

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE**

GERSON BRITO DA SILVA
GUILHERME BATISTA GREGÓRIO
MATHEUS DOS SANTOS BISPO
VINICIUS OLIVEIRA GONÇALVES

**ANÁLISE DA SOLDAGEM POR TERMOFUSÃO
EM TUBULAÇÕES PARA LINHAS DE AR COMPRIMIDO**

São Paulo
2024

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE**

**GERSON BRITO DA SILVA
GUILHERME BATISTA GREGÓRIO
MATHEUS SANTOS BISPO
VINÍCIUS OLIVEIRA GONÇALVES**

**ANÁLISE DA SOLDAGEM POR TERMOFUSÃO
EM TUBULAÇÕES PARA LINHAS DE AR COMPRIMIDO**

Projeto científico elaborado como
requisito parcial para a conclusão do
Curso Superior de Tecnologia Mecânica
– Processos de Soldagem.

Orientador (a): Edgar de Souza Dutra

São Paulo
2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

GERSON BRITO DA SILVA
GUILHERME BATISTA GREGÓRIO
MATHEUS DOS SANTOS BISPO
VINICIUS OLIVEIRA GONÇALVES

ANÁLISE DA SOLDAGEM POR TERMOFUSÃO EM TUBULAÇÕES PARA LINHAS DE AR COMPRIMIDO

Projeto científico elaborado como
requisito parcial para a conclusão do
Curso Superior de Tecnologia Mecânica
– Processos de Soldagem.

Orientador (a): Edgar de Souza Dutra

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

Assinatura:_____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____/____/____

Prof. Me. Fulano, de tal e tal e tal e
tal

Assinatura:_____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____/____/____

Prof. Me. Fulano, de tal e tal e tal e
tal

Assinatura:_____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____/____/____

RESUMO

O processo de soldagem por termofusão consiste na união permanente de materiais termoplásticos por meio de seu aquecimento até atingir o ponto de fusão, a temperatura em que o material passa do estado sólido para o estado líquido. O material utilizado foi o polipropileno copolímero Random (PP), um termoplástico que suporta altos níveis de pressão e temperatura sem ser afetado, além de possuir alta durabilidade devido ao seu peso molecular e alta resistência à corrosão e a diversos produtos químicos. Seu ponto de fusão inicia-se entre 140°C e 150°C, facilitando o processo escolhido e sua aplicação.

No seguimento industrial, que vem inovando os processos mais comuns de mercado, como a soldagem de tubulações de aço, a soldagem de materiais não metálicos, como o PP, tem ganhado destaque devido às suas propriedades vantajosas. A construção de uma linha de transporte de fluidos com tubulações de polipropileno vem se expandindo no mercado e envolve a termofusão.

A soldagem pode ser de topo ou de soquete, onde as extremidades da tubulação e conexão são aquecidas a uma certa temperatura, de acordo com seu diâmetro e classe de pressão. As etapas se iniciam com a limpeza e preparação da superfície a ser soldada, assim como a definição dos parâmetros de soldagem escolhidos e a determinação da qualificação e procedimento de fusão.

Palavras-chave: Termofusão; inovação; expansão de mercado; Soldagem de materiais não metálico.

ABSTRACT

The thermofusion welding process consists of the permanent joining of thermoplastic materials by heating them until they reach the melting point, the temperature at which the material changes from a solid to a liquid state. The material used was polypropylene random copolymer (PP), a thermoplastic that withstands high levels of pressure and temperature without being affected, in addition to having high durability due to its molecular weight and high resistance to corrosion and various chemicals. Its melting point begins between 140°C and 150°C, facilitating the chosen process and its application.

In the industrial sector, which is innovating the most common market processes such as welding steel pipes, welding of non-metallic materials like PP has gained prominence due to its advantageous properties. The construction of a fluid transport line with polypropylene pipes is expanding in the market and involves thermofusion.

Welding can be done through butt fusion or socket fusion, where the ends of the pipe and fitting are heated to a certain temperature according to their diameter and pressure class. The steps begin with cleaning and preparing the surface to be welded, as well as defining the chosen welding parameters and determining the qualification and fusion procedure.

Keywords: Thermofusion; innovation; market expansion; Welding of non-metallic materials.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 Justificativa	6
1.2 Objetivo geral	7
1.3 Objetivos específicos	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 Soldagem de soquete	8
2.2 União dos materiais termoplásticos.....	10
2.3 Tipos de juntas soldadas	11
2.4 Parâmetros do Processo.....	12
2.5 Caracterização do cordão de solda para solda de topo	22
2.6 Normas Aplicáveis à Soldagem por Termofusão.....	23
2.7 Registro de qualificação de procedimento de fusão	24
2.8 Especificação de procedimento de fusão.....	25
2.9 Ensaios não destrutivos.....	25
2.9.1 Teste de estanqueidade	27
2.10 Ensaio Destrutivo	33
2.10.1 Ensaio de calorimetria diferencial exploratória DSC	35
2.10.2 Resultado do teste DSC	45
2.11 Controle de qualidade	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 Ramo de atuação	47
3.2 Moléculas dos materiais poliméricos.....	48
3.3 Material de base	55
3.4 Planejamento para a soldagem de soquete.....	58
3.5 Importância da limpeza do Polímero.....	61
3.6 Variáveis de controle	61
3.7 Equipamentos do processo de termofusão	62
4 CRONOGRAMA	63
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Solda de Soquete por ferramenta aquecida	8
Figura 2 – Junta de topo para tubulação	12
Figura 3 - Processo termofusão por solda de soquete com junta sobreposta	12
Figura 4 - Processo de termofusão por solda de soquete com junta sobreposta.....	19
Figura 5 - Processo termofusão por solda de soquete com junta sobreposta 1	21
Figura 6 - Processo termofusão por solda de soquete com junta sobreposta 2	21
Figura 7 - Processo termofusão por solda de soquete com junta sobreposta 3	22
Figura 8 - Resultados	27
Figura 9 - Materiais Necessários Para Construção Do Modulo De Teste	28
Figura 10 - Materiais utilizados para a limpeza do PP	28
Figura 11 - Tubos com comprimento de 100mm cada	29
Figura 12 - 1 tubo com 200mm/2 tubos com 72,5mm e uma união (tipo 3).....	29
Figura 13 - Limpeza do soquete 25mm	30
Figura 14 - Limpeza do PP 25 mm (conforme DVS 2207-1)	30
Figura 15 - Aferindo temperatura (conforme DVS-2207)	30
Figura 16 - Soldagem modo soquete	31
Figura 17 - Verificando temperatura após Soldagem	31
Figura 18 - Módulo de teste de estanqueidade já montado/modulo de teste com 2kgbar de pressão.....	32
Figura 19 – Resultado do teste de pressão	33
Figura 20 - Tubo PP antes do teste de ductilidade	34
Figura 21 - Tubo fixado na morsa antes do teste/tubo já comprimido	34
Figura 22 - Tubo PP após o teste (não houve fraturas visuais) teste de ductilidade aprovado	35
Figura 23 - Equipamento DSC calorimetria diferencial exploratória	36
Figura 24 - Cadinho de DSC	36
Figura 25 - Cadinho e tampa	37
Figura 26 - Com fechamento hermético	37
Figura 27 - Balança	38
Figura 28 - Cadinho zerado.....	38

Figura 29 - Retirando amostra de solda	39
Figura 30 - Amostra da parte soldada	39
Figura 31 - Amostra da parte soldada no cadinho	40
Figura 32 - Cadinho e seu encaixe.....	40
Figura 33 - Embutindo a tampa do cadinho (Fechamento Hermético)	41
Figura 34 - Cadinho tampado	41
Figura 35 - Cadinho de referência	42
Figura 36 - Cilindro de Nitrogênio utilizado no equipamento DSC para realização do teste.....	42
Figura 37 - Material PP Virgem para comparativo	43
Figura 38 - Material virgem dentro do cadinho	43
Figura 39 - Aguardando análise no calorímetro diferencial exploratório.....	44
Figura 40 - Sistema de ar comprimido.....	48
Figura 41 - Macromolécula 1	49
Figura 42 - Macromolécula 2	49
Figura 43 - Macromolécula 3	49
Figura 44 - Macromolécula 4	50
Figura 45 - Macromolécula 5	51
Figura 46 - Macromolécula 6	51
Figura 47 - Temperaturas de transição para materiais poliméricos.....	52
Figura 48 - Influência da temperatura no comportamento mecânico do polímero.....	54
Figura 49 - Equipamento de soldagem de termofusão por método de soquete	57
Figura 50 - Equipamentos de controle de medição para a realização da soldagem .	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores para altura do cordão de solda	11
Tabela 2 - Parâmetros de inserção e período	14
Tabela 3 – Solda de topo PPR	15
Tabela 4 - Diferenças admitidas no cordão de solda (B, b1 e b2)	15
Tabela 5 - Tempo e profundidade de inserção	20
Tabela 6 - Características técnicas termofusora	62
Tabela 7 – Cronograma de atividades.....	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Características do cordão de solda	23
Quadro 2 - Processo e montagem de PPR na Soldagem de soquete.....	60

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - PPR Amostra de solda.....	44
Gráfico 2 - PPR Virgem	45

1 INTRODUÇÃO

A união de materiais não metálicos por meio do processo de Termofusão constitui uma técnica vinculada ao aumento controlado da temperatura do material base até atingir seu ponto de fusão. Esse método implica no acoplamento das extremidades a serem unidas, seguido pela aplicação de compressão controlada entre as partes e, por último, o resfriamento do material já unido até atingir a temperatura ambiente.

O conceito deste procedimento, o calor necessário para promover a fusão dos materiais provém de uma fonte externa, exemplificada pela Máquina de Soldagem por Termofusão. Esta máquina, munida de uma placa de aquecimento, incide calor sobre as extremidades a serem soldadas por um período preestabelecido, conferindo ao processo o epíteto de Termofusão. Vale ressaltar que a fonte de calor caracteriza a distinção entre os processos de Termofusão e Eletrofusão, este último seguindo princípio físico semelhante, mas utilizando uma resistência incorporada à luva de união como elemento de aquecimento consumível (DANIELETTTO, 2007).

Este estudo propõe a exploração detalhada da Termofusão, destacando seus elementos fundamentais e contribuindo para o entendimento aprofundado desta técnica aplicada à união de materiais não metálicos.

1.1 Justificativa

A análise do processo de soldagem por Termofusão de materiais não metálicos revela sua crescente substituição de outros processos mais comuns do mercado, destacando-se pelo custo, facilidade de execução e versatilidade.

Os diferenciais desse processo incluem a ausência de corrosão, um controle aprimorado do processo, garantia da potabilidade da água e do ar transportado. Além disso, apresenta excelente isolamento térmico e menor perda de calor em comparação com materiais metálicos, assim como uma resistência ao impacto excepcional devido à elasticidade do material. Demonstrou também alta resistência a baixas temperaturas, excelente desempenho hidráulico devido às suas paredes internas lisas, e facilidade de transporte e manuseio devido à leveza do material, que

é inatacável por correntes galvânicas (CATÁLOGO TÉCNICO TIGRE – TERMOFUSÃO, 2024).

O Polipropileno foi escolhido devido ao seu preço acessível e versatilidade de confecção. As características de suas ligas proporcionam variações em suas propriedades, tornando-o altamente versátil, com custos mais baixos. Além disso, é um polímero soldável e apresenta excelente resistência mecânica. Sua baixa toxicidade é benéfica para o ambiente, evitando contaminações ao transportar fluidos. É amplamente utilizado na indústria automobilística e doméstica (SANTOS, 2011).

1.2 Objetivo geral

Apresentar um processo de soldagem termofusão e destacar sua importância na área de soldagem e sua eficiência diante das variadas aplicações.

1.3 Objetivos específicos

- Identificar as normas do processo de soldagem por termofusão;
- Executar o procedimento de soldagem designado pela EPF;
- Efetuar a análise visual.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

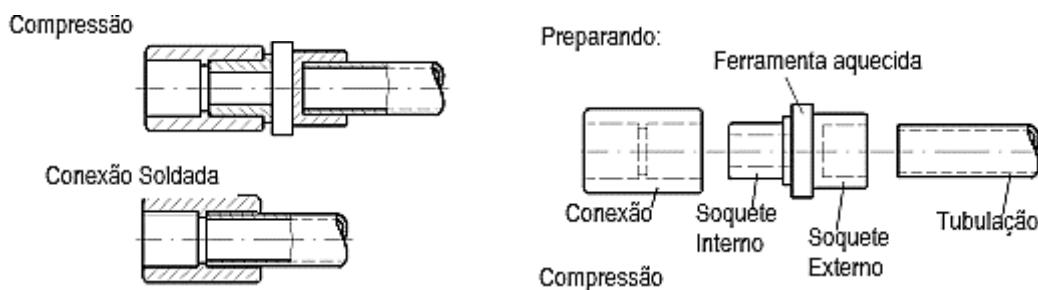
Soldagem por termofusão é um processo amplamente utilizado na indústria para unir materiais termoplásticos, como o polipropileno. Durante esse processo, as superfícies das peças são aquecidas até atingirem um estado viscoso e, em seguida, são pressionadas uma contra a outra para promover a fusão. A soldagem por termofusão é comumente empregada em tubulações, tanques e outros componentes industriais fabricados com polipropileno devido à sua resistência química e durabilidade (SANTOS, 2011).

A revisão bibliográfica sobre esse processo pode abranger temas como parâmetros ideais de soldagem, influência da temperatura e pressão, tipos de equipamentos utilizados, métodos de controle de qualidade e avanços tecnológicos recentes na soldagem por termofusão de polipropileno.

2.1 Soldagem de soquete

A soldagem de soquete aquecido é um processo em que o calor é aplicado para fundir as extremidades de tubos, unindo-os. A literatura destaca a eficiência desse método em diversas aplicações. Documentos como o Catálogo Técnico SIMONA (2017) e o Catálogo Técnico TIGRE abordam os princípios da termofusão no método de soldagem de soquete e suas aplicações na união de tubos (conforme Figura 1), enquanto a norma alemã explora as técnicas específicas relacionadas à soldagem de soquete. Recomendo a leitura desses trabalhos para uma revisão mais aprofundada sobre o tema (DVS 2207-1, 2003).

Figura 1 - Solda de Soquete por ferramenta aquecida



Fonte: DVS 2207-1 (2003)

As ferramentas e acessórios aquecidos são adaptados e dimensionados para que a adesão a uma pressão de união seja acumulada e constante por um período

mínimo. A soldagem de soquete por ferramenta aquecida pode ser realizada manualmente até 50 mm de diâmetro do tubo. Para diâmetros a partir de 63 mm, é necessário um dispositivo automatizado de soldagem devido à maior força de união.

2.2 União dos materiais termoplásticos

A união de materiais termoplásticos pode ser realizada por meio de diferentes métodos, sendo a soldagem por termofusão um dos mais comuns. Nesse processo, as extremidades dos tubos são aquecidas até atingirem um estado pastoso e, em seguida, são pressionadas uma contra a outra para formar uma junta sólida ao esfriar. As características da união dos materiais termoplásticos, como o polipropileno, incluem:

- 1. Compatibilidade Química:** O polipropileno é resistente a muitos produtos químicos, o que contribui para a durabilidade das uniões formadas por termofusão.
- 2. Rapidez e Facilidade de Execução:** A termofusão é um processo relativamente rápido e fácil, exigindo equipamentos simples e treinamento adequado.
- 3. Integridade Estrutural:** A junta formada por termofusão tende a ser forte e durável, mantendo a integridade estrutural da tubulação.
- 4. Ausência de Materiais Adicionais:** Em muitos casos, não são necessários materiais de adição, tornando o processo mais econômico.

É importante seguir as especificações do fabricante e as normas técnicas aplicáveis para garantir uma união eficaz e duradoura em tubulações de polipropileno. Referências específicas, como manuais do fabricante e normas ASTM, podem fornecer informações detalhadas sobre as condições ideais de execução e as propriedades resultantes da termofusão nesse contexto.

O método escolhido para a união do material será a soldagem de soquete ou topo de superfície, onde se aplica pressão no material a ser unido por um soquete de acoplamento com sua superfície aquecida a uma temperatura de 260°C. A aplicação se dá por superfícies externas para o tubo e internas para a conexão. O equipamento responsável por este processo é a máquina de termofusão (SOLDAGEM GLOBAL THERMOPLASTIC SOLUTIONS, 2017).

2.3 Tipos de juntas soldadas

Quando se refere a juntas soldadas, são estabelecidos requisitos específicos para a capacidade de carga de um componente, especialmente no que diz respeito à qualidade das juntas soldadas. As juntas que se aplicam à tubulação são designadas de acordo com o processo, sendo eles: solda de topo e solda de soquete.

Junta de topo – Refere-se à junta de topo a topo, onde as faces de superfície a serem soldadas são alinhadas sob pressão até atingirem a temperatura de soldagem. O alinhamento está concluído quando a altura dos cordões de solda atinge os valores mencionados na (Tabela 1), coluna 2, sobre a circunferência total do tubo ou da superfície total da folha, respectivamente. Os tamanhos dos cordões são um índice para um contato completo das áreas de união da junta (CATÁLOGO TÉCNICO TIGRE, 2012).

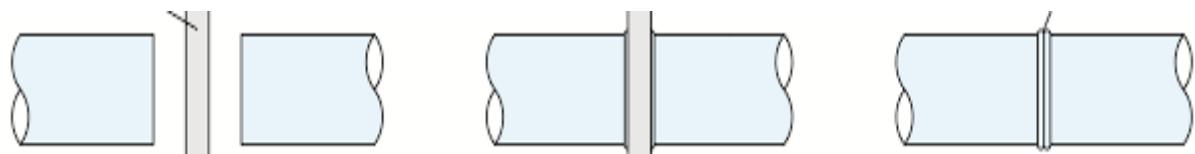
Tabela 1 - Valores para altura do cordão de solda

Espessura nominal da parede (mm)	Alinhamento (mm)
Até 4,5	0,5
4,5 a 7	1,0
7 a 12	1,5
12 a 19	2,0
19 a 26	2,5
26 a 37	3,0
37 a 50	3,5
50 a 70	4,0

Fonte: DVS 2207 – 1 (2003)

A solda de topo, segundo a Associação Brasileira de Engenharia de Polímeros (ABEPE, 2013), envolve a união de peças termoplásticas por meio do aquecimento das superfícies de contato e subsequente aplicação de pressão. Essa técnica é frequentemente utilizada em materiais como o polipropileno (ABEPE, 2013).

Figura 2 – Junta de topo para tubulação



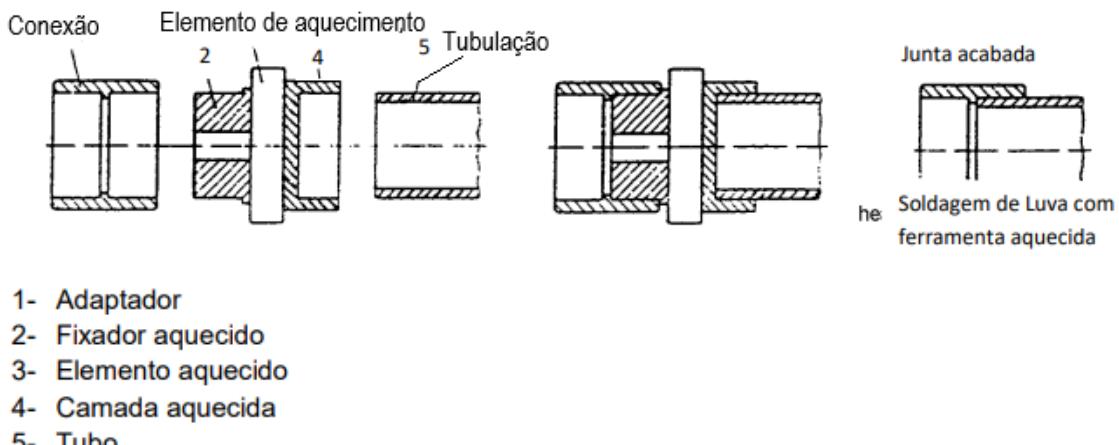
Fonte: ABEPE (2012)

Junta sobreposta – Refere-se à junta sobreposta onde as superfícies são encaixadas em uma ferramenta aquecida de molde soquete, até atingir a temperatura de soldagem. As juntas sobrepostas são aquecidas e adaptadas no soquete dimensionalmente para criar uma determinada pressão de união (Figura 3).

Este processo pode ser realizado manualmente com um diâmetro de tubo de até 50 mm. A partir de 63 mm de diâmetro, é necessário um dispositivo mecânico de soldagem devido à maior força de união das juntas.

A superfície de conexão do tubo deve ser usinada com uma ferramenta de descascamento. Neste contexto, as ferramentas aquecidas a serem utilizadas devem ser consideradas de acordo com a Diretriz DVS (DVS 2207 – 1, 2003).

Figura 3 - Processo termofusão por solda de soquete com junta sobreposta



Fonte: Catálogo Técnico SIMONA (2017)

2.4 Parâmetros do Processo

A soldagem de soquete por termofusão, alguns parâmetros críticos influenciam o resultado da união termoplástica. Aqui estão alguns dos principais parâmetros:

Temperatura de Fusão, Pressão de Soldagem, Tempo de Fusão, Dimensões dos Equipamentos, Resfriamento Controlado e Qualidade do Material e Limpeza das Superfícies.

A temperatura deve ser controlada para garantir que o material atinja o estado viscoso necessário para a fusão adequada. O controle preciso é essencial para evitar danos ao material. Já a aplicação de pressão adequada durante a soldagem assegura uma união firme entre as superfícies termofundidas. A pressão controla a formação da junta e evita vazamentos.

O tempo durante o qual as superfícies estão em contato sob pressão e temperatura é crucial. Deve ser suficiente para permitir a fusão completa das peças, mas sem causar degradação excessiva. Enquanto a geometria dos dispositivos de soldagem, como matrizes e adaptadores, é crítica para garantir uma solda uniforme. As dimensões devem ser projetadas de acordo com as especificações do material e da aplicação.

Após a fusão, um resfriamento adequado é necessário para garantir a solidificação uniforme do material. O controle da taxa de resfriamento evita distorções e mantém a integridade estrutural. Por isto qualidade do material e a preparação adequada das superfícies a serem soldadas são fundamentais. Superfícies limpas e sem contaminações contribuem para uma soldagem mais eficiente.

Lembrando que esses parâmetros podem variar dependendo do diâmetro específico do tubo utilizado e das condições da aplicação industrial. É crucial seguir as recomendações do fabricante do material e utilizar equipamentos de soldagem adequados para garantir resultados consistentes e confiáveis, como na Tabela 2 (CATÁLOGO TÉCNICO TIGRE, 2020).

Tabela 2 - Parâmetros de inserção e período

Diâmetro de tubos e/ou conexões	Profundidade de inserção no bocal - p(mm)	Tempo mínimo de aquecimento (segundos)	Intervalo máximo para acoplamento (segundos)	Tempo de esfriamento (minutos)
20	12	5	4	2
25	13	7	4	2
32	14,5	8	6	4
40	16	12	6	4
50	18	18	6	4
63	24	24	8	6
75	26	30	8	6
90	29	40	8	6

Nota: caso a temperatura ambiente esteja abaixo de 10°Celcius deve se consultar outra tabela.

Fonte: Catálogo Técnico Tigre (2020).

O aquecimento ocorre em baixas pressões, praticamente zero, e por um tempo correlacionado com a superfície de solda, para que o material atinja a temperatura de fusão adequada. A soldagem consiste na compressão das superfícies de solda fundidas, permitindo a penetração e a interligação molecular das duas partes. A pressão de soldagem deve ser mantida até que a temperatura caia abaixo da temperatura de fusão do material. O resfriamento pode ser subdividido em três fases, conforme a Tigre (2020).

- Resfriamento durante a solda, com pressão elevada;
- Resfriamento após a solda. Alguns procedimentos, como a DVS 2207, recomendam manter a pressão de solda ainda nesta fase, outros recomendam zerar a pressão, mas sempre mantendo o conjunto imóvel até o fim do ciclo de cristalização do material 150°C para PP;
- Resfriamento para aplicar carga e pressão: Pode ser executado já com as partes soldadas fora da máquina de solda, e já podem ser movimentadas, entretanto, somente deve ser aplicada pressão após a superfície de solda atingir a temperatura ambiente.

Tabela 3 – Solda de topo PPR

Espessura do Tubo	P^1, t^1 pré- aquece - aquece ($1,0 \pm 0,1$) bar	P^2, t^2 Aquece. 0 a 0,1bar	Tp Retirada da placa de solda	Ts Elevar a pressão	P^3, t^3 Resfriamento ($1,0 \pm 0,1$) bar
mm	Larg. Inicial do cordão(B)mm	Tempo S	Tempo Max. S	Tempo S	Tempo Min.
Até 4,5	0,5	135	5	6	6
4,3 – 7	0,5	135 – 175	5 - 6	6 - 7	6 - 12
7 – 12	1,0	175 – 245	6 - 7	7 - 11	12 - 20
12 – 19	1,0	245 – 330	7 - 9	11 - 17	20 - 30
19 – 26	1,5	330 – 400	9 - 11	17 - 22	30 - 40
26 – 37	2,0	400 – 485	11 - 14	22 - 32	40 - 55
37 – 50	2,5	485 – 560	14 - 17	32 - 43	55 - 70

Fonte: DVS 2207-1 (2003)

Tabela 4 - Diferenças admitidas no cordão de solda (B, b1 e b2)

$B=(B_{max} + B_{min})/2$	Tubo/Tubo	Tubo/conexão e Conexão/Conexão	Tubos de Materiais Diferentes
$B_{min} \geq 0,9 \cdot B$ $B_{max} \leq 1,1 \cdot B$	$B_1 \geq 0,7 \cdot b_2$	$B_1 \geq 0,6 \cdot b_2$	$B_1 \geq 0,6 \cdot b_2$

Fonte: DVS 2207-1 (2003)

Na sequência discorremos os processos considerados para os ensaios poliméricos:

Ensaios Mecânicos:

1. Tração
2. Flexão
3. Compressão
4. Impacto
5. Fadiga
6. Dureza
7. Relaxação de tensão
8. Ensaios Térmicos:

Análise Térmica (DSC, TGA, TMA)

1. Temperatura de Deflexão Térmica (HDT)
2. Temperatura de Transição Vítrea (Tg)
3. Estabilidade Térmica
4. Relative Thermal Index (RTI)
5. Ensaios de Morfologia e Microestrutura:

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

1. Microscopia Óptica
2. Microscopia de Força Atômica (AFM)
3. Microscopia Confocal
4. Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM)
5. Análise de Porosidade

Ensaios de Espectroscopia:

1. Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)
2. Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (RMN)
3. Espectroscopia Raman
4. Espectrometria de Massas (MS)
5. Espectroscopia de Fluorescência

Ensaios de Análise Química:

1. Cromatografia Gasosa (GC)
2. Cromatografia Líquida (HPLC)
3. Espectrometria de Massas (MS)
4. Análise Elemental (CHN)

Ensaios de Propriedades Elétricas:

1. Resistividade
2. Permissividade
3. Resistência ao Arco

Ensaios de Inflamabilidade e Comportamento ao Fogo:

1. Teste de Inflamabilidade UL94
2. Teste de Propagação de Chama (ASTM E84)
3. Análise de Decomposição de Gases (TG-DSC-FTIR)

Ensaios de Resistência Química:

1. Imersão em Solventes
2. Testes de Interação Química

Fonte: Encyclopedia of Polymer Science and Technology (2002)

2.4.1 Parâmetros de soldagem de soquete quanto ao Diâmetro

De acordo com a norma DVS 2207-1 Item 6.1 / 2007, as ferramentas e acessórios aquecidos são adaptados dimensionalmente para que, na união, seja criada uma pressão de união. A soldagem de soquete com ferramenta aquecida pode ser realizada manualmente com diâmetros de tubos de 16 mm até 50 mm.

2.4.1.1 Temperatura

Antes do início do processo de soldagem, a temperatura de soldagem (250 a 270 °C) definida na ferramenta aquecida deve ser verificada. Isso é feito, por exemplo, por meio de um dispositivo de medição de indicação rápida com uma superfície de

contato de 10 mm para medir a temperatura da superfície. A medição de controle deve ser feita dentro da área da ferramenta aquecida que corresponde ao produto semiacabado. Para ajustar o equilíbrio térmico, a ferramenta aquecida pode ser inserida no mínimo 10 minutos após atingir a temperatura definida.

DVS 2207-1 / 2007

A temperatura do polímero atinge seu valor máximo na região de contato com o corpo quente.

Pressões muito altas durante o aquecimento podem gerar:

- Deslocamento das partes fundidas;
- Fragilização da junta soldada.

Pressões muito baixas durante resfriamento podem gerar:

- Formação de poros na linha fusão;
- Quando menor a ZTA maior a resistência e maior a vida útil da solda.

2.4.1.2 Tempo

O tempo de mudança de processo deve ser o menor possível. Devido aos baixos valores de condutividade térmica dos termoplásticos, a condução de calor, imediatamente atrás da superfície fundida, pode ser muito lenta para mantê-la fundida. Soldas produzidas com superfícies parcialmente solidificadas serão fracas (junta fria), pois as cadeias dos polímeros não se misturam completamente (CATÁLOGO TÉCNICO TOP FUSION, 2014).

Os processos apresentam as seguintes variáveis:

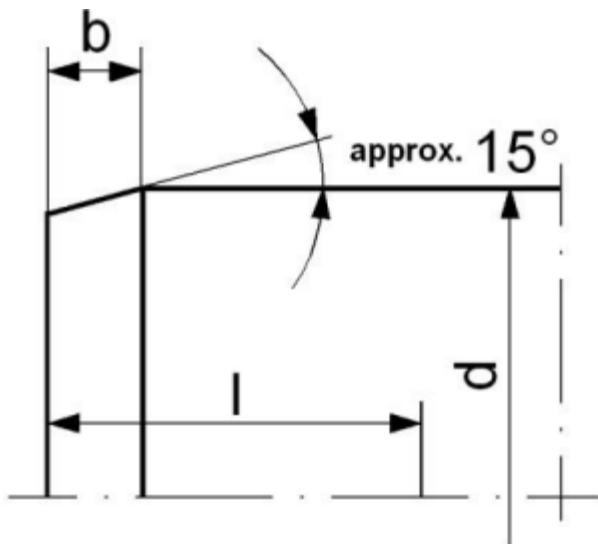
- Temperatura do corpo.
- Deslocamento do polímero durante aquecimento e soldagem.
- Tempo de mudança do processo.
- Pressão aplicada durante o aquecimento e o processo de união.
- Características do polímero

2.4.1.3 Preparação para Soldagem

A conexão deve ser limpa por dentro e por fora de acordo com a seção 3.2.3. O tratamento das áreas de união dos componentes de soldagem deve ocorrer imediatamente antes do início da soldagem (DVS 2207-1 / 2007).

A extremidade do tubo deve ser chanfrada conforme a Figura 4 e a Tabela 5. A área de união do tubo deve ser tratada de acordo com as orientações do fabricante. Para soldas manuais, a profundidade do inserto deve ser marcada no tubo com a distância I , conforme a Tabela 4.6.3 (DVS 2207-1 / 2007).

Figura 4 - Processo de termofusão por solda de soquete com junta sobreposta.



Fonte: DVS 2207-1 (2007)

Tabela 5 - Tempo e profundidade de inserção

Diâmetro do tubo e da conexão	Tempo em segundos		Cura em minutos	Profundidade de inserção em mm
	Aquecimento*	Acoplamento (montagem)		
20	5	4	2	12,2
25	7	4	2	13
32	8	6	4	14,5
40	12	6	4	16
50	18	6	4	18
63	24	8	6	24
75	30	10	8	26
90	40	15	8	29
110	50	20	8	32,5
160	70	40	12	43

Dimensões em milímetros (mm) – Tempo em segundos (s).

*Aumentar 50% o tempo de aquecimento quando a temperatura ambiente < 10 °C.

Fonte: Catálogo Técnico Top Fusion (2014)

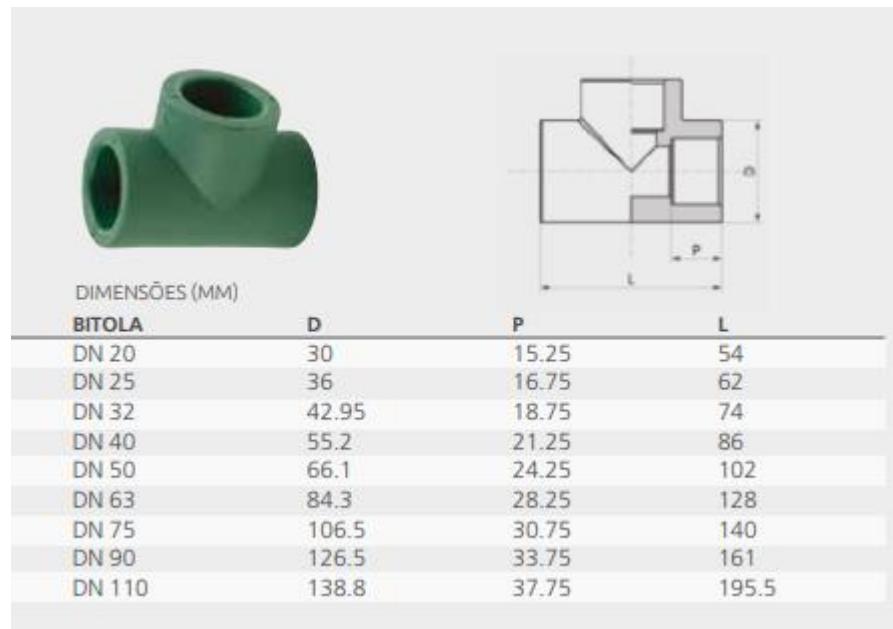
2.4.1.4 Diâmetros e variações

A espessura e diâmetro nominal da parede das peças a serem soldadas devem coincidir na área de união e respeitar a tolerância dimensional (DVS 2207-1 / 2007).

A diferença entre o diâmetro externo máximo medido e o diâmetro externo mínimo medido (ou entre o diâmetro interno máximo e mínimo) na mesma seção transversal de um tubo ou conexão de PPR é conhecida como tolerância dimensional. Esta diferença é uma medida da variação permitida nas dimensões do produto durante o processo de fabricação (ISO 15874-1 / 2013).

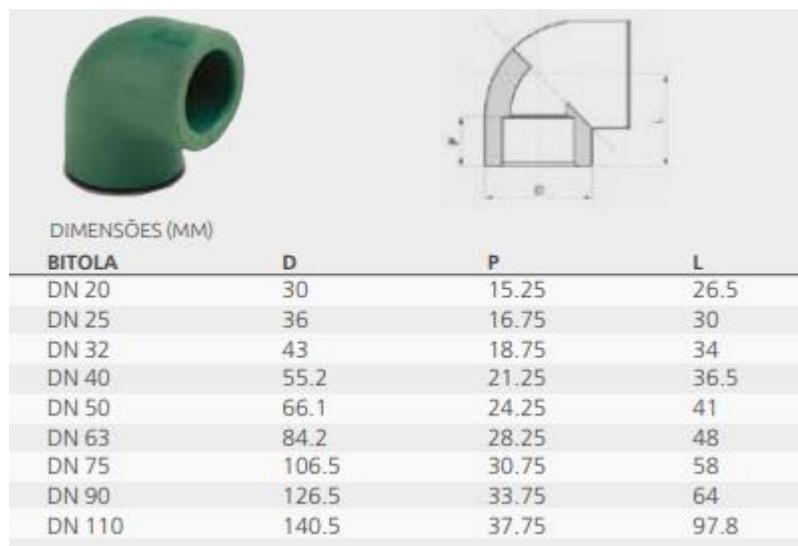
E de acordo com a ISO 15874-1 / 2013, a tolerância dimensional indica o intervalo dentro do qual o diâmetro externo (ou interno) de um tubo ou conexão pode variar e ainda ser considerado aceitável de acordo com as especificações do fabricante ou normas técnicas aplicáveis. Por exemplo, se um tubo de PPR tem um diâmetro externo nominal de 25 mm e uma tolerância dimensional de $\pm 0,2$ mm, isso significa que o diâmetro externo real do tubo pode variar entre 24,8 mm (diâmetro externo mínimo) e 25,2 mm (diâmetro externo máximo) e ainda ser considerado dentro das especificações aceitáveis, o diâmetro interno da conexão a ser soldada irá sempre corresponder ao diâmetro externo do tubo conforme imagens 5.

Figura 5 - Processo termofusão por solda de soquete com junta sobreposta 1



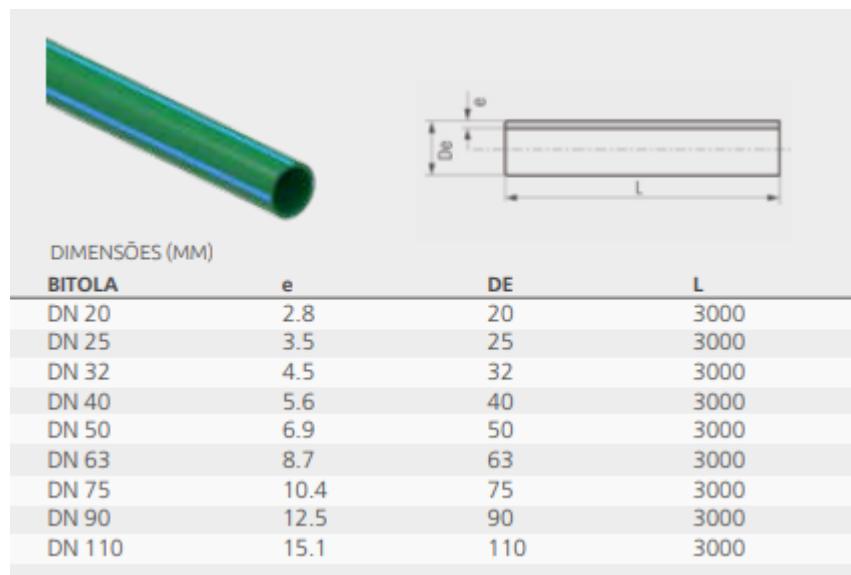
Fonte: Catálogo técnico Tigre (2012).

Figura 6 - Processo termofusão por solda de soquete com junta sobreposta 2



Fonte: Catálogo técnico Tigre (2012).

Figura 7 - Processo termofusão por solda de soquete com junta sobreposta 3

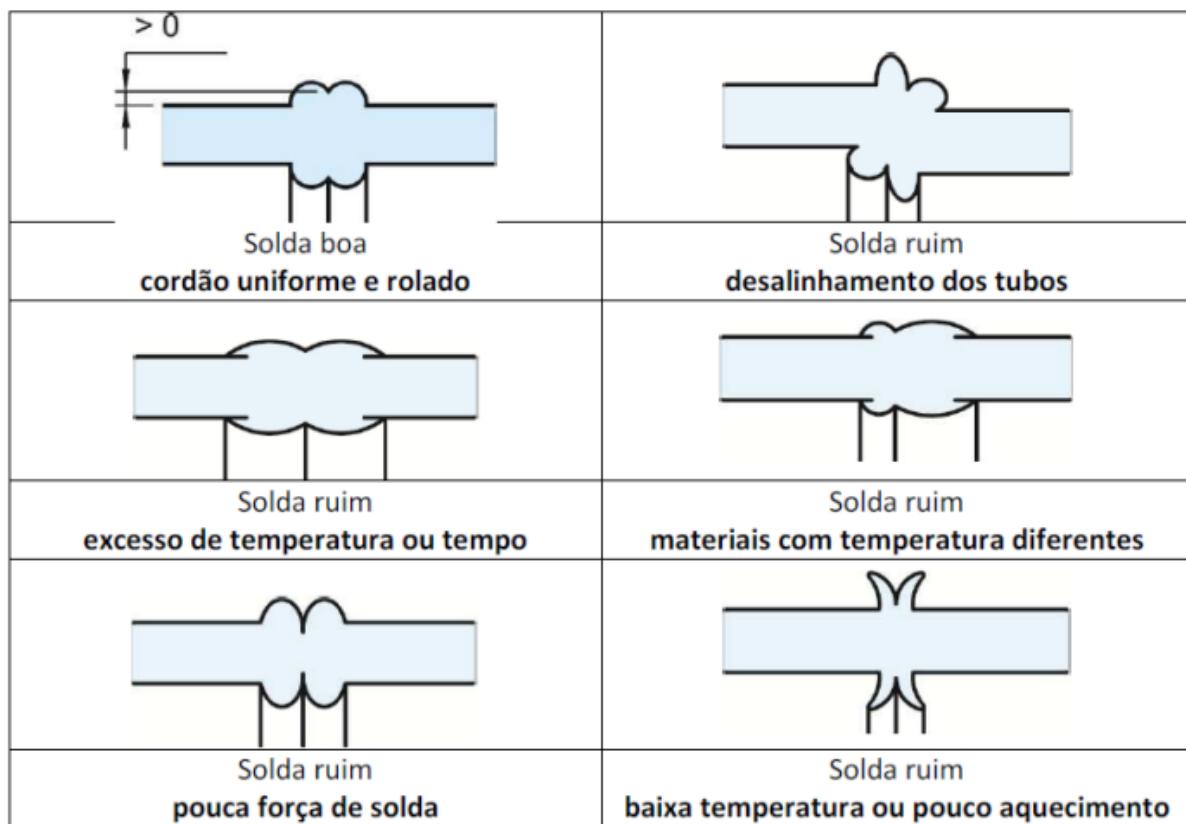


Fonte: Catálogo técnico Tigre (2012).

2.5 Caracterização do cordão de solda para solda de topo

O cordão de solda na termofusão de termoplásticos, como o polipropileno, deve apresentar características cruciais para garantir uma junta eficaz. Uniformidade, adesão adequada, ausência de defeitos, compatibilidade com o material base, resistência mecânica, aspecto visual e resistência química são fatores essenciais. O controle preciso dos parâmetros de soldagem é fundamental para alcançar um cordão de solda com as propriedades desejáveis, e testes de qualidade, como ensaios de tração, são necessários para garantir a conformidade com os requisitos da aplicação industrial (ABPE, 2013).

Quadro 1 - Características do cordão de solda



Fonte: Manual de termofusão (2012).

2.6 Normas Aplicáveis à Soldagem por Termofusão

- NBR 14.464 -Sistemas para Distribuição de Gás Combustível para Redes Enterradas;
 - Execução de Solda de Topo (EM REVISÃO – aguardar versão 2013);
 - NBR 14.472 – Tubo de Polietileno PE 80 e PE 100 – Qualificação do Soldador (Módulo 3);
 - NTS 060 - Tubos de Polietileno PE 80 e PE 100 para redes de água e adutoras – procedimento de solda de topo;
 - DVS 2207-1 - Soldagem de Materiais Termoplásticos – Soldagem de Tubos, Conexões e Placas –Parte 1 – Procedimentos;
 - DVS 2202-1 - Teste de Produtos Semiacabados de Polietileno - Avaliação de Solda;
 - ISO 21307 - Tubos e Conexões Plásticas – Procedimentos de Solda de Topo para Tubos;

- Conexões de Polietileno (PE) para Distribuição de Água e Gás Combustível; - DS/INF 70-2 - Tubulações plásticas – Procedimento de Solda de Termofusão de Topo; - DS/INF 70-3 -Tubulações Plásticas – Solda de Termofusão de Topo – Inspeção Visual (CENTRO PAULA SOUZA, 2012).

2.7 Registro de qualificação de procedimento de fusão

O Relatório de Soldagem sobreposta deve apresentar, no mínimo, os seguintes dados:

- Identificação dos tubos e conexões;
- Identificação do DE (diâmetro externo);
- SDR (Proporção de dimensão padrão);
- Tipo de material;
- Nomes dos fabricantes do tubo e conexão;
- Códigos do lote de fabricação, que permitam rastrear as produções deles nos programas de qualidade dos fabricantes;
- Controle visual do bulbo final de solda;
- Informando sua aparência;
- Uniformidade;
- Contaminações;
- Medidas alinhamento;
- Parâmetros de Solda;
- Parâmetros reais e medidos;
- Nome da (o) elaborador (a);
- Nome da (o) executor (a) do processo;
- Nome da (o) Inspetor (a) responsável;
- Assinatura da (o) profissional que está qualificando;
- Código da (o) soldador (a) (Sinetec);
- Código da (o) Inspetor (a) responsável;
- Data de execução da solda.

2.8 Especificação de procedimento de fusão

O Especificação de Procedimento de Fusão (EPF), possuí no mínimo, os seguintes dados:

- Identificação dos tubos e conexões;
- Identificação do DE (diâmetro externo);
- SDR (Proporção de dimensão padrão);
- Tipo de material;
- Nomes dos fabricantes do tubo e conexão;
- Códigos do lote de fabricação
- Controle visual do bulbo final de solda;
- Informando sua aparência;
- Uniformidade;
- Contaminações;
- Medidas alinhamento;
- Parâmetros de Solda;
- Nome da (o) elaborador (a);
- Nome da (o) Inspetor (a) responsável;
- Assinatura Inspetor (a) responsável que está qualificando;
- Código da (o) Inspetor (a) responsável;
- Data de execução da solda.

A EPF e o RQPF são documentos similares; porém, o RQPF (Registro de Qualificação de Procedimento de Fusão) deve incluir os parâmetros que devem ser executados e os parâmetros que foram executados.

Já a EPF (Especificação de Procedimento de Fusão) serve para especificar e informar quem está executando a soldagem.

2.9 Ensaios não destrutivos

O ensaio visual de solda de soquete envolve a verificação de dimensionamento, exame de penetração, inspeção de inclusões e porosidades, verificação do alinhamento, exame do cordão de solda e avaliação da geometria da solda. Essa

abordagem visa garantir conformidade com as especificações, fusão adequada, ausência de defeitos superficiais e integridade estrutural.

Os ensaios pertinentes ao processo que iremos executar são descritos na norma, que define o essencial e o não essencial de acordo com a aplicação (DVS 2207-1, 2003).

A seguir tópicos a serem analisados segundo a DVS 2207-1 (2003):

- Identificação dos tubos e conexões;
- Tipo de material;
- Códigos do lote de fabricação que permitam rastrear as produções deles nos programas de qualidade dos fabricantes;
- Informando sua aparência;
- Uniformidade;
- Contaminações;
- Medidas alinhamento;
- Parâmetros de Solda;
- Nome da (o) elaborador (a);
- Nome da (o) Inspetor (a) responsável;
- Assinatura Inspetor (a) responsável que está qualificando;
- Código da (o) Inspetor (a) responsável;
- Data de execução da solda.

Este relatório apresenta uma análise visual do processo de soldagem de soquete por termofusão executada para um módulo de teste em tubulação de Polipropileno. O objetivo é identificar falhas na solda que podem comprometer a estrutura da mesma e seguir os critérios de aceitação conforme descreve a norma DVS 2202 – 1 / 1989.

Durante a execução da construção de um módulo de teste em tubulação de polipropileno, foram executadas 16 soldas, com os mais variados parâmetros de temperatura, tempo de aquecimento, tempo de acoplamento, tempo de resfriamento e Alinhamento, onde foram selecionadas 4 para análise que correspondem ao processo.

Para esta análise, utilizamos parâmetros padrão normatizado de acordo com a diâmetro do tubo a ser soldado, e realizamos variações deste que é considerado ideal conforme a figura 8.

Figura 8 - Resultados

Solda I	Parâmetros	Análise
	Temperatura: 284° C Tempo A: 7s Tempo B: 4s Tempo C: 2min	Alinhamento: Cordão uniforme, livre de falhas e variações de tamanho. Alinhamento fixo sem alterações apresentando uma solda considerada ideal.
Solda II	Parâmetros	Análise
	Temperatura: 284° C Tempo A: 10,5s Tempo B: 6s Tempo C: 2min	Cordão falho com variações de tamanho e forma . Alinhamento fixo Alto Aquecimento
Solda XIV	Parâmetros	Análise
	Temperatura: 260° C Tempo A: 3,5s Tempo B: 4s Tempo C: 2min	Cordão insuficiente ou ausente Alinhamento Fixo Baixo Aquecimento
Solda IV	Parâmetros	Análise
	Temperatura: 284° C Tempo A: 7s Tempo B: 4s Tempo C: 2min	Cordão desuniforme, e fora de acoplamento Desalinhamento de 7 mm

Obs: O período de tempo descrito em sequência alfabética corresponde :
Tempo A : Tempo de aquecimento das juntas.
Tempo B : Tempo de Acoplamento das juntas.
Tempo C : Tempo de Resfriamento das juntas .

Fonte: Autoria própria (2024)

Os ensaios não destrutivos (END) são aplicados para avaliar a estrutura do material, verificar a integridade e detectar a presença de descontinuidades sem causar danos permanentes ao objeto ou material em questão. Essas técnicas são essenciais em inspeções de qualidade e manutenção, permitindo identificar potenciais falhas sem comprometer a integridade do componente (DVS 2203-1, 1999).

2.9.1 Teste de estanqueidade

Nesta etapa, elaboramos um módulo de teste de estanqueidade (NBR 5626/98, 1998) para junta soldada.

Figura 9 - Materiais Necessários Para Construção Do Modulo De Teste



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 10 - Materiais utilizados para a limpeza do PP



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 11 - Tubos com comprimento de 100mm cada



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 12 - 1 tubo com 200mm/2 tubos com 72,5mm e uma união (tipo 3)



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 13 - Limpeza do soquete 25mm



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 14 - Limpeza do PP 25 mm (conforme DVS 2207-1)



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 15 - Aferindo temperatura (conforme DVS-2207)



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 16 - Soldagem modo soquete



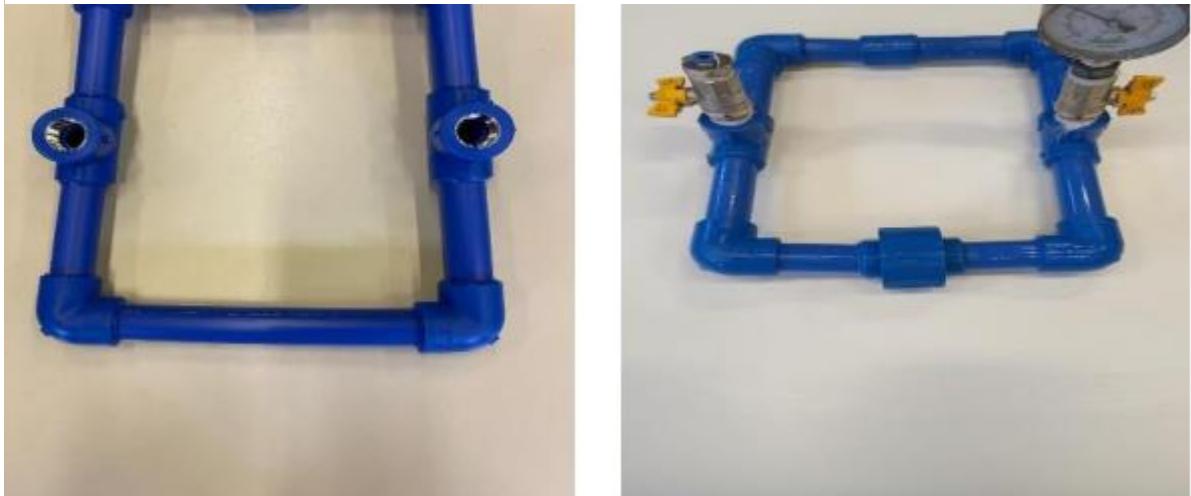
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 17 - Verificando temperatura após Soldagem



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 18 - Módulo de teste de estanqueidade já montado/modulo de teste com 2kgbar de pressão



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 19 – Resultado do teste de pressão

Relatório de Teste de Pressão	
Obra: Fatec Itaquera – Profº Miguel reale	Endereço: Av: Eng Ardevam Machado, s/n – Vila carmosina
Cidade: SÂO PAULO	Estado: SP
Responsável pela obra: Edgar de Souza Dutra	
Responsável pela Teste: Grupo Tcc Termofusão	
Hora inicial do teste: 10h	Hora final do teste: 14h30m
Teste Inicial	
Máxima pressão de serviço x 1,5 =	2,1 Bar
Queda de pressão após 30 minutos:	0 Bar
Resultado do Teste Inicial:	2,1 Bar
Teste Principal	
Pressão de serviço:	2,1 Bar
Queda de Pressão após duas horas :	0 Bar
Resultado do Teste principal:	2,1 Bar
Teste Final	
Pressão aplicada de forma alternada, durante uma hora de pressão de 2 Bar, 1 Bar e rede despressurizada a intervalo único, foi realizado teste com solução de bolhas .	
Foi detectado algum vazamento ou trinca? Em caso negativo teste será Aprovado.	
POSITIVO <input type="checkbox"/>	NEGATIVO <input checked="" type="checkbox"/>
Lugar: _____	Data: _____ / _____ / _____
Assinatura do responsável pelo Teste	Assinatura do responsável pela obra

Fonte: Autoria própria (2024)

2.10 Ensaio Destrutivo

Nesta etapa, realizamos o teste de ductilidade para avaliar a capacidade do material de se deformar continuamente sem fraturar.

Figura 20 - Tubo PP antes do teste de ductilidade



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 21 - Tubo fixado na morsa antes do teste/tubo já comprimido



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 22 - Tubo PP após o teste (não houve fraturas visuais) teste de ductilidade aprovado



Fonte: Autoria própria (2024)

2.10.1 Ensaio de calorimetria diferencial exploratória DSC

O ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) é uma técnica fundamental na caracterização de materiais, com destaque especial para os polímeros. Através do DSC, é possível obter uma compreensão abrangente do comportamento térmico desses materiais, desempenhando um papel crucial em diversas áreas, desde pesquisa e desenvolvimento de materiais até controle de qualidade e aplicações industriais variadas.

O princípio básico do DSC reside na medição da diferença de calor absorvido ou liberado por uma amostra em comparação com uma amostra de referência, enquanto ambas são submetidas a um programa controlado de temperatura. As transições térmicas, como fusão, cristalização e transições vítreas, resultam em mudanças no fluxo de calor, as quais são detectadas como picos nos gráficos gerados durante o ensaio de DSC.

A interpretação dos dados obtidos por meio do DSC vai além da simples caracterização de polímeros. Ela possibilita também a análise do histórico térmico, incluindo esforços mecânicos ou tratamentos térmicos prévios aos quais a amostra possa ter sido submetida. Isso é de extrema importância, pois oferece insights valiosos sobre a estrutura e as propriedades dos materiais em estudo.

Nessa etapa, realizamos a análise plastográfica, no equipamento DSC do material PPR Virgem e PPR da região já soldada, para realizar comparações de possíveis mudanças moleculares do material.

Figura 23 - Equipamento DSC calorimetria diferencial exploratória



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 24 - Cadiño de DSC



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 25 - Cadiño e tampa



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 26 - Com fechamento hermético



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 27 - Balança



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 28 - Cadiño zerado



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 29 - Retirando amostra de solda



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 30 - Amostra da parte soldada



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 31 - Amostra da parte soldada no cadiño



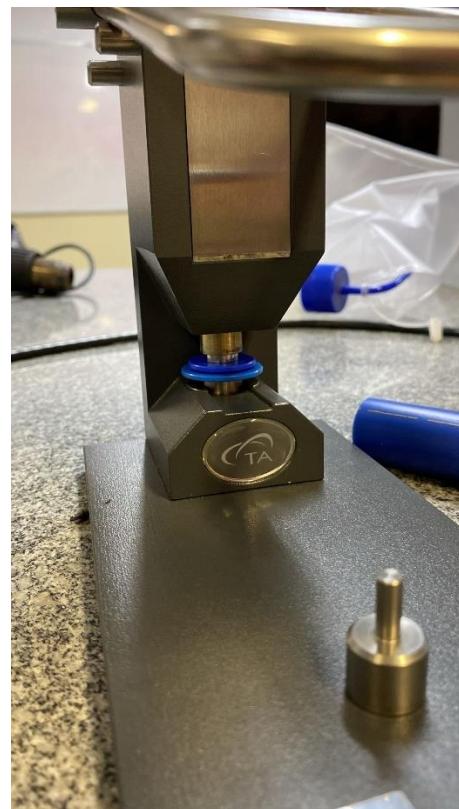
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 32 - Cadiño e seu encaixe



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 33 - Embutindo a tampa do cadinho (Fechamento Hermético)



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 34 - Cadiño tampado



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 35 - Cadiño de referênciā



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 36 - Cilindro de Nitrogênio utilizado no equipamento DSC para realização do teste



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 37 - Material PP Virgem para comparativo



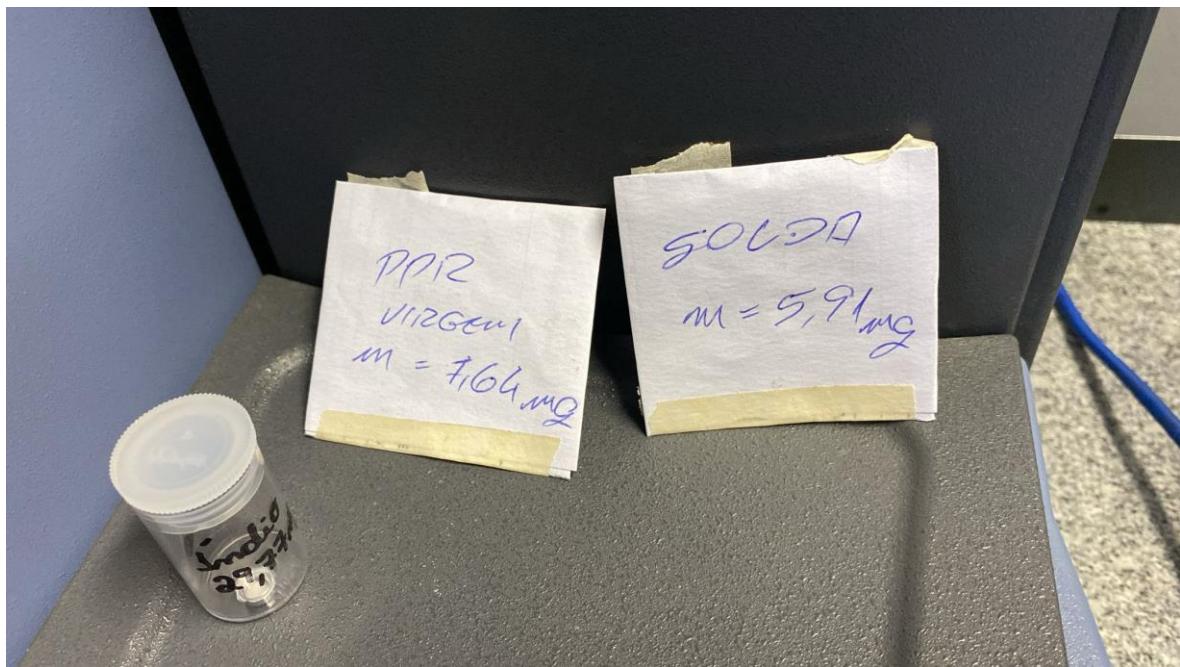
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 38 - Material virgem dentro do cadinho



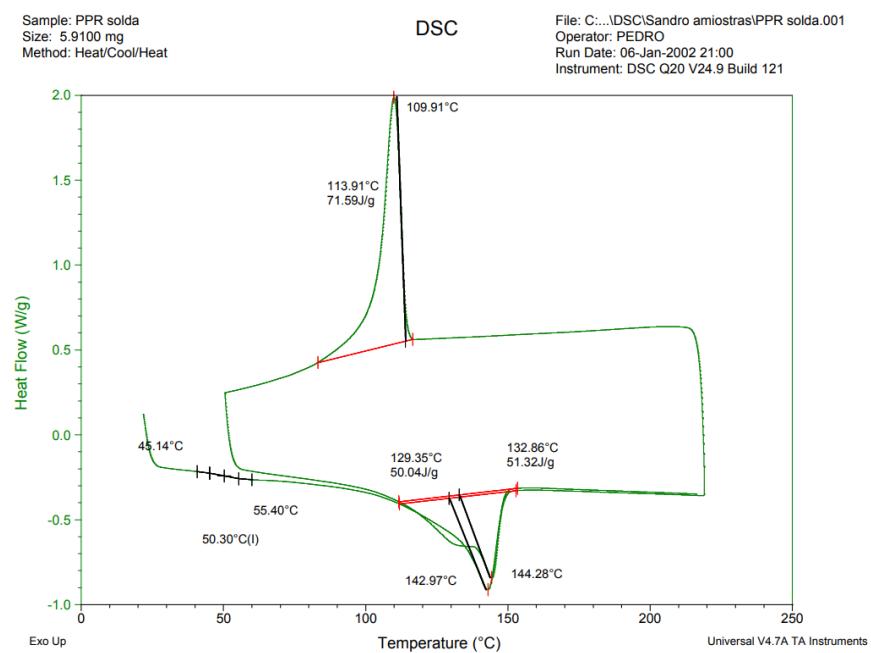
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 39 - Aguardando análise no calorímetro diferencial exploratório



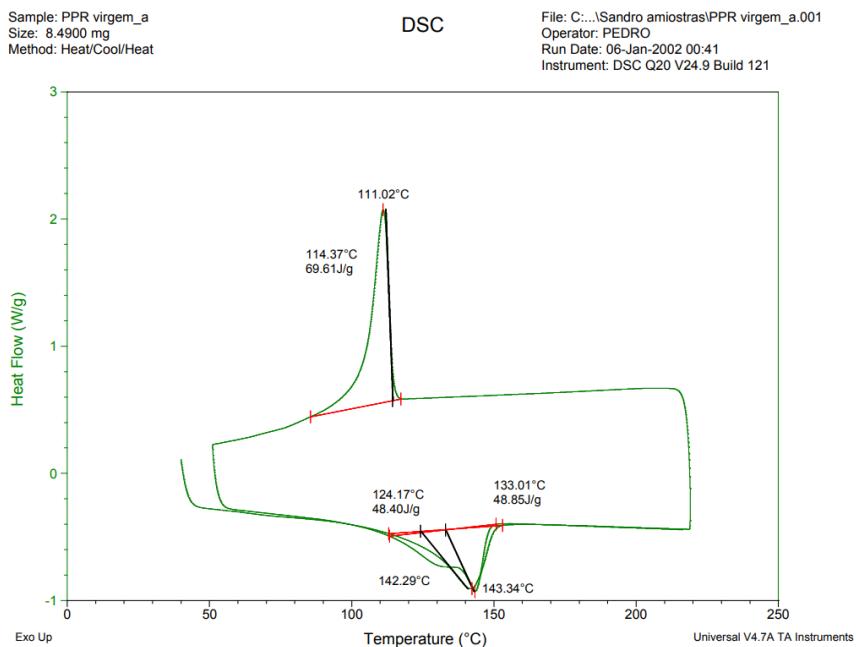
Fonte: Autoria própria (2024)

Gráfico 1 - PPR Amostra de solda



Fonte: Autoria própria (2024)

Gráfico 2 - PPR Virgem



Fonte: Autoria própria (2024)

2.10.2 Resultado do teste DSC

De acordo com a ASTM D3418-21, o método de Teste Padrão para Temperaturas de Transição e de Fusão e Cristalização de Polímeros por Calorimetria de Varredura Diferencial é uma técnica fundamental na caracterização de materiais, com destaque especial para os polímeros. Através do DSC, é possível obter uma compreensão abrangente do comportamento térmico desses materiais, desempenhando um papel crucial em diversas áreas, desde pesquisa e desenvolvimento de materiais até controle de qualidade e aplicações industriais variadas.

A interpretação dos dados obtidos por meio do DSC vai além da simples caracterização de polímeros. Ela possibilita também a análise do histórico térmico, incluindo esforços mecânicos ou tratamentos térmicos prévios aos quais a amostra possa ter sido submetida. Isso é de extrema importância, pois oferece insights valiosos sobre a estrutura e as propriedades dos materiais em estudo.

Um exemplo prático dessa aplicação é a comparação das curvas de DSC entre amostras soldadas e não soldadas. Nesse caso específico, a solda realizada em um tubo de polipropileno randomizado (PPR) demonstrou manter-se praticamente

inalterada em relação à amostra não soldada. Essa constatação reforça a ideia de que a solda não interferiu na estrutura cristalina do material, fornecendo dados valiosos para a análise e otimização de processos de soldagem em aplicações industriais.

2.11 Controle de qualidade

Para uma solda bem-feita, o material a ser soldado deve estar limpo, sem impurezas, e deve ter um chanfro totalmente uniforme para evitar irregularidades. Tubos que deveriam ser planos e estão tortos apresentam problemas de difusão do material; se o chanfro estiver irregular, uma parte do tubo pode se difundir mais que outra, resultando em falta de difusão e baixa união, criando um ponto de fragilidade.

Os parâmetros de soldagem devem ser respeitados para evitar irregularidades nas propriedades mecânicas do material. A aplicação de energia maior do que a necessária pode alterar o material a ser soldado, potencialmente resultando em falhas.

Outro problema que pode ocorrer é o resfriamento abrupto, que pode tornar o material mais frágil ou mais dúctil, dependendo de como é resfriado. É importante lembrar que, dependendo da temperatura de soldagem, devem ser considerados cuidados específicos, pois temperaturas abaixo de 10°C causam alterações tanto na execução da soldagem quanto no resfriamento do material. O material polimérico se comporta de maneira semelhante aos aços em relação ao tratamento térmico, elementos de liga e composição química, onde, dependendo de sua composição, suas propriedades químicas e mecânicas e sua função podem mudar (SANTOS, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Ramo de atuação

Atualmente, os tubos de PPR são utilizados em diversos segmentos para o transporte de fluidos, mais especificamente como sistema hidráulico, e estão presentes em qualquer construção, seja ela residencial, comercial ou industrial.

Destacamos a indústria, que vem modernizando as instalações, e a aplicação para ar comprimido, pois cada aplicação se refere a uma cor e especificação. O material empregado é utilizado para ar comprimido, que é um produto chave e de suma importância para o funcionamento de uma vasta quantidade de máquinas e equipamentos (CIMETSAS, 2019).

O ar comprimido é um gás inodoro e incolor. Além disso, não é inflamável nem tóxico e é amplamente empregado em todos os tipos de combustão e como fonte de energia (CIMETSAS, 2019).

Locais de Utilização do Ar Comprimido:

- **Indústria Alimentícia:** A produção e embalagem de alimentos dependem fundamentalmente do ar comprimido para limpeza, transporte de produtos e acionamento de máquinas.
- **Construção Civil:** Desde a operação de ferramentas pneumáticas até o controle de sistemas de climatização, o ar comprimido é indispensável no canteiro de obras.
- **Indústria Farmacêutica:** Em ambientes controlados, o ar comprimido é utilizado para limpeza de equipamentos, transporte de produtos e até mesmo em processos de produção.
- **Setor Médico:** Equipamentos como bombas de infusão e ventiladores pulmonares dependem do ar comprimido para funcionar com precisão.
- **Indústria Têxtil:** Na operação de teares e máquinas de costura industriais, o ar comprimido é usado para acionar componentes e garantir a produção eficiente.

- **Setor de Energia:** Usinas termoelétricas e nucleares utilizam o ar comprimido para operar válvulas e sistemas de controle.
- **Indústria de Embalagens:** Máquinas de envase, rotulagem e selagem contam com o ar comprimido para garantir processos ágeis e precisos.
- **Laboratórios e Pesquisa:** O ar comprimido é essencial para diversos equipamentos de laboratório, como cromatógrafos e espectrômetros de massa.

Figura 40 - Sistema de ar comprimido



Fonte: CIMETSAS (2019)

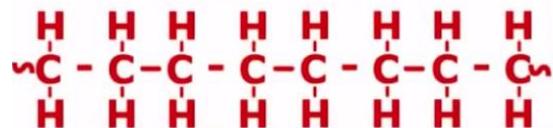
- **Pureza do ar comprimido** - Quando refletimos sobre toda essa versatilidade, é importante compreender que, para garantir essa aplicabilidade, é necessário prestar atenção a alguns pontos. Um aspecto de extrema importância é a pureza do ar comprimido. Esse é um fator fundamental, já que, para funcionar de maneira adequada, o ar precisa estar limpo e seco. É nesse sentido que as instalações de tubos PPR vêm crescendo no setor industrial.

3.2 Moléculas dos materiais poliméricos

São constituídos por macromoléculas (moléculas longas), como exemplificado abaixo com o eteno ou etileno, com ligações repetidas formando a macromolécula de um hidrocarboneto. Essa macromolécula é composta por monômeros, ou seja, cada um dos elementos da figura 41 é um monômero, sendo uma parte da molécula. Os monômeros são pequenas moléculas com funcionalidades químicas específicas

que podem ser polimerizadas, se unindo em várias para formar uma macromolécula (DUPONT DELRIN RESINA DE ACETAL, 2020).

Figura 41 - Macromolécula 1



Fonte: Artigo Plastic Academy Ricardo Cuzziol (2017)

Figura 42 - Macromolécula 2



Fonte: Artigo Plastic Academy Ricardo Cuzziol (2017)

As macromoléculas são importantes, pois constituem os materiais poliméricos, proporcionando uma certa mobilidade que confere as propriedades do material. Quando o material é colocado em estágio de fusão, são essas moléculas que se movimentam umas em relação às outras, permitindo o fluxo do material (DUPONT DELRIN RESINA DE ACETAL, 2020).

3.2.1 Polimerizada

Por exemplo, temos o etileno, uma molécula composta por dois átomos de carbono e hidrogênio, extraída do petróleo como um gás natural. Através do processo de polimerização, ela se transforma em polietileno (PE), conforme mostrado na figura 43, onde se liga a si mesma indefinidamente, formando uma macromolécula (DUPONT DELRIN RESINA DE ACETAL, 2020).

Figura 43 - Macromolécula 3



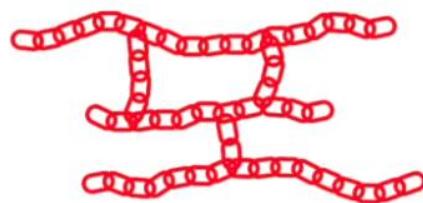
Fonte: Artigo Plastic Academy Ricardo Cuzziol (2017)

3.2.2 Movimentação molecular

Termoplásticos: Quando os polímeros recebem a aplicação de calor e entram na zona de fusão, suas moléculas se quebram, gerando vários monômeros. Após o resfriamento, esses monômeros se unem novamente, formando macromoléculas.

Termofixos e Elastômeros: Nestes materiais, as moléculas têm ligações desordenadas, como exemplificado na figura 44. Quando é aplicado calor, ocorre a formação de ligações covalentes entre as moléculas, gerando ligações cruzadas e resultando em um material que não se funde com ele mesmo (DUPONT DELRIN RESINA DE ACETAL, 2020).

Figura 44 - Macromolécula 4



Fonte: Artigo Plastic Academy Ricardo Cuzziol (2017)

3.2.3 Termoplásticos Amorfo x cristalino

Termoplásticos Amorfos: Nesses materiais, as moléculas estão dispostas de forma aleatória, sem um padrão específico, como exemplificado na figura 45. Essa configuração confere aos termoplásticos amorfos grandes propriedades, como transparência, menor mobilidade relativa das moléculas em relação umas às outras, maior área de contato com fluidos e maior espaço entre as moléculas. Os materiais amorfos não possuem a Temperatura de Transição Vítreia (TM) (DUPONT DELRIN RESINA DE ACETAL, 2020).

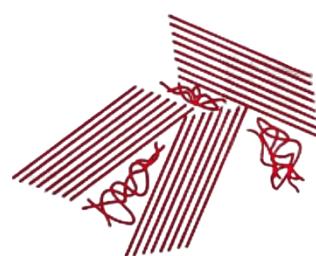
Figura 45 - Macromolécula 5



Fonte: Artigo Plastic Academy Ricardo Cuzziol (2017)

Os termoplásticos cristalinos são macromoléculas organizadas, com regiões com emaranhado de macromoléculas semelhante às moléculas amorfas em determinadas regiões, como exemplificado na Figura 46. As regiões, onde existe organização, são denominadas cristais, fazendo com que as moléculas fiquem mais próximas em relação às moléculas dos materiais amorfos. Isso impede a passagem de luz, conferindo uma característica mais opaca ao material, além de proporcionar maior resistência térmica, maior mobilidade e maior resistência química. Esses materiais possuem uma Temperatura de Transição Vítreia (TG) negativa e não são fluidos em relação aos materiais amorfos, onde a Temperatura de Transição Vítreia (TM) indica a fusão do material (DUPONT DELRIN RESINA DE ACETAL, 2020).

Figura 46 - Macromolécula 6

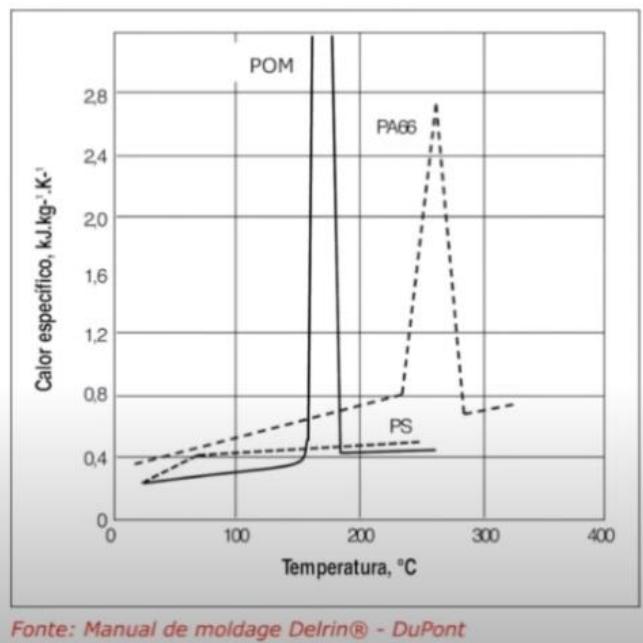


Fonte: Artigo Plastic Academy Ricardo Cuzziol (2017)

A diferença de energia necessária para elevar um material do estado sólido para o estado fluido varia entre um material cristalino, como o poliacetal, e um material amorfos, como o polietileno. Para os materiais amorfos, o nível de energia necessário para se tornarem fluidos é menor em relação ao material cristalino. Isso ocorre devido à constância da energia nos materiais amorfos, enquanto os cristalinos

têm um ponto de fusão definido, representando um pico de energia necessário para fundir o material e modificar sua estrutura cristalina (DUPONT DELRIN RESINA DE ACETAL, 2020).

Figura 47 - Temperaturas de transição para materiais poliméricos



Fonte: Manual De Moldage Delrin – Dupont (2024)

Existem três tipos de temperaturas de transição para materiais poliméricos: TG (Temperatura de Transição Vítreo), TM (Temperatura de Fusão Cristalina) e TC (Temperatura de Cristalização), (ARTIGO PLASTIC ACADEMY RICARDO CUZZIOL, 2017).

3.2.4 Temperatura de Transição Vítreo TG

A TG (Temperatura de Transição Vítreo) é uma palavra que vem do inglês, Glas transition temperature. É a temperatura na qual, para um sólido amorfo, as forças que mantêm suas moléculas coesas são superadas pela movimentação molecular induzida termicamente.

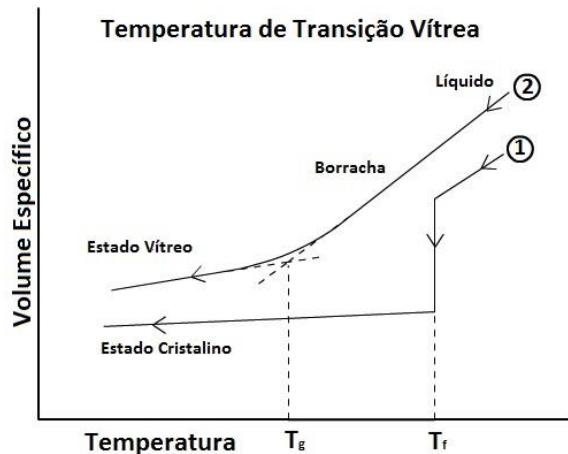
Acima desta temperatura, há uma movimentação molecular para materiais amorfos, enquanto abaixo dela não há ou há uma baixa movimentação molecular, deixando o material rígido, ou seja, o material está vítreo (ENCICLOPÉDIA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE POLÍMEROS, TRANSIÇÃO VÍTREA, JOHN WILEY & FILHOS, 2006).

A TG em materiais amorfos está acima da temperatura ambiente devido à configuração molecular desses materiais. Ao passar da fase sólida para a fase líquida, não estão realizando uma fusão, como os materiais cristalinos, mas sim uma transição de fase chamada de transição vítreia (TG), conforme discutido no artigo "O cotidiano é meio amorfó: transição vítreia, uma abordagem para ensino médio" (REVISTA CIÊNCIA PARA QUEM TEM PRESSA, 2004).

Na TG, ocorre uma transição no comportamento do material, como mostrado na figura 48, apresentando um diagrama tanto para materiais amorfos como para cristalinos. Neste ponto, observamos a taxa de expansão em relação à aplicação de calor. Na zona TG, os materiais se comportam como fluidos viscosos ou sólidos borrachosos. Os materiais amorfos, acima da TG, podem ser moldados, enquanto os materiais cristalinos se tornam sólidos borrachosos (materiais elastoméricos), onde as regiões cristalinas fornecem rigidez ao material e as regiões amorfas o tornam mais fluido.

Quando o material atinge a zona TG, ocorre uma mudança no comportamento térmico, volumétrico, elétrico e mecânico do material, onde todas as suas propriedades sofrem alterações. Um exemplo disso é seu comportamento na condução de eletricidade, que é diferente quando está na zona TG. No caso dos materiais amorfos, quando estão abaixo da TG, o material se comporta como sólido vítreo, enquanto os materiais cristalinos apresentam maior tenacidade acima da TG e entre a TM, onde a TG determina a menor temperatura de trabalho (ARTIGO PLASTIC ACADEMY RICARDO CUZZIO, 2017).

Figura 48 - Influência da temperatura no comportamento mecânico do polímero



Fonte: DGEBA - Diglicidil Éter Bisfenol A (2024)

3.2.4.1 Temperatura de fusão cristalina TM

A temperatura na qual a estrutura cristalina dos polímeros cristalinos é "destruída", levando-os ao estado amorfo, indica o ponto de fusão do material, no qual os cristais deixam de existir e sua estrutura molecular se torna aleatória. Materiais amorfos não possuem um ponto de fusão (TM).

No caso dos polímeros semicristalinos, esse ponto de fusão indica o momento em que eles se tornam fluidos. Quanto mais próximo da TM, maior a alteração no comportamento mecânico do material (CUZZIOL, 2017).

3.2.4.2 Temperatura de cristalização TC

A temperatura na qual os cristais da estrutura molecular dos materiais cristalinos se formam novamente é chamada de temperatura de cristalização (TC). A TC é uma temperatura distinta da TM, geralmente sendo menor que a temperatura de fusão. Isso ocorre devido à cinética de fusão dos cristais ser diferente da formação de cristais. Portanto, resfriamos o material abaixo da TM para iniciar a cristalização (CUZZIOL, 2017).

3.2.4.3 Temperatura máxima de trabalho de um polímero

Há três testes para avaliar isso. O primeiro é o Índice de Temperatura Relativa (RTI), que indica a temperatura máxima do material a longo prazo. Ele é apresentado em três valores distintos: RTI mecânico sem impacto, RTI mecânico

com impacto e RTI elétrico. O segundo teste é o HDT (Temperature Deflection Test), que informa a temperatura na qual o corpo de prova sofre uma deflexão estabelecida, indicando a capacidade do material de suportar carga em altas temperaturas. O terceiro teste é a temperatura de amolecimento Vicat.

Essas informações podem ser encontradas na ficha técnica do material, bem como nos sites ULTRUS PROSPECTOR, CAMPUSPLASTICS e MATWEB (CUZZIOL, 2017).

3.2.5 Temperatura de Cristalização do Polipropileno

Temperatura de cristalização do polipropileno é de 110 - 115°C, com valor médio de 111°C e uma margem de erro de 5 graus.

A temperatura de fragilidade do polipropileno é de -20.0°C, com um valor médio de -20.0°C e uma margem de erro de 16 graus.

3.3 Material de base

O material utilizado é da classe dos polímeros termoplásticos, Polipropileno Copolímero Random (PPR), uma resina que é resultado de alguns processos químicos complexos, composta principalmente de petróleo. Desenvolvida na Europa na década de 50, tornou-se uma solução na criação de tubos e conexões para suportar pressão em altas temperaturas e processos de corrosão sem apresentar vazamentos.

O PP e o PE pertencem ao grupo das poliolefinas e são atualmente os materiais mais importantes. Devido à sua não polaridade, determinada pela estrutura não molecular, eles não são processados para colagem. As Poliolefinas, no entanto, são muito bem soldáveis. A gama de aplicações para as poliolefinas inclui: tubos de gás (somente o PE - duro, pintado de amarelo), tubos de água e química, conduíte para proteção de tubos, tubos de escape, trabalhos em silos e, genericamente, em equipamentos de engenharia e processamento químico. Com sua vasta gama de aplicações, os tubos PPR também seguem o padrão de identificação baseado na norma ABNT 6493 – Cores de Tubulações Industriais.

O PPR apresenta um excelente desempenho em instalações de rede hidráulica, suas características fizeram com que grandes empresas revisassem suas

instalações e implantassem um novo sistema para conseguir diminuir algum fato. O material de base utilizado, identificado na cor azul, é aplicado para o ar comprimido e, devido a essa aplicação, exige alta resistência. A linha PPR Industrial azul é comercializada para o mercado de ar comprimido e instalações industriais nos seguintes diâmetros: DN 20mm, 25mm, 32mm, 40mm, 50mm, 63mm, 75mm e 90mm.

Sua aplicação exige que a união seja feita por termofusão. A classe de pressão para esta finalidade está classificada em PN20 e PN25, que é a resistência à pressão que certo produto resiste até o ponto de ruptura. A pressão nominal de um tubo é uma das maneiras de identificar, é o SDR (Standard Dimension Ratio) ou RDE, que é o diâmetro externo nominal e a relação com a espessura nominal (SDR). O valor da PN corresponde à máxima pressão de operação ou MPO. (ALESSANDRA FERNANDES SANTOS, 2011).

Classe de pressão: PN 20 (2,0 MPa) para tubos e PN 25 (2,5 MPa) para conexões. Temperatura máxima de serviço: 70°C a uma pressão máxima de 6,7kgf/cm².

A temperatura de degradação térmica dependerá da energia das ligações químicas que constituem os polímeros. Estas ligações poderão ser quebradas se uma energia igual ou superior for fornecida ao polímero na forma de aquecimento em um curto ou longo período, quanto for necessário. E o grau de cristalinidade e a forma da fase cristalina do material polimérico influenciam na temperatura de degradação.

Cada polímero apresentado tem uma característica que o distingue dos outros: o poli-isopreno tem uma ligação dupla C=C e um grupo metila ligado a um destes carbonos, o polipropileno tem um carbono terciário a cada mero e o polietileno só tem carbonos terciários nas ramificações da cadeia principal (SANTOS, 2011).

Soldagem por soquete: Nesse método, os tubos ou conexões são inseridos em um soquete aquecido pela termofusora (Figura 4), que promove o aquecimento e fusão das superfícies. Após a fusão, os elementos são unidos e mantidos em posição até que a junta esteja completamente resfriada e solidificada.

Figura 49 - Equipamento de soldagem de termofusão por método de soquete



Fonte: Autoria própria (2024)

Assim como em todo método, a soldagem por soquete necessita de materiais específicos para uma conclusão bem-sucedida. Durante o processo, é importante garantir que a junta esteja limpa, uniforme e perpendicular. O monitoramento dos parâmetros de temperatura deve ser constantemente verificado e, após a conclusão, é necessário realizar a inspeção. Para isso, utiliza-se um termômetro óptico com escala de -40°C a 600°C e um paquímetro com escala de 150 mm (Figura 50).

Figura 50 - Equipamentos de controle de medição para a realização da soldagem



Fonte: Autoria própria (2024)

3.4 Planejamento para a soldagem de soquete

O processo de soldagem de soquete por termofusão demanda um planejamento específico, que inclui a conformidade com normas e procedimentos. O elemento fundamental para uma solda de qualidade é descrito em um documento denominado EPF (Especificação de Procedimento de Fusão).

A EPF, como é conhecida, detalha os parâmetros e informações essenciais para um procedimento bem-sucedido (conforme Quadro 2), abrangendo desde o material base utilizado até o tipo, suas características, a aplicação e o procedimento executado. Este processo, caracterizado como simples, pode ser dividido em sete etapas, conforme descrito no Catálogo Simona de Soldagem de Termoplásticos (2017).

A – Preparação dos Materiais e Equipamentos: Após a seleção do material adequado para a aplicação desejada, é necessário proceder com a limpeza

do equipamento e verificar se está funcionando corretamente. Além disso, é essencial preparar a junta a ser soldada, incluindo o corte, o alinhamento das bordas e a sua limpeza;

B – Verificar a temperatura de aquecimento: É fundamental realizar o controle da temperatura do equipamento antes da soldagem, pois o material requer uma temperatura mínima específica para o processo;

C – Acoplamento dos acessórios para soldagem: É crucial acoplar corretamente os acessórios no equipamento, como os soquetes, a chapa de aquecimento e a base;

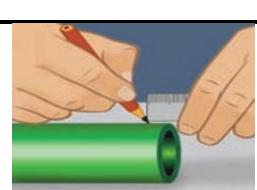
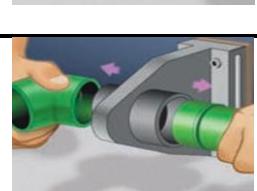
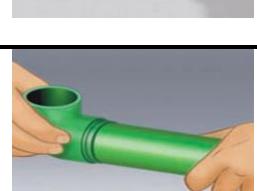
D – Encaixar as superfícies do tubo e conexão: Após um período determinado, as superfícies do tubo e da conexão são devidamente encaixadas e alinhadas, e então mantidas uniformemente em aquecimento na ferramenta aquecida até atingirem sua temperatura de fusão;

E – Temperatura de Aquecimento e Pressão: Após o término do ciclo de temperatura e pressão entre a ferramenta e o material, a pressão é reduzida a zero e procede-se à troca do encaixe no equipamento para o acoplamento entre os materiais a serem soldados;

F – Acoplamento das Juntas: Ao unir as juntas, é necessário aplicar uma pressão específica entre as partes por um período até que o resfriamento ocorra sem que haja qualquer tipo de movimento, como torção ou inclinação;

G – Inspeção visual imediata: Durante o processo de resfriamento, é possível realizar uma inspeção visual imediata, pois ao unir o material, forma-se um anel viscoso em ambas as juntas.

Quadro 2 - Processo e montagem de PPR na Soldagem de soquete

<p>1) Realizamos a limpeza dos bocais da termofusão com um pano embebido em álcool e verificamos se as placas do equipamento estão de modo correto;</p>	
<p>2) Corte dos tubos com tesoura. Recomenda-se a tesoura para evitar as rebarbas ao se cortar o material;</p>	
<p>3) Limpe o tubo e o interior do bocal com um pano embebido em álcool;</p>	
<p>4) Marque a profundidade de inserção na ponta do tubo, conforme a medida especificada na Tabela 1, de acordo com o diâmetro;</p>	
<p>5) Introduza simultaneamente os tubos e/ou conexões em seus respectivos bocais, de forma perpendicular à placa termofusora;</p>	
<p>6) Retire os tubos e/ou conexões da termofusão após passado o tempo mínimo determinado para a fusão, conforme Tabela 1;</p>	
<p>7) Imediatamente execute à união. Introduza o tubo na conexão. (Durante 3 segundos, é possível alinhar a conexão ou girá-la não mais que 15°);</p>	
<p>8) Recomenda-se deixar a junta em repouso até atingir resfriamento total.</p>	

Fonte: Adaptado do Catálogo técnico Tigre (2012)

3.5 Importância da limpeza do Polímero

A primeira etapa de preparação para o processo de termofusão envolve a limpeza minuciosa das superfícies a serem unidas, independentemente do tipo de polímero. Qualquer sujeira, poeira, óleo, umidade ou outros contaminantes devem ser completamente removidos. Isso pode ser feito utilizando métodos de limpeza adequados, como solventes apropriados, escovas ou panos limpos. Os agentes de limpeza ou panos já umedecidos em uma caixa plástica fechada devem consistir em 100% de solvente vaporizador, por exemplo, 99 partes de etanol com grau de pureza de 99,8% e 1 parte de MEK (metiletilcetona, desnaturação). Os agentes testados de acordo com DVGW 603 atendem a este requisito. O uso de álcool etílico pode resultar na redução da qualidade devido à água contida. A limpeza adequada garante uma superfície livre de impurezas, permitindo a aderência adequada entre os materiais poliméricos (DVS 2207-1, 2003).

3.6 Variáveis de controle

No processo de termofusão, várias variáveis críticas precisam ser controladas para garantir uma junção eficaz. Essas incluem:

- Temperatura: A temperatura de fusão precisa ser controlada com precisão para evitar danos aos materiais e garantir uma fusão adequada;
- Pressão: A aplicação controlada de pressão durante o processo assegura o contato íntimo entre as superfícies a serem unidas;
- Tempo de Exposição ao Calor: O tempo que os materiais ficam expostos ao calor é crucial para alcançar a fusão ideal sem causar degradação excessiva;
- Uniformidade na Distribuição de Calor: Garantir que o calor seja distribuído uniformemente em toda a área de termofusão para evitar inconsistências na junta;
- Preparação de Superfície: A limpeza e preparação adequada das superfícies antes do processo são variáveis críticas para garantir uma união sólida;
- Seleção de Materiais Adequados: Escolher os polímeros termoplásticos certos, levando em consideração suas propriedades e compatibilidade;

- Controle de Aditivos e Estabilizadores: A incorporação controlada de aditivos e estabilizadores térmicos para otimizar propriedades e garantir estabilidade durante a termofusão;

O controle efetivo dessas variáveis assegura a qualidade da junta termofundidas, tornando o processo confiável e eficiente em diversas aplicações industriais (CATÁLOGO TÉCNICO TIGRE, 2012).

3.7 Equipamentos do processo de termofusão

Neste trabalho, serão utilizados os seguintes equipamentos e as características dos mesmos encontram-se na Tabela 5.

- Tesoura de corte. (Para corte em tubos com pequenos diâmetros) usado em diâmetros pequenos.
- Termofusora (Máquina onde se aplica o aquecimento dos tubos).
- Régua / Paquímetro (Para aferir as cotas)
- Faceador (para deixar o tubo com corte plano sem rebarbas) usados em diâmetros grandes.

Tabela 6 - Características técnicas termofusora

Características	
Marca	Dajing
Modelo	Dj-009
Potência máxima	1000w
Potência mínima	800w
Temperatura de operação	240ºc ~ 300ºc
Fonte de alimentação	220v
Frequência	60hz
Diâmetros dos bocais	20mm, 25mm, 32mm, 40mm e 50mm
Diâmetro do cortador	3mm ~ 42mm
Placa de aquecimento	Alumínio
Base	Aço
Alça	Plástico

Fonte: DAJING (2023)

4 CRONOGRAMA

O planejamento das atividades referentes à soldagem por termofusão tem sua visualização na Tabela 6.

Tabela 7 – Cronograma de atividades

ATIVIDADE	2023						2024					
	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Pesquisa Bibliográfica e Documental												
Desenvolvimento do planejamento												
Estudo do equipamento												
Preparação dos tubos de PP												
Elaboração da EPF												
Soldagem do Termofusão												
Corte dos corpos de prova												
Realização dos Ensaios												
Análises dos critérios de aceitação												
Análise dos Resultados												
Conclusão Final do TCC												

Fonte: Autoria própria (2024)

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação.** Rio de Janeiro, 2002. 7 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**

ABPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS. **Norma Base.** São Paulo, 2013.

CASTRO, T. B.: **Soldagem por termofusão aplicado em tubos fabricados de poliamida** PUC Rio – Rio de Janeiro, 2016.

TIGRE. **Catálogo técnico PPR Termofusão** – Tigre. Joinville, 2012. 6,7e 8 p.

CEFET-MG – IVALNIZA FELIZARDO 2019

CPS. **Soldagem de termoplásticos 2 - (soldagem por termofusão e eletrofusão)** – Centro Paula Souza. São Paulo, 2023.

DVS 2202-1,1989 **Imperfeições em juntas de solda termoplásticas.** Norma Alemã, 1989.

DVS 2203 -1,1999 **Ensaios de Juntas Soldadas de chapas e tubos termoplásticos, Métodos de ensaio – Requisitos,** 1999.

DVS 2207-1,2003 **Soldagem de materiais termoplásticos – soldagem de tubos, conexões e placas – parte 1 procedimentos.** 2003

ABPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS **Procedimentos de Solda de Topo.** São Paulo, 2013.

SANTOS; A. F.: **Informação e documentação – Polipropileno.** Rio de Janeiro, 2018. 68 p.

SILVA, F. A.: **Desenvolvimento de algoritmo para máquina de solda de topo por termofusão.** Universidade Federal de Uberlândia, 2020. 16,17 e 18 p.

SIMONA, - **Soldagem global thermoplastic solutions.** USA, 2017.