

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA

**RONALDO DOS SANTOS FERREIRA
TONIMAR SANTOS ARAÚJO**

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS DO PROCESSO DE BRASAGEM VISANDO A
CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO DE TROCADOR DE CALOR ALETADO**

SÃO PAULO

2021

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA

**RONALDO DOS SANTOS FERREIRA
TONIMAR SANTOS ARAÚJO**

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS DO PROCESSO DE BRASAGEM VISANDO A
CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO DE TROCADOR DE CALOR ALETADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Tecnologia de Itaquera no curso
de Curso de Tecnologia Mecânica: Processos
em Soldagem.

Orientador: Prof. Edgar de Souza Dutra

SÃO PAULO

2021

Autores: Ronaldo dos Santos Ferreira, Tonimar Santos Araújo

**Trabalho: APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS DO PROCESSO DE BRASAGEM
VISANDO A CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO DE TROCADOR DE CALOR
ALETADO**

Orientador: Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

Trabalho de Graduação apresentado como
atividade de Graduação de curso em grau de
Tecnólogo em Mecânica em Processos de
Soldagem, pela Faculdade de Tecnologia
Itaquera - Miguel Reale.

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora

Professor orientador: Prof. Me. Edgar Souza Dutra

Professor examinador Prof. Dr. Douglas Moraes

Professor examinador Prof. Esp. Juliano Neves Panão

RESUMO

Este estudo analisou a aplicação de métodos para aplicação de metodologias do processo de brasagem visando a construção e manutenção de trocador de calor aletado. O processo de soldagem é bastante antigo e comum na maioria das indústrias. Os processos de soldagem podem ser classificados pelo tipo de fonte de energia que utilizam ou pela natureza da união dos materiais. A tarefa mais complexa para os fabricantes de trocadores de calor com aletas de placa é o processo de brasagem, porque diversas juntas de brasagem são necessárias para garantir que o grande número de placas e aletas funcione suavemente na montagem acabada. A vantagem é que nenhuma etapa de limpeza é necessária no final e as peças estão livres de resíduos. O estudo foi desenvolvido por meio de revisão da literatura e método experimental na produção de um trocador de calor por brasagem.

Palavras-chave: Brasagem; Processo; Trocador; Calor.

ABSTRACT

This study analyzed the application of methods for qualifying the brazing process for the construction and maintenance of finned heat exchanger. The welding process is quite old and common in most industries. Welding processes can be classified by the type of energy source they use or by the nature of the joining of the materials. Variations in brazing energy can lead to different hardness values in the thermally affected zone due to the different cooling speeds imposed by them. The most complex task for manufacturers of plate fin heat exchangers is the brazing process, several brazing joints are required to ensure that the large number of plates and fins work smoothly in the finished assembly. The advantage is that no cleaning steps are necessary at the end and the parts are free of residues. The study was developed through literature review and experimental method in the production of a brazing heat exchanger.

Keywords: Brazing; Process; Exchanger; Heat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças	14
Figura 2 - Soldagem por pressão (esquemática).....	15
Figura 3 - Soldagem por fusão (esquemática)	15
Figura 4 - Ação da umectação na junta brasada.....	17
Figura 5 - Difusão molecular na junta brasada.....	18
Figura 6 - Folgas recomendadas para os processos de brasagem	19
Figura 7 – Trocador de calor tipo placa.....	26
Figura 8 - Trocador de calor tubular	27
Figura 9 – Trocador de calor duplo tubo	28
Figura 10 - Transferência de Calor.....	30
Figura 11 - Trocador de calor da pá carregadeira	34
Figura 12 - O trocador de calor	34
Figura 13 – Desenho de produto.....	36
Figura 14 – Casco.....	38
Figura 15 – Tubo flexível.....	39
Figura 16– Espelhos	40
Figura 17– Conexões.....	41
Figura 18 – Consumível Foscooper	42
Figura 19 – Consumível de latão	43
Figura 20 – Fluxo trincal.....	44
Figura 21– Separação e identificação da matéria-prima	44
Figura 22– Traçador de altura Mitutoyo	45
Figura 23– Separação e identificação da matéria-prima	45
Figura 24– Furadeira de bancada	46
Figura 25– Tubo de cobre flexível ¼” conformado	46
Figura 26– Montagem dos tubos e aletas	47
Figura 27– Montagem do trocador de calor.....	47
Figura 28– Regulador de pressão	48
Figura 29 – Regulador manômetro gás GLP.....	48
Figura 30 – Brasagem dos tubos, aletas e espelhos	49
Figura 31– Brasagem dos espelhos e conexões.....	49

Figura 32– Plano de inspeção visual.....	50
Figura 33– Teste de estanquidade.....	52
Figura 34– Embalagem.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens.....	13
Tabela 2 – Materiais.....	37
Tabela 3- Composição química (%) do material 1.....	37
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do material 1.....	37
Tabela 5- Composição química (%) do material 2.....	38
Tabela 6- Propriedades mecânicas do material 2.....	38
Tabela 7- Composição química (%) do material 3.....	39
Tabela 8- Propriedades mecânicas do material 3.....	39
Tabela 9- Composição química (%) do material 4.....	40
Tabela 10 - Propriedades mecânicas do material 4.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS	12
3 UNIÃO DE MATERIAIS E BRASAGEM	13
3.1 Brasagem	17
4 VASOS DE PRESSÃO	21
5 TROCADORES DE CALOR	25
5.1Transferência de Calor	29
6- METALURGIA.....	31
7- MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
8- RESULTADOS	54
9 - CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor buscam realizar a transferência de calor de um ou mais fluidos que estão em temperaturas diferentes, os trocadores de calor são um dos equipamentos mais comuns encontrados em a maioria das indústrias. Seu papel adquiriu grande importância diante da necessidade economizar energia e ter um equipamento ideal não apenas baseado em sua análise térmica e desempenho econômico na instalação, mas sim em função de outros fatores, como o uso de energia do sistema e a disponibilidade e quantidade de energia e matérias-primas necessárias para atender a uma certa função. Existem vários tipos de trocadores de calor e atualmente em todo o mundo são oferecidos no mercado uma infinidade de designs diferentes destes. É necessário especificar que em qualquer tipo de trocador o calor é transferido em apenas uma direção: do fluido com a temperatura mais alta para o fluido com a mais baixa temperatura; no entanto, os fluidos usados podem estar em contato uns com os outros ou não; nesse caso, o calor é transferido do fluido com temperatura mais alta para a temperatura mais baixa, pois ambos estão em contato térmico com as paredes, normalmente metálicos, que os separam.

Neste caso, o trocador de calor de carcaça e tubo será usado porque é o mais comum em aplicações industriais onde é altamente exigido devido à existência de altas temperaturas e pressões, sendo utilizado para aqueles processos que requerem resfriamento, aquecimento ou mudança de estado entre líquidos e gases, sendo equipamentos preparados para as mais exigentes condições de trabalho e operação.

Um trocador de calor é um dispositivo que permite que o calor de um fluido (um líquido ou um gás) passe para um segundo fluido (outro líquido ou gás) sem que os dois fluidos tenham que se misturar ou entrar em contato direto. Em teoria, pode-se obter o calor dos jatos de gás apenas jogando água fria neles, mas então as chamas se extinguiriam! O princípio essencial de um trocador de calor é que ele transfere o calor sem transferir o fluido que transporta o calor.

Todos os trocadores de calor fazem o mesmo trabalho - passar calor de um fluido para outro - mas funcionam de muitas maneiras diferentes. Os dois tipos mais comuns de trocador de calor são o *shell-and-tube* e *plate / fin*. Em trocadores de calor de casco e tubo, um fluido flui através de um conjunto de tubos de metal enquanto o

segundo fluido passa por um casco selado que os rodeia. Esse é o design mostrado em nosso diagrama acima. Os dois fluidos podem fluir na mesma direção (conhecido como fluxo paralelo), em direções opostas (contrafluxo ou contra-corrente) ou em ângulos retos (fluxo cruzado). As caldeiras em locomotivas a vapor funcionam dessa forma.

Os esforços crescentes e urgentes para melhorar a eficiência de praticamente todas as máquinas que produzem e consomem energia em o mundo resultou em uma expansão explosiva da manufatura em muitas áreas associadas à conservação de energia.

O estudo se justifica por analisar uma temática atual, tendo relevância acadêmica e social, por analisar a produção de trocador de calor aletado através da utilização da brasagem.

Este estudo tem por característica de forma inicial pelo levantamento de referenciais teóricos, através da seleção da literatura para sustentação, com a discussão do pensamento acerca do tema e análise dos fatos na verificação dos conceitos teóricos, seguindo-se pela verificação e confrontação das respectivas definições.

A pesquisa será realizada por meio de leituras sistemáticas e da produção de fichamentos de livros, artigos e fontes eletrônicas que abordam o tema proposto. A revisão da literatura acerca do assunto se apresenta como base para adquirir um conhecimento prévio sobre o que foi tratado, em pesquisas anteriores, acerca do tema a se investigar. Além disto, a busca por esta literatura economizará esforços, pois poderão encontrar-se, em outros trabalhos, pistas ou respostas sobre como responder à problemática da atual pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este estudo tem por objetivo geral analisar a aplicação de metodologias do processo de brasagem visando a construção e manutenção de trocador de calor aletado.

2.1.1 Objetivos específicos

De forma específica, o estudo tem por objetivo:

- Verificar os elementos da brasagem;
- Verificar a utilização da brasagem na produção e manutenção de trocador de calor aletado;
- Construir um trocador de calor utilizando a brasagem.

3 UNIÃO DE MATERIAIS E BRASAGEM

De acordo com Wainer (2016) o processo de soldagem é bastante antigo e comum na maioria das indústrias. Os processos de soldagem podem ser classificados pelo tipo de fonte energia que utilizam ou pela natureza da união dos materiais. Mesmo com a evolução das técnicas, ainda existe um número elevado de processos que dependem da experiência do operador no ajuste dos parâmetros. Estes parâmetros são importantes e estão relacionados com defeitos e dificuldades comuns em processos de soldagem: A dificuldade na abertura do arco, dificuldade em manter o arco aberto, projeções, aquecimento exagerado do eletrodo, má aderência do cordão de solda, porosidades, mordeduras, falta de penetração, entre outras.

Segundo Castro (2005, p. 01) tabela 1 lista algumas das principais vantagens e desvantagens dos processos de soldagem:

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
1. Juntas de integridade e eficiência elevadas	1. Não pode ser desmontada
2. Grande variedade de processos	2. Pode afetar microestrutura e propriedades das partes
3. Aplicável a diversos materiais	3. Pode causar distorções e tensões residuais
4. Operação manual ou automática	4. Requer considerável habilidade do operador
5. Pode ser altamente portátil	5. Pode exigir operações auxiliares de elevado custo e duração (ex.: tratamentos térmicos)
6. Juntas podem ser isentas de vazamentos	6. Estrutura resultante é monolítica e pode ser sensível a falha total
7. Custo, em geral, razoável	
8. Junta não apresenta problemas de perda de aperto.	

Fonte: Adaptado de BRITTO, (2021).

A soldagem é um processo de fixação onde é realizada a união de duas ou mais peças de um material, (geralmente metais ou termoplásticos), geralmente conseguida por coalescência (fusão), na qual as peças são soldadas por fusão, são elas. Pode-se adicionar um material de enchimento (metal ou plástico), que, ao ser fundido, forma uma poça de material fundido entre as peças a serem soldadas (a poça de fusão) e, ao ser resfriado, torna-se uma junta fixa a que se denomina cordão. (MARQUES et al, 2005)

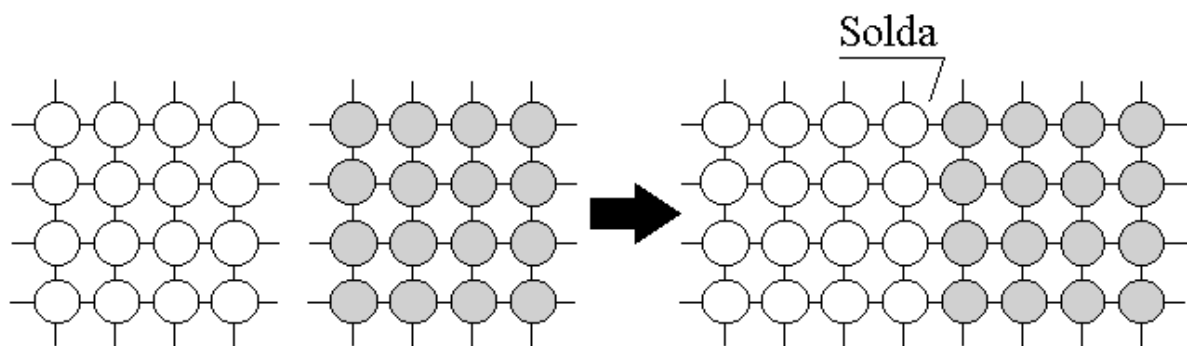
Às vezes, pressão e calor são usados juntos, ou apenas a própria pressão, para produzir a solda.

Muitas fontes de energia diferentes podem ser usadas para soldagem, incluindo uma chama de gás, um arco elétrico, um laser, um feixe de elétrons, processos de fricção ou ultrassom. A energia necessária para formar a ligação entre duas peças de metal geralmente vem de um arco elétrico. A energia para soldas termoplásticas ou de fusão geralmente vem do contato direto com uma ferramenta quente ou gás.

A soldagem é frequentemente realizada em uma indústria de atmosfera, mas pode ser realizada em muitos lugares diferentes, incluindo ar livre, baixo nível de água e espaço. Independentemente da localização, no entanto, a soldagem ainda é perigosa e devem ser tomadas precauções para evitar queimaduras, choque elétrico, vapores tóxicos e exposição excessiva à luz ultravioleta.

A soldagem, sendo Castro (2005) ocorre através da aproximação do material (figura 1).

Figura 1 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças



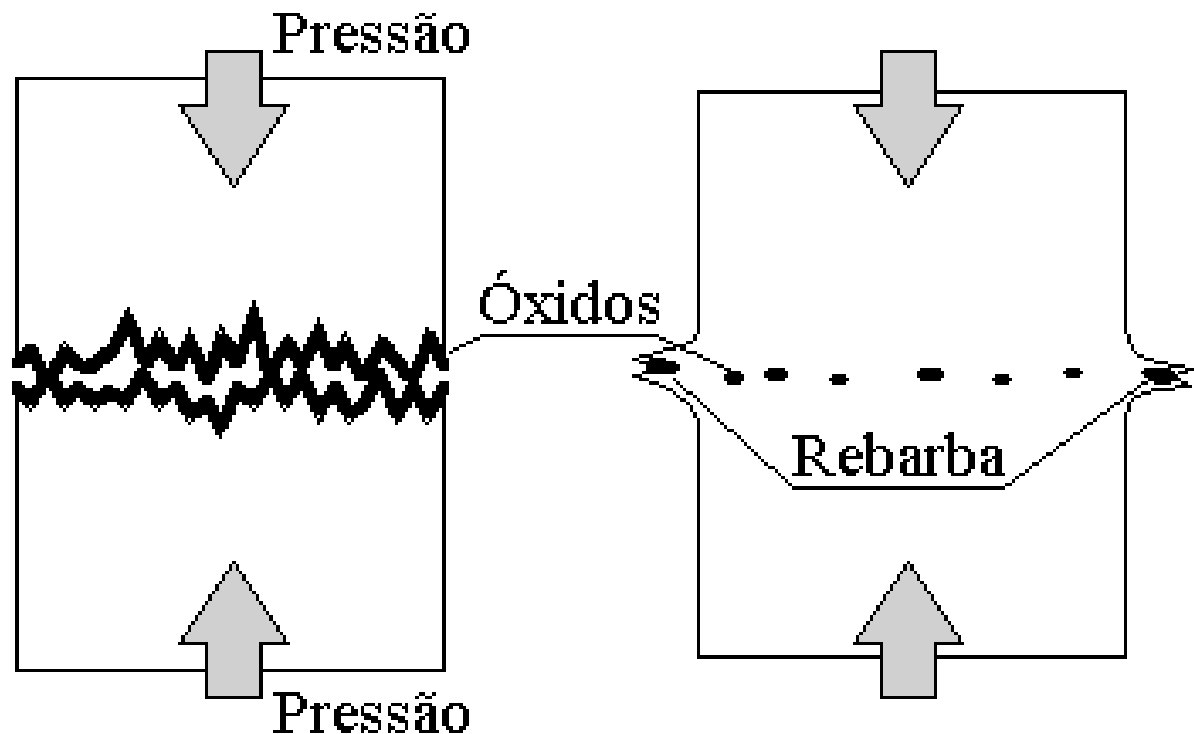
Fonte: CASTRO, (2005).

Tal efeito pode ser observado, por exemplo, quando dois pedaços de gelo são colocados em contato, sendo que outros materiais, a soldagem não ocorre tão facilmente pois a aproximação das superfícies a distâncias suficientes para a criação de ligações químicas entre os seus átomos é dificultada pela rugosidade microscópica e camadas de óxido, umidade, gordura, poeira e outros contaminantes existentes em toda superfície metálica. Tal dificuldade pode ser superada de duas formas principais, das quais originam os dois grandes grupos de processos de soldagem:

- Deformar as superfícies em contato, rompendo as camadas de contaminantes e permitindo a sua aproximação e a formação de ligações químicas (figura 2). As superfícies de contato podem ser aquecidas para facilitar a sua deformação.

- Aquecer localmente a região a ser soldada até a sua fusão, destruindo, assim, as superfícies e produzindo a solda com a solidificação do material fundido (figura 3).

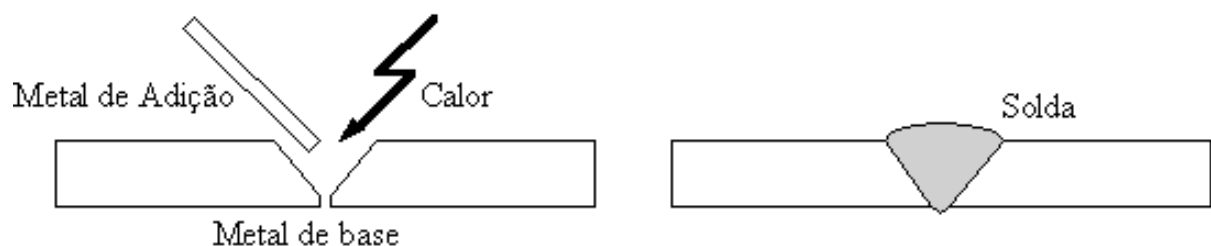
Figura 2 - Soldagem por pressão (esquemática)



Fonte: CASTRO, (2005).

Desta forma, os diferentes processos de soldagem podem ser agrupados em dois grandes grupos baseando-se no método dominante de se produzir a solda, isto é, (a) processos de soldagem por pressão (ou por deformação) e (b) processos de soldagem por fusão.

Figura 3 - Soldagem por fusão (esquemática)



Fonte: CASTRO, (2005).

A solda comumente utilizada na indústria automobilística é a solda a resistência, e tem como base a lei de Joule, ($Q = I^2 \cdot t \cdot R$). Onde Q é o calor gerado para a fusão do metal, I é a corrente elétrica que varia de 8 kA a 14 kA, t é o tempo de passagem da corrente que varia de 100ms a 500ms e R é a resistência entre os materiais a serem fundidos. A resistência necessária para geração do calor é controlada pela força aplicada com a pinça de soldagem que varia de 2 kN a 8 kN.

Mantendo-se estas variáveis, I e R, constantes através de parametrização em um controlador de solda a qualidade mantém-se. Porém há o desgaste do cilindro pneumático que faz com que varie a resistência e possíveis fugas de corrente, alterando-se a qualidade final.

Segundo Melin (2005, p. 12) a soldagem com eletrodo revestido envolve alguns fenômenos de transferência metálica, que são de grande importância para um melhor controle do processo de soldagem obtendo cordões mais perfeitos, diminuindo respingos, prevendo a penetração do passe, controlando a distorção da estrutura soldada.

É definido como arco elétrico a descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo cátodo aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido. No arco voltaico para soldagem a descarga elétrica tem baixa tensão e alta intensidade e que existem três conceitos importantes perante esta visão para o conhecimento do arco: calor, ionização e emissão.

Ressalta-se que conforme a energia que um elétron recebe, ele pode ou não sair da influência de um campo eletromagnético de um átomo e tornar-se um elétron livre.

A energia utilizada para transformá-lo em elétron livre chama-se potencial de ionização. No caso dos arcos elétricos por soldagem o principal seria a ionização térmica que é a ionização por colisão entre as partículas aquecidas. Neste fenômeno tem-se um elétron livre e um íon positivo, formando um meio condutor de eletricidade. A emissão termiônica é um processo de liberação de elétrons de uma superfície aquecida. A abertura do arco para soldagem necessita do aquecimento e bombardeamento com elétrons do gás que circunda o eletrodo, a fonte de energia possui uma diferença de potencial característica.

3.1 Brasagem

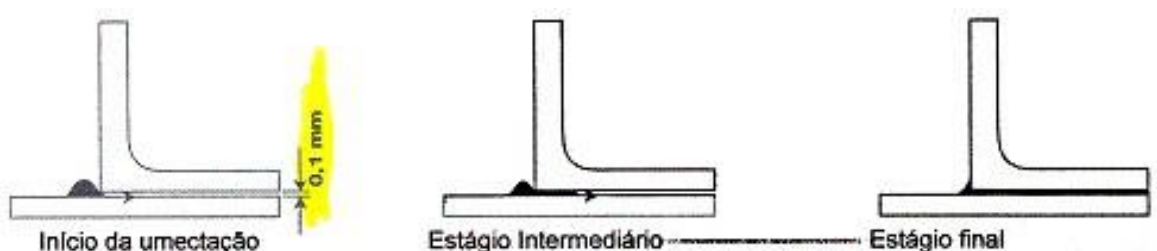
Atualmente, a brasagem é uma tecnologia dedicada a unir metais. No entanto, quando o refogado é feito corretamente, é uma ferramenta de negócios para reduzir custos, aumentar a produção e melhorar a qualidade do produto devido ao seu design limpo, é rápido, preciso e controlável, ajudando a minimizar o desperdício de material de enchimento, o que o torna um dos processos de soldagem mais comuns e adequado para alguns processos ou sistemas de produção. (WAINER, 2004)

Além disso, facilita uma produção rápida de peças a serem unidas a partir de componentes padrão, pode ligar uma ampla variedade de metais, podendo ligar metais ferrosos a não ferrosos e, uma vez que refogar não derrete metais básicos, é ideal para unir metais com diferentes temperaturas de fusão. Avanços recentes nos processos de brasagem levaram a melhorias processos de união que vão desde a brasagem da tocha, onde a fusão entre os mesmos materiais a serem unidos compromete em alguns casos a área da ligação com brasagem por indução onde a área dos materiais não sofrer nenhum comprometimento. Desenvolvimentos tecnológicos levaram processos a ser mais seguro, mais limpo, mais produtivo, mas também mais caro, uma vez que precisam de máquinas especiais com acessórios específicos para cada tipo de junta. (MARQUES et al, 2005)

Segundo FERNANDES (2001), a união ocorre através da combinação de três efeitos:

- a) Umectação: é o poder que um líquido tem de molhar um sólido, podendo fluir sobre o mesmo, deixando uma película aderida. Para facilitar a compreensão, podemos entender como sendo o fenômeno que permite com que uma fina película de água fique aderida a superfície de um vidro após o escoamento de uma gota de água. Na brasagem este efeito é identificado como a fluidez do metal de adição sobre as superfícies aquecidas;

Figura 4 - Ação da umectação na junta brasada



Fonte: FERNANDES, (2001).

- b) Capilaridade: é um de fenômenos físicos que promove pressão nos líquidos, fazendo com que penetrem entre duas superfícies. Na brasagem a capilaridade é obtida através da folga entre as peças a serem unidas, a qual o metal de adição deverá preencher. Esta folga deve ser até 0,05 mm para brasagem em fornos de atmosfera controlada ou a vácuo e de 0,05 mm até 0,20 mm para brasagem manual e em fornos com atmosfera comum;
- c) Difusão Molecular: é um processo espontâneo de transporte de moléculas do sistema cristalino de um material para outro. Como o aquecimento, as moléculas do material base se distanciam e o metal de adição no estado líquido penetra entre essas moléculas. No resfriamento as moléculas se atraem, contraindo o metal de adição, gerando aderência entre o metal base e o metal de adição.

Figura 5 - Difusão molecular na junta brasada



Fonte: FERNANDES, (2001).

A Brasagem (em inglês Brazing) consiste no processo de aquecimento à temperatura adequada, buscando munir um enchimento ou metal de enchimento com uma temperatura de fusão inferior à dos metais a serem unidos, que não estão envolvidos no processo de soldagem. (WAINER, 2004).

A brasagem é o processo de união de duas peças por meio de calor e um material de enchimento que funde a uma temperatura acima de 427° C (800° F) e abaixo do ponto de fusão das peças a serem soldadas. (MARQUES et al, 2005)

Segundo Vozniaki (2014, p. 17):

A brasagem, embora muitas vezes confundida com os processos de soldagem, possui características singulares que a definem como um processo de junção de materiais único. Diferentemente dos processos de soldagem por fusão, onde há fusão do material base e do metal de adição, na brasagem ocorre somente a fusão do metal de adição, devido ao menor ponto de fusão do metal de adição.

Os processos de brasagem podem ser divididos em dois tipos: Brasagem e Soldagem branca. A principal diferença entre os dois processos é o ponto de fusão do metal de adição. Na soldagem branca utilizam-se metais de adição

com ponto de fusão abaixo de 400°C enquanto na brasagem utiliza-se metal de adição acima de 400° e abaixo do ponto de fusão do material base.

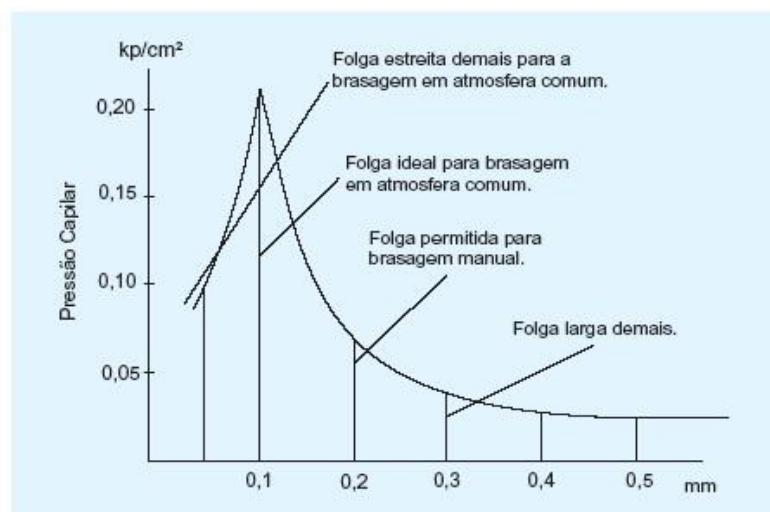
O material de enchimento utilizado na brasagem varia de acordo com o material das peças a serem unidas. As ligas mais utilizadas são cobre-fósforo, prata, níquel e cobalto, alumínio-silicioso, cobre, cobre-zinco e magnésio. (WAINER, 2004)

O objetivo da realização deste processo de soldagem entre peças do mesmo ou de diferentes materiais é criar uma junta permanente de alta resistência, simplificar o funcionamento mecânico e adotar técnicas de produção simples e sempre compatíveis com as demandas de produção em cadeia, entre outras. (WAINER, 2004)

Existem diferentes métodos de brasagem, por exemplo, a tocha, resistência, forno, infravermelho, laser ou indução entre outros. A brasagem por indução tem uma série de vantagens sobre esses outros métodos. (MARQUES et al, 2005)

Na brasagem, o princípio capilar é usado para distribuir o metal de adição fundido entre as superfícies dos metais básicos. Portanto, durante a operação de brasagem, deve-se ter o cuidado de manter uma folga entre os metais base que permita que a capilaridade atue com mais eficiência. Na maioria dos casos, isso significa folga apertada. (MARQUES et al, 2005).

Figura 6 - Folgas recomendadas para os processos de brasagem



Fonte: FERNANDES, (2001)

O contato metal-metal é toda a folga de que você normalmente precisa, já que o "acabamento laminado" médio dos metais fornece aspereza superficial suficiente para criar "caminhos" capilares onde o metal de adição fundido pode fluir. Por sua vez,

as superfícies altamente polidas tendem a restringir o fluxo de metal de adição. (WAINER, 2004)

No entanto, há um fator especial que deve ser considerado cuidadosamente ao planejar folgas de junta. As juntas soldadas são feitas em temperaturas de brasagem, não em temperatura ambiente. Portanto, precisará levar em consideração o "coeficiente de expansão térmica" dos metais que estão sendo unidos. Isso é particularmente importante em montagens tubulares que unem materiais diferentes. (MARQUES et al, 2005)

A característica da brasagem é:

- As juntas soldadas são muito resistentes, sejam metais ferrosos e não ferrosos. Muitas vezes a resistência à tração de duas peças soldadas com brasagem supera a sua própria resistência de metais básicos.
- Uma vantagem adicional da brasagem é sua capacidade de soldar materiais diferentes, como titânio com aço inoxidável, enquanto a mesma soldagem feita com TIG, ficaria quebradiça.
- É muito econômica em comparação com outros processos, pois requer pouco material de enchimento para unir duas peças com resistência máxima.
- As características físicas e químicas do material de enchimento são completamente diferentes das peças a serem soldadas.
- É possível soldar metais diferentes, mesmo de diferentes massas e pontos de fusão. Por sua vez, é um processo de soldagem muito rápido de fazer, apenas o suficiente para atingir a temperatura de soldagem, que é ligeiramente superior a 450° C, mas muito inferior à temperatura de fusão dos metais em solda.
- A brasagem é caracterizada por alta resistência e ductilidade. Na verdade, a zona de ligação é igual ou mais forte do que os metais que foram unidos. É também se destaca pela homogeneidade, o que implica um bom acabamento a nível estético e estanquidade quando se trata de fluidos.

O processo de brasagem por indução é um processo pelo qual superfícies dos componentes a serem unidos são aquecidos seletivamente à temperatura de soldagem por meio da energia elétrica fornecida por um equipamento de indução (gerador de corrente de alta frequência). O princípio do aquecimento por indução é baseado em uma corrente alternada que flui através da bobina indutora e por este motivo gerando um campo magnético que varia em magnitude com a corrente. Se for um material condutor elétrico, a corrente eletromagnética será induzida no material. Devido à resistência do material, o calor se desenvolve na região do material através do qual ocorrentes eletromagnéticas. O equipamento de aquecimento por indução pode aquecer materiais eletricamente condutores a temperaturas muito altas de uma só vez. (WAINER, 2004)

4 VASOS DE PRESSÃO

Segundo Silva (2017) os vasos de pressão apresentam diversas aplicações para indústria e edificações. São utilizados para o acondicionamento de fluidos pressurizados, sendo estes tanto líquidos quanto gases sob pressão ou ação de vácuo.

Segundo a Norma Regulamentadora nº 13, vaso de pressão é todo e qualquer vaso cujo produto da pressão manométrica (kPa) pelo volume interno (m^3) resulta em um fator superior que 8 (oito) (BRASIL, 2006).

Segundo Telles (1996) os vasos de pressão são considerados recipientes estanques que, seja qual o seu formato, tipo e aplicação industrial, armazenem um determinado fluido pressurizado.

Para Silva (2017, p. 02):

Os vasos de pressão apresentam externamente uma parede de pressão que podem ser simples ou múltiplas, podem também ser de variados formatos em decorrência das dimensões e aplicação. A parede de pressão é composta basicamente pelo casco e tampos de fechamento. Os vasos de pressão apresentam ainda partes não sujeitas à pressão, como é o caso dos suportes. De forma geral, os vasos de pressão não sujeitos à chama são utilizados para as seguintes aplicações: acumulação intermediária de gases e líquidos para processos, armazenamento de gases sob pressão e processamento de gases e líquidos.

De acordo com Pereira Filho (2004) os testes hidrostáticos apresentados pela ASME como a prova de carga que solicita os vasos de pressão em tensões superiores

às tensões estabelecidas nas condições de projeto, sendo realizados através da aplicação de uma pressão hidrostática, de forma geral através da utilização da água como fluido de pressurização, esperando-se que com a sobrevivência do equipamento a esta pressão elevada, o mesmo esteja apto a desempenhar sua função operacional com segurança, sob condições menos severas.

Existe discussão entre os profissionais da área de inspeção de equipamentos sobre os reais benefícios da realização do teste hidrostático como ferramenta para avaliação de integridade de vasos de pressão. Um dos principais argumentos contra a realização de testes hidrostáticos é o perigo da ocorrência de crescimento subcrítico de descontinuidades (CSCD), sem que este fenômeno seja percebido, levando a redução da vida remanescente dos equipamentos.

Os testes hidrostáticos são realizados em vasos de pressão, que são equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa, como indica a definição da NR-13, item 13.6.1.

São equipamentos de processo estanques, de dimensões e formato normatizados, capazes de conter um fluido pressurizado.

Tem-se como exemplos de vasos de pressão:

- vasos de armazenamento e de acumulação intermediários;
- torres de destilação fracionada;
- torres de absorção;
- torres de extração;
- reatores químicos;
- (vi) evaporadores;
- (vii) esferas de armazenamento de gases liquefeitos; (vii) vasos separadores de fases;
- (viii) trocadores de calor.

Como indica a NR-13 as caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo.

Um vaso de pressão, como uma espécie de unidade, é um dos componentes mais importantes em plantas de processo industrial e petroquímico. Em sentido amplo, o termo vaso de pressão abrange uma ampla gama de trocadores de calor unitários,

reatores, vasos de armazenamento, colunas, vasos de separação, etc... Devido aos riscos que estariam associados a qualquer liberação acidental de conteúdo, em muitos países a produção e operação de recipientes de pressão são controladas pela legislação. Esta legislação pode definir o padrão nacional para o qual o vaso de pressão deve ser projetado, o envolvimento de inspeção independente durante a construção e, subsequentemente, a inspeção e testes regulares durante a operação. Alguns padrões nacionais para vasos de pressão, têm efetivamente o status de padrões internacionais de fato.

A legislação e / ou norma nacional geralmente define quando um vaso deve ser tratado como um vaso de pressão. Uma definição de pressão mínima (normalmente 5,10 4 N / m²) excluirá os tanques de baixa pressão e um mínimo de alguns litros excluirá a tubulação e seus componentes. Observe que os vasos que operam no vácuo são frequentemente definidos como vasos de pressão para garantir que o projeto, a construção etc. sejam de qualidade aceitável.

Para fins de projeto e construção, o vaso de pressão é geralmente definido como o vaso de pressão adequado, incluindo acessórios soldados até, e incluindo, os flanges do bico, conectores aparafusados ou soldados ou a borda a ser soldada na primeira solda circunferencial à tubulação de conexão.

Várias organizações estão envolvidas na produção e operação de um vaso de pressão. Eles podem ser considerados da seguinte forma:

A Autoridade Reguladora é a autoridade no país de instalação legalmente encarregada de fazer cumprir os requisitos da lei e dos regulamentos relativos a vasos de pressão.

O usuário opera a planta e, portanto, o vaso de pressão. Ele é responsável perante a autoridade reguladora pela operação segura e contínua da embarcação.

O fabricante é a organização que projeta, constrói e testa o vaso de pressão de acordo com o pedido do comprador. Observe que a função de design pode ser realizada pelo comprador ou por uma organização independente.

A Autoridade de Inspeção é a organização que verifica se o vaso de pressão foi projetado, construído e testado de acordo com o pedido e a norma.

Os vasos de pressão, como componentes de uma planta completa, são projetados para atender aos requisitos especificados por uma equipe, geralmente composta por engenheiros de processo, termodinamicistas e engenheiros mecânicos.

O procedimento de projeto completo é descrito em detalhes em Bickell e Ruiz (1967) e a interação entre os elementos do procedimento.

Requisitos operacionais

A primeira etapa neste procedimento de design é definir os requisitos operacionais. Estes são impostos ao navio como parte da planta geral e incluem o seguinte:

Pressão operacional

Assim como a pressão normal de operação estável, a pressão máxima mantida precisa ser definida. Regulamentos e / ou padrões definirão como essa pressão máxima é traduzida em pressão de projeto do vaso.

Condições de fluido

As temperaturas máxima e mínima do fluido precisarão ser especificadas e traduzidas em temperaturas de projeto de metal. As propriedades físicas e químicas do fluido influenciarão a escolha do material e a gravidade específica afetará o projeto do suporte.

Cargas externas

As cargas a serem consideradas incluem vento, neve e cargas locais, como reações de tubulação e peso morto do equipamento suportado pela embarcação.

Condições transitórias

Alguns vasos podem exigir uma avaliação de cargas cíclicas resultantes de pressão operacional, temperatura, carga de vibração estrutural e acústica.

Requisitos funcionais

Em seguida, são definidos os requisitos funcionais, que abrangem os parâmetros geométricos. Alguns desses parâmetros são novamente definidos pela equipe de projeto da planta, enquanto outros são deixados ao critério do projetista do vaso de pressão.

As regras de projeto nos padrões fornecerão espessuras ou dimensões mínimas de uma variedade de componentes de vasos de pressão. Essas espessuras irão garantir a integridade do projeto do vaso contra o risco de deformação plástica grosseira, colapso incremental e colapso por flambagem. Os componentes cobertos pelas regras de projeto nas normas são descritos com mais detalhes no Projeto Mecânico de Trocadores de Calor.

As espessuras determinadas pelas equações relevantes são mínimas às quais devem ser adicionadas várias tolerâncias, incluindo tolerâncias para corrosão, erosão, tolerâncias de fornecimento de material e qualquer desbaste de fabricação.

As espessuras preliminares dos componentes são geralmente obtidas usando as equações de pressão interna ou externa relevantes do padrão. Essas espessuras são então verificadas para as outras cargas que foram identificadas nos requisitos operacionais.

Quando os componentes ou cargas não são cobertos por equações explícitas na análise padrão, pode ser necessária uma análise adicional e isso é feito por acordo entre o projetista, o comprador e a autoridade de inspeção.

5 TROCADORES DE CALOR

Trocadores de calor são dispositivos cuja função é transferir calor de um fluido para outro com temperatura mais baixa. A transferência de calor ocorre por meio de uma placa ou tubo metálico que favorece a troca entre os fluidos sem que se misturem.

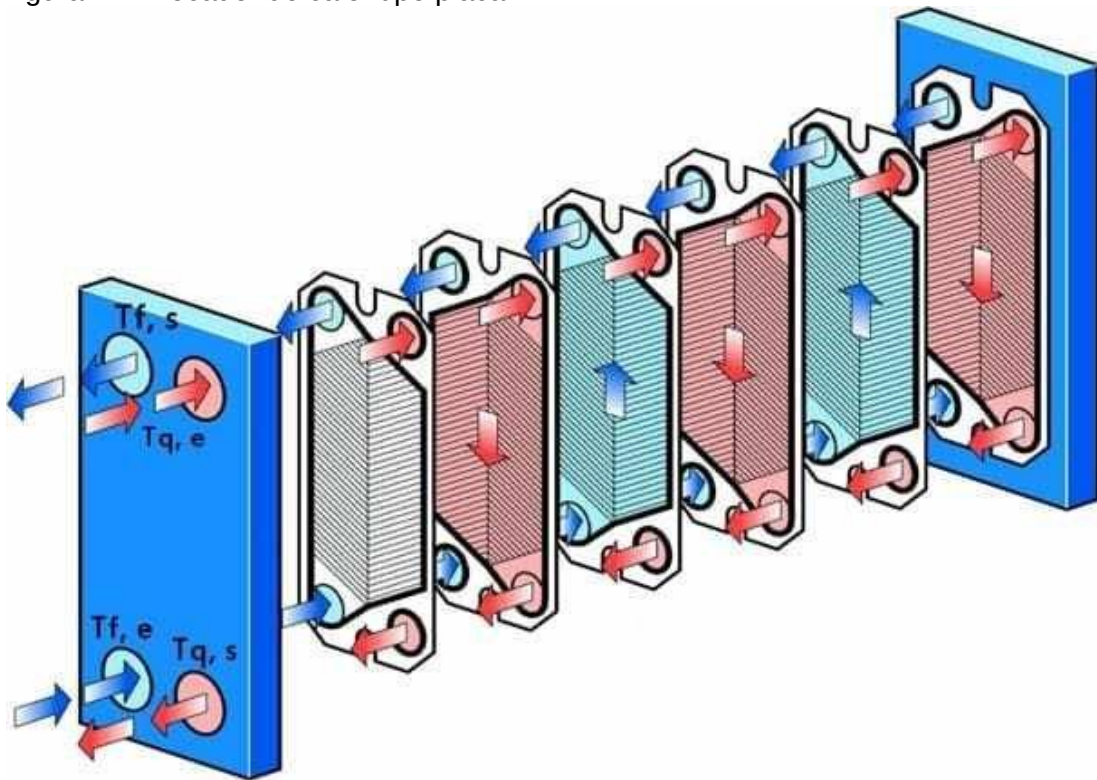
De acordo com Incropera et al. (2014), transferência de calor é a troca de energia térmica devido à uma diferença de temperaturas no meio, sendo que sempre que houver diferença de temperatura entre dois ou mais meios, haverá a transferência de calor do meio mais quente ao menos quente, se aplicado de forma natural, sem ações externas.

A configuração do trocador de calor a placas consiste em um acondicionamento de chapas ou chapas finas de metal corrugado com alto coeficiente de transferência que favorece a transferência de calor. A conformação ondulada permite que fluxos turbulentos ocorram em velocidades relativamente baixas (0,25 a 1 m / s).

Como indica Gut (2003), o trocador de calor a placas ou PHE (do inglês, *Plate Heat Exchanger*) consiste no escoamento dos fluidos através de canais formados entre placas metálicas sequenciais presentes no equipamento. Vale destacar que os

trocadores de calor a placas (PHEs) foram inseridos na indústria alimentícia e farmacêutica na década de 30 devido à sua grande facilidade de higienização, porém os mesmos só se tornaram populares 30 anos mais tarde, por tornarem-se uma alternativa comum ao trocador de calor casco e tubos nos processamentos químicos que envolviam a transferência de calor. Os cálculos de desempenho térmico, perda de carga e os métodos de dimensionamento apresentam diversas limitações.

Figura 7 – Trocador de calor tipo placa



Fonte: GUT, (2003).

O funcionamento é simples, se tomarmos a imagem como exemplo, podemos ver que enquanto o fluido quente desce por um lado da folha, ele circula contrafluxo por uma folha imediatamente contígua (para favorecer a troca e não produzir tensões térmicas em áreas específicas), os fluidos nunca se misturam e a pressão de aperto da gaxeta mais as gaxetas de borracha do perímetro evitam que os fluidos escapem.

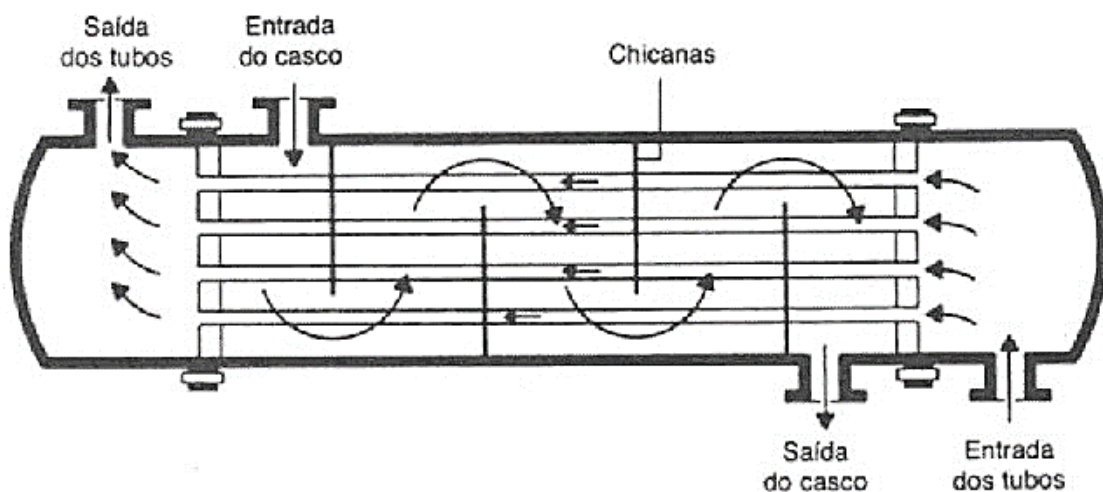
Existem três características notáveis neste tipo de trocador de calor:

- As placas são ultrafinas (0,5-0,9 mm) com um alto coeficiente de troca de calor, o que melhora sua eficiência na transferência de calor.

- Os trocadores de calor de placas requerem muito pouco espaço para montagem em comparação aos trocadores de calor de casco e tubo.
- Fácil manutenção, pois em caso de incrustações, sua desmontagem e limpeza são muito simples e rápidas.

O tipo mais simples de trocador de calor é trocador tubular. É constituído por dois tubos concêntricos, com um dos fluidos escoando pelo tubo central enquanto o outro flui, em corrente paralela, ou em contracorrente, no espaço anular” (FOUST, 1982, p.670). Esse trocador pode ser mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Trocador de calor tubular



Fonte: GUT, (2003).

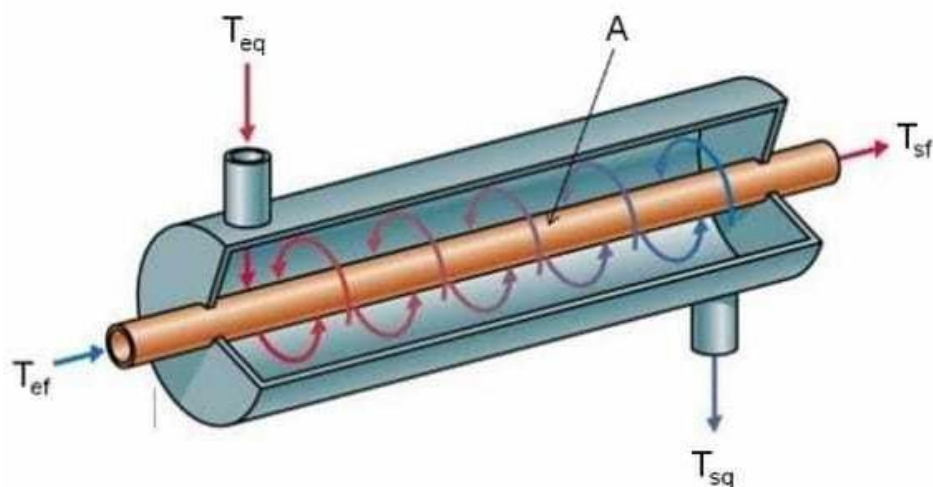
A configuração de tubos e concha é a construção mais básica e comum de trocadores de calor, por ser o sistema de tubos mais utilizado é chamado de trocador de tubos sem mais, mas devido à configuração que será explicada no ponto 3.4 adicionaremos o termo "com invólucro". O fluido que circula no interior dos tubos é denominado "Fluxo interno" e o fluido que circula pelo invólucro "Escoamento externo".

Nas extremidades dos tubos, o fluido que circula no interior dos tubos é separado do fluido que circula pelo invólucro pelas chamadas “placas tubulares”. Nas partes intermediárias você pode ver alguns espaçadores em forma de meia-lua chamados "Defletores", cuja função é forçar a direção do fluxo e melhorar a troca de calor. (GUT, 2003)

Em sistemas onde os fluidos apresentam grandes diferenças de pressão, o fluido com maior pressão circula pelos tubos e o fluido com menor pressão pelo exterior, ou seja, pelo invólucro. Isso tem o custo de materiais, os tubos podem ser fabricados para suportar pressões mais altas do que o invólucro, pois se fosse o contrário, o custo seria muito mais alto. (GUT, 2003)

O trocador de calor tubular tipo duplo tubo consiste basicamente em um tubo que é montado concentricamente no interior de outro tubo de maior diâmetro (MACEDO, 2012). Esse trocador é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Trocador de calor duplo tubo



Fonte: GUT, (2003).

O trocador de calor de tubos consiste em dois tubos concêntricos de diâmetros diferentes montados um dentro do outro, chamados de trocador de calor de tubo duplo ou tubos concêntricos.

Nesse dispositivo, o fluido quente circula pelo conduíte interno, gerando calor para o fluido de baixa temperatura que circula por sua seção anular (camisa ou camisa). (GUT, 2003)

O trocador de calor tubular concêntrico é extremamente útil, pois pode ser montado em qualquer oficina a partir de peças padrão, como as mencionadas na lista anterior, mas além desses componentes, é possível fazer um projeto mais simples

substituindo elementos como prensa-cabos por arruelas soldadas ou substituindo a conexão T por tubos soldados que conectam os tubos externos formando assim o garfo.

As aplicações dos trocadores de calor são diversas e para cada processo para o qual foram projetados recebem um nome específico. A seguir, serão mencionados os gabinetes mais utilizados a bordo.

- Pré-aquecedor
- Radiador
- Ar Condicionado (Evaporador / Condensador)
- Gerador de água doce (evaporador / condensador)
- Condensador de vapor

5.1 Transferência de Calor

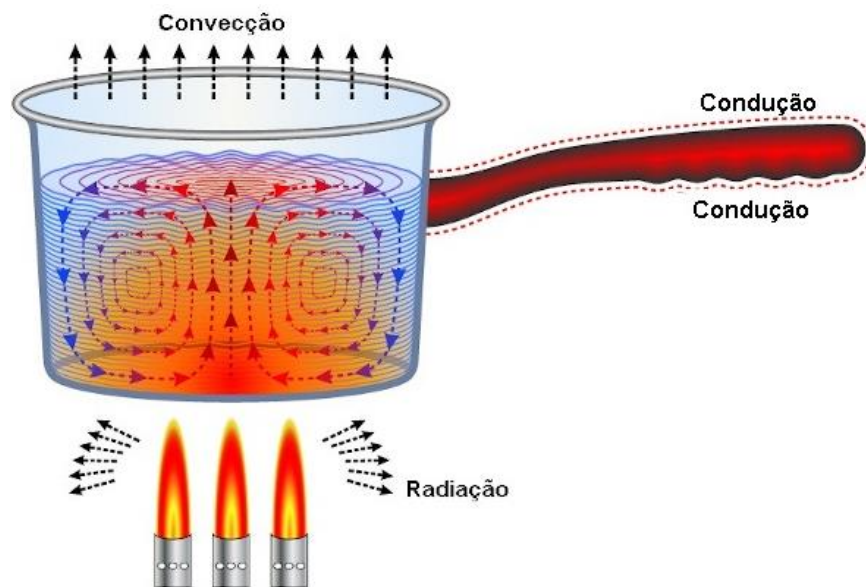
A transferência de calor (Figura 10) clássica ocorre apenas através dos processos de condução, convecção, radiação ou qualquer combinação deles. Transferência de calor associado à mudança de fase de uma substância, como por exemplo, ao processo de fervura de água líquida) às vezes é considerado um tipo de convecção. (GUT, 2003)

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região alta de temperatura ou outra baixa temperatura dentro de um meio (sólido, líquido e gasoso), ou entre diferentes meios que estão em contato físico direto. A energia é transmitida por comunicação molecular sem deslocamento apreciável das moléculas.

A convecção é um processo de transporte de energia pela ação combinada de condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. É de grande importância como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida, líquida ou gasosa. (GUT, 2003)

Já a radiação é um processo pelo qual o calor flui de um corpo de alta temperatura para um de baixa temperatura, quando estes são separados por um espaço, pode até ser o vazio. (GUT, 2003)

Figura 10 - Transferência de Calor.



Fonte BRASILESCOLA (2021).

Um grande número de critérios pode ser diferenciado para classificar as equipes de transferência de calor, mas os mais comuns são os seguintes:

- Classificação de acordo com a trajetória dos fluidos
- Classificação de acordo com a forma como o calor é transferido
- Classificação de acordo com a aplicação
- Classificação de acordo com as características de construção
- Classificação de acordo com o número de fluidos envolvidos

De acordo com a trajetória dos fluidos que intervêm no processo, os trocadores de equipamentos podem ser classificados em: trocadores de fluxo em paralelos, trocadores de fluxo em contracorrente, trocadores de fluxo de trocadores de fluxo cruzado de passagem única ou passagem múltipla.

A maioria dos processos de dissipação ou recuperação de energia térmica envolvem transferência de calor entre dois fluidos, portanto, os trocadores de dois fluidos são os mais comuns, porém, existem equipamentos que operam com três fluidos. (GUT, 2003)

6- METALURGIA

Ao longo da história, desde o seu surgimento na Terra, o ser humano utilizou instrumentos para modificar a natureza a seu favor. Nesse sentido, a história do homem é uma história da tecnologia, uma história em que os elementos disponíveis no ambiente foram transformados de tal forma que essa transformação tornaria a vida mais fácil. Desde os primeiros momentos, o homem usou os elementos mais disponíveis ao seu redor: paus, pedras, peles, ossos. Elementos que podiam ser trabalhados, manipulados, para os tornar eficazes, mas elementos que não necessitavam, em última instância, de qualquer transformação íntima, de qualquer modificação das suas propriedades estruturais, não é o que acontece com os metais. (MOEN, 2000)

O metal, em sua maior parte, exige o uso de uma modificação laboriosa e complexa das características em que o encontramos em seu estado natural. O surgimento da metalurgia é um elemento recente, visto na escala geral da história, mas de tal importância para o ser humano que não seria possível compreender o fluxo da história e, claro, das sociedades sem ela. contemporâneo. Isso tem sido considerado desde a antiguidade, a ponto de considerar sua descoberta o marco que marca um antes e um depois nas sociedades pré-históricas. Em 1836, a dinamarquesa CJ Thomsen expõe o Sistema das Três Idades ao material pré-histórico classificar, ele propõe que os materiais ser dividida de acordo com se eles vêm da Idade da Pedra, Idade do Bronze ou do Ferro Idade. Esse sistema foi rapidamente aceito pelos pesquisadores e foi um grande avanço conceitual. Artefatos pré-históricos podem ser organizados cronologicamente e, assim, poder fornecer um método eficaz para estudar o passado. Hoje essa classificação, com modificações que ainda são importantes, continua em vigor. (MOEN, 2000)

Tradicionalmente, o surgimento da metalurgia tem sido considerado o marco que marca um antes e um depois na pré-história, porém, para alguns autores atuais, a metalurgia seria uma “relativa inovação tecnológica”. Os autores justificam sua opinião referindo-se a diversos aspectos. Uma delas é que uma das principais características da metalurgia, que é a sua associação com a atividade mineira, não é de todo uma atividade nova, aliás, as atividades mineiras associadas ao sílex ou à obsidiana são conhecidas desde o Paleolítico. Nem mesmo a forma de explorar neste momento varia muito, minerando O calcolítico é muito semelhante aos anteriores. Na

verdade, é, como o Paleolítico, uma operação de superfície, mal arranhando a terra com explorações de superfície.

Outro argumento é que a fundição do cobre não requer tecnologia muito mais complexa do que a da cerâmica. Sabemos que nos tempos do Neolítico Balcânico atingiam-se facilmente temperaturas de 700° e que, ao mesmo tempo, na Mesopotâmia atingiam-se temperaturas de 800° e até 1.000° C. Teríamos, assim, uma pirotecnologia suficientemente avançada para reduzir os óxidos e carbonatos de cobre, que exigem atingir 1.000°C e menos se usarmos fluxos. (MOEN, 2000)

Por fim, os autores afirmam que o forno metalúrgico também não foi uma inovação transcendental, visto que já era conhecido o forno vaso que suportava até 1.250°C. (MOEN, 2000)

Para Mohen (2000), no entanto, o forno metalúrgico pode ser considerado uma inovação essencial. Sua principal característica é que, graças ao uso de tocha de boca ou fole, pode-se atingir facilmente 1.100° C.

Mohen (2000) afirma que o forno metalúrgico é diferente de todos os outros, pois exige atizar o fogo em condições redutoras que tornam o fornecimento de ar externo incompatível. Isso pode ser feito de forma simples revestindo o núcleo incandescente com combustível onde o metal é reduzido, mas é necessário que o jato de ar seja direcionado para o combustível incandescente e não para o mineral. Isso reduz facilmente os óxidos de cobre, como cuprita, ou carbonatos, como malaquita e azurita. Além disso, toda a operação é simplificada se um fluxo como o óxido de ferro for usado.

7- MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado por meio de revisão da literatura de cunho qualitativo que caracteriza de forma inicial pela coleta de referenciais teóricos, para construção da literatura de base, com a discussão das ideias acerca da temática e análise dos fatos na verificação dos conceitos teóricos, seguindo-se pela verificação e confrontação das respectivas definições.

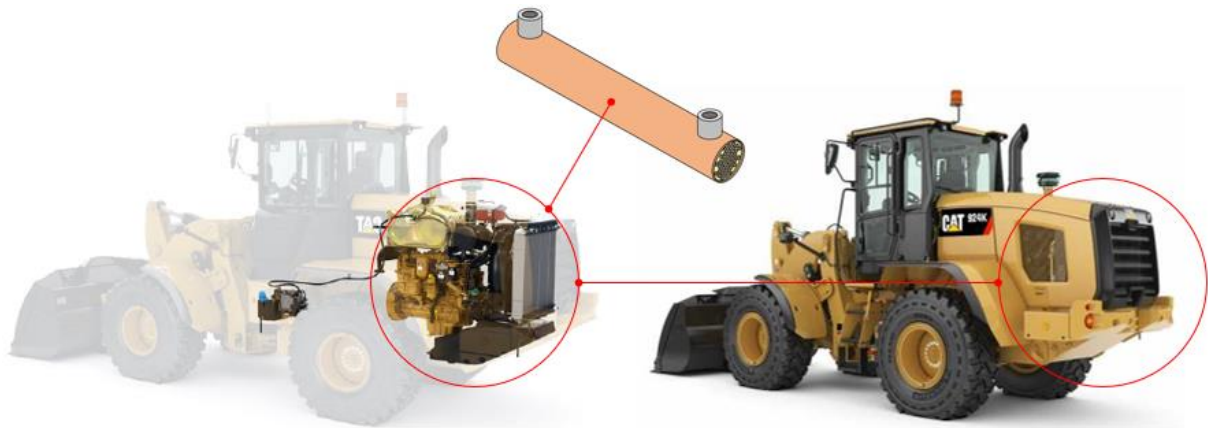
Em um segundo momento é a apresenta a produção de um trocador de calor.

Para a seleção dos materiais das diferentes partes do trocador, foi levada em consideração uma série de fatores que influenciam na sua operação subsequente:

- Propriedades mecânicas: materiais com alto limite elástico e resistência à tração, boa tenacidade, soldabilidade e economia e tem uma disponibilidade aceitável
- Resistência à corrosão: devem ser capazes de resistir ao ataque químico dos fluidos com os quais entrarão em contato.
- Facilidade de fabricação: os materiais devem ter algumas características importantes, como usinabilidade, soldabilidade e facilidade a ser formado.
- Vida útil estimada: normalmente, um dispositivo deste tipo é projetado para ter uma vida útil de cerca de 50 anos, dados a partir dos quais você pode escolher o material a ser usado na condução de um estudo adequado.
- Disponibilidade e prazo de entrega: ponto importante, pois caso se escolha um material de fácil fornecimento, é possível tornar o projeto muito mais barato.
- Custo de material e fabricação: um material "high-end" acarreta um alto custo de fabricação.

O trocador de calor a ser fabricado pertence à pá carregadeira da Caterpillar CAT 924, onde a mesma situa-se no interior do radiador de mesmo nome conforme demonstrado na Figura 11.

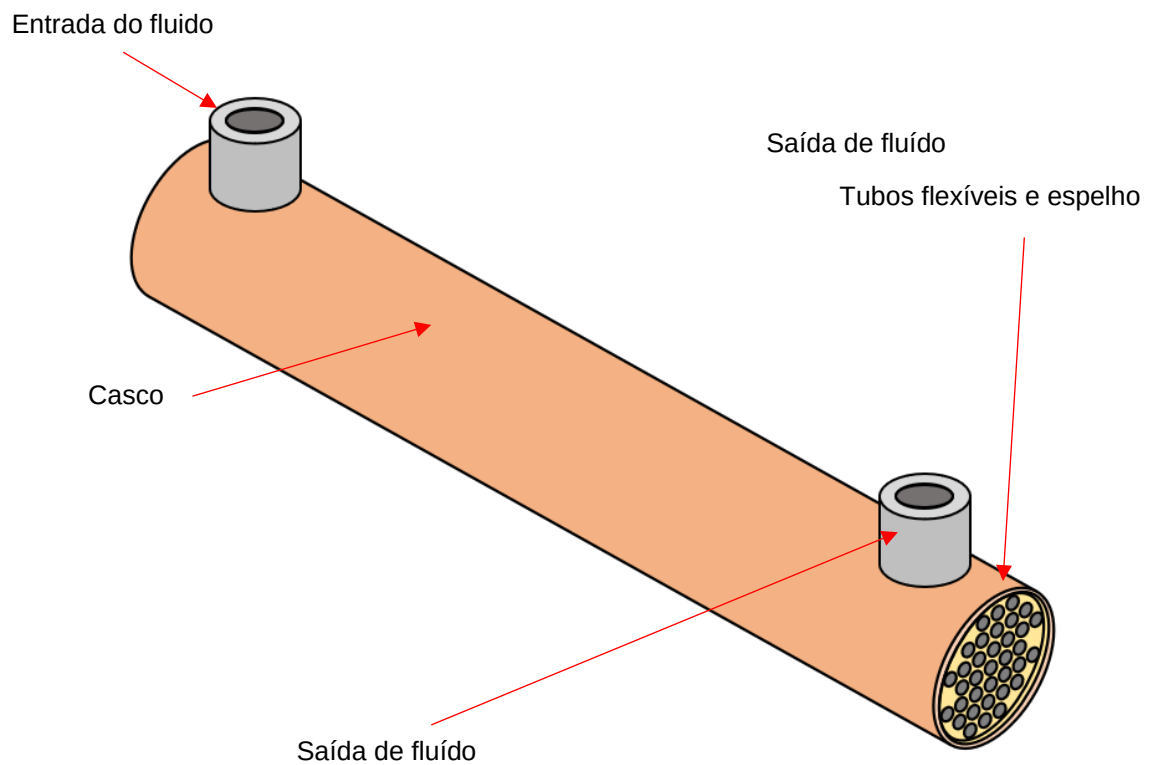
Figura 11 - Trocador de calor da pá carregadeira



Fonte: Adaptado catálogo Cat 924 (2021)

O trocador de calor CAT 924 será composto casco, tubos flexíveis, espelhos, conexões de entrada e saída de fluido conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - O trocador de calor



Fonte: Autores

Para a elaboração deste projeto, seguiu-se alguns dos diversos aspectos estabelecidos por Telles (1996) no que diz respeito às etapas de montagem, fabricação e controle da qualidade, estas que interferem ou que podem ter influência no projeto de um equipamento de processo como um trocador de calor, levando-se em consideração as seguintes etapas cronológicas pertinentes ao objeto de estudo deste trabalho:

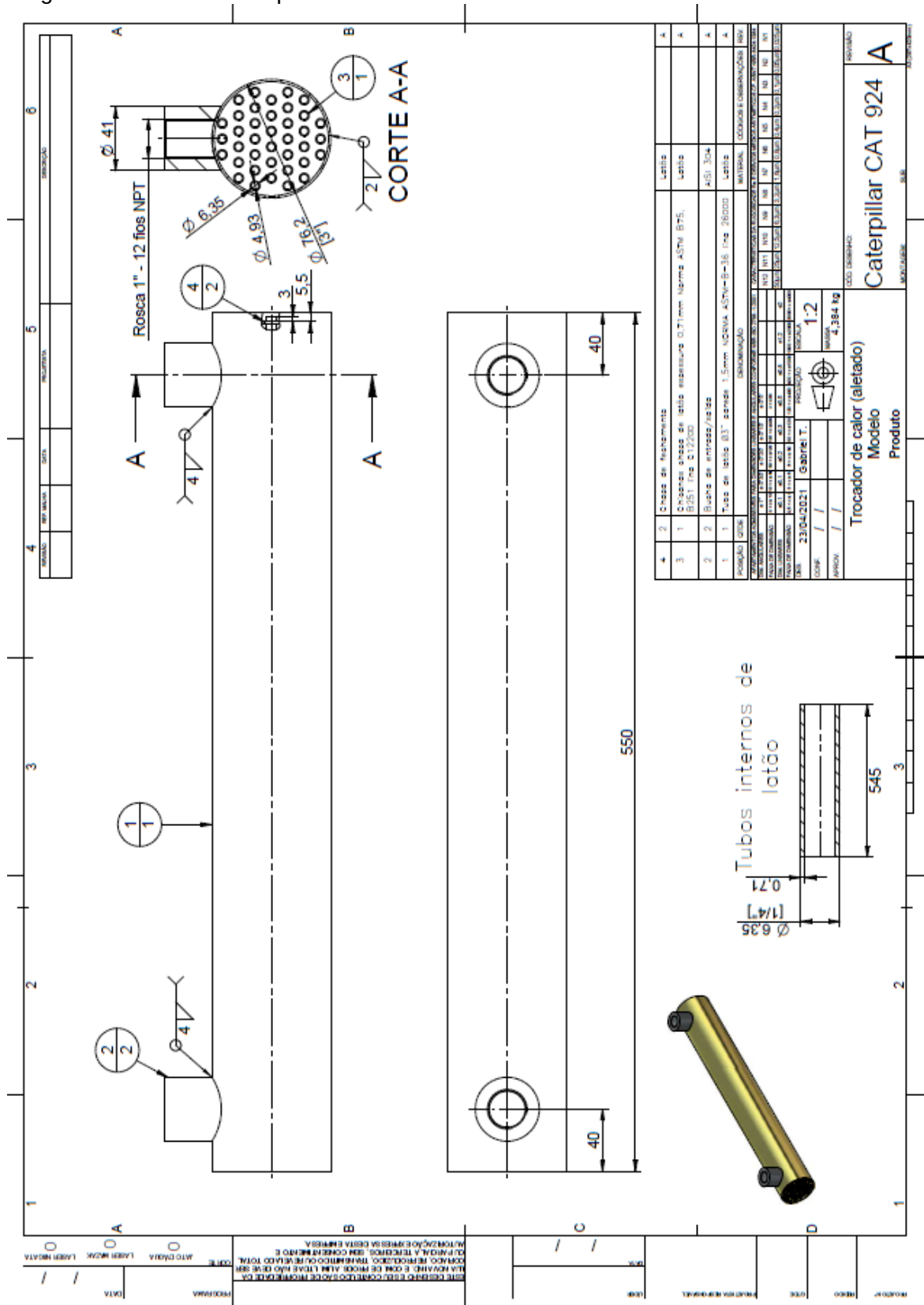
1. Análise do desenho de produto e processo;
2. Levantamento da matéria-prima necessária;
3. Recepção e identificação da matéria-prima;
4. Traçagem e corte dos materiais;
5. Conformação;
6. União dos materiais;
7. Inspeção visual;
8. Teste de estanquidade;
9. Embalagem e embarque.

Passo 1 - Análise do desenho de produto e processo

Uma vez completado e disponibilizado o projeto, a primeira atividade é fazer o estudo do desenho de produto e de processo, onde será possível efetuar o levantamento dos materiais necessários incluindo consumíveis (arames, varetas, fluxos, etc.), suas especificações, dimensões e detalhes.

No referido trabalho, utilizou-se do desenho de produto do cliente que corresponde ao projeto do trocador de calor aletado CAT 924 (Figura 13), demonstrando as informações pertinentes à obtenção da matéria-prima especificada, estudos de processos de fabricação e detalhes importantes.

Figura 13 – Desenho de produto



Fonte: Caterpillar (2021)

Passo 2 - Levantamento da matéria-prima necessária

Materiais de base

Após a análise do desenho foi realizada uma descrição detalhada dos materiais e gerada a Tabela 2.

Tabela 2 - Materiais

Item	Descrição dos materiais	Quantidade	Material
1	Tubo de latão 3"	550 mm	ASTM B-36 liga 26000
2	Tubo de cobre flexível 1/4"	545 mm	ASTM B-75, B- 251 liga C12200
3	Chapa de latão	0,71 mm	ASTM B-36 liga 26800
4	Conexões rosca internas de aço 1"	2	ASTM A-36

Fonte: Autores

O material "1" utilizado no casco corresponde ao tubo de latão ASTM B-36 liga 26000 com composição conforme Tabela 3 e propriedades mecânicas conforme Tabela 4.

Tabela 3- Composição química (%) do material 1

Especificação	Elementos(%)			
ASTM B-36 liga 26000	Cu (%) 68,50 a 71,50	Zn (%) Restante	Pb (%) 0,07 máx	Fe (%) 0,05 máx

Fonte: Termomecanica (2021)

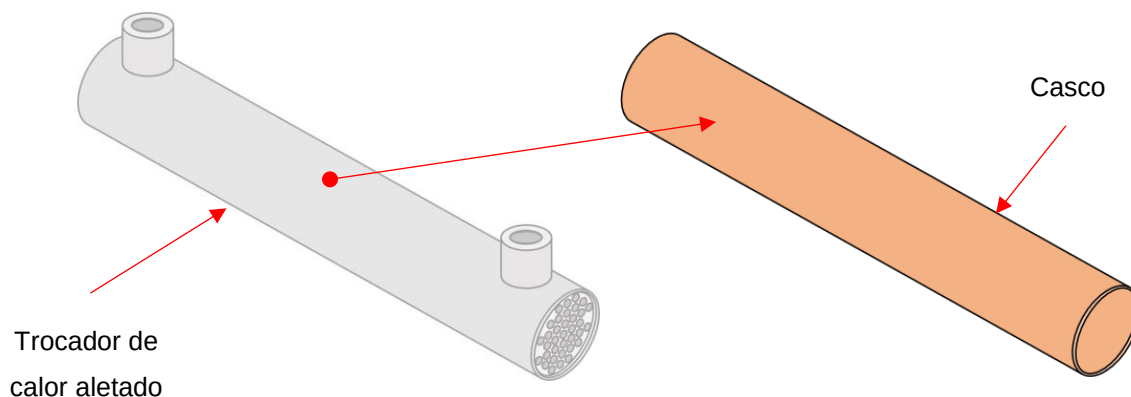
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do material 1

Especificação	Resistência à tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento mínimo (%) em uma média de comprimento.
ASTM B-36 liga C26000	345 – 483 MPa	426 – 428 MPa	57

Fonte: <https://shockmetais.com.br/tabelas/latao/pmec>

A Figura 14 demonstra o casco como peça que compõe o corpo do trocador de calor aletado.

Figura 14 – Casco



Fonte: Autores

O material 2 utilizado no trocador corresponde ao tubo de cobre flexível ¼" ASTM B-75, B-251 liga C12200 com composição conforme tabela 5 e propriedades mecânicas conforme Tabela 6.

Tabela 5- Composição química (%) do material 2

Especificação	Elementos (%)	
ASTM B-75, B-251 liga C12200	Cu (%) 99,90 mín.	P (%) 0,015 – 0,040

Fonte: Termomecanica (2021)

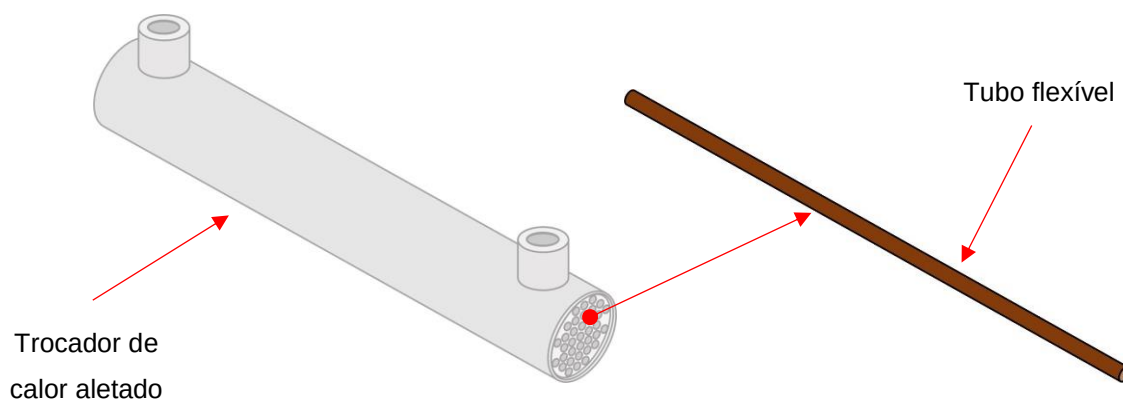
Tabela 6- Propriedades mecânicas do material 2

Especificação	Resistência à tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento mínimo (%) em uma média de comprimento.
ASTM B-75, B-251 liga C12200	205 MPa	62 mín.	40 mín.

Fonte: TERMOMECAÂNICA (2021)

A Figura 15 demonstra o tubo flexível como peça que compõe parte do trocador de calor aletado.

Figura 15 – Tubo flexível



Fonte: Autores

O material "3" utilizado no espelho corresponde ao chapa de latão ASTM B-36 liga 26800 com composição conforme tabela 7 e propriedades mecânicas conforme Tabela 8.

Tabela 7- Composição química (%) do material 3

Especificação	Elementos (%)			
ASTM B-36 liga 26800	Cu (%) 64,00 a 68,50	Zn (%) Restante	Pb (%) 0,09 máx	Fe (%) 0,05 máx

Fonte: TERMOMECÂNICA (2021)

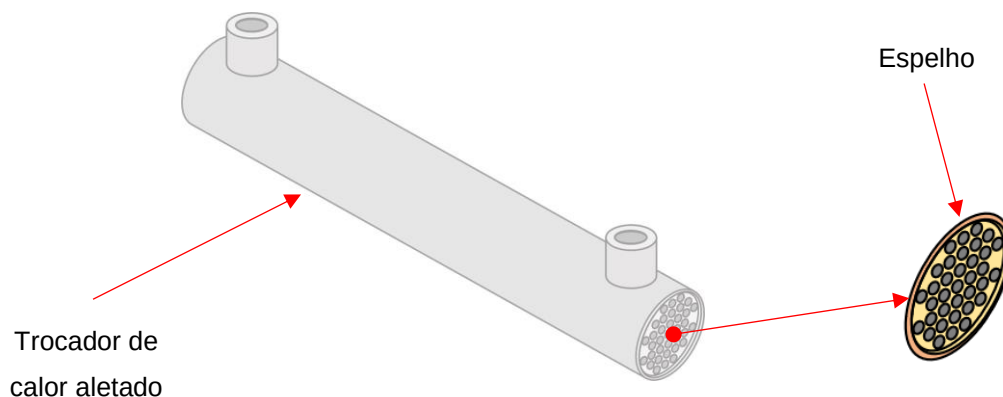
Tabela 8- Propriedades mecânicas do material 3

Especificação	Resistência à tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento mínimo (%) em uma média de comprimento.
ASTM B-36 liga 26800	340 - 405	-	43

Fonte: TERMOMECÂNICA (2021)

A Figura 16 demonstra a chapa furada como peça que compõe o espelho do trocador de calor aletado.

Figura 16– Espelhos



Fonte: Autores

O material "4" utilizado nas conexões com roscas internas corresponde ao ASTM A-36 com composição conforme Tabela 9 e propriedades mecânicas conforme Tabela 10.

Tabela 9- Composição química (%) do material 4

Especificação	Elementos (%)						
ASTM A-36	(C) 0.25- 0.29	(Cu) 0.20	(Fe) 98.0	(Mn) 1.03	(P) 0.040	(Si) 0.280	(S) 0.050

Fonte: AÇOS NOBRE (2021)

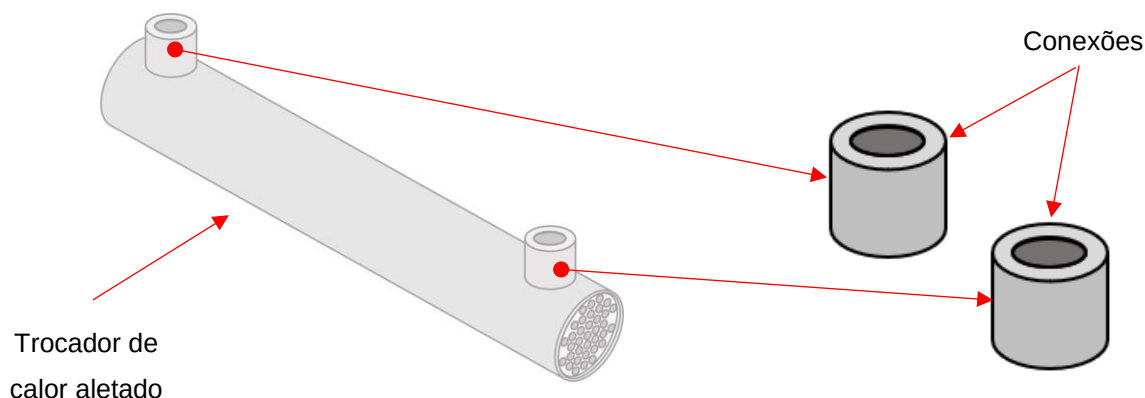
Tabela 10 - Propriedades mecânicas do material 4

Especificação	Resistência à tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento mínimo (%) em uma média de comprimento.
ASTM A-36	450 – 550	250 mín.	18

Fonte: AÇOS NOBRE (2021)

A Figura 17 demonstra a chapa furada como peça que compõe o espelho do trocador de calor aletado.

Figura 17– Conexões



Fonte: Autores

Definição dos materiais de adição e fluxo

Para a definição do metal de adição, foi consultada os conceitos de interação de Modenesi, Marques e Bracarense (2005) sobre interação do mel de base e adição.

Tabela 11 - Metais de adição recomendados para brasagem de diferentes materiais

Metal base	Alumínio e ligas	Magnésio e ligas	Cobre e ligas	Aço carbono e baixa liga	Ferro fundido	Aço inoxidável	Níquel e ligas	Aço ferramenta
Aço ferrmenta	(a)	(a)	BAg, BAu, RBCuZn, BNi	BAg, BAu, BCu, BNi, RBCuZn	BAg, BAu, RBCuZn, BNi	BAg, BAu, RCu, BNi	BAg, BAu, BCu, BNi, RBCuZn	BAg, BAu, BCu, BNi, RBCuZn
Níquel e ligas	(a)	(a)	BAg, BAu, RBCuZn	BAg, BAu, BCu, BNi, RBCuZn	BAg, BCu, RBCuZn	BAg, BAu, BCu, BNi	BAg, BAu, BCu, BNi	
Aço inoxidável	BAISi	(a)	BAg, BAu	BAg, BAu, BCu, BNi	BAg, BAu, BCu, BNi	BAg, BAu, BCu, Bni		
Ferro fundido	(a)	(a)	BAg, BAu, RBCuZn	BAg, RBCuZn	BAg, BNi, RBCuZn			
Aço carbono e baixa liga	BAISi	(a)	BAg, BAu, RBCuZn	BAg, BAu, BCu, BNi, RBCuZn				
Cobre e ligas	(a)	(a)	BAg, BAu, BCuP, RBCuZn					
Magnésio e ligas	(a)	BMg						
Alumínio e ligas	BAISi							

Fonte: Adaptado de MODENESI, MARQUES E BRACARENSE (2005)

Baseados na tabela de interação do metal de base e adição, foi possível identificar os consumíveis BCuP para as juntas latão/latão e RBCuZn para as juntas latão/aço. Respectivamente, foram definidos os seguintes consumíveis aplicáveis conforme indicações:

Para a junta latão/latão conforme Figura 17:

- Vareta Foscooper espessura 2,4mm
- Fabricante/Modelo: Harris 5
- Norma: AWS A5.8 ou ASME II PARTE C SFA 5.8

Figura 18 – Consumível Foscooper



Fonte: REFRIGÁS (2021)

Para a junta latão/aço foi definido o seguinte consumível e sua visualização poderá ser observada na Figura 18:

- Vareta de Latão espessura 2,4mm;
- Fabricante/Modelo: Brastak BT-561
- Norma: AWS A5.8M ou ASME II PARTE C SFA 5.8

Figura 19 – Consumível de latão



Fonte: LOJA DO MECÂNICO (2021)

Para a definição do fluxo, foi consultada a Tabela 12 de desempenho conforme descrito por Modenesi, Marques e Bracarense (2005).

Tabela 12 - Metais de adição recomendados para brasagem de diferentes materiais

Classe AWS	Metal de base	Metal de adição recomendado	Faixa de temperatura recomendada (°C)	Forma de fornecimento
FB1	Ligas de Al	BAISi	540-615	Pó
FB2	Ligas de Mg	BMg	480-620	Pó
FB3	Aço carbono e aço inoxidável	BAG, BCuP, BCu, BNi, BAu, RBCuZn	565-1205	Pó, pasta e líquido
FB4	Alumínio- Bronze	BAG e BCuP	595-870	Pasta

Com base no observado, foi recomendado o fluxo do tipo pó, pasta ou líquido de acordo com os metais de base e adição.

- Fluxo Trincal (Pó) para liga de processos de Brasagem.
- Fabricante/Modelo: Vonder 74.39. 022.500

O fluxo utilizado foi o da marca Vonder, indicado para peças em aço, latão, bronze, exceto alumínio (Figura 20).

Figura 20 – Fluxo trincal

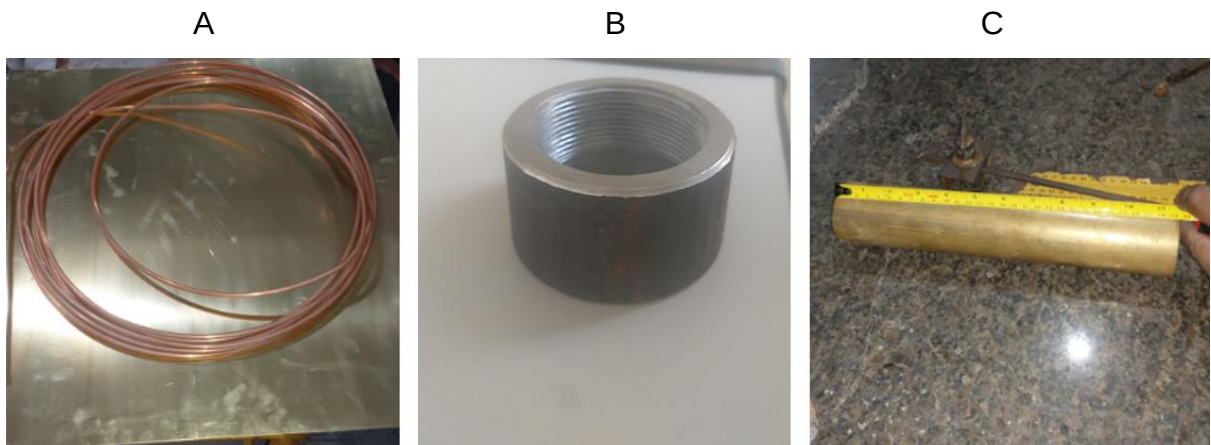


Fonte: CASA DOS PARAFUSOS (2021)

Passo 3 - Recepção e identificação da matéria-prima;

Após encomenda e recebimento da matéria-prima, executou-se o confronto dos certificados de qualidade e notas fiscais emitidos pelos fornecedores com as respectivas ordens de compra. Consequinte, efetuou-se a separação e identificação de cada material, como no caso da chapa de latão e tubo flexível de cobre (Figura 21-A), conexões de aço (Figura 21-B) e tubo de latão (Figura 21-C).

Figura 21– Separação e identificação da matéria-prima



Fonte: Autores (2021)

Passo 4 – Traçagem e corte dos materiais

A traçagem consistiu nas marcações realizadas sobre a chapa e tubos onde as mesmas serviram de referências para os cortes e montagens, utilizando-se de trena e graminho Mitutoyo (Figura 22).

Figura 22– Traçador de altura Mitutoyo



Fonte: Autores (2021)

Para a realização dos cortes, foi utilizada uma guilhotina manual (Figura 23-A), uma serra fita (Figura 23-B), obtendo as chapas nas dimensões (Figura 23-C).

Figura 23– Separação e identificação da matéria-prima



Fonte: Autores (2021)

Para a realização dos furos nas aletas e espelho foi utilizada uma furadeira de bancada (Figura 24).

Figura 24– Furadeira de bancada



Fonte: Autores (2021)

Passo 5 - Conformação

A conformação compreendeu na elaboração de um perfil linear pertinente à geometria especificada dos tubos destinados ao trocador de calor (Figura 25).

Figura 25– Tubo de cobre flexível ¼" conformado



Fonte: Autores (2021)

Passo 6 - União dos materiais

A união dos materiais ocorreu através da montagem do tubo/espelho e tubos/aletas (Figura 26) e do tudo com as conexões do trocador de calor (Figura 27).

Figura 26– Montagem dos tubos e aletas



Fonte: Autores (2021)

Figura 27– Montagem do trocador de calor



Fonte: Autores (2021)

Utilizamos um conjunto de manômetros e reguladores de Pressão Modelo MD 10 BR801 Condor – 405116 e 159136 (Figura 28) ou equivalente que em conjunto com um fluxômetro será possível identificar a vazão e a pressão dos gases utilizados.

Figura 28– Regulador de pressão



Fonte: A MEGA LOJA (2021)

Figura 29 – Regulador manômetro gás GLP



Fonte: Autores (2021)

Para a realização da brasagem por chama, foram utilizados os gases Oxigênio e GLP, iniciando o processo pelos tubos/espelhos (Figura 30-A), depois os tubos/aletas (Figura 30-B), casco/conexões (Figura 31-A) e por fim, casco/espelho (Figura 31-B).

Figura 30 – Brasagem dos tubos, aletas e espelhos

A



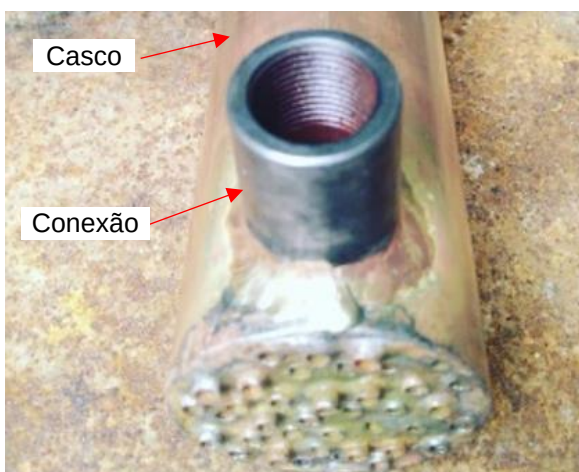
B



Fonte: Autores (2021)

Figura 31– Brasagem dos espelhos e conexões

A



B



Fonte: Autores (2021)

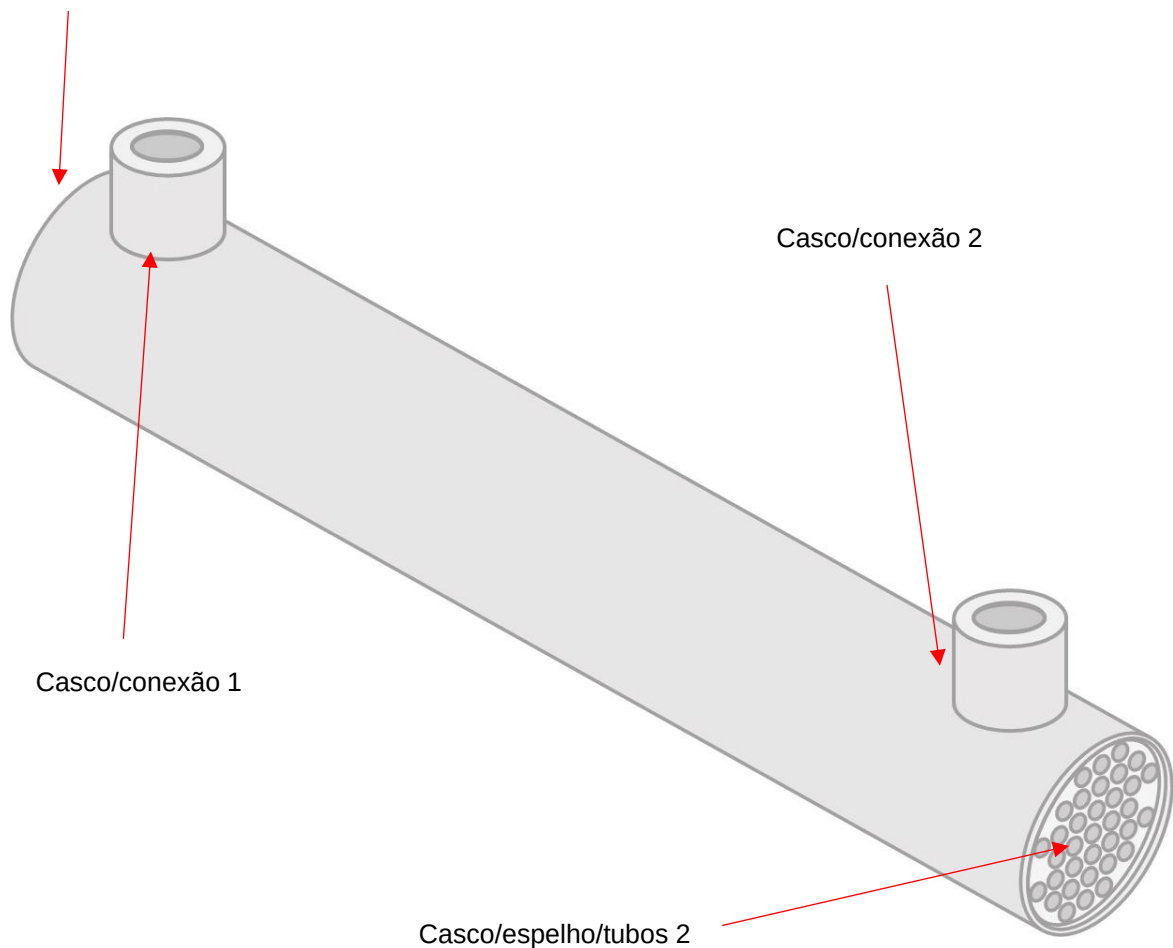
Passo 7 - Inspeção visual

Para a qualificação do processo de brasagem, o código ASME IX (2013) determina que os corpos de prova devem ser submetidos ao ensaio não destrutivo EV (Ensaio Visual) QB-141.6.

Da mesma forma, utilizou-se este conceito com o intuito de avaliar a brasagem e determinar as possíveis descontinuidades no trocador de calor aletado conforme plano de inspeção (Figura 32), obtendo aprovação do mesmo após verificação visual (Figura 33).

Figura 32– Plano de inspeção visual

Casco/espelho/ tubos 1



Fonte: Autoria (2021)

Figura 32 – Inspeção visual

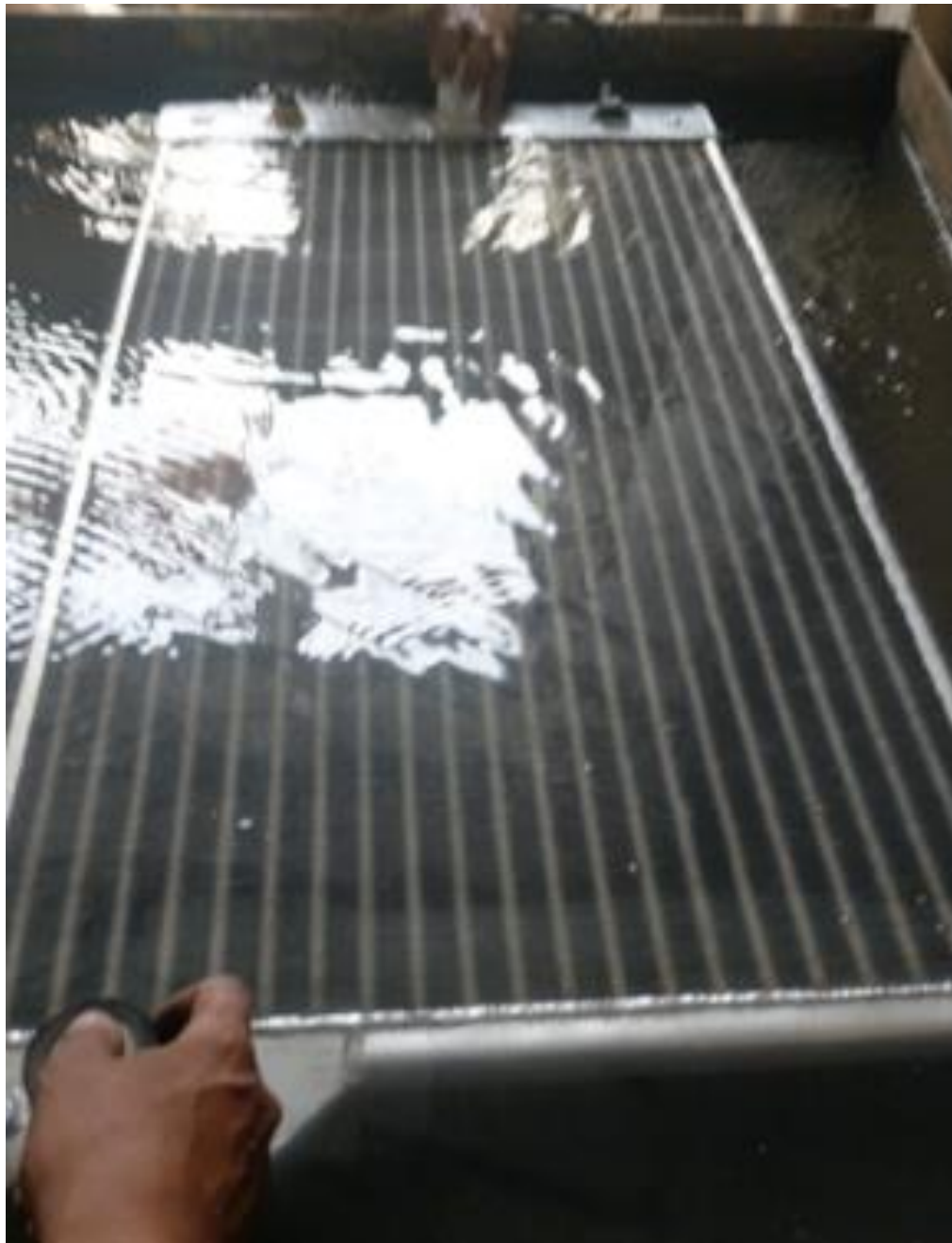


Fonte: Autores (2021)

Passo 8 - Teste de estanqueidade

Com objetivo de garantir a qualidade da brasagem no que diz respeito à detecção de possíveis vazamentos, realizou-se o teste de estanquidade por imersão para formar bolhas com pressão positiva (Figura 33).

Figura 33 – Teste de estanqueidade



Fonte: Autores (2021)

Passo 9 – Embalagem e embarque

Após confirmação da qualidade, o trocador de calor juntamente ao radiador, foram embalados (Figura 34) e enviados ao cliente.

Figura 34 – Embalagem



Fonte: Autores (2021)

8- RESULTADOS

Obtivemos o conceito de fabricação do Trocador de Calor Aletado respeitando as etapas básicas de construção do mesmo, seguindo o projeto do fabricante Caterpillar CAT 924.

Adequou-se os parâmetros de brasagem baseados em normas regulamentadas do processo e literaturas pertinentes, visando a qualidade na união de materiais, que por sua vez, resultou na brasagem das juntas conforme características geométricas do modelo do Trocador de Calor Aletado.

Fabricou-se o Trocador de Calor Aletado respeitando as dimensões exigidas no desenho de produto.

O ensaio visual foi realizado e aprovado, não apresentando trincas, fissuras e nem porosidades na brasagem.

Após aplicação do teste de estanqueidade, posicionando o trocador de calor dentro de um tanque de água e pressurização do mesmo com ar-comprimido para se verificar possíveis vazamentos, constatou-se a qualidade do processo realizado.

9 - CONCLUSÃO

Este estudo buscou analisar a aplicação de metodologias de construção e manutenção de um trocador de calor aletado utilizando o processo de brasagem.

Os trocadores de calor são equipamentos desenvolvidos para que a troca térmica ocorra de forma facilitada entre dois fluídos. Este sistema é utilizado em diversos equipamentos que fazem parte do nosso cotidiano, exemplo: sistemas de arrefecimento de motores a combustão e até mesmo um forno a gás podem ser considerados trocadores de calor.

A tarefa mais complexa para os fabricantes de trocadores de calor com aletas de placa é o processo de brasagem, onde diversas juntas de brasagem são necessárias para garantir que o grande número de placas e aletas funcione suavemente na montagem acabada. A vantagem é que nenhuma etapa de limpeza é necessária no final, e ainda sim, as peças estão livres de resíduos.

Concluimos que nosso objetivo de conhecimento de construção de um trocador de calor foi alcançado, respeitando as medidas do desenho de produto do cliente, trabalhando com os materiais especificados e com encaixe de custos e benefícios, mantendo sempre o alinhamento de construção conforme o desenho de produto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOS NOBRE (Brasil). **Tudo sobre o Aço A36**. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/aco-a36/>. Acesso em: 19 maio 2021.

ALVES, Líria. **Transferência de calor de um sistema**. [S. l.]. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/transferencia-calor-um-sistema.htm>. Acesso em: 6 maio 2021.

A MEGA LOJA (Brasil). **Regulador de Pressão Oxigênio Condor**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.amegaloja.com.br/regulador-oxigenio-condor-md-10-ox/p>. Acesso em: 20 maio 2021.

ASM, **Metals handbook .Vol. 8 – Metallography** , Structures and Phase diagrams, 1973.

ASTM E8/E 8M-08 **Standart Test Methods for Tension Testing of Metalic Materials**. 2008.

AWS **Welding Handbook**, v 4, 8 ed., Miame, pp 233-332. 1998.

CASTRO, R., CABENET, J. J. **Welding Metallurgy of Stainless and Heat-Resisting Steels**, 1 ed., Cambridge University Press, Cambridge, England, 189p. 1975.

BICKELL, M.B., RUIZ, C. **Stress Analysis of Piping Systems**. In: Projeto e análise de vasos de pressão - 1967.

BRASIL. **Ministério do Trabalho. Caldeiras e Vasos de Pressão**. Portaria GM n.º 3.214, de 08 de junho de 1978 - NR 13.

CASA DOS PARAFUSOS (Brasil). **Fluxo de Solda**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.casadosparafusosfranca.com.br/fluxo-de-solda-para-prata-150-gm-von>. Acesso em: 20 maio 2021.

FERNANDES, A. A. **Programa de Treinamento Brastak – Módulo Brasagem: Fundamentos, Características, Aplicações e Segurança do Processo de União Intermetálica por Brasagem**. Santo André, Brastak Soldas Especiais Ltda., 2001.

FILHO, D. F., FERRARESI, V. A., VILARINHO, L. O. **“Influencia de Protecao nas Constantes α e β da Formula de Consumo na Soldagem MIG/MAG do Aco Inoxidavel Ferritico”**, Anais do XXXIII-CONSOLDA, Congresso Nacional de Soldagem, Caxias do Sul, ref CT-06. 2007.

FOUST, A; S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. Tradução por Horácio Macedo. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

GUT, J. A. W. **Configurações ótimas para trocadores de calor a placas**. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – USP, São Paulo. 2003

HONEYCOMBE, R. W. K. **Steel – Microstructure and properties**, London: Edward Arnolds publishers, pp 513-518. 1984.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

LOJA DO MECANICO (Brasil). **Consumível de Latão**. [S. l.], 1 mai. 2021. Disponível em:

<https://busca.lojadomecanico.com.br/busca?q=consum%C3%ADvel%20de%20lat%C3%A3o>. Acesso em: 20 maio 2021.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **“Soldagem: Fundamentos e Tecnologia”**. Ed. UFMG, Belo Horizonte 363p, 2005.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 2.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MARTINS, Eliseu. **Contabilidade de Custos**. 7ª ed. São Paulo: Atlas, 2004.

MELIN, P. **Type-2 Fuzzy Logic: Theory and applications**. SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 2005.

MOEN, B. Low back pain and widespread pain predict sickness absence among industrial workers. **BMC Musculoskelet Disord**. 2003; 4: 21.

NORMA REGULAMENTADORA NR13
NR-13 Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão

PEREIRA FILHO, Jorge dos Santos. **Análise de efeitos de teste hidrostáticos em vasos de pressão**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

REFRIGÁS (Brasil). **Vareta Foscooper Harris 0 2,50mm Brastak**. [S. /], 1 maio 2021. Disponível em: <https://www.refrigas.com.br/vareta-foscooper-harris-0-2-50mm-brastak>. Acesso em: 19 maio 2021.

SILVA, R. et. al. **Aplicabilidade, Normas e Projeto de Vasos de Pressão: Uma Revisão**. VIII COEN – Congresso de Engenharias da UFSJ, 2017.

TELLES, Pedro C. da Silva. **Vasos de Pressão**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora – 2ª edição Rio de Janeiro, 1996.

TERMOMECANICA (Brasil). **Catálogo de Laminados**. Disponível em: https://www.termomecanica.com.br/download/conteudo_tecnico/Catalogo%20Laminados. Acesso em: 19 maio 2021.

VOZNIAKI, Márcio Luis. **Estudo comparativo da brasagem de alumínio com diferentes meios de adição**. 2014. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

WAINE, E. **Soldagem: Processo e metalurgia**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.