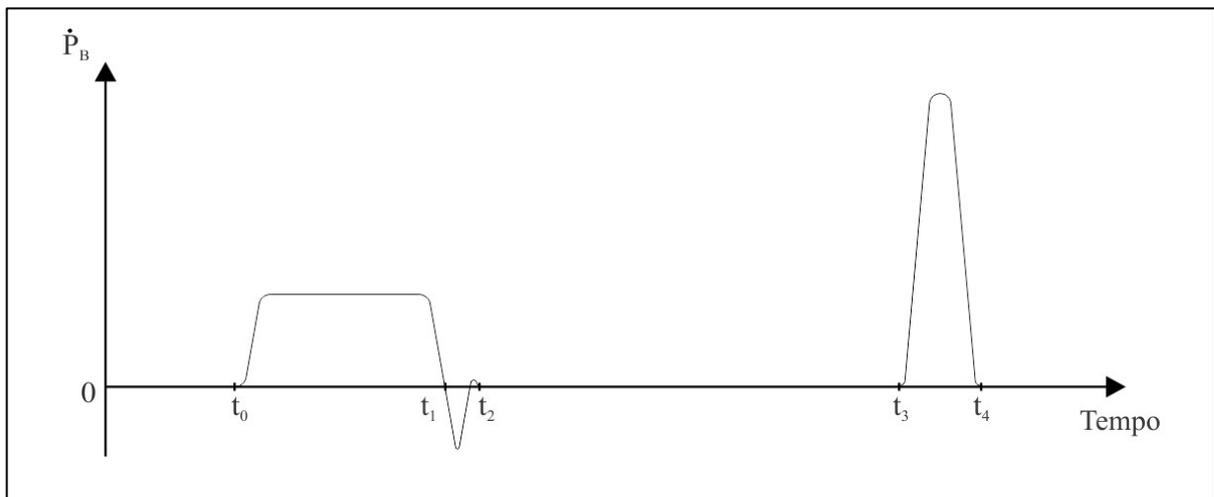
Figura 15. P_B em função do tempo durante a detecção da Pressão de Arraste.



Fonte: Autoria própria.

A forma como a pressão da bomba aumenta antes de se iniciar o movimento do conjunto depende da forma como o soldador está regulando a pressão através da unidade de comando. Já o aumento de pressão após o fim do movimento se dá de forma mais rápida uma vez que decorre do impacto repentino entre os tubos ou entre o pistão e a camisa do cilindro hidráulico. Isto significa dizer que a taxa de variação da pressão em função do tempo no momento do impacto atinge um valor máximo. A Figura 16 mostra um esboço do gráfico da derivada de P_B em relação ao tempo plotada ao longo do tempo da operação de detecção do arraste.

Figura 16. Comportamento de $\dot{P}_B = dP_B/dt$ durante a detecção da Pressão de Arraste.



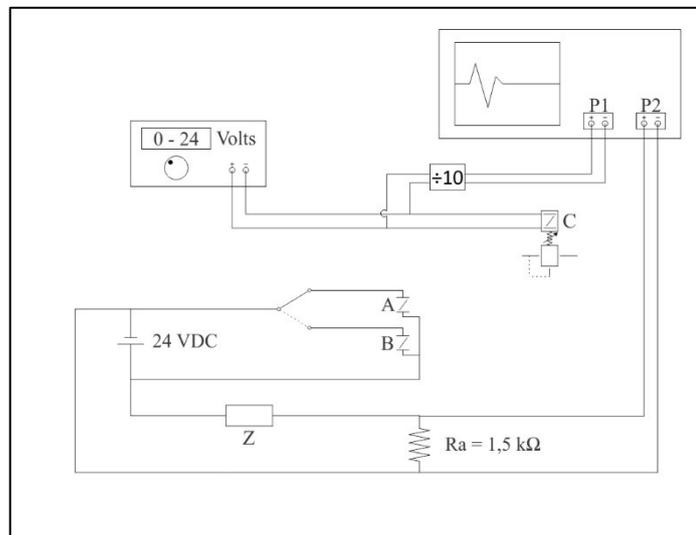
Fonte: Autoria própria.

Uma vez validado este comportamento, pode-se utilizar o pico da taxa de variação de P_B como critério para a detecção do contato entre os tubos e então proceder com o cálculo da pressão de arraste avaliando P_B imediatamente antes deste instante. Outra alternativa é avaliar P_B assim que se iniciar o movimento do conjunto móvel. Neste caso, o critério para a detecção deste instante seria o valor negativo de \dot{P}_B decorrente da diminuição de P_B do valor do atrito estático para o valor do atrito cinético.

3.3 Validação Experimental

Para verificar o modelo teórico foram realizados testes na empresa Complastec. Para tal, foi utilizado o chassi de uma máquina modelo 315 mm da fabricante WIDOS, disponibilizado pela Complastec, e a bomba hidráulica adquirida para a máquina produto do projeto. O controle da pressão da bomba, a aquisição e o registro dos dados foram realizados através da instrumentação da bomba conforme a Figura 17.

Figura 17. Layout de instrumentação do sistema de comando.



Fonte: Autoria própria.

No layout, as bobinas A e B representam as bobinas de acionamento da válvula de comando direcional para abrir e fechar as abraçadeiras da máquina, respectivamente. Já a bobina C representa a bobina da válvula reguladora de pressão da bomba, a qual é submetida a uma tensão P_{SP} , que é fornecida por uma fonte de tensão com saída de 0 V a 24 V. A impedância Z representa o transdutor de pressão conectado à linha de recalque da bomba e através do qual será monitorada a pressão da bomba P_B . A resposta do transdutor é dada em corrente de 4 mA

a 20 mA e é condicionada através da resistência R_a de 1,5 k Ω , convertendo-a em tensão que é lida pelo analisador de sinais Agilent modelo 35670A. O transdutor é da marca Rexroth, modelo HM20-2X/250-C-K35. Além disso, foi montado também um manômetro para possibilitar o acompanhamento visual do valor de P_B .

Para simular a condição de arraste de tubos, um gerador de 400 kg foi preso às abraçadeiras móveis e o chassi foi fixado a um outro gerador de 600 kg, conforme pode ser visto nas Figura 18.

Figura 18. Fotografia do arranjo experimental.



Fonte: Autoria própria.

Uma vez organizado todo o aparato de teste, procedeu-se com a obtenção da correlação entre a tensão de saída do transdutor de pressão e a pressão da bomba P_B , a qual é expressa pela Equação 6, obtida por regressão linear via método dos mínimos quadrados e onde P_B é expresso em Bar e P_{BV} é o sinal em Volts gerado pelo transdutor de pressão.

$$P_B = 9,6399 * P_{BV} - 57,4208 \quad \text{Eq. 6}$$

Na sequência foram simuladas seis condições para detecção do arraste. Elas foram obtidas variando a tensão aplicada à bobina da válvula proporcional manualmente e mudando a forma como esta variava ao longo do tempo, indo desde um aumento lento da pressão da bomba até uma entrada em degrau. Para todas as condições manteve-se o mesmo peso preso às

abraçadeiras móveis, bem como foram realizadas no mesmo local, de forma a alterar menos o possível a pressão de arraste de uma condição para a outra. Também foram mantidas as mesmas posições iniciais e finais das abraçadeiras móveis, sendo estas o fim de curso dos cilindros no sentido de abrir e de fechar os tubos, respectivamente. Para cada condição foram registrados os dados de P_{BV} e P_{SP} ao longo do tempo e então estes foram exportados para análise. A frequência de aquisição de todas as amostras foi de 128 Hz, exceto para a primeira, que foi de 256 Hz. As figuras 19 e 20 mostram uma das condições sendo simuladas.

Figura 19. Abraçadeiras móveis se movimentando.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20. P_{BV} e P_{SP} ao longo do tempo para a condição simulada.



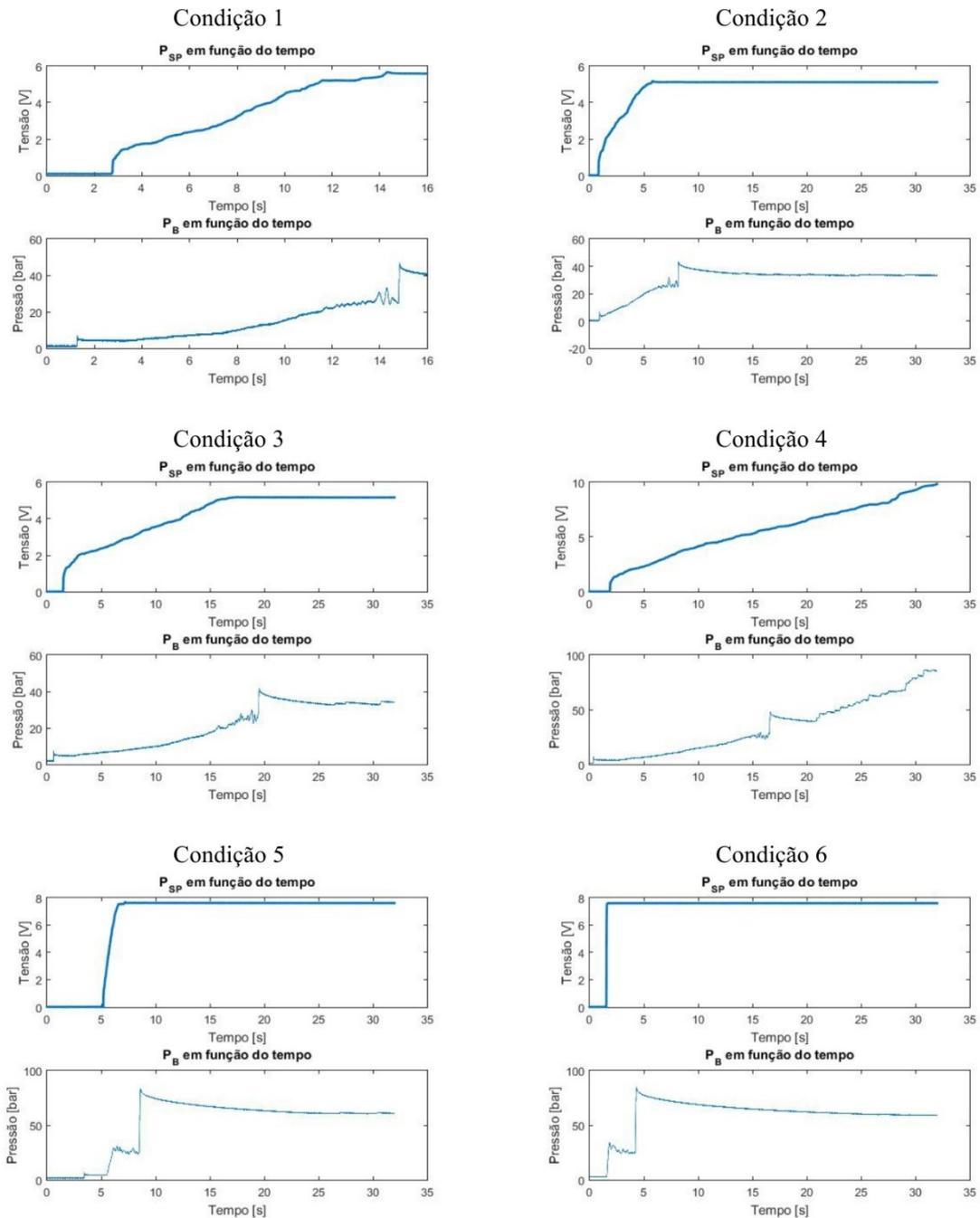
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados da validação experimental

Os gráficos de P_B e P_{SP} em função do tempo para cada uma das seis condições testadas encontram-se na Figura 21.

Figura 21. P_B e P_{SP} em função do tempo para as condições 1 a 6.

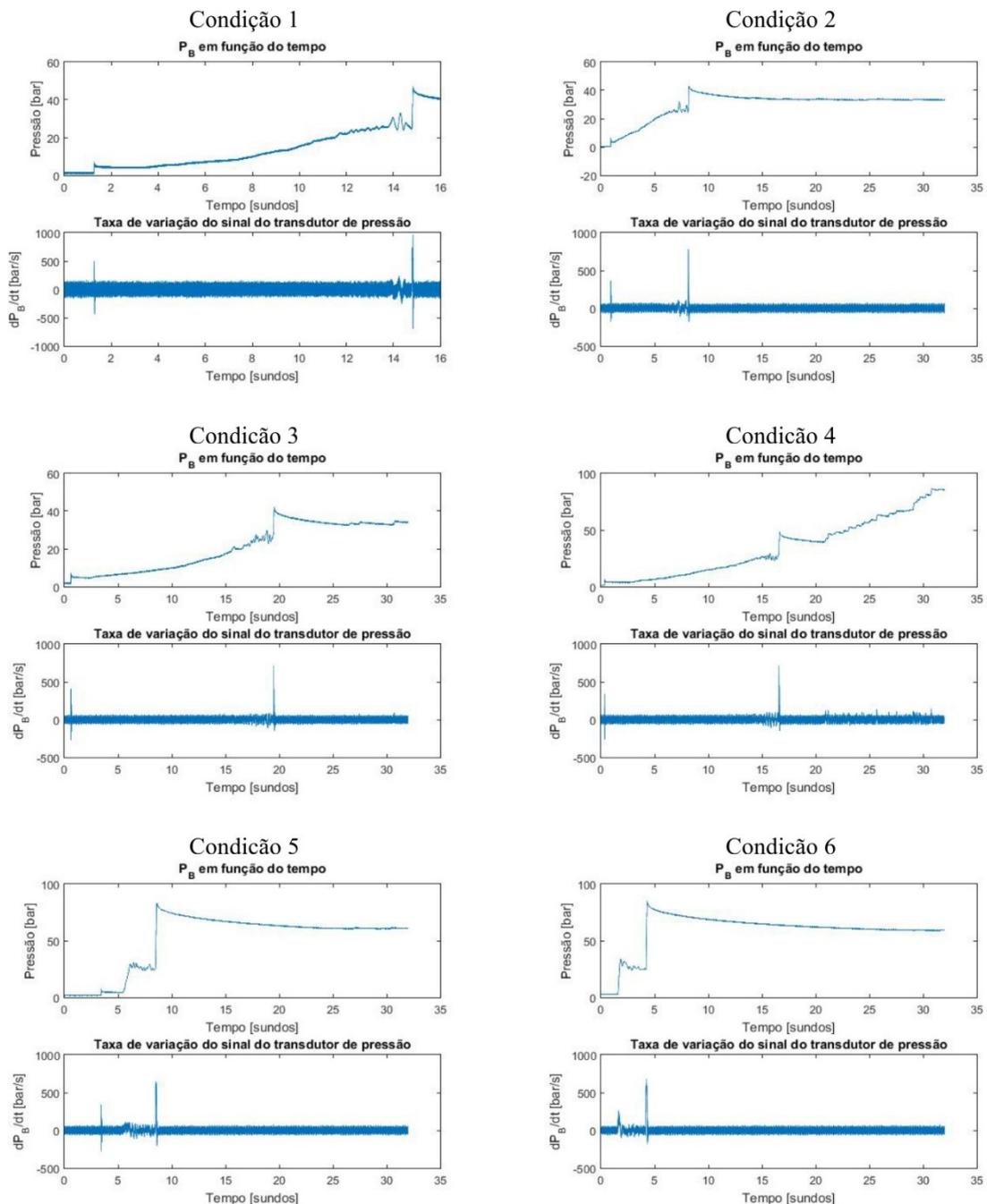


Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser observado, P_B apresenta um comportamento muito similar ao esperado no modelo teórico, principalmente na condição 6, que foi obtida com uma entrada em degrau da tensão P_{SP} na bobina da válvula proporcional, e na condição 5, que foi obtida com um aumento rápido do valor de P_{SP} .

Na Figura 22 observa-se o valor da taxa de variação de P_B em relação ao tempo durante a execução de cada um dos testes.

Figura 22. Comportamento de P_B e \dot{P}_B para as condições 1 a 6.

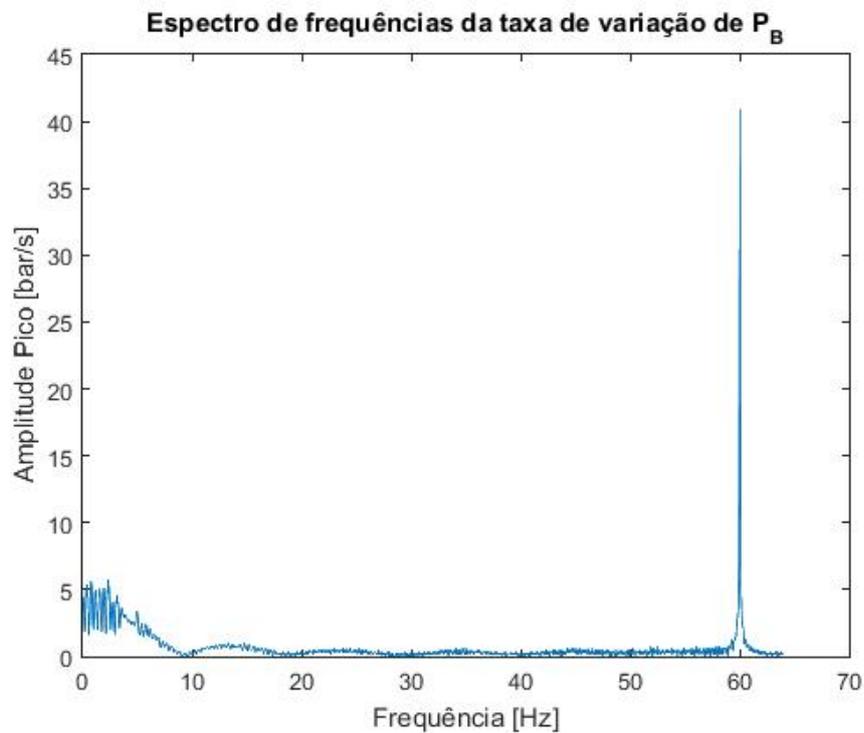


Fonte: Autoria própria.

Avaliando os gráficos da Figura 22 pode-se observar os seguintes pontos:

- a) É possível verificar um pico acentuado e de fácil identificação no gráfico no instante em que as abraçadeiras móveis atingem o fim de curso, o que corrobora para a validação do modelo teórico;
- b) É possível verificar picos também nos instantes iniciais de algumas das condições testadas. Esses picos são decorrentes do acionamento da válvula de comando direcional, que causa uma oscilação de pressão na linha durante o processo. Os gráficos que não apresentam esse pico no início tiveram a aquisição de dados iniciada após a abertura da válvula;
- c) Verifica-se também um intenso ruído em todo o sinal. O mesmo é proveniente da rede de alimentação elétrica de frequência 60 Hz e pode ser constatado através da análise da composição do espectro do sinal no domínio da frequência, como pode ser verificado para a condição 6 na Figura 23.

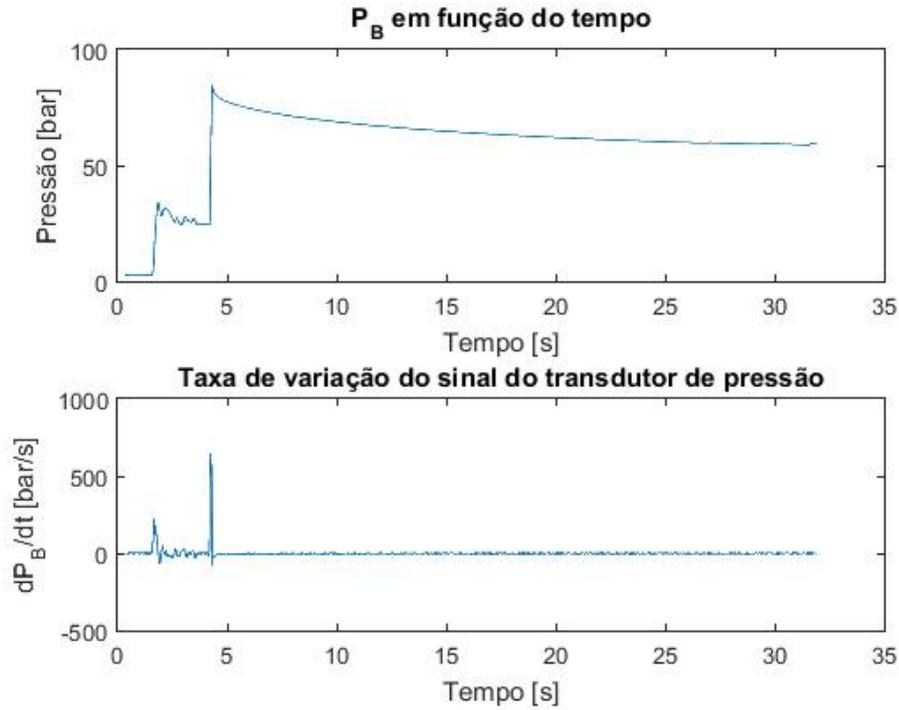
Figura 23. Espectro de frequências de \dot{P}_B para a condição 6.



Fonte: Autoria própria.

Aplicando um filtro passa-baixa com frequência de corte 50 Hz aos dados obtidos obtém-se uma melhor visualização da taxa de variação de P_B em função do tempo. A Figura 24 mostra o resultado da aplicação do filtro para a condição 6.

Figura 24. Comportamento de P_B e \dot{P}_B para a condição 6 após a aplicação de filtro.



Fonte: Autoria própria.

O comportamento de P_B e de sua derivada em relação ao tempo se assemelham muito ao apresentado no modelo teórico. Percebe-se que, mesmo alterando a forma de acionamento da válvula reguladora de pressão, o comportamento apresentado por P_B continua muito semelhante entre as diferentes condições testadas. A fim de automatizar a detecção da pressão de arraste, foi analisada a taxa de variação de P_B em três momentos para cada condição: elevação da pressão antes do arraste, o instante de início do arraste e o momento em que as abraçadeiras móveis chegam ao fim de curso, isto é, momentos entre t_0 e t_1 , entre t_1 e t_2 e entre t_3 e t_4 da Figura 16, respectivamente. Em cada um dos momentos foi avaliado o maior valor em módulo da taxa de variação de P_B . Além disso, o filtro foi aplicado aos sinais de todas as condições. A Tabela 1 apresenta os valores levantados.

Tabela 1. Valores de \dot{P}_B (Bar/s) para cada uma das condições testadas em diferentes momentos.

Momento	Condição					
	1	2	3	4	5	6
t_0 a t_1	41,8	66,1	56,9	27,7	74,8	219,7
t_1 a t_2	-52,0	-67,5	-44,0	-46,0	-62,2	-67,2
t_3 a t_4	629,8	617	526,9	599,6	638,8	648,5

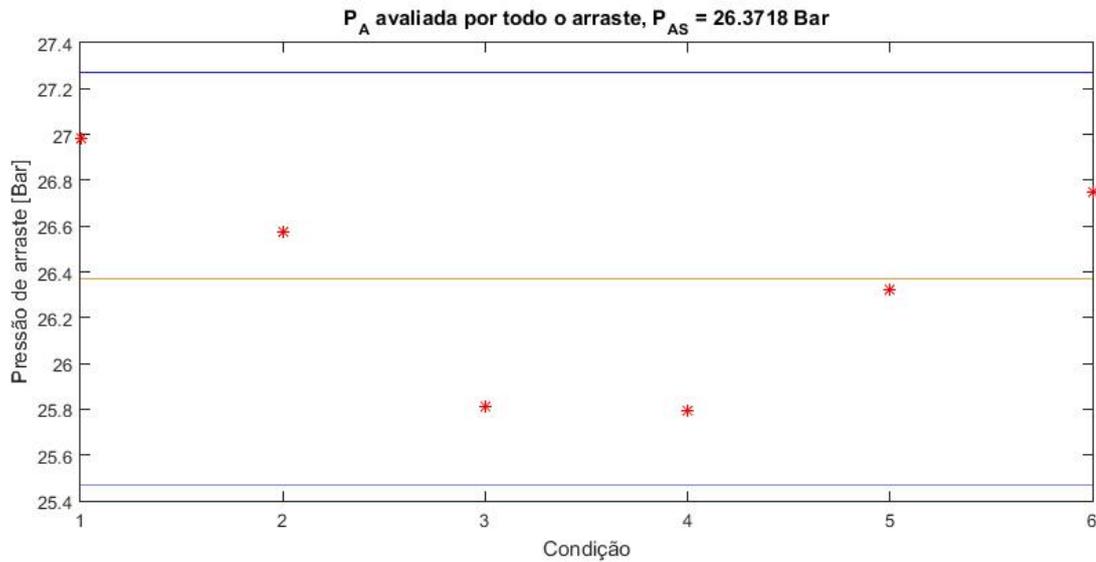
Fonte: Autoria própria.

Analisando os valores da Tabela 1 verifica-se que o início do movimento das abraçadeiras, entre t_1 e t_2 , e o fim do movimento, entre t_3 e t_4 , são facilmente identificáveis de forma numérica e que os valores para a taxa de variação de P_B são similares, em questão de ordem de grandeza, para as diversas condições testadas. Mesmo na condição 6, na qual P_{SP} foi elevada não gradualmente, mas sim através de uma entrada em degrau, o valor obtido para a derivada de P_B antes do início do arraste não se comparou ao valor obtido ao final do arraste entre t_3 e t_4 . Desta forma, para o conjunto de unidade de comando e chassis em estudo, pode-se determinar os instantes de início e fim do arraste através do monitoramento da derivada de P_B , adotando-se como critérios valores menores que -35,0 Bar/s para o momento do início do arraste e valores maiores que 500 Bar/s para o momento do fim do arraste.

Uma vez sendo capaz de detectar o período no qual o conjunto está submetido à pressão de arraste, resta calcular o valor da mesma para as diferentes condições. O valor da pressão de arraste que se deseja obter é aquele referente ao instante imediatamente antes do contato entre os tubos, isto é, imediatamente antes de t_3 , momento no qual o conjunto está sujeito somente ao atrito cinético, teoricamente. Uma maneira de estimar o valor de P_A é considerar que o conjunto está sob a ação apenas do atrito cinético entre os momentos t_2 e t_3 , conforme exposto no modelo teórico através da Figura 15, e realizar o cálculo da média de P_B ao longo deste intervalo.

Desta forma, P_A foi estimada para cada uma das seis condições testadas e a identificação dos intervalos de cálculo foi baseada nos critérios descritos. Então procedeu-se com o cálculo da pressão de arraste do sistema, P_{AS} , fazendo a média dos seis valores de P_A encontrados. O resultado encontra-se na Figura 25, a qual mostra os valores de P_A , P_{AS} e os limites superiores e inferiores relativos à tolerância especificada na norma de soldagem realizada a baixa pressão e que foram definidos como $P_{AS} \pm 0,9$ Bar.

Figura 25. Valores de P_A para as condições 1 a 6 e avaliação de atendimento à tolerância.



Fonte: Autoria própria.

Percebe-se na Figura 25 que todos os valores de P_A ficaram dentro da tolerância especificada pela norma. Entretanto, ao realizar o cálculo de P_A desta forma o valor calculado leva em conta o atrito estático e outras flutuações no valor de P_B , como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26. Intervalo de cálculo para a condição 6.



Fonte: Autoria própria.

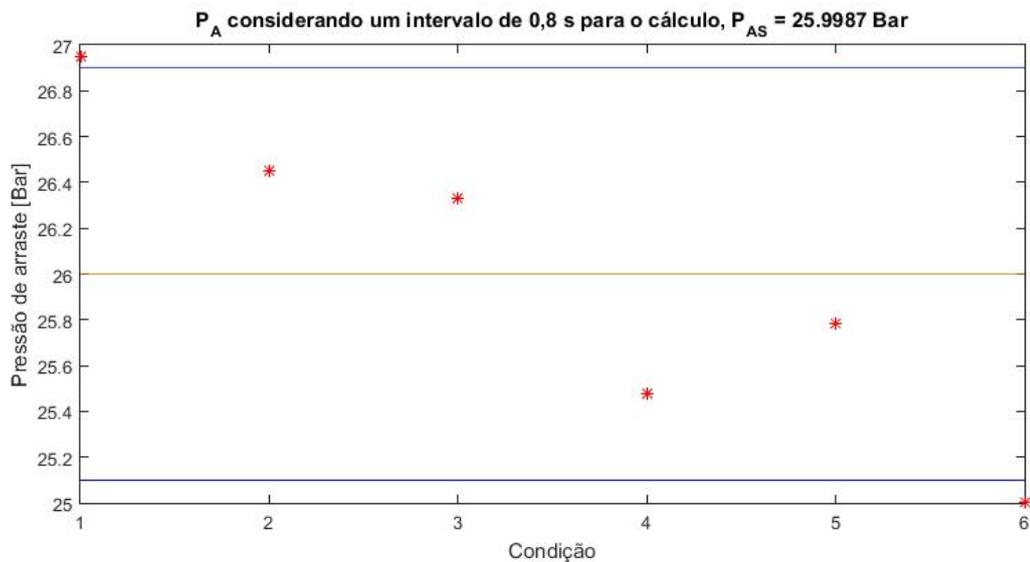
Dessa forma, é de interesse calcular os valores de P_A considerando um intervalo de cálculo mais próximo ao fim do movimento das abraçadeiras, afim de eliminar a influência da

flutuação da força de arraste próxima ao instante t_2 . Para tal, repetiu-se a análise feita para a Figura 25, só que desta vez considerando os valores de P_B contidos dentro de um intervalo de aproximadamente 0,8 segundos imediatamente antes de t_3 , que corresponde a 100 valores de P_B para as condições realizadas com uma frequência de aquisição de 128 Hz e a 200 valores para a condição realizada com frequência de aquisição de 256 Hz. O novo intervalo de cálculo pode ser visualizado na Figura 27 e o resultado dessa nova análise pode ser visto na Figura 28.

Figura 27. Novo intervalo de cálculo considerado para a Condição 6.



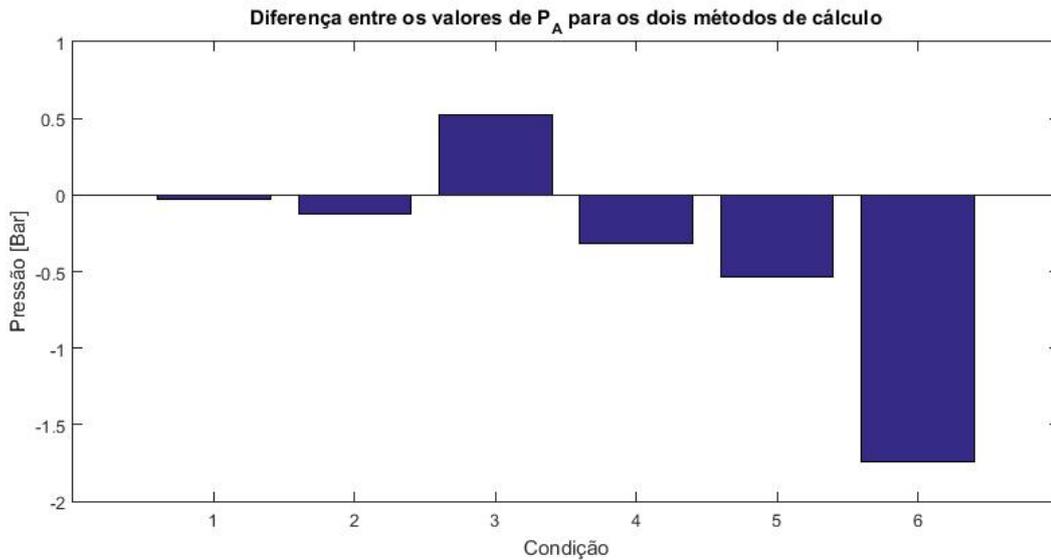
Figura 28. Valores de P_A para as condições 1 a 6 - cálculo para um intervalo de 0,8 s.



Fonte: Autoria própria.

O valor de P_{AS} diminuiu aproximadamente 0,37 Bar, indicando uma redução da influência das flutuações da pressão. Entretanto, algumas condições apresentaram maior variação de um método de cálculo para o outro, o que leva a analisar a diferença entre os dois valores de P_A obtidos em cada uma das condições. O resultado da comparação é mostrado na Figura 29.

Figura 29. Diferença entre os valores de P_A obtidos pelos dois métodos de cálculo.



Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser visto, a maior diferença ocorre para a condição 6. Nela, P_{SP} aumenta rapidamente através de uma entrada em degrau e P_B se comporta o mais próximo do previsto no modelo teórico, com uma menor variação em seu valor após o início do movimento, como pode ser visto na Figura 21. O valor de P_A obtido para a condição 6 considerando um intervalo de cálculo de 0,8 s é consideravelmente menor que o valor obtido considerando o intervalo de cálculo entre t_2 e t_3 , indicando uma redução significativa da influência das variações de P_B no segundo método. Já nas demais condições a redução do valor de P_A do primeiro para o segundo método foi menos significativa, indicando uma menor atenuação dos efeitos das oscilações de P_B . Nestas condições, P_{SP} não aumenta em degrau, o que leva a crer que a forma como P_{SP} é aplicada à válvula reguladora interfere no resultado de P_A e que a elevação em degrau é a melhor maneira de fazê-lo.

Conclui-se que a melhor forma de estimar P_A é utilizando um intervalo de 0,8 s imediatamente antes de t_3 e elevando P_{SP} com uma entrada em degrau. Portanto, para a detecção

automática da pressão de arraste o algoritmo de comando e cálculo deve proceder com as seguintes operações:

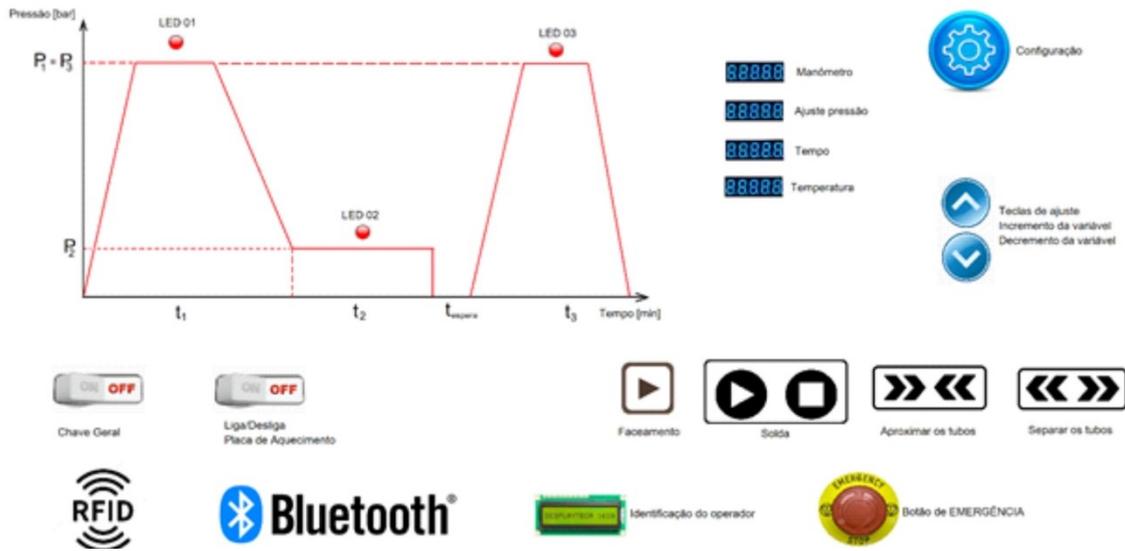
- a) As abraçadeiras móveis da máquina devem ser colocadas em posição de abertura máxima;
- b) P_{SP} deve ser zerado, de forma a zerar a pressão na linha;
- c) A válvula de comando deve ser acionada na posição de fechar o móvel da máquina;
- d) Iniciar a aquisição dos valores de P_B ;
- e) Configurar, através de uma entrada em degrau, P_{SP} no máximo valor com o qual a unidade de comando trabalha, permitindo detectar pressões de arraste em todo o range de trabalho da máquina;
- f) Assim que a taxa de variação de P_B exceder o valor de 500 Bar/s, marcar o valor do tempo, que é o instante no qual o móvel chegou ao fim de curso ou cessou o movimento devido ao contato entre os tubos. Caso isto não ocorra, a pressão de arraste do sistema é mais elevada que a capacidade de trabalho da máquina e P_B estabilizou no valor da máxima pressão de trabalho da bomba;
- g) No caso de ocorrer o movimento da máquina, calcular P_A fazendo a média de P_B durante os últimos 0,8 segundos de movimento. Isto diminuirá o efeito do valor do atrito estático sobre P_A ;
- h) Ajustar a pressão final de faceamento, pré-aquecimento, aquecimento ou solda utilizando os parâmetros da norma adotada e o valor de P_A obtido.

Mesmo com a consistência entre o modelo teórico e a validação experimental, bem como a robustez dos dados obtidos, faz-se necessário destacar que os parâmetros a serem implementados no software da máquina deverão ser recalculados tendo por base dados obtidos através de experimentos a serem realizados com todos os componentes integrantes da máquina, produto deste projeto de pesquisa, pronta. No entanto, a metodologia aqui proposta pode ser validada neste trabalho.

4.2 Algoritmo para a realização automática da solda

Uma vez determinada a pressão de arraste, a realização da solda envolve o controle das pressões e temperatura de soldagem utilizando controladores PID e tendo como pontos de referência os parâmetros especificados pela norma de soldagem. Assim, a fim de atender a todos os requisitos levantados, foi idealizado o *layout* para a unidade de comando apresentado na Figura 30.

Figura 30. Layout da unidade de comando.



Fonte: Autoria própria.

Com este *layout* a unidade de comando poderá ser operada no modo semiautomático, com a definição dos parâmetros de soldagem sendo realizada pelo operador e configurada através das teclas de “Configuração”, “Incremento” e “Decremento”. Ademais, a máquina também poderá trabalhar no modo automático, com os parâmetros sendo definidos automaticamente através da definição pelo operador dos dados do material, da norma de soldagem, do DE e do SDR das peças. Para tal, o soldador deverá configurar tais dados via aplicativo de celular, o qual especificará os parâmetros de soldagem em função dos dados inseridos e então os exportará para a máquina através de conexão *bluetooth*. Independentemente de quem faça a configuração dos parâmetros de soldagem na máquina, se o soldador ou o aplicativo de celular, as etapas para a realização da soldagem são as mesmas. Os passos 1 a 42 sequenciam os passos do algoritmo a ser implementado no software da máquina produto para o modo de operação semiautomático:

1. Posicionamento das peças na máquina pelo soldador;
2. Soldador liga a máquina de solda;
3. Soldador aproxima o crachá do leitor de RFID para identificação do operador. Neste momento, é definido no controlador a variável de registro e impressão OPERADOR. Se qualquer outra operação for realizada antes da leitura do cartão RFID à variável OPERADOR será atribuído o valor DESCONHECIDO. O valor da variável será sempre indicado no visor específico para isto;

4. Soldador pressiona a tecla CONFIGURAÇÃO e o display “Temperatura” começa a piscar indicando que as teclas de incremento e decremento podem ser usadas para ajustar a temperatura de funcionamento da placa. Define-se então a variável TEMPERATURA com o valor indicado no display “Temperatura”;
5. O soldador pressiona a tecla CONFIGURAÇÃO e o display “Temperatura” para de piscar e passa a indicar a temperatura instantânea da placa de aquecimento de forma contínua;
6. Assim que o soldador ligar a chave da placa de aquecimento, o controlador da temperatura irá alimentar a placa de aquecimento e mantê-la na temperatura ajustada. O controle será feito utilizando um hardware com controle PID e relés de estado sólido. A referência será enviada pela CPU da máquina ao controlador de temperatura PID via sinal analógico;
7. Enquanto a placa de aquecimento não estiver na temperatura adequada para a realização da solda, a mesma deve ser mantida no seu suporte;
8. Para iniciar a configuração manual dos parâmetros de solda, o soldador deve manter a tecla CONFIGURAÇÃO pressionada até o LED 01 acender;
9. O soldador deve usar as teclas de ajuste para ajustar a pressão P1, referente à etapa de pré-aquecimento. O valor será indicado no display “Ajuste de Pressão”;
10. O soldador deve então pressionar a tecla CONFIGURAÇÃO e o display “Tempo” irá piscar para ajuste do tempo t1, referente ao tempo mínimo necessário para a formação do bulbo especificado pela norma de soldagem durante o pré-aquecimento. Neste instante o valor indicado no display “Ajuste de Pressão” e configurado no passo 9 será armazenado nas variáveis P1 e P3 no controlador da máquina, referentes às pressões de pré-aquecimento e de união;
11. O operador deve usar as setas para cima e para baixo para ajustar o tempo t1. O valor será indicado no display “Tempo”. Este valor deve ser maior que o tempo suficiente para a formação do bulbo mínimo especificado na norma de soldagem;
12. O operador pressiona a tecla CONFIGURAÇÃO novamente e o LED 01 se apagará, bem como o valor indicado no display “Tempo” será armazenado na CPU da máquina na variável t1. Em seguida, o LED 02 se acenderá indicando que a pressão P2 pode ser ajustada;
13. O operador configura a pressão P2. O valor será indicado no display “Ajuste de Pressão”;

14. Ao pressionar a tecla CONFIGURAÇÃO novamente, o display “Tempo” irá piscar para ajuste do tempo de aquecimento t2. Neste instante o valor indicado no display “Ajuste de Pressão” será armazenado na variável P2 no controlador da máquina;
15. O operador deve usar as teclas de ajuste para configurar o tempo t2. O valor será indicado no display “Tempo”;
16. O soldador deve pressionar a tecla CONFIGURAÇÃO novamente. O LED 02 se apagará, o valor indicado no display “Tempo” será armazenado no controlador da máquina na variável t2 e o LED 03 se acenderá indicando que a pressão P3 pode ser alterada do valor indicado no display “Ajuste de Pressão”;
17. O soldador deve então ajustar a pressão P3. O valor será indicado no display “Ajuste de Pressão”. O soldador deve pular esta etapa se deseja manter P1 igual a P3;
18. Ao pressionar mais uma vez a tecla CONFIGURAÇÃO, o display “Tempo” irá piscar para ajuste do tempo t3. Neste instante o valor indicado no display “Ajuste de Pressão” será armazenado na variável P3 no controlador da máquina;
19. O soldador deve usar as setas para cima e para baixo para ajustar o tempo t3. O valor será indicado no display “Tempo”;
20. Ao pressionar a tecla CONFIGURAÇÃO, o LED 03 se apagará, o valor indicado no display “Tempo” será armazenado no controlador da máquina na variável t3;
21. Deve-se então proceder com a abertura manual da máquina, afastando o móvel totalmente apertando a tecla SEPARAR TUBOS;
22. Posicionamento do faceador entre as peças;
23. O faceador deve ser habilitada ativando a chave presente na sua carcaça;
24. O soldador deve então apertar a tecla FACEAMENTO. Neste instante o faceador iniciará seu movimento e após isto os tubos serão fechados, encostando no faceador automaticamente. Durante o movimento do móvel será realizada a detecção da pressão de arraste, cujo cálculo será realizado assim que os tubos encontrarem o faceador. Neste instante, o software realizará o cálculo da pressão de faceamento como a soma de P_A mais 35 Bar. Uma vez definida a pressão de faceamento, a CPU informará ao controlador PID de pressão o valor a ser atingido e o resultado será que a pressão de contato indicada no display “manômetro” será a soma da pressão de arraste e 35 bar. O soldador não terá acesso direto à pressão de arraste, tornando o processo independente da atividade humana nesta etapa;
25. O soldador deve acompanhar o faceamento até que o resultado desejado seja alcançado;

26. Para parar o faceamento, o soldador deve apertar a tecla SEPARAR TUBOS. Neste instante os tubos se separam do faceador, esta desliga automaticamente, e então o móvel abre totalmente. Caso seja necessário, devem ser repetidos os passos 24 e 25;
27. É realizada a retirada do faceador;
28. Posiciona-se a placa de aquecimento no chassi da máquina;
29. O soldador deve apertar a tecla SOLDA para dar início ao processo de união. A qualquer momento pode-se interromper a solda selecionando o botão STOP. Caso isto ocorra, a bomba para e a válvula reguladora de pressão zera completamente a pressão na linha;
30. Uma vez iniciada a solda, a máquina aproximará os tubos pressionando estes sobre a placa de aquecimento. A detecção da pressão de arraste se dará ao longo da aproximação dos tubos até o contato com a placa de aquecimento para a realização do pré-aquecimento, passando pelos mesmos cálculos da etapa 24 e baseados no algoritmo para a detecção da pressão de arraste desenvolvido. Uma vez calculada a pressão de arraste, a CPU informará ao controlador o valor de P_1 corrigido por P_A . O manômetro deve indicar o valor da pressão indicada no display “Ajuste de Pressão” mais a pressão de arraste. O LED 01 permanecerá aceso e o display “tempo” indicará a contagem regressiva de t_1 ;
31. O soldador deve acompanhar a formação do bulbo e caso este se forme na dimensão mínima antes da contagem regressiva de t_1 , a tecla SOLDA deve ser novamente pressionada e a máquina passará para o aquecimento;
32. O LED 01 se apagará o LED 02 se acenderá e o display “Ajuste de Pressão” indicará P_2 . Neste instante a máquina automaticamente ajustará a pressão configurada para a etapa P_2 até que o display “manômetro” indique o valor de P_A adicionado de P_2 . Além disso, o display “Tempo” irá indicar a contagem regressiva de t_2 ;
33. 15 segundos antes do término da contagem regressiva de t_2 um alarme sonoro soará;
34. Ao término da contagem regressiva a máquina afastará os tubos, separando estes da placa de aquecimento e o LED 02 se apagará;
35. A placa de aquecimento deverá ser removida em até 06 segundos;
36. A máquina irá aproximar os tubos e ajustará a pressão de contato automaticamente como a soma de P_A e P_3 . O display “Tempo” irá iniciar a contagem regressiva de t_3 . O tempo de resfriamento é dependente da temperatura ambiente. Um sensor de temperatura ambiente irá regular o tempo t_3 e o display de tempo irá piscar quando o tempo corrigido em função da temperatura tiver transcorrido totalmente. O usuário poderá decidir então por parar a solda pressionando a tecla STOP ou continuar até que o tempo t_3 obtido na

tabela transcorra totalmente. Ao decidir por parar a solda o algoritmo pula para o passo 38;

37. A máquina irá soar um alarme indicando o fim da solda ao final de t_3 ;
38. A válvula reguladora de pressão irá zerar a pressão na linha e a bomba hidráulica será desligada automaticamente;
39. O operador poderá então realizar a remoção dos tubos da máquina, bem como exportar o relatório da solda via bluetooth;
40. O ID de usuário retornará então ao status DESCONHECIDO.
41. A máquina manterá os parâmetros da solda a menos que o usuário pressione a tecla STOP após ver o status DESCONHECIDO no display.
42. Fim do algoritmo.

A partir do algoritmo do processo de soldagem supracitado e do algoritmo para a detecção da pressão de arraste é possível iniciar a implementação do sistema de controle da máquina produto do projeto Embrapii/UFU/Complastec - NFEM - 2005.00038.

5 CONCLUSÕES

De acordo com as informações levantadas neste trabalho e com os resultados obtidos foi possível desenvolver os algoritmos necessários à implementação do sistema de comando e controle automáticos da máquina produto do projeto Embrapii/UFU/Complastec - NFEM - 2005.00038. No processo foram determinadas as etapas a serem automatizadas, sendo estas as que envolvem principalmente a determinação e o controle dos parâmetros de soldagem, haja vista que o sucesso do processo de união está diretamente atrelado ao atendimento destes parâmetros. Ademais, verificou-se que o processo de detecção de arraste é passível de ser automatizado, bem como o algoritmo desenvolvido é capaz de determinar a pressão de arraste a que está sujeito o sistema com precisão suficiente para atender às tolerâncias especificadas pelas normas de soldagem.

Por fim, conclui-se que, por mais que o procedimento de solda de topo por termofusão seja um processo relativamente simples, a implementação do controle automático dos parâmetros de soldagem é extremamente pertinente no que concerne ao atendimento dos padrões de qualidade do processo, agregando confiabilidade ao processo de instalação de tubulações de PEAD.

Como trabalhos futuros sugere-se:

- a) Realização de ensaios com a tubulação a ser soldada em diversas condições de atrito com o solo (areia, terra, cascalho, entre outros);
- b) Padronização da entrada de degrau nos testes de estimativa do arraste em condições de ensaio com os tubos;
- c) Determinação da influência da amplitude do degrau na estimativa da pressão de arraste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14464: Tubos e conexões plásticas - União por solda de topo em tubos e conexões de polietileno PE 80 e PE 100 - Procedimento.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16302: Qualificação de pessoas - Perfil profissional do soldador de tubos e conexões poliméricos.** Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS ABPE. **ABPE**, [s.d.]. Aplicações. Disponível em: <<http://www.abpebrasil.com.br/default.asp?pg=1&cod=7>>. Acesso em: 05 de dez. de 2020.

DANIELETTO, J. R. B. **Manual de Tubulações de Polietileno e Polipropileno - Características, Dimensionamento e Instalação.** São Paulo. 2007.

GERMAN WELDING SOCIETY. **DVS 2207-1: Welding of thermoplastics Heated tool welding of pipes, pipeline components and sheets made of PE-HD.** 2007.

GF PIPING SYSTEMS. **GFPS**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gfps.com/appgate/ecat/common_flow/10006H/BR/pt/109064/217869/423027/423079/880183/880184/P773899/product.html>, Acesso em: 05 de dez. de 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12176-1: Plastics pipes and fittings - Equipment for fusion jointing polyethylene systems - Part 1: Butt fusion.** 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11414: Plastics pipes and fittings - Preparation of polyethylene (PE) pipe/pipe or pipe/fitting test piece assemblies by butt fusion.** 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 21307: Plastics pipes and fittings - Butt fusion jointing procedures for polyethylene (PE) pipes and fittings used in the construction of gas and water distribution systems.** 2011.

ROTHENBERGER. **ROTHENBERGER Pipetool Technologies at work**, [s.d.]. Disponível em: <https://rothenberger.com/media/wysiwyg/GB/Welding-parameters/L21107-i8_Schweisstabellen_ROWELD_P160_630B_Plus_0218.pdf>, Acesso em: 05 de dez. de 2020.

SABESP. **Norma Técnica SABESP NTS 060: Execução de solda em tubos e conexões de polietileno por termofusão (solda de topo) - Procedimento.** São Paulo. 2019.