

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANA CLAUDIA OLIVEIRA MOTA  
LUIZ FELIPE VIANA ÁVILA**

**ESTUDO COMPARATIVO RELATIVO A MUDANÇA DO PROCESSO  
DE SOLDAGEM TIG PARA RESISTÊNCIA E PRESSÃO EM  
VARETAS COMBUSTÍVEIS DE LIGAS DE ZIRCÔNIO**

**VOLTA REDONDA  
2018**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ESTUDO COMPARATIVO RELATIVO A MUDANÇA DO PROCESSO  
DE SOLDAGEM TIG PARA RESISTÊNCIA E PRESSÃO EM  
VARETAS COMBUSTÍVEIS DE LIGAS DE ZIRCÔNIO**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Alunos:

Ana Claudia Oliveira Mota

Luiz Felipe Viana Ávila

Orientador:

Prof. M.Sc Alexandre Fernandes Habibe

Co-Orientador:

Prof. M.Sc Alexandre Roberto Soares

**VOLTA REDONDA**

**2018**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Ana Claudia Oliveira Mota  
Luiz Felipe Viana Ávila

Estudo comparativo entre a mudança do processo de soldagem TIG para resistência e pressão em varetas combustíveis de ligas de zircônio

Orientador:

Prof. M.Sc Alexandre Fernandes Habibe

Co-Orientador:

Prof. M.Sc Alexandre Roberto Soares

Banca examinadora:

---

Prof. M.Sc Alexandre Fernandes Habibe

---

Prof. M. Sc Alexandre Alvarenga Palmeira

---

Prof. Antonio de Pádua Sobreira Leal

## DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho primeiramente a Deus, pela força e coragem durante toda essa caminhada, a nossa família, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que concluíssemos essa etapa de nossas vidas e aos nossos professores, por terem acreditado que seríamos capazes de chegar até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos em primeiro lugar a Deus, por nos ter dado força em todos os momentos de fraqueza, sem ele nada seria possível. Aos nossos pais, por todo apoio, carinho, dedicação e confiança depositada em nós. Aos professores por todos os conhecimentos compartilhados, em especial ao professor Antônio de Pádua Sobreira Leal e ao professor Josué Ribeiro da Silva por toda a dedicação e empenho em nos ajudar na elaboração deste trabalho. Aos nossos amigos Mauro Conrado, Jeferson Carlos dos Santos e Roberta Cândido pela compreensão e disponibilidade em fornecer a mão amiga.

## RESUMO

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o crescimento populacional e o desenvolvimento tecnológico, fizeram com que se aumentasse o consumo de energia em 0,8% na classe residencial e 5,5% na classe industrial, o que se justifica a busca por inovação no processo de fabricação e produtos, além do aperfeiçoamento de práticas existentes e obediência as normas de segurança atuais. Diante deste potencial, a tendência é que as fontes renováveis não hídricas continuem a ganhar espaço na matriz energética do país, porém os atuais avanços tecnológicos impulsionam a geração nuclear de energia elétrica que vem a ganhar cada vez mais espaço na matriz energética do país, já que possui um alto fator de potência elétrica e garantia de menores índices de acidentes, nesse contexto temos um alto investimento em estudos e projetos visando a melhoria do setor. O nível de desenvolvimento industrial pode ser avaliado através do processo de soldagem utilizado frequentemente nas indústrias. O Brasil avançou muito nas últimas décadas e procura sempre evoluir no setor primordial da fabricação à soldagem, tendo o processo de soldagem como umas das maneiras mais práticas e econômicas de se unir partes de um material. Neste contexto temos a união do tubo de revestimento com o tampão terminal formando as varetas de combustíveis, componente de suma importância na produção de energia elétrica nuclear, logo uma solda de qualidade é umas das preocupações do setor nuclear. Com o intuito de apresentar um estudo comparativo do processo de soldagem TIG com o processo de soldagem por Resistência e Pressão em varetas de combustíveis de ligas de zircônio, a fim de possibilitar a escolha da melhor opção perante a necessidade do setor garantindo a otimização do processo e aumento da produtividade.

**Palavras Chaves: Zircônio; soldagem; produtividade; ensaios destrutivos; ensaios não-destrutivos.**

## ABSTRACT

According to the Energy Research Company (EPE), population growth and technological development led to an increase in energy consumption of 0.8% in the residential class and 5.5% in the industrial class, which is justified the search for innovation in the manufacturing process and products, in addition to improving existing practices and complying with current safety standards. Facing this potential, the tendency is for non-hydro renewable sources to continue to gain space in the country's energy matrix, but the current technological advances drive the nuclear power generation that is gaining more and more space in the country's energy matrix. Which has a high electric power factor and a guarantee of lower accident rates, in this context we have a high investment in studies and projects aimed at improving the sector. The level of industrial development can be assessed through the welding process often used in industries. Brazil has advanced a lot in the last decades and always tries to evolve in the primordial sector of the manufacturing to the welding, having the process of welding as one of the most practical and economic ways of joining parts of a material. In this context we have the union of the coating tube with the end cap forming the fuel rods, a very important component in the production of nuclear electric energy, so a quality welding is one of the concerns of the nuclear sector. With the purpose of presenting a comparative study of the TIG welding process with the resistance and pressure welding process in zirconium alloy fuel rods, in order to allow the choice of the best option in the light of the need of the sector, guaranteeing optimization of the process and increased productivity.

**Key words: Zirconium; Welding; Productivity; Destructive testing; Non-destructive testing.**

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
	1.1 Problema Abordado .....	17
	1.2 Justificativa.....	18
	1.3 Objetivo Geral .....	18
	1.4 Objetivo Específico.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
	2.1 Usina Nuclear.....	19
	2.2 Zircônio.....	20
	2.2.1 Ligas de zircônio e a aplicação no setor nuclear.....	21
	2.2.2 Zircaloy-4 e ZIRLO® .....	23
	2.3 Soldagem.....	29
	2.3.1 Soldagem em ligas de zircônio aplicadas na área nuclear.....	29
	2.3.2 Processos de soldagem .....	30
	2.3.3 Soldagem TIG.....	32
	2.3.4 Soldagem por resistência e pressão .....	47
3.	METODOLOGIA .....	58
	3.1 Determinação do Objeto de Estudo .....	58
	3.2 Estabelecimento das Fontes de Dados e de Consulta Bibliográfica .....	58
	3.3 Seleção do Modelo de Tecnologia .....	58
	3.4 Consolidação dos Parâmetros Básicos do Projeto .....	59
	3.5 Elaboração do Estudo Técnico Comparativo .....	59
	3.6 Elaboração da Especificação Final .....	59
4.	MATERIAS E MÉTODOS .....	60

4.1	Materiais .....	60
4.2	Métodos .....	61
4.2.1	Execução da soldagem TIG .....	62
4.2.2	Execução da soldagem por resistência e pressão .....	64
4.2.3	Ensaios e medições .....	66
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	77
5.1	Resultados da Solda TIG .....	77
5.1.1	Ensaio visual .....	77
5.1.2	Inspeção dimensional .....	78
5.1.3	Ensaio radiográfico .....	78
5.1.4	Ensaio de arrebentamento .....	80
5.1.5	Ensaio metalográfico .....	83
5.1.6	Ensaio de corrosão .....	86
5.2	Resultados da Solda por Resistência e Pressão .....	87
5.2.1	Ensaio visual .....	87
5.2.2	Aquisição das dimensões da nervura de solda .....	89
5.2.3	Ensaio de arrebentamento .....	93
5.2.4	Ensaio metalográfico .....	96
5.2.5	Ensaio de corrosão .....	97
5.3	Discussão .....	98
6.	CONCLUSÃO .....	101
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de uma vareta combustível. ....	22
Figura 2: Parte de um Elemento Combustível de um reator PWR .....	23
Figura 3: Microestrutura de Zircaloy-4 temperadas de beta, apresentando duas morfologias diferentes. (a) estrutura entrelaçada e (b) estrutura de placas paralelas .....	27
Figura 4: Formação teórica de uma solda por aproximação das superfícies das peças .....	31
Figura 5: Esquema do processo de soldagem TIG .....	33
Figura 6: Esquema de equipamento básico para soldagem TIG.....	38
Figura 7: Esquema de corrente contínua com polaridade direta.....	39
Figura 8: Esquema de corrente contínua com polaridade inversa .....	40
Figura 9: Gráfico de tensão x corrente pulsada.....	40
Figura 10: Efeito do tipo de corrente e polaridade na soldagem TIG .....	41
Figura 11: Esquema da soldagem TIG com chanfro estreito .....	43
Figura 12: Esquema da soldagem TIG Hot-Wire.....	45
Figura 13: Manipulador robótico para procedimentos de soldagem orbital .....	46
Figura 14: Transformador de soldagem por resistência criado por Thomson .....	48
Figura 15: Esquema do princípio de funcionamento da soldagem por resistência....	49
Figura 16: Esquema da máquina de solda por resistência e pressão.....	50
Figura 17: Conjunto de resistências .....	52
Figura 18: Tipos de processo por resistência.....	53
Figura 19: Esquema da soldagem por ponto.....	54
Figura 20: Esquema do processo de soldagem por costura .....	56
Figura 21: Representação esquemática do tubo de revestimento .....	60

Figura 22: Representação do tampão terminal para solda TIG, com indicação da região que será soldada.....	61
Figura 23: Representação do tampão terminal para solda por resistência e pressão, com indicação da região que será soldada.....	61
Figura 24: Imagem do interior da câmara de soldagem TIG.....	63
Figura 25: Eletrodo de tungstênio EWCe-2.....	63
Figura 26 máquina de solda TIG.....	64
Figura 27: Imagem da câmara de soldagem por resistência e pressão.....	65
Figura 28: Eletrodo de liga de cobre.....	65
Figura 29: Máquina de solda resistência e pressão.....	66
Figura 30: Fluxograma da solda TIG.....	67
Figura 31: Micrografia demonstrando um reforço de solda.....	68
Figura 32: Anel Calibrado.....	69
Figura 33: Embutimento da amostra do corpo de prova TIG.....	71
Figura 34: Fluxograma da solda por Resistência e Pressão.....	73
Figura 35: Corte Longitudinal do corpo de prova.....	75
Figura 36: Embutimento da amostra do Corpo de Prova Resistência e Pressão.....	76
Figura 37: CP TIG com cordão de solda aprovado.....	77
Figura 38: Cordão de solda com inclusão de tungstênio.....	78
Figura 39: Radiografia de uma solda isenta de defeitos.....	79
Figura 40: Exemplo de uma radiografia onde houve inclusão de tungstênio na região da solda.....	80
Figura 41: Exemplo de uma radiografia onde há existência de um poro na região do cordão de solda.....	80
Figura 42: Histogramas das pressões de arrebatamento dos corpos de prova da solda TIG.....	82

Figura 43: Corpo de prova TIG arrebetado na região do Tubo de Revestimento....	83
Figura 44: Micrografia de uma junta soldada TIG .....	84
Figura 45: Histograma das profundidades de penetração das amostras dos corpos de prova da solda TIG .....	85
Figura 46: Histograma das espessuras da parede das amostras dos corpos de prova da solda TIG .....	86
Figura 47: CP TIG após realização do Ensaio de Corrosão.....	87
Figura 48: CP soldado por resistência e pressão aprovado.....	88
Figura 49: CP soldado por resistência e pressão com a presença de fusão sobre o Tampão Terminal.....	88
Figura 50: Histograma das larguras máximas da nervura da solda .....	90
Figura 51: Histograma das larguras mínimas da nervura da solda .....	91
Figura 52: Histograma das alturas máximas da nervura da solda.....	92
Figura 53: Histograma das alturas mínimas da nervura da solda .....	93
Figura 54: Histograma das pressões de arrebetamento dos corpos de prova da solda por resistência e pressão .....	95
Figura 55: Corpo de Prova Resistência e Pressão Arrebetado na região do Tubo de Revestimento .....	95
Figura 56: Micrografia de uma junta soldada por Resistência e Pressão.....	96
Figura 57: Macrografia de uma junta soldada por Resistência e Pressão observada no microscópio óptico .....	97
Figura 58: Corpo de prova soldado por Resistência e Pressão após realização do ensaio de corrosão .....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do Zircaloy-4 .....	25
Tabela 2 – Composição química do ZIRLO®.....	25
Tabela 3 – Temperaturas de transformação de fase das Ligas Zircaloy-4 e ZIRLO® .....	26
Tabela 4: Composição química de eletrodos de tungstênio (AWS A 5.12).....	37
Tabela 5 – Dados obtidos no ensaio de arrebatamento da solda TIG .....	81
Tabela 6 – Dados obtidos na medição da profundidade de penetração da solda TIG .....	84
Tabela 7 – Dados obtidos na medição da espessura da parede da solda TIG .....	85
Tabela 8 – Dados obtidos na medição da largura máxima da nervura da solda.....	89
Tabela 9 – Dados obtidos na medição da largura mínima da nervura da solda.....	90
Tabela 10 – Dados obtidos na medição da altura máxima da nervura da solda.....	91
Tabela 11 – Dados obtidos na medição da altura mínima da nervura da solda.....	92
Tabela 12 – Dados obtidos no ensaio de arrebatamento da solda por resistência e pressão .....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\alpha$ : Fase alfa do zircônio, HC

$\beta$ : Fase beta do zircônio, CCC

$\gamma$ : Gama

Ar: Argônio

ASTM: *American Society for Testing Materials*

AWS: *American Welding Society*

CA: Corrente alternada

CC: Corrente contínua

CC-: Corrente contínua com polaridade negativa ou direta

CC+: Corrente contínua com polaridade positiva ou inversa

CCC: Cúbica de corpo centrado

Ce: Cério

Cr: Cromo

CP: Corpo de prova

CS: Cordão de solda

CST: Corrosão sob tensão

EWCe: Eletrodo de tungstênio com adição de óxido de cério

EWG: Eletrodo de tungstênio com adição de combinação e quantidade de óxidos não especificados

EWLa: Eletrodo de tungstênio com adição de óxido de lantânio

EWP: Eletrodo de tungstênio puro

EWTh: Eletrodo de tungstênio com adição de óxido de tório

EWZr: Eletrodo de tungstênio com adição de óxido de zircônio

Fe: Ferro

HC: Hexagonal compacta

He: Hélio

Hf: Háfnio

La: Lantânio

MAG: *Metal Active Gas*

MIG: *Metal Inert Gas*

PWR: *Pressurized Water Reactor*

Sn: Estanho

TIG: *Tungsten Inert Gas*

Th: Tório

UO<sub>2</sub>: Dióxido de Urânio

ZF: Zona fundida

ZTA: Zona termicamente afetada

Zr: Zircônio

ZrSiO<sub>4</sub>: Zirconita

## 1 INTRODUÇÃO

Átomos de alguns elementos químicos possuem a particularidade, de transformar massa em energia, por meio de reações nucleares. Uma das maneiras de aproveitar essa energia para a geração de eletricidade é a fissão nuclear.

A fissão nuclear é a divisão do núcleo de um átomo instável, em duas ou mais partículas menores, quando atingido pelo bombardeamento de nêutrons. Esse processo é uma reação química onde há transferência de energia de um meio interior para um meio exterior ocorrendo à liberação de calor.

A fissão do átomo de urânio se destaca como a técnica mais utilizada em usinas nucleares na geração de eletricidade. A primeira usina nuclear a entrar em operação no Brasil foi a Usina ANGRA 1, ela opera com um reator de água pressurizada (PWR), o tipo mais utilizado no mundo.

Os reatores PWR (*Pressurized Water Reactor*), utilizam como combustível nuclear pastilhas de dióxido de urânio (UO<sub>2</sub>) enriquecidas, responsáveis pela fissão nuclear e que são acondicionadas em varetas combustíveis (*fuel rods*). Em um reator nuclear grandes quantidades de calor e de radiação são geradas e por isso a segurança durante sua operação é de grande importância. Visando evitar a possibilidade de ocorrência de um acidente, materiais que apresentem boas propriedades estruturais e mecânicas devem ser empregados nesse tipo de serviço.

Ligas de zircônio são largamente utilizadas em reatores nucleares, por apresentarem elevada resistência à corrosão em altas temperaturas, baixa absorção de nêutrons térmicos e resistência mecânica. As ligas de zircônio conhecidas com Zircaloy-4 e ZIRLO® são utilizadas para a fabricação dos componentes, Tampão Terminal e Tubo de Revestimento da vareta combustível, respectivamente.

Por muito anos se utilizou o processo TIG para a soldagem da vareta combustível. O processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), é um tipo de processo de soldagem a arco elétrico, que utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio e um gás inerte que protege a poça de fusão e o eletrodo.

Devido à complexibilidade do processo, o maior tempo requerido para realização da solda e a necessidade de um maior controle de inspeção, viu-se a necessidade de mudança de processo.

Visando que no processo por Resistência e Pressão, a solda acontece em fração de segundos, demonstrando-se mais produtivo em relação à solda TIG, realizou-se a migração dos processos.

No processo de soldagem por Resistência e Pressão, as peças a serem unidas são aquecidas pelo calor gerado na junta pela resistência à passagem de corrente elétrica (efeito Joule), esse calor faz com que a junta passe do estado sólido para o estado de fusão incipiente, e posteriormente, as peças são pressionadas uma contra a outra mediante aplicação de força através do eletrodo de liga de cobre com a cavidade para moldagem da solda que por deformação promove a formação do cordão de solda.

Este trabalho tem como propósito avaliar, através da realização de ensaios não destrutíveis e destrutíveis, se a migração do processo de soldagem TIG para Resistência e Pressão foi eficiente e satisfatório.

Para realizar esse estudo, foram utilizados corpos de prova formados pelo Tampão Terminal e pelo Tubo de Revestimento, sendo a união dos mesmos realizada por meio dos processos de soldagem TIG e Resistência e Pressão. Os corpos de prova representam as varetas combustíveis.

## 1.1 Problema Abordado

Os cordões de solda formados durante o processo de fabricação de varetas combustíveis devem ser resistentes mecanicamente e apresentar grande resistência à corrosão, uma vez que, em condições normais de operação do reator as varetas são expostas a um ambiente severo de altas temperaturas e pressões. Visando assegurar a qualidade dessas soldas utilizava-se o processo de soldagem TIG, porém o tempo elevado para realização das mesmas e a exigência de um maior controle, faziam com que o processo fosse pouco produtivo.

## 1.2 Justificativa

Com o propósito de melhorar o processo de soldagem das varetas combustíveis, tornando o processo mais produtivo e acreditando que a qualidade dos cordões de solda seria mantida, buscou-se a migração do processo de soldagem TIG para o processo por Resistência e Pressão.

## 1.3 Objetivo Geral

Avaliar a mudança do processo de soldagem TIG para o processo por Resistência e Pressão em ligas de zircônio (Zircaloy-4 e ZIRLO®), utilizadas na fabricação de varetas combustíveis.

## 1.4 Objetivo Específico

Avaliar as juntas soldadas, resultantes dos processos de soldagem TIG e Resistência e Pressão, por intermédio da realização de ensaios não destrutíveis e destrutíveis, com intuito de assegurar que ambos os processos são aptos para produzir soldas de alta qualidade, com resistência mecânica e resistência à corrosão e comprovar por meio de comparação se a mudança entre os processos de soldagem foi realmente satisfatória.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Usina Nuclear

Atualmente uma das grandes preocupações mundiais é a preservação do meio ambiente. Visando a sustentabilidade ambiental, a idéia de implantação de fontes de energia alternativas em substituição aos combustíveis fósseis, cresce cada vez mais.

A queima de combustíveis fósseis gera gases que agravam o efeito estufa contribuindo para o aquecimento global. A produção de energia nuclear é uma alternativa, pois ela não contribui para o efeito estufa, apesar de gerar lixo nuclear e ser alvo de constantes desconfianças em relação a sua segurança quanto aos riscos de acidentes.

Com a necessidade de resolver esse problema ambiental, o uso de usinas nucleares vem sendo repensado em muitos países. No Brasil, em 1985, entrou em operação a primeira usina nuclear, conhecida como Angra-1, situada na Central Nuclear Almirante Álvaro. Ela opera com um reator de água pressurizada PWR (*Pressurized Water Reactor*), e utiliza ligas de zircônio como material de revestimento das pastilhas de urânio (<http://www.eletronuclear.gov.br>).

Este reator opera com três circuitos de água, sendo eles: circuito primário, circuito secundário e água de resfriamento. A água do circuito primário é aquecida através da fissão nuclear das pastilhas de urânio enriquecido, sua temperatura pode variar entre 300° a 400°C.

No que se refere a uma usina nuclear é de extrema importância que os materiais que a constituem e os empregados na fabricação do elemento combustível apresentem boas propriedades mecânicas, estruturais e elevada resistência à corrosão à altas temperaturas e pressões. A degradação dos materiais é um fator que pode ocasionar a diminuição da vida útil e a segurança de um reator.

## 2.2 Zircônio

O zircônio (Zr) foi descoberto em 1789 por Martin Klaproth (LOBO, 2002). Sua utilização começa no final da década de 1940 com a descoberta do háfnio (Hf), um elemento químico encontrado na natureza junto com o zircônio.

A partir dessa descoberta reconheceu-se que os cálculos da seção de choque transversal de absorção de nêutrons térmicos do zircônio estavam errados. Os cálculos foram refeitos e se estabeleceu o valor de  $0,18 \pm 0,02$  barns, tornando-se assim o zircônio um material muito atrativo para aplicação em reatores nucleares.

O Zr apresenta um alto ponto de fusão  $1852 \pm 2^\circ\text{C}$  ( $3366 \pm 4^\circ\text{F}$ ), elevada resistência à corrosão a altas temperaturas e baixa seção de choque de absorção de nêutrons térmicos (transparência aos nêutrons).

Alguns materiais não podem ser empregados em um reator, pois capturam os nêutrons que tentam passar por eles, tornando-se esses nêutrons parte dos átomos desses materiais, impossibilitando os mesmos de realizarem a fissão nuclear. Quando se diz que o zircônio tem baixa seção de choque de absorção de nêutrons térmicos, é porque ele é transparente a passagem de nêutrons, permitindo que os mesmos atinjam as pastilhas enriquecidas de urânio as bombardeando ocorrendo a fissão nuclear.

Em 1949, o zircônio foi definido como metal de estrutura do reator do submarino "*Nautilus*" da marinha americana (LOBO, 2002). O Zr não é encontrado na natureza de forma livre, sua principal fonte é a Zirconita ( $\text{ZrSiO}_4$ ).

Encontra-se no estado sólido em temperatura ambiente. Apresenta-se em duas formas alotrópicas, estrutura cristalina hexagonal compacta (Zr- $\alpha$ ) em temperatura ambiente e sua transição para estrutura cúbica de corpo centrado (Zr- $\beta$ ) ocorre a  $862^\circ\text{C}$  ( $1584^\circ\text{F}$ ).

O metal zircônio é empregado em filamentos de lâmpadas, em trocadores de calor e sua maior aplicação se destina no setor nuclear, na forma de ligas e no revestimento do reator nuclear.

### 2.2.1 Ligas de zircônio e a aplicação no setor nuclear

A maior das preocupações da área nuclear corresponde à segurança de um reator durante sua operação. A escolha de materiais para serem utilizados nesse ambiente recai sobre aqueles que apresentem além de boas propriedades estruturais e mecânicas ofereçam da mesma forma um elevado grau de confiabilidade em serviço, onde qualquer falha pode gerar um grave acidente (LOBO e ANDRADE, 2010).

O zircônio é encontrado na natureza sempre acompanhado de uma porcentagem entre 1 e 3,5% de háfnio. Segundo PEREIRA (2014), para a utilização do Zr no setor nuclear é necessário que haja a sua separação do Hf, que apresenta uma seção de choque consideravelmente elevada (115 barns), essa alta seção de choque afetaria o funcionamento do reator e conseqüentemente diminuiria a eficiência da fissão nuclear.

Elementos de liga são adicionados ao Zr, dando origem as ligas. As ligas são desenvolvidas e patenteadas e suas propriedades vão sendo aperfeiçoadas com o propósito de melhorar seu desempenho.

Uma das aplicações das ligas de Zr no setor nuclear é como material de revestimento das varetas combustíveis (*fuel rod*), que acondicionam as pastilhas de dióxido de urânio. As varetas são montadas, numa estrutura designada elemento combustível, conforme figura 1.

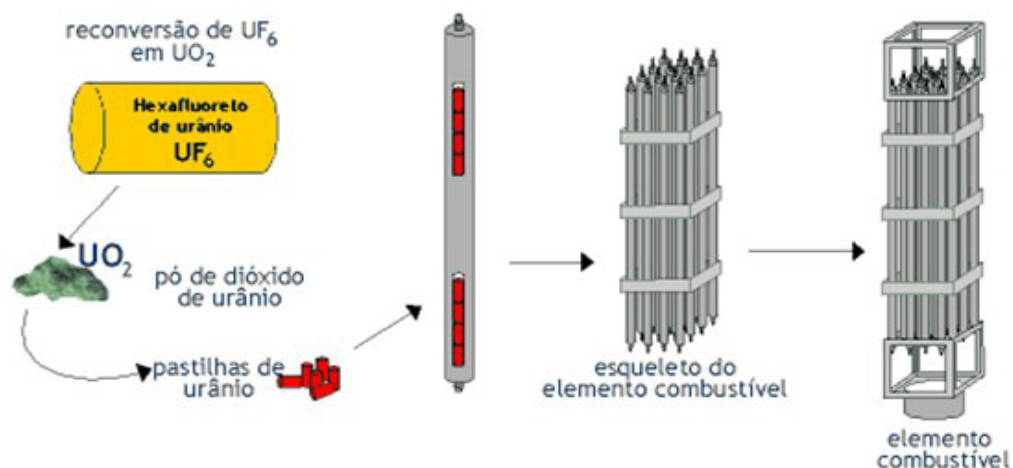


Figura 1: Esquema de uma vareta combustível.

Fonte: [http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20041/Moacir/usina\\_arquivos/usinanuclear.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20041/Moacir/usina_arquivos/usinanuclear.html)

Quando em serviço no reator essas ligas são expostas a água em altas temperaturas e pressões. Para que resistam a essas condições severas de operação é de extrema importância que apresentem boas propriedades mecânicas, estruturais e resistência à corrosão.

Segundo ZIMMERMANN (2014), no que se refere a corrosão em um combustível nuclear para reatores PWR, ela se manifesta de maneira uniforme na superfície do revestimento. Em condições normais de operação dos reatores, a ocorrência de falha da vareta combustível por motivo de corrosão uniforme excessiva é uma raridade.

A corrosão sob tensão (CST), é um fenômeno que acontece em usinas nucleares devido a suas condições de operação. Ela causa a deterioração de materiais e a formação de trincas favorecendo a ruptura do material.

Em relação ao assunto de corrosão, diferentemente dos outros tipos, na CST o material se apresenta com boa aparência até o momento da fratura, dificultando a percepção da presença de corrosão. A temperatura, as tensões ao qual o material é submetido, o meio corrosivo e a própria estrutura composicional do material são fatores que influenciam a fratura.

As principais ligas utilizadas em reatores são o Zircaloy-2, o Zircaloy-4 e o ZIRLO<sup>®</sup>, que são ligas desenvolvidas pela empresa americana Westinghouse, e a liga denominada M5 desenvolvida pela empresa de origem europeia AREVA.

Em nosso trabalho abordaremos as ligas Zircaloy-4 e o ZIRLO<sup>®</sup>, que compõem o tampão terminal e o tubo de revestimento, respectivamente. A figura 2, exibe uma parte de um Elemento Combustível de um reator PWR.

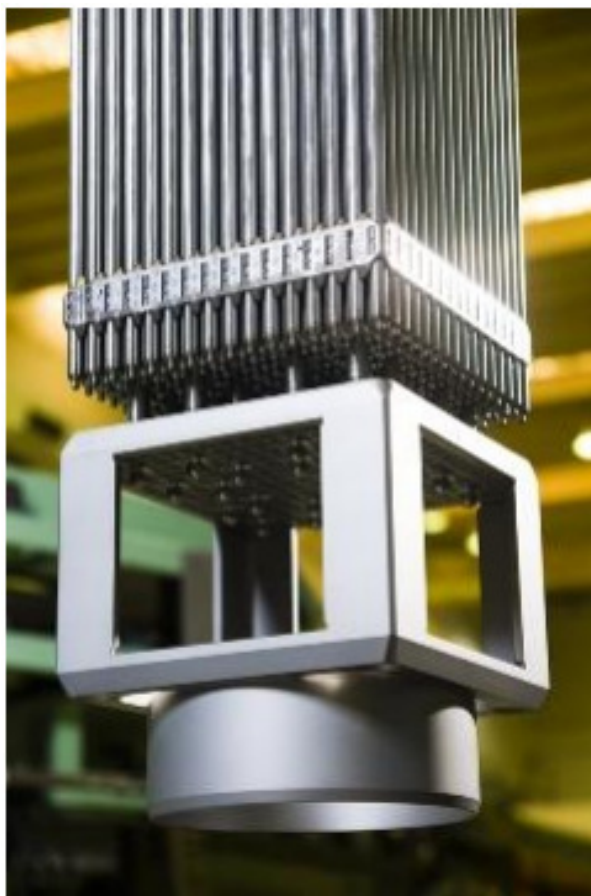


Figura 2: Parte de um Elemento Combustível de um reator PWR  
Fonte: (PEREIRA, 2014)

## 2.2.2 Zircaloy-4 e ZIRLO<sup>®</sup>

### 2.2.2.1 Histórico

Com a finalidade de melhorar a resistência à corrosão do zircônio adicionou-se o elemento estanho, e com isso deu-se origem a classe de ligas conhecidas como Zircalloys.

A contaminação de zircônio com 2,5% de estanho, originou-se a liga denominada Zircaloy-1. Algumas modificações foram realizadas, dando origem à liga Zircaloy-2. A liga conhecida como Zircaloy-3 é uma pequena modificação, com variação no teor de estanho (0,25-0,5%), porém esta liga nunca chegou a ser comercialmente produzida, dando lugar ao Zircaloy-4, uma liga praticamente sem a presença do elemento níquel e que foi desenvolvida para reduzir a captura de hidrogênio.

Uma nova liga surgiu denominada ZIRLO<sup>®</sup>, esse material passa a considerar o oxigênio um elemento de liga e não mais uma impureza.

Segundo LOBO e ANDRADE (2010), a principal diferença entre as ligas Zircaloy-4 e o ZIRLO<sup>®</sup>, é que a segunda apresenta uma maior estabilidade dimensional e resistência a corrosão em altas temperaturas.

O material ZIRLO<sup>®</sup> é uma liga avançada a base de zircônio que possui alta resistência à corrosão aos produtos de refrigeração, combustíveis e fissão do reator. Isso significa que os tubos feitos com ZIRLO<sup>®</sup> podem tolerar longos períodos de ciclo do reator a temperaturas mais elevadas, sem reduzir as margens de segurança operacional da usina (WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY, 2017).

#### 2.2.2.2 Características composicionais

Segundo LOBO (2002), os principais elementos de liga do Zircaloy-4 responsáveis pela otimização de suas propriedades e principalmente pela sua resistência a corrosão, são o estanho (Sn), o ferro (Fe) e o cromo (Cr), embora não ultrapassem 2% em peso de liga.

A tabela 1, mostra a composição química do Zircaloy-4.

Tabela 1 – Composição química do Zircaloy-4

Elemento	Zircaloy-4 (% em peso)
Estanho	1,20 a 1,45
Ferro	0,18 a 0,24
Cromo	0,07 a 0,13
Níquel	<0,007
Ferro + Cromo + Níquel	-
Ferro + Cromo	0,28 a 0,37
Nióbio	-
Oxigênio	0,10 a 0,15
Zircônio	Resultante do balanço

Fonte: (JUNQUEIRA, 2014)

A liga ZIRLO<sup>®</sup> apresenta uma pequena redução na quantidade de estanho, de ferro e a eliminação total do cromo. Essas mudanças na composição são responsáveis pela melhoria na resistência à corrosão, quando comparada a liga Zircaloy-4. Com a redução de estanho diminui a resistência mecânica da liga e por isso foi necessário a adição do elemento nióbio.

A tabela 2, mostra a composição química do ZIRLO<sup>®</sup>.

Tabela 2 – Composição química do ZIRLO<sup>®</sup>

Elemento	ZIRLO <sup>®</sup> (% em peso)
Estanho	0,80 a 1,10
Ferro	0,09 a 0,13
Cromo	-
Níquel	-
Ferro + Cromo + Níquel	-
Ferro + Cromo	-
Nióbio	0,80 a 1,20
Oxigênio	0,105 a 0,145
Zircônio	Resultante do balanço

Fonte: (JUNQUEIRA, 2014)

### 2.2.2.3 Transformações de fase

Durante o processo de soldagem é muito importante saber a temperatura de transformação de fase do metal de base, a fim de definir as temperaturas admissíveis durante o processo.

Na tabela 3, são apresentas as temperaturas de transformação de fase das ligas Zircaloy-4 e ZIRLO®.

Tabela 3 – Temperaturas de transformação de fase das Ligas Zircaloy-4 e ZIRLO®

<b>MATERIAL</b>	<b>Alfa ↔ Alfa + Beta</b>	<b>Alfa + Beta ↔ Beta</b>
Zircaloy-4	825°C (1517°F)	950°C (1742°F)
ZIRLO®	780°C (1435°F)	940°C (1725°F)

Fonte: (SOARES, PINTO, et al., 2016)

Na fase alfa ( $\alpha$ ), as duas ligas apresentam estrutura cristalina hexagonal compacta (HC), já na fase beta ( $\beta$ ), apresentam estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC).

As ligas de zircônio tem sua morfologia microestrutural diretamente relacionada com a taxa de resfriamento e o teor de impurezas, ligas com teores de oxigênio entre 0,13 a 0,39% com resfriamento rápido resultam em uma estrutura *Basketweave* ou *Widmanstätten*, enquanto a têmpera pode produzir estruturas aciculares. Sendo assim a microestrutura um forte fator a definir a resistência à corrosão das ligas de Zircaloy nos reatores refrigerados a água (JUNQUEIRA, 2014).

Segundo ZIMMERMANN (2014), a microestrutura típica das ligas de Zircaloy é do tipo estrutura entrelaçada (*basketware structure*), embora recozimentos possam resultar em grãos de diferentes morfologias.

Estrutura *Widmanstätten* é a nomenclatura usada para indicar uma estrutura resultante da formação de uma nova fase, devido à separação da fase original em duas fases distintas ao longo do plano cristalográfico, que acontece devido ao crescimento de novas fases dentro do limite do grão do metal.

A estrutura apresenta o formato de lamelas e geralmente são muito pequenas, por isso devem ser vistas com o auxílio de um microscópio.

A estrutura *Widmanstätten* pode existir como uma estrutura fina acicular ou grosseira. Em seu artigo HOLT (1970), define as estruturas *Widmanstätten*, nomeando a fase contínua de estrutura entrelaçada (*basketweave*), e a fase acicular que acontece no contorno do pré-grão beta de estrutura de placas paralelas.

Abaixo a figura 3(a) exhibe a estrutura entrelaçada e a 3(b) a de placas paralelas.

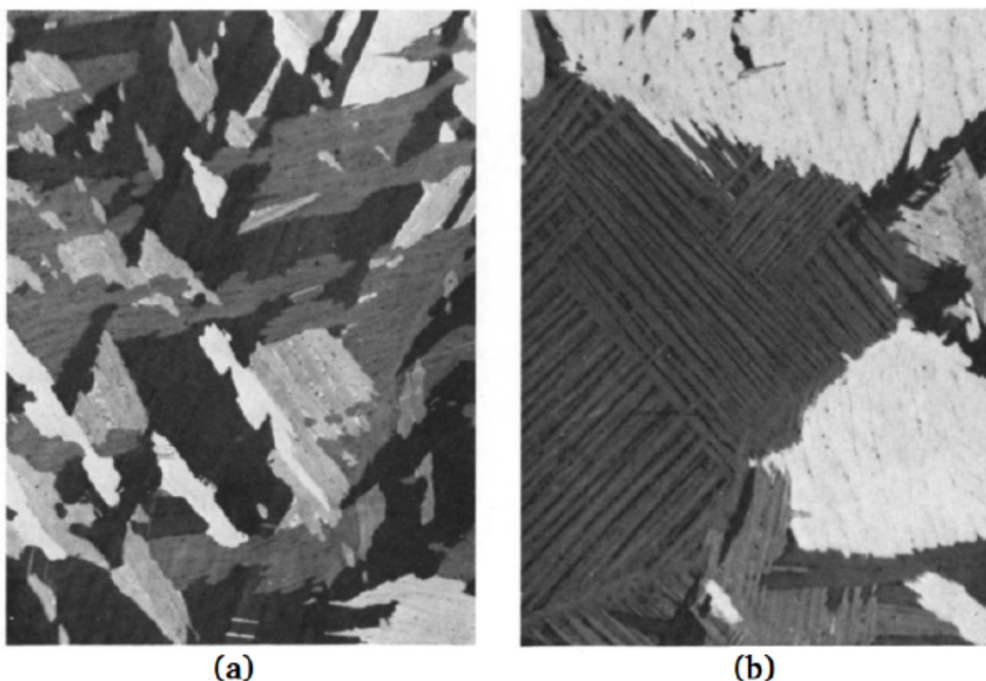


Figura 3: Microestrutura de Zircaloy-4 temperadas de beta, apresentando duas morfologias diferentes. (a) estrutura entrelaçada e (b) estrutura de placas paralelas  
Fonte: (HOLT, 1970)

#### 2.2.2.4 Elementos de liga e suas influências sobre o zircônio

Alguns elementos tendem a deslocar as temperaturas de transformação, os elementos  $\alpha$  estabilizadores aumentam a temperatura de transformação alotrópica  $\alpha \rightarrow \beta$ , (elementos alfa-gênicos) e os elementos  $\beta$  estabilizadores diminuem a temperatura de transformação alotrópica (elementos gama-gênicos).

Segundo ZIMMERMANN (2014), no zircônio a estabilidade das fases  $\alpha$  e  $\beta$ , são influenciadas por outros elementos, que podem ter o papel de alfa estabilizadores ou betas estabilizadores, assim como por compostos intermediários. Elementos conhecidos como alfa-gênicos em Zircônio são: alumínio, antimônio, estanho, berílio, chumbo, háfnio, nitrogênio, oxigênio e cádmio. Os elementos que diminuem a temperatura de transformação ( $\beta$  estabilizadores) são: ferro, cromo, níquel, molibdênio, cobre, nióbio, tântalo, vanádio, tório, urânio, tungstênio, titânio, manganês, cobalto e prata.

Na fase beta, elementos como Fe e Cr são solúveis, mas na fase alfa são relativamente insolúveis. A distribuição e o tamanho dessas fases são regidos por reações que ocorrem durante a transformação  $\beta \rightarrow \alpha$  e conformação mecânica em temperaturas mais baixas (JUNQUEIRA, 2014).

#### 2.2.2.5 Aplicações nucleares

No setor nuclear o Zircaloy-4 é empregado como material do tampão terminal, do tampão terminal do tubo guia e do tampão do amortecedor interno. O ZIRLO<sup>®</sup> por sua vez, é empregado no tubo de revestimento da vareta combustível, tubo guia, tubo amortecedor interno e tubo de instrumentação.

As peças anteriormente citadas, são algumas das peças que compõem o elemento combustível nuclear.

## 2.3 Soldagem

Intitula-se soldagem o processo que utiliza uma fonte de calor, com ou sem a aplicação de pressão, para unir duas partes metálicas, onde o resultado desse processo é a solda (WAINER, BRANDI e MELLO, 2004).

Segundo a American Welding Society (AWS), soldagem é uma operação que visa atingir a coalescência localizada causada pelo aquecimento até uma temperatura apropriada, com ou sem metal de adição e de aplicação de pressão.

No setor industrial a soldagem tem grande aplicabilidade no processo de união de metais, desde estruturas rudimentares até a construção grandes navios. Sua aplicação não se limita a união de peças, ela também é utilizada na recuperação de peças desgastadas, depositando material e formando uma camada sobressalente de material na superfície das mesmas, que posteriormente são submetidas algum tipo de processo mecânico, a fim de retornar à suas características de projeto.

### 2.3.1 Soldagem em ligas de zircônio aplicadas na área nuclear

As varetas combustíveis são fechadas nas suas extremidades por peças conhecidas como tampão terminal e a vedação é realizada através de processo de soldagem circunferencial.

A qualidade desta solda é de extrema importância, dado a circunstância que a vareta combustível sofrerá grandes solicitações mecânicas internamente e externamente.

A vareta juntamente com o cordão de solda deve apresentar estanqueidade suficiente para não permitir o vazamento de material radioativo e nem a entrada do fluido utilizado como refrigerante no reator.

Nas soldas utilizadas em um reator, a resistência mecânica juntamente à resistência à corrosão são fatores muito importantes que necessitam ser observados e controlados. Levando em consideração que foi exposto, pode-se concluir que a qualidade da solda é um fator de segurança no reator.

### 2.3.2 Processos de soldagem

O material das peças a serem soldadas recebe o nome de metal de base. Se durante a realização da solda for introduzido um material adicional, como é no caso de alguns processos por fusão, esse material recebe o nome de metal de adição. A região onde acontece a união das peças é denominada junta.

Uma peça metálica é constituída por uma grande quantidade de átomos, espacialmente ordenados e dispostos em um arranjo cristalino (estrutura cristalina).

Na estrutura cristalina os átomos que se encontram em seu interior, estão ligados a um número bem maior de átomos, do que os átomos que se aduzem na superfície.

Por estarem ligados a um número superior de átomos, os átomos que estão no interior da estrutura cristalina apresentam uma condição de energia menor e não tendem a se ligar com outros átomos. Já os átomos da superfície apresentam maior condição de energia tendendo a se ligar a outros átomos.

Em teoria aproximando-se duas peças metálicas a uma pequena distância, haveria a formação de uma solda, conforme figura 4. Contudo, na prática isso não acontece, devido a existência de obstáculos, que impossibilitam uma aproximação suficiente entre as peças.

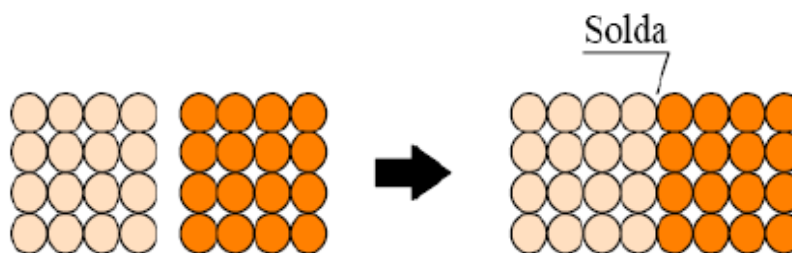


Figura 4: Formação teórica de uma solda por aproximação das superfícies das peças

Fonte: (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2007).

A rugosidade é um dos obstáculos, pois mesmo as superfícies metálicas polidas, apresentam um certo grau de rugosidade em escala microscópica e submicroscópica. A poeira é outro obstáculo considerável, que impede o real contato entre as peças.

Segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2007), a fim de superar estes obstáculos, são utilizados alguns métodos, os quais os dois principais, originam dois amplos tipos de processos de soldagem: processos por fusão e processos por pressão.

Nos processos por fusão, a região da solda é aquecida por uma fonte concentrada de calor capaz de fundir o material de base. São exemplos de processos por fusão: Soldagem a Gás, Eletrodo Revestido, TIG (*Tungsten Inert Gas*), MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*).

Nos processos por pressão, as peças são aquecidas até um estado plástico adiantado e forçadas uma contra a outra através da aplicação de pressão externa. Podemos citar como exemplos de processos por pressão: Soldagem por Centelhamento, Soldagem por fricção (atrito), Soldagem por Resistência, Soldagem a frio e Soldagem por ultrassom.

As fontes de energia utilizadas para aquecer os materiais ou para realizar a união podem ser: mecânica, química, elétrica ou radiante.

### 2.3.3 Soldagem TIG

Segundo WAINER, BRANDI e MELLO (2004), o processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), também conhecido como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), foi patenteado no fim dos anos 20, porém só começou a ser comercialmente utilizado em 1942, nos Estados Unidos para a soldagem em liga de magnésio de assentos de aviões.

No início utilizou-se um eletrodo de tungstênio, o hélio como gás de proteção e corrente contínua, pois havia dificuldades em estabilizar o arco, posteriormente essa dificuldade foi superada .

Alguns anos depois o processo ganhou grande espaço no mercado e o argônio passou a ser utilizado no lugar do hélio como gás de proteção, devido ao seu valor economicamente mais viável.

Ao decorrer dos anos o processo passou por inovações e melhorias, apresentando soldas de boa qualidade e se difundindo em vários setores da indústria.

#### 2.3.3.1 Conceito

No processo de soldagem TIG, a fonte de calor é o arco elétrico, que passa entre o eletrodo não consumível de tungstênio e as peças a serem unidas.

O arco elétrico é o responsável pela união das peças através do aquecimento e fusão dessas. O arco apresenta boa estabilidade, possibilitando a produção de soldas com bom acabamento e com pouca ou nenhuma exigência de limpeza após a operação.

Um gás inerte assegura a proteção da zona de solda e do eletrodo; normalmente são utilizados o argônio, ou hélio, ou uma mistura deles. A escolha de qual tipo de gás que será empregado dependerá do material que será soldado.

A soldagem TIG pode ser manual ou automatizada, autógena ou com o uso de metal de adição. Quando o processo for autógeno, ou seja, sem o uso de metal de adição, o arco gera o calor na junta das peças a serem unidas, onde essas são aquecidas e quando a poça de fusão se solidificar as peças se unirão. No processo com emprego de metal de adição, a junta das peças a serem unidas são aquecidas da mesma forma que no processo autógeno, a diferença é que o metal de adição é adicionado na poça de fusão antes dessa se solidificar.

Quando se realiza uma solda por fusão acumula-se gradiente térmico no metal de base. Recebe o nome de zona fundida (ZF), o local onde o material se fundiu e em seguida se solidificou durante a realização da solda. A região do metal de base não fundida, mas que sofreu alterações em suas propriedades e características microestruturas pelo ciclo térmico é chamada zona termicamente afetada (ZTA).

O excepcional controle de energia, em consequência ao controle independente da fonte de calor se destaca como uma característica relevante desse processo (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2007).

A figura 5, demonstra o processo de soldagem TIG

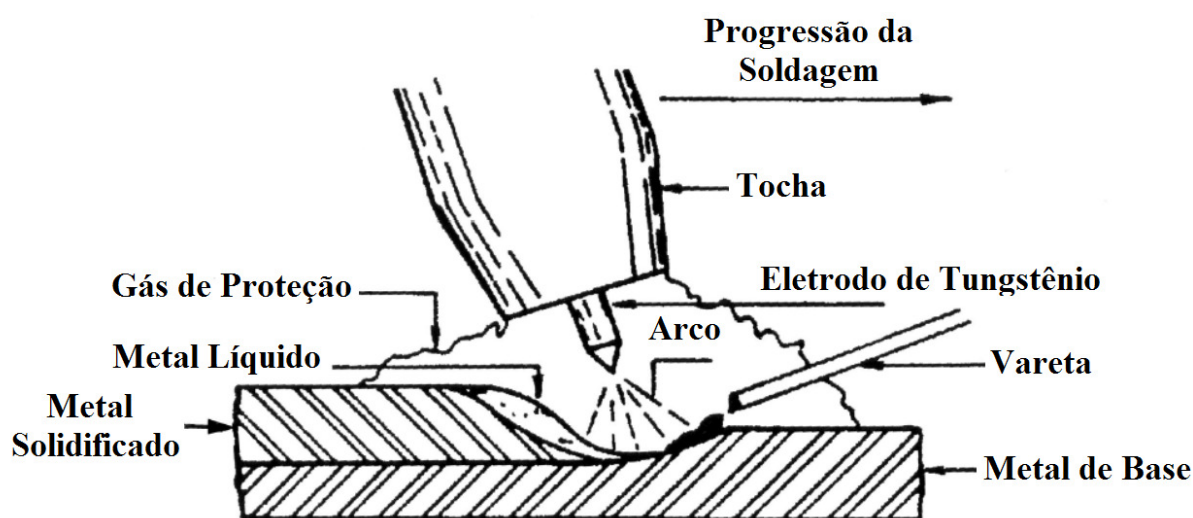


Figura 5: Esquema do processo de soldagem TIG  
Fonte: (SENAI-RJ, 2009)

### 2.3.3.2 Equipamentos

Os equipamentos básicos empregados no processo TIG são: fonte de energia elétrica, o aparelho ignitor de alta frequência, gás protetor, tocha de soldagem, cabos e mangueiras.

A fonte de energia elétrica é encarregada de fornecer a energia elétrica a todo o sistema de solda. A energia necessária para o processo de soldagem pode ser fornecida por um transformador que produz corrente alternada (CA), por meio de um retificador que produz corrente contínua (CC) ou por meio de um gerador que produz corrente contínua (CC).

O aparelho ignitor de alta frequência é utilizado junto a fonte de energia elétrica. Ele propicia a ionização da coluna de gás entre o eletrodo e a peça, induzindo a abertura do arco. No processo TIG não é recomendável que a peça e o eletrodo entrem em contato, visto que o eletrodo de tungstênio pode contaminar a peça e ao mesmo tempo se danificar.

O gás protetor inerte deve possuir pureza de no mínimo 99,99 vol.% e teor de umidade controlado. Sendo armazenado em cilindros, que possuem reguladores de pressão e de vazão.

Os gases mais utilizados são o argônio (Ar), o hélio (He) ou uma mistura deles.

O gás argônio facilita a abertura do arco e possibilita um arco mais estável. Sendo aplicado na soldagem de materiais de pequenas espessuras, já que a penetração utilizando esse gás é menor.

O gás hélio é adequado para a soldagem de materiais de maior espessura e alta condutibilidade térmica, porque transmite maior aporte de calor quando comparado ao argônio, para uma mesma corrente e tensão.

Por possuir uma densidade menor é necessária uma vazão de duas a três vezes maior de gás hélio, para garantir a mesma eficiência em termos de proteção em relação ao gás argônio.

Antes de dar início ao processo de soldagem, com a abertura do arco elétrico é recomendável que se inicie a vazão do gás de proteção, o chamado pré-purga do gás.

Após a finalização do cordão de solda e o fechamento do arco elétrico, o fluxo de gás deve ocorrer por mais alguns segundos, a fim de evitar a contaminação do cordão pela atmosfera. Esse tempo recebe o nome de pós-purga do gás de proteção.

Tendo a função de alojar o eletrodo de tungstênio, conduzir a corrente elétrica e conceder a proteção gasosa necessária, a tocha de soldagem necessita de refrigeração. A refrigeração pode ser realizada pelo próprio gás de proteção ou por água.

O eletrodo utilizado é o de tungstênio, ele apresenta o maior ponto de fusão entre os metais, cerca de  $3400^{\circ}\text{C}$ . Elementos de liga são adicionados ao eletrodo influenciando suas propriedades e melhorando seu desempenho no processo de soldagem.

A escolha correta do tipo de eletrodo para realização do processo de soldagem é de fundamental importância para assegurar uma solda de qualidade.

A tabela de classificação AWS (*American Welding Society*) apresenta nove tipos de eletrodos, onde a designação EW indica se tratar de um eletrodo de tungstênio, o símbolo seguinte expressa o elemento de liga que compõe o eletrodo e a numeração corresponde ao percentual aproximado do elemento de liga.

O eletrodo de tungstênio puro (EWP) é o mais barato, porém apresenta maior dificuldade de abertura de arco e menor durabilidade em relação aos outros tipos de eletrodos.

O eletrodo de tungstênio com adição de óxido de cério (EWCe), apresenta facilidade de abertura e boa estabilidade do arco.

O eletrodo de tungstênio com adição de óxido de lantânio (EWLa) é muito similar ao EWCe, oferecendo boa resistência ao desgaste.

O eletrodo de tungstênio com adição de óxido de tório (EWTh), apresenta uma notável resistência a contaminação da solda.

Em aplicações onde a contaminação da poça de fusão deve ser a mínima possível, se utiliza o eletrodo de tungstênio com adição de óxido de zircônio (EWZr).

Os eletrodos classificados como EWG, possuem adição de combinação e quantidade de óxidos não especificados.

A tabela 4, expõe a composição química de eletrodos de tungstênio, conforme a AWS.

Tabela 4: Composição química de eletrodos de tungstênio (AWS A 5.12)

Classificação AWS	Composição Química (% peso)					
	Tungstênio (min)	CeO <sub>2</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Outros* (Max)
EWP	99,5	-	-	-	-	0,5
EWCe-2	97,3	1,8 a 2,2	-	-	-	0,5
EWLa-1	98,3	-	0,8 a 1,2	-	-	0,5
EWLa-1,5	97,8	-	1,3 a 1,7	-	-	0,5
EWLa-2	97,3	-	1,8 a 2,2	-	-	0,5
EWTh-1	98,3	-	-	0,8 a 1,2	-	0,5
EWTh-2	97,3	-	-	1,7 a 2,2	-	0,5
EWZr-1	99,1	-	-	-	0,15 a 0,40	0,5
EWG	94,5	#	#	#	#	#

\* Outros óxidos ou elementos

# Não especificado

Fonte: Tabela redigida da obra (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2007)

Apesar de serem ditos como não consumíveis, de tempos em tempos os eletrodos precisam ser substituídos, pois vão se desgastando.

Normalmente os eletrodos são apontados por meio químico ou mecânico antes do início da operação de soldagem. O ângulo da ponta, assim como diâmetro do eletrodo influenciam diretamente o cordão de solda, sendo, portanto, uma variável importante no processo automático de soldagem, a fim de garantir a repetitividade e bons resultados do processo.

Os cabos são utilizados para conduzir a corrente elétrica e as mangueiras para transportar o gás ou a água até a tocha de soldagem.

Vários equipamentos auxiliares podem ser utilizados, como temporizadores e osciladores do arco de soldagem, com o intuito de melhorar o processo de soldagem.

A figura 6, demonstra os equipamentos básicos para soldagem TIG.

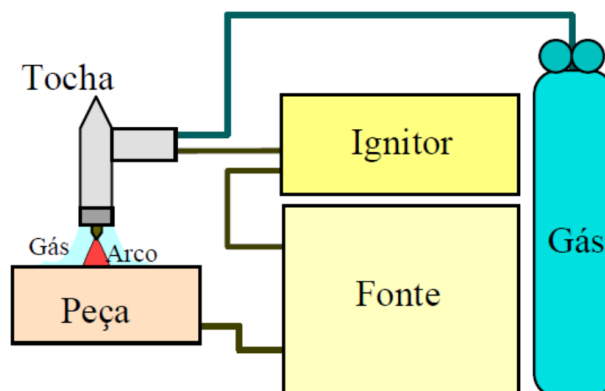


Figura 6: Esquema de equipamento básico para soldagem TIG  
 Fonte: (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2007)

### 2.3.3.3 Variáveis de soldagem

As variáveis de soldagem apresentam uma interação entre si e influenciam na qualidade e no resultado final do cordão de solda.

Segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2007), as variáveis que basicamente determinam o processo são: o comprimento do arco, a corrente de soldagem, a velocidade de soldagem e a vazão do gás de proteção.

O intervalo de espaço entre a ponta do eletrodo e o metal de base, é conhecido como o comprimento do arco e tem atuação direta na geração do cordão de solda. Arcos muito longos, ou muito curtos se tornam instáveis e favorecem a formação de descontinuidades, como porosidades.

As fontes de energia elétrica fornecem valores de corrente de soldagem que são ajustáveis para cada tipo de aplicação. Essas fontes de energia podem ser fornecidas em forma de corrente contínua (CC), corrente alternada (CA) ou corrente pulsada, onde a intensidade de cada uma influencia diretamente na emissão de elétrons e na penetração do cordão de solda.

Sabendo que no arco elétrico os polos não se comportam de igual maneira, a polaridade do arco influencia na dimensão e na forma da poça de fusão.

Na corrente contínua com polaridade direta ou negativa (CC-), conforme figura 7, os elétrons fluem em altas velocidades do eletrodo que é o cátodo (polo negativo) para a peça que é o anodo (polo positivo), aquecendo consideravelmente o metal de base e permitindo a utilização de valores altos de corrente, sem que o eletrodo venha a se fundir.

Um exemplo, dessa aplicação de corrente é quando se deseja a formação de um cordão mais profundo.

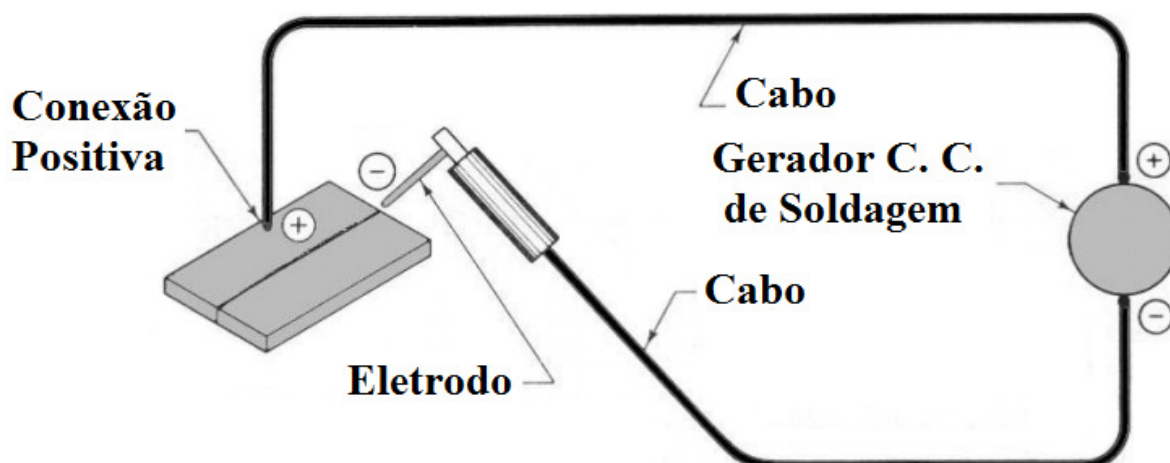


Figura 7: Esquema de corrente contínua com polaridade direta  
Fonte: (NERIS, 2012)

Na corrente contínua com polaridade inversa ou positiva (CC+), como mostrado na figura 8, os elétrons fluem da peça (catodo) para o eletrodo (anodo), causando uma maior concentração de calor no eletrodo. Por esse motivo o eletrodo utilizado na soldagem com corrente contínua com polaridade inversa deve ter diâmetro maior, visando evitar o superaquecimento e conseqüentemente possibilidade de contaminação da poça de fusão pelo eletrodo de tungstênio.

Essa corrente é utilizada quando se deseja um cordão de solda com penetração mais rasa, sendo utilizada na união de peça de pequenas espessuras.

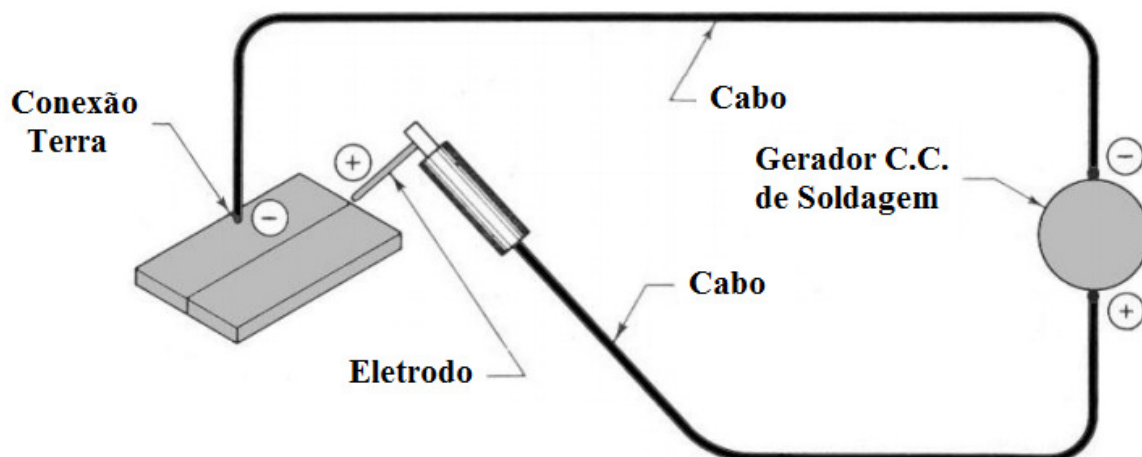


Figura 8: Esquema de corrente contínua com polaridade inversa  
Fonte: (NERIS, 2012)

Equipamentos modernos de soldagem TIG possibilitam a utilização de corrente contínua pulsada, onde a mesma varia entre um valor mínimo (corrente de base) e um valor máximo (corrente de pico), como mostrado na figura 9.

Segundo BRACARENSE (2000), na corrente pulsada ocorre a variação da corrente do arco entre um valor mínimo (background) e um máximo, de forma repetitiva. Sendo possível controlar o tempo de valor mínimo, o tempo de pulso e os valores de corrente.

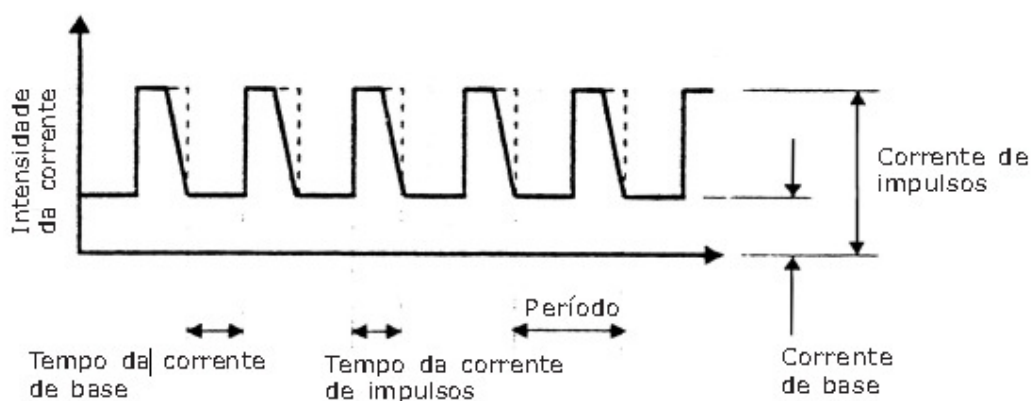


Figura 9: Gráfico de tensão x corrente pulsada  
Fonte: (SENAI-RJ, 2009)

A corrente pulsada permite a formação de um cordão de solda composto por pontos, onde o calor se dissipa de forma mais rápida e a poça de fusão se solidifica entre os pulsos, apresentando boa penetração do cordão de solda e sendo muito utilizada nos processos automatizados.

A corrente alternada (CA), varia do pico ao vale, ou seja, da parte superior que representa a polaridade positiva, à parte inferior a polaridade negativa. Combina boa penetração com limpeza, ou seja, a retirada superficial de óxidos do metal de base. O arco elétrico promove essa limpeza, na ocasião em que o eletrodo se apresenta como anodo.

Os elétrons e os íons fluem tanto da peça para o eletrodo, como vice e versa.

Na figura 10 é possível observar os efeitos dos tipos de corrente e polaridades na soldagem TIG.

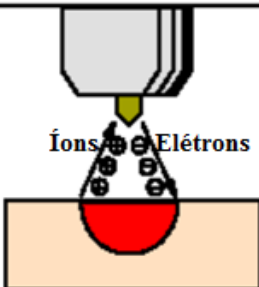
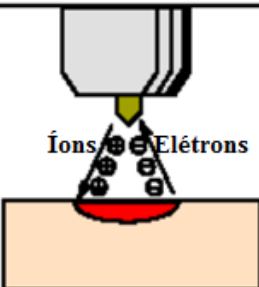
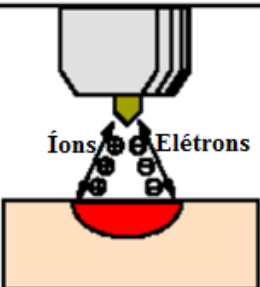
Tipo de Corrente	CC-	CC+	CA
Fluxo de Elétrons e Íons:			
Perfil do Cordão			
Limpeza de Óxido	Não	Sim	Sim (meio ciclo)
Balanco de Calor (aprox.):	70% na peça 30% no eletrodo	30% na peça 70% no eletrodo	50% na peça 50% no eletrodo

Figura 10: Efeito do tipo de corrente e polaridade na soldagem TIG  
Fonte: Tabela redigida da obra (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2007)

A velocidade de soldagem é a velocidade de avanço, que além de influenciar na largura e na profundidade do cordão de solda é um dos fatores que define a produtividade e conseqüentemente o custo do processo. Velocidades de soldagem mais rápidas resultam em um processo mais produtivo e eficiente, porém há casos,

em que se deseja excelência em qualidade, passando a velocidade de avanço a ser apenas uma resultante do processo de soldagem.

A velocidade de soldagem afeta a largura e a profundidade do cordão de solda, velocidades mais altas tendem a resultar em cordões de menor profundidade e menor largura.

Na hora da escolha da velocidade de trabalho, deve haver cautela, pois velocidades muito elevadas podem resultar descontinuidades.

A vazão do gás de proteção a ser utilizada, deve ser um valor adequado, nem muito baixo e nem muito elevado.

A vazão do gás de proteção compromete a qualidade do cordão de solda. Quando se trabalha com uma vazão muito baixa pode haver o aparecimento de porosidades no cordão, devido à proteção inadequada e quando se trabalha com uma vazão muito elevada, essa vem a encarecer o custo do processo.

#### 2.3.3.4 Variações do processo TIG

Algumas variações foram desenvolvidas no processo de soldagem TIG, as quais podemos citar: TIG com chanfro estreito (*Narrow Gap*), TIG com adição de arame quente (*Hot –Wire*) e TIG com cabeça orbital.

##### **a) Soldagem TIG com chanfro estreito:**

A soldagem TIG com chanfro estreito (*Narrow Gap*), não consiste de um processo e sim de uma técnica. Segundo VIEIRA (2012), a soldagem com chanfro estreito, pode ser utilizada em vários processos de soldagem a arco, como o MIG/MAG, o arco submerso e o próprio TIG.

Essa técnica foi desenvolvida com intuito de reduzir a quantidade de material depositado no chanfro, na soldagem de topo de chapas espessas. Alguns cuidados

são necessários para garantir uma solda de qualidade, como o preparo da confecção do chanfro e o correto deslocamento da tocha.

Sendo responsável pela alimentação do eletrodo e do gás de proteção, a tocha se move livremente dentro do chanfro.

Segundo VIEIRA (2012), o projeto de construção de uma tocha é complexo, visto que ela transita dentro do chanfro, onde o mesmo apresenta pequenas distâncias entre as suas laterais, havendo a necessidade, portanto, de uma tocha que seja capaz de se movimentar livremente, sem tocar nas paredes laterais do chanfro, a fim de evitar danos.

O posicionamento da tocha dentro do chanfro é uma medida adotada com o intuito de garantir a fusão das bordas do chanfro das peças e evitar a falta de penetração nas laterais do chanfro. São utilizados dispositivos especiais, como bicos de contato móveis, para facilitar a operação.

A soldagem em chanfro estreito pelo processo TIG é feita com um maior número de passes, já que as chapas a serem unidas apresentam grandes espessuras. A figura 11 demonstra a formação da solda, com vários passes pelo processo TIG com chanfro estreito.



Figura 11: Esquema da soldagem TIG com chanfro estreito

Fonte: [http://www.esab.com/videos/English/HNG%20Intro\\_MP4%2020130404.mp4](http://www.esab.com/videos/English/HNG%20Intro_MP4%2020130404.mp4)

**b) Soldagem TIG com adição de arame quente:**

Segundo OLIVARES e DÍAZ (2016), a Soldagem TIG com adição de arame quente (*Hot-Wire*) foi desenvolvida na década de 1960 e essa técnica tinha como objetivo aumentar a taxa de deposição do processo TIG.

No processo de soldagem TIG existem dois tipos de alimentação automática de arames distintos, um conhecido como “*Cold-Wire*” (arame frio) e outro como “*Hot-Wire*” (arame quente), que consiste no pré-aquecimento do arame, pela resistência à passagem de corrente elétrica (efeito Joule).

No processo TIG convencional com metal de adição, em formato de fio, o metal é introduzido frio (temperatura ambiente) na poça de fusão, e com isso a energia do arco se torna necessária para derretê-lo, reduzindo dessa forma a eficiência do processo. No processo TIG utilizando a técnica *Hot-Wire*, o fio é aquecido até ao ponto de fusão e adicionado à poça de solda, geralmente por trás do eletrodo de tungstênio (HENON, 2018).

A redução de energia requerida para fundir o material de adição, é a grande vantagem na utilização do arame pré-aquecido. Podendo-se utilizar maiores velocidades de alimentação comparado ao arame frio (DELGADO, 2000).

Muito aplicada na soldagem de ligas de cobre e de níquel, aços inoxidáveis e em aço carbono de baixa liga. A figura 12, demonstra o princípio de soldagem TIG *Hot –Wire*.

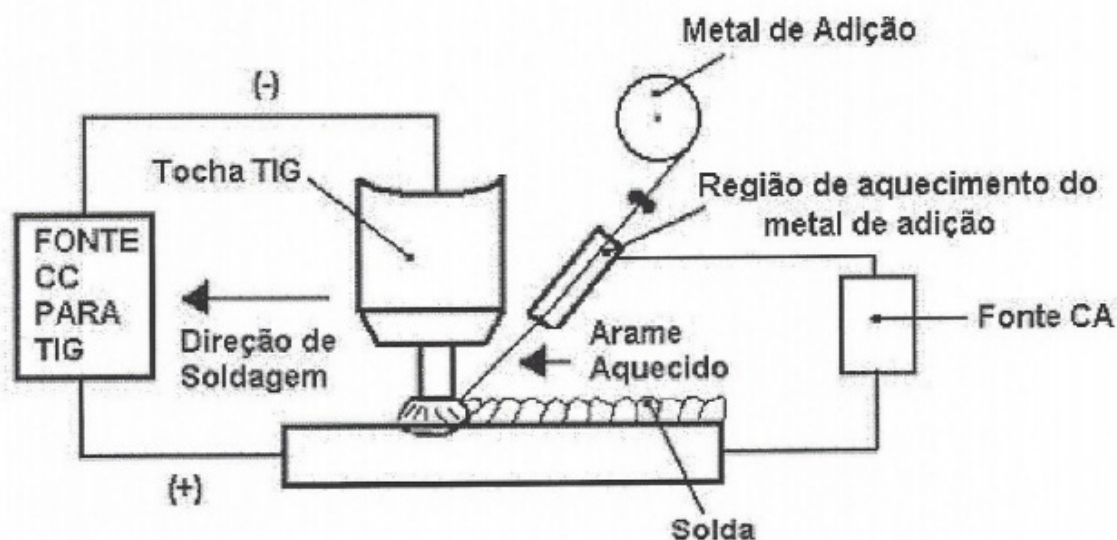


Figura 12: Esquema da soldagem TIG Hot-Wire

Fonte: Adaptado de (FILHO, 2007)

### c) Soldagem TIG com cabeça Orbital:

Devido às falhas apresentadas nas tubulações das aeronaves durante os voos, engenheiros da indústria aeroespacial desenvolveram na década de 1960, a soldagem orbital TIG, com o intuito de proporcionar soldas de união de tubos de linhas hidráulicas com maior robustez (CUNHA, 2008).

A constituição desse processo se dá basicamente por uma unidade de controle, uma fonte de soldagem e um cabeçote orbital. Sistemas modernos com controle baseado em sistemas computadorizados permitem o armazenamento de informações referentes às variáveis de soldagem. A unidade de controle é encarregada de controlar todas as variáveis do processo, como corrente e velocidade de soldagem e de acordo com a posição do eletrodo, alterá-las em relação do tubo. A fonte de soldagem a ser empregada no equipamento, deve ser compacta e portátil no sentido de atender aos requisitos de portabilidade necessários pelo equipamento. A corrente deve ser do tipo constante, podendo variar somente entre modo corrente contínua constante, pulsada ou alternada.

Nesse processo de soldagem os tubos a serem soldados e o cabeçote de soldagem permanecem estacionários, o que rotacional ao redor dos tubos é eletrodo de tungstênio, por meio de sistemas de soldagem orbital.

O tubo costuma ser dividido em setores, por um conjunto de posições horárias, sendo estabelecidos parâmetros apropriados para cada setor, por causa da poça de fusão, que apresenta comportamento variado em função da posição. Após estabelecidos os parâmetros o manipulador robótico é programado e ele mesmo altera os valores durante o processo (PAES, 2016).

Na figura 13, podemos observar um manipulador robótico para soldagem TIG orbital.



Figura 13: Manipulador robótico para procedimentos de soldagem orbital  
Fonte: (Paes, 2016)

#### 2.3.3.5 Características (vantagens e limitações)

O processo TIG se caracteriza como um dos mais versáteis, sendo eficaz na soldagem da maioria dos metais existentes e ligas em diferentes espessuras. Apresenta ótimo controle sobre a poça de fusão, minimizando a zona termicamente afetada pelo calor e possíveis distorções.

Apesar de o processo produzir soldas de alta qualidade e com excelente acabamento, requerendo mínima ou nenhuma necessidade de limpeza, ele é relativamente caro, com baixa taxa de deposição (*deposition rate*), ou seja, pequena quantidade de metal é depositado por unidade de tempo refletindo em baixa produtividade e custos relativamente elevados de equipamentos e consumíveis.

#### 2.3.3.6 Aplicações

A soldagem TIG é muito utilizada para a união de materiais que apresentam dificuldade em serem soldados por outros processos, em circunstâncias onde o calor cedido a peça deve ser rigorosamente controlado e em aplicações onde o mais importante é a qualidade da junta soldada e não o seu custo de produção.

Aplicável em vários tipos de materiais, como zircônio, ligas de alumínio, magnésio, e em ligas de aços inoxidáveis. Utilizada na soldagem de tubulações, no reparo de peças, na soldagem de peças leves, de precisão e de pequenas espessuras.

Sendo um processo muito difundido e utilizado na indústria naval, química, aeroespacial e nuclear.

#### 2.3.4 Soldagem por resistência e pressão

Segundo a Revista ESAB (2005), o primeiro modelo de soldagem por resistência data o ano de 1856, quando James Joule, conseguiu soldar arames de cobre por meio de aquecimento por resistência elétrica.

O primeiro transformador de soldagem por resistência, foi criado pelo americano Elihu Thomson em 1886, que no ano seguinte patenteou o processo. A figura 14 exhibe o transformador de soldagem.

Mais tarde, Thomson desenvolveu máquinas para soldagem por costura, por pontos, por projeção e de topo pela ação de faíscas.

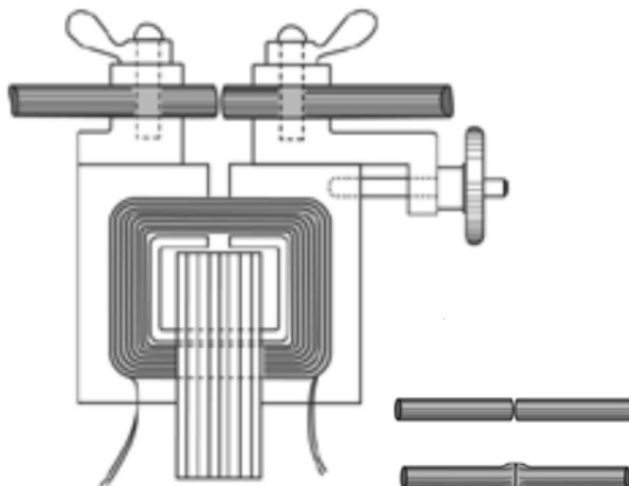


Figura 14: Transformador de soldagem por resistência criado por Thomson  
Fonte: ( Revista ESAB, 2005)

#### 2.3.4.1 Conceito

Segundo MARQUES e MODENESI (2000), a soldagem por resistência é o processo pelo qual a formação do cordão de solda, se dá pela resistência à passagem de corrente elétrica pelas peças. Essa resistência gera calor e sob a aplicação pressão, ocorre à deformação localizada, gerando a solda.

Segundo BRACARENSE (2000), as peças serem soldadas são unidas entre si em estado pastoso (ou parte fundidas), sem a utilização de metal de adição, através da aplicação de pressão.

As peças a serem unidas são pressionadas uma contra a outra, por intermédio de um eletrodo não consumível. A corrente elétrica passa pelo eletrodo até a região de junta das peças a serem unidas. Essa junta oferece uma resistência à passagem de corrente elétrica, e essa resistência gera uma quantidade de calor, que é proporcional ao tempo.

A figura 15, expõe o princípio de funcionamento da soldagem por Resistência e Pressão.

Segundo BATISTA (2001), uma característica importante desse processo é a versatilidade na união de diversos tipos de materiais, com diferentes formatos e espessuras.

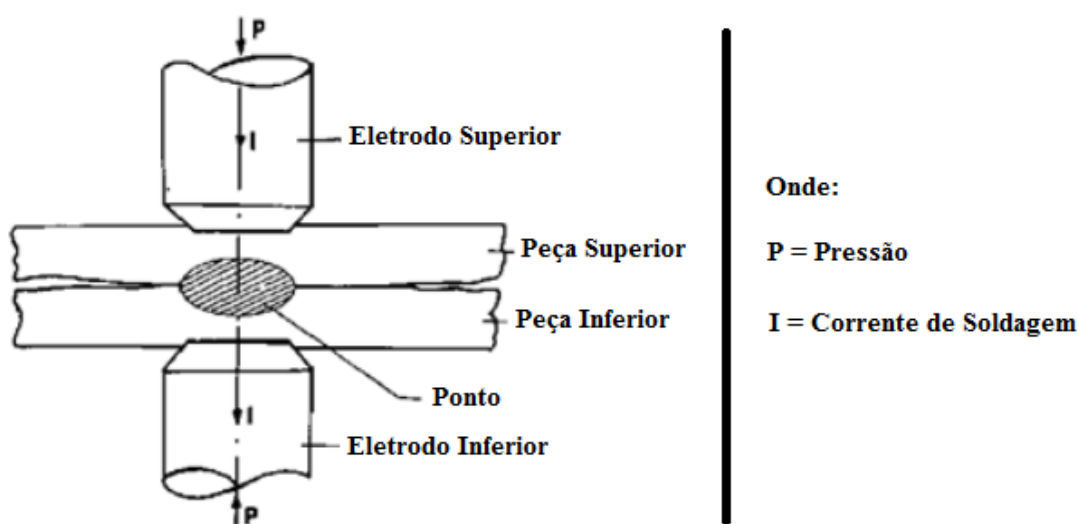


Figura 15: Esquema do princípio de funcionamento da soldagem por resistência  
 Fonte: (WAINER, BRANDI e MELLO 2004)

#### 2.3.4.2 Equipamentos

O equipamento utilizado para a soldagem por resistência e pressão consiste basicamente em: um sistema elétrico, um mecânico e um de controle.

Fontes de energia, conexões e o eletrodo constituem o sistema elétrico. As máquinas de soldagem por centelhamento possuem um dispositivo responsável por promover o centelhamento entre as peças a serem unidas.

O sistema mecânico é constituído por dispositivos que fixam as peças e aplicam pressão. Essa aplicação de pressão pode vir a ser manual, quando a produção é muito variada, sendo necessária a alteração contínua dos parâmetros de

soldagem, ou, pode ser pneumática ou hidráulica, quando a produção é especializada em um determinado tipo de produto.

O sistema de controle atua sobre as variáveis e os parâmetros, como por exemplo, no tempo de passagem da corrente elétrica de soldagem.

Na figura 16, podemos observar esquematicamente uma máquina de solda por resistência e pressão.

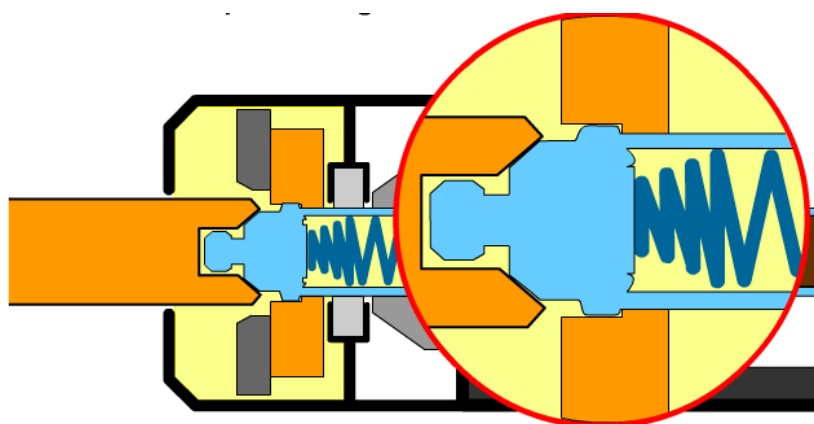


Figura 16: Esquema da máquina de solda por resistência e pressão  
Fonte: (JUNQUEIRA, 2014)

#### 2.3.4.3 Variáveis de soldagem

As variáveis essenciais na soldagem por resistência e pressão são: a corrente elétrica, o tempo, a força e a forma dos eletrodos.

A corrente elétrica tem uma forte influência no cordão de solda. Ela apresenta um valor mínimo e um valor máximo, que dependem da espessura das peças do material que as formam.

O eletrodo conduz a corrente elétrica até a junta onde ocorre a resistência a passagem da corrente elétrica, entre peça/eletrodo e peça/peça, e esta resistência

gera calor e esse aquece a região a ser soldada. Se uma corrente abaixo do limite mínimo for utilizada, não será possível atingir o aquecimento adequado na junta havendo a formação de uma solda de má qualidade.

Entretanto se for utilizado um valor superior ao limite máximo, ocorrerá o aquecimento total das peças que estão entre o eletrodo e dessa forma ocorrerá deformação plástica do material, algo que não é desejado.

A quantidade de calor gerado na junta é proporcional ao tempo de passagem da corrente elétrica. É denominado tempo de soldagem, a duração de fornecimento de corrente elétrica para a realização da solda.

O eletrodo concede forma à junta soldada, sendo responsável por conduzir a corrente elétrica e por transmitir a força mecânica de compressão (pressão), exercida nas peças a serem unidas, necessária para a realização da solda.

Segundo WAINER, BRANDI e MELLO (2004), quando as peças a serem soldadas, já se encontram unidas mecanicamente através da pressão exercida pelo eletrodo, pode-se dizer que a resistência entre esse eletrodo é um conjunto de cinco resistências elétricas, conforme figura 17.

A resistência R1 é a de contato entre o eletrodo superior e a peça superior

A resistência R2 é a da peça superior

A resistência R3 é a de contato entre as peças superior e inferior

A resistência R4 é a da peça inferior

A resistência R5 é a de contato entre o eletrodo inferior e a peça inferior

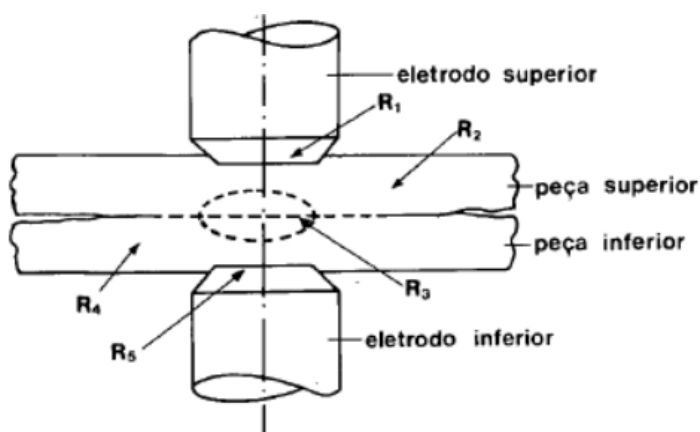


Figura 17: Conjunto de resistências  
Fonte: (WAINER, BRANDI e MELLO, 2004)

Por trabalhar em condições desfavoráveis, o eletrodo precisa ser constituído de um material que apresente elevada condutibilidade térmica e elétrica combinadas com boa resistência mecânica, sendo constituído geralmente de ligas à base de cobre termicamente tratadas, para permitir que ele resista à deformação proveniente das altas temperaturas e pressão mecânica de trabalho.

Apesar de não ser consumível, ele se desgasta e deve ser substituído, pois sua geometria e desempenho afetam diretamente na qualidade do cordão de solda.

#### 2.3.4.4 Variações do processo por resistência e pressão

Existem vários processos de soldagem por resistência e pressão. Segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2007), tais processos são: soldagem por pontos, soldagem por projeção, soldagem por costura e soldagem topo a topo. A figura 18, demonstra alguns dos processos por resistência e pressão.

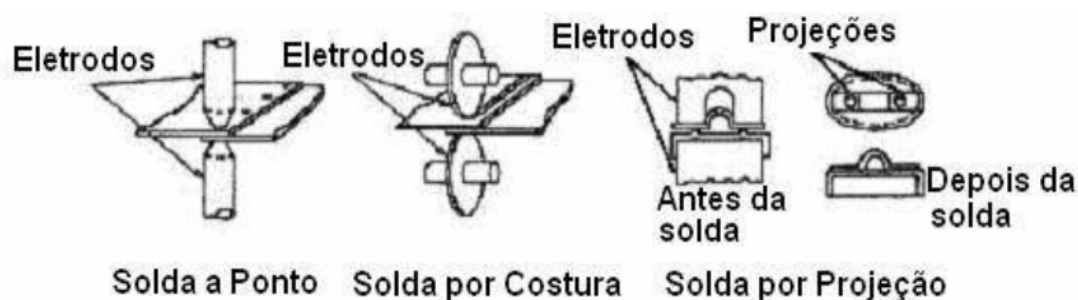


Figura 18: Tipos de processo por resistência

Fonte: (MAGDALENA e SILVA, 2014)

#### a) Soldagem por pontos:

Processo no qual as peças sobrepostas a serem unidas são pressionadas uma contra a outra através de eletrodos movimentados por forças hidráulica, mecânica, pneumática, ou uma mistura delas. Posteriormente, um curto pulso de alta corrente e baixa tensão é fornecido, passando pelos eletrodos, não consumíveis, por meio do metal base.

Uma quantidade de calor proporcional ao tempo e a intensidade da corrente é gerado nas superfícies de contato das peças a serem unidas, sendo esse calor oriundo da resistência do metal base à passagem da corrente elétrica.

Cessado o fluxo de corrente, os eletrodos ainda continuam exercendo pressão sobre as superfícies das peças, no tempo em que o metal de solda rapidamente se resfria e em seguida se solidifica. Após cada ponto de solda os eletrodos são retraídos. O contorno da face e o diâmetro dos eletrodos limita a forma das lentes de solda (BRANCO, 2004).

O ponto de solda (*nugget*) é gerado na região de contato dos eletrodos com a chapa durante o tempo de soldagem, enquanto a corrente de soldagem passa de um eletrodo ao outro através das chapas, e em virtude da resistência apresentada, será gerado o calor necessário para a fusão dos materiais, conforme figura 19.

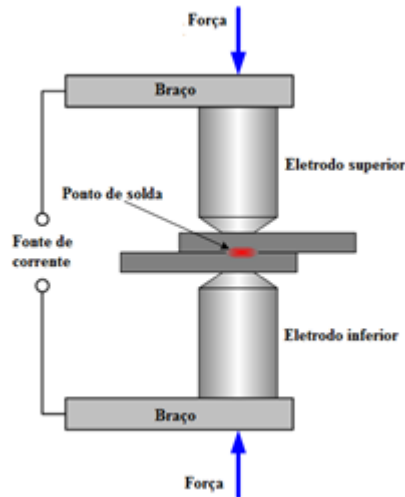


Figura 19: Esquema da soldagem por ponto  
 Fonte: (KOPELIOVICH, 2012)

Com a possibilidade de gerar vários pontos de solda através de múltiplos eletrodos, a soldagem por ponto é muito atrativa em linhas de produção automatizadas, sendo o processo mais utilizado na união de chapas para fabricação de carrocerias automotivas por meio de robôs industriais (DIAS, 2011).

#### **b) Soldagem por projeção:**

A soldagem por projeção é o processo utilizado na soldagem de peças com saliências, provenientes do processo de fabricação das mesmas. Este processo é utilizado quando as peças a serem unidas, apresentam espessuras muito diferentes entre si ou quando se tem a imposição de precisão do posicionamento de uma peça em relação a outra. A peça que possui a saliência em seu material de base, determina a quantidade de massa que será fundida. A fusão ocorre no local em que a saliência dessa peça está em contato com a outra peça. Para que a execução do processo ocorra de forma correta são importantes o alinhamento e a distância de contato dos eletrodos até o local da saliência (BATISTA, 2011).

O processo de soldagem por projeção é semelhante ao processo de soldagem a ponto, eles se diferenciam pela localização das marcas de solda, que é determinada pela projeção ou *embosse* em uma das superfícies de fusão. Duas ou

até mais soldas à projeção podem vim a ser realizadas simultaneamente com um mesmo par de eletrodos.

O termo *embosse* deriva do inglês e significa a marca deixada pela solda neste processo.

Este tipo de soldagem é especialmente utilizado na união de pequenas peças usinadas, forjadas ou estampadas, que possuam uma ou mais saliências. Possibilita que parafusos, pinos e porcas sejam facilmente soldados em uma chapa de pequena espessura (COLOMBARI, 2004).

### **c) Soldagem por costura:**

A solda por costura é uma modificação da solda à ponto, onde uma série de marcas sobrepostas são produzida com o intuito de se obter uma solda contínua. Geralmente ambos ou pelo menos um dos eletrodos são circulares, eles giram enquanto a junta que será soldada passa entre eles. A solda por costura pode vim a ser produzida em um equipamento de solda a ponto, mas a operação será mais lenta. A solda por costura é preferencialmente utilizada para juntas contínuas impermeáveis a líquidos e gases, em aplicações como tanques de combustível para automóveis, extintores de incêndios e fabricação de tubos (COLOMBARI, 2004).

Este tipo de solda pode ser efetuado por pontos em sequência, onde nesse caso os eletrodos são substituídos por discos. Sua aplicação se dá em produto que necessita de uma união contínua. Durante a soldagem os discos giram sendo percorridos pela corrente de solda e devem manter o contato constante com a peça a ser soldada até o final da solda, aplicando força, conforme figura 20.

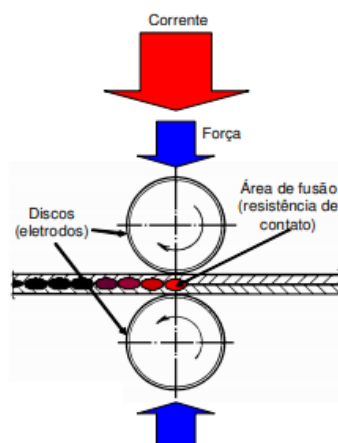


Figura 20: Esquema do processo de soldagem por costura  
Fonte: (BATISTA,2011)

#### d) Soldagem topo a topo

A Soldagem topo a topo é dividida em dois grupos. Esses grupos são: resistência pura ou por centelhamento.

##### a. Por resistência pura:

Processo utilizado para materiais com seção redonda, quadrada, ou seja, de forma geométrica. A formação da solda se dá pelo calor gerado na junta devido, a resistência à passagem de corrente elétrica, onde posteriormente as peças são prensadas uma contra a outra e a solda é formada em toda a superfície de contato.

##### b. Por centelhamento:

As peças a serem unidas são aproximadas uma da outra, sem que suas superfícies se toquem. A energia elétrica é ligada e as peças se aproximam com velocidade constante, essa aproximação gera o surgimento de um arco elétrico. No momento em que toda as superfícies a serem unidas se encontram aquecidas, a corrente é desligada e há a aplicação de pressão sendo as peças pressionadas uma contra a outra e por meio de deformação o cordão de solda é formado.

#### 2.3.4.5 Características (vantagens e limitações)

O baixo tempo para a realização da solda, fração de segundos é uma das principais vantagens desse processo, possibilitando altos níveis de produção. Outras vantagens que podem ser mencionadas são: a não necessidade de utilização de material de adição, a confiabilidade e a repetibilidade do processo.

Uma das desvantagens desse processo é o elevado investimento e a pouca portabilidade de equipamentos. Sua utilização apresenta limitações quanto à espessura máxima das peças a serem soldadas e necessidade do emprego de eletrodo de ligas de cobre, que por possuir elevada condutibilidade térmica e elétrica combinada à boa resistência mecânica tem um valor de custo elevado.

#### 2.3.4.6 Aplicações

O processo de soldagem por resistência e pressão é um dos métodos mais empregados atualmente, servindo para variadas formas, espessuras e tipo de materiais, além de fácil adaptação de equipamentos. A aplicação varia conforme os métodos do processo aplicado assim para cada método têm uma área de aplicação com mais incidência.

O processo de soldagem por resistência e pressão por ponto é, por exemplo, aplicado com regularidade na união de chapas de aço relativamente finas, sendo muito utilizado na indústria automotiva.

Dentre as áreas de aplicação o processo de soldagem por resistência e pressão está se destacando atualmente na indústria automobilística, de eletroeletrônicos, de equipamentos ferroviários, de tubulações e na fabricação de eletrodoméstico.

### 3. METODOLOGIA

Considerando o objetivo central do trabalho, com foco na comparação dos processos de soldagem TIG para Resistência e Pressão em varetas de combustível de ligas de zircônio, desenvolvemos a estrutura do nosso projeto baseado nos seguintes passos metodológicos:

#### 3.1 Determinação do Objeto de Estudo

A partir da seleção da temática voltada para o estudo comparativo entre o processo de soldagem TIG e o processo de soldagem por resistência e pressão, assumindo como meta a escolha da melhor opção para o setor nuclear, nossa proposta considerou a exigência de um maior controle, o tempo de produtividade e a realização dos ensaios destrutíveis e não-destrutíveis.

#### 3.2 Estabelecimento das Fontes de Dados e de Consulta Bibliográfica

As fontes de dados principais foram assumidas nos textos provenientes de livros especializados, artigos científicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado, catálogos técnicos, normas internas regulamentadoras para ensaios em laboratório.

#### 3.3 Seleção do Modelo de Tecnologia

Algumas vertentes tecnológicas foram utilizadas em paralelo com o estudo comparativo dos processos de soldagem, ampliando as possibilidades de entendimento do processo mais adequado ao pressuposto desejado. As características da solda centralizaram nossos estudos

na geometria da solda formada, no tempo de processo e nos ensaios destrutíveis e não-destrutíveis.

### 3.4 Consolidação dos Parâmetros Básicos do Projeto

Com o aprofundamento dos estudos conseguimos identificar os componentes qualitativos e quantitativos da comparação entre os processos de soldagem, aprofundando com uma análise estatística dos dados obtidos nos ensaios. O que nos leva a optar pelo processo de soldagem por Resistência e Pressão como eficaz ao tipo de especificações exigidas na solda das varetas de combustível.

### 3.5 Elaboração do Estudo Técnico Comparativo

O estudo em questão visa comparar detalhadamente a especificidade e a produtividade do processo de soldagem TIG com o processo de soldagem por resistência e pressão. Neste comparativo a produtividade, a qualidade e a exposição do funcionário foram fundamentais para a avaliação técnica e construção do modelo.

### 3.6 Elaboração da Especificação Final

Nesse passo, ajustamos os resultados comparativos dos processos de soldagem, mostrando em processo de ensaios e estatisticamente a viabilidade de cada solda.

Com a formatação de um sumário executivo buscamos uma forma sintética de apresentar o conjunto das informações técnicas, conteúdo e resultados recativo ao projeto.

## 4. MATERIAS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

Os materiais que foram utilizados nesse estudo são as ligas de Zircaloy-4 e ZIRLO<sup>®</sup>, ambas fabricadas pela empresa Westinghouse, cujas especificações de composição química estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2 respectivamente.

O Tampão Terminal é confeccionado através do processo de fabricação de usinagem a partir de barras de Zircaloy-4, podendo ser produzidas grandes quantidades, utilizando um torno automático. O Tubo de Revestimento é constituído de ZIRLO<sup>®</sup>, sendo fabricado pelo processo de laminação de tubos sem costura.

Foram utilizados corpos de prova formados pelo Tampão Terminal e pelo Tubo de Revestimento. Estes corpos de prova servem para validar o processo de soldagem das varetas combustíveis, representando a própria estrutura da vareta.

Para confecção de corpos de prova, o Tubo de revestimento foi seccionado em seguimentos de tamanho especificado, atendendo as dimensões de projeto e posteriormente foi montado e depois soldado ao Tampão Terminal via processo de soldagem TIG ou por Resistência e Pressão.

A figura 21, representa o tubo de revestimento

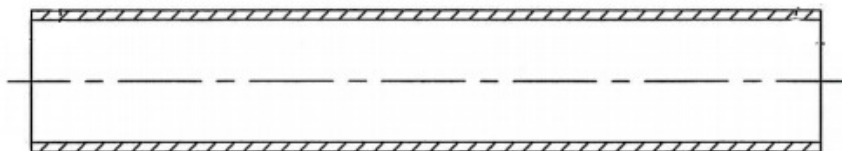


Figura 21: Representação esquemática do tubo de revestimento  
Fonte: Desenvolvidos pelos Autores (2018)

Na figura 22, podemos observar o tampão terminal utilizado no processo de soldagem TIG. As setas indicam a região a qual o tampão se unirá ao tubo de revestimento, através da formação do cordão de solda.

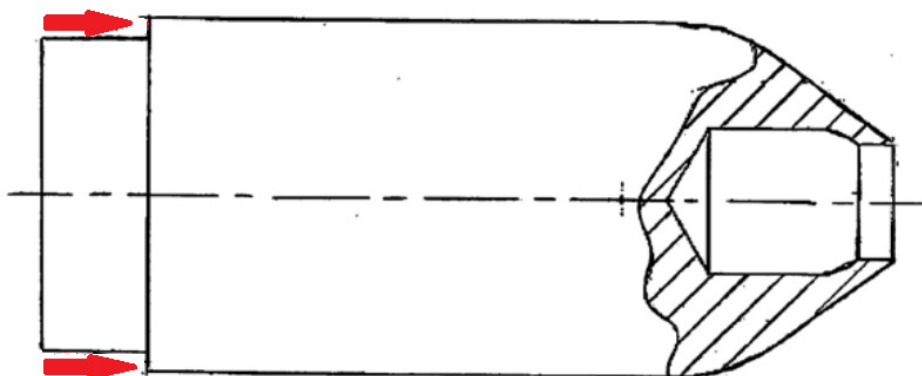


Figura 22: Representação do tampão terminal para solda TIG, com indicação da região que será soldada

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

A figura 23, exibe o tampão terminal utilizado no processo de soldagem por resistência e pressão, com as setas indicando a região a qual o tampão se unirá ao tubo de revestimento, através da formação do cordão de solda.

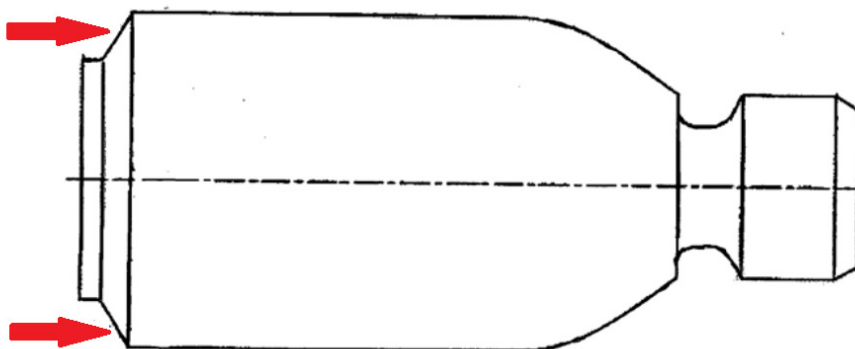


Figura 23: Representação do tampão terminal para solda por resistência e pressão, com indicação da região que será soldada

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

## 4.2 Métodos

#### 4.2.1 Execução da soldagem TIG

Antes de dar início a execução da soldagem, realizou-se a preparação da junta, onde o Tubo de Revestimento recebeu um chanfro através do processo de usinagem.

A soldagem TIG autógena semiautomática foi realizada em uma câmara inerte fechada, empregando o argônio como gás de proteção, visando diminuir a chance de contaminação pela atmosfera.

Uma pinça prendia o Tubo de Revestimento que já se encontrava encaixado com o Tampão Terminal. Acoplado na câmara de soldagem estava o eletrodo de tungstênio com adição de óxido de cério (EWCe -2).

As peças a serem unidas eram rotacionadas e a solda teve início em sua corrente máxima, o valor da corrente foi mantido por tempo suficiente para uma volta completa, ocorrendo fusão relativamente calma, seguida de solidificação, o valor da corrente foi então reduzido. Essa redução no valor da corrente foi realizada com o intuito de dar acabamento a solda e evitar descontinuidades, como poros e rechupes.

Os valores utilizados para parâmetros como: corrente de soldagem, velocidade de rotação, pressão interna na câmara, altura do eletrodo, posição do eletrodo em relação à junta, diâmetro e ângulo do eletrodo foram os pré-estabelecidos em projeto.

A realização de cada solda se deu em aproximadamente 2 minutos, levando em consideração o tempo de pré-purga, a formação da solda e o pós-purga. Foram soldados 60 corpos de prova.

A figura 24, mostra como é o interior da câmara fechada de soldagem TIG.

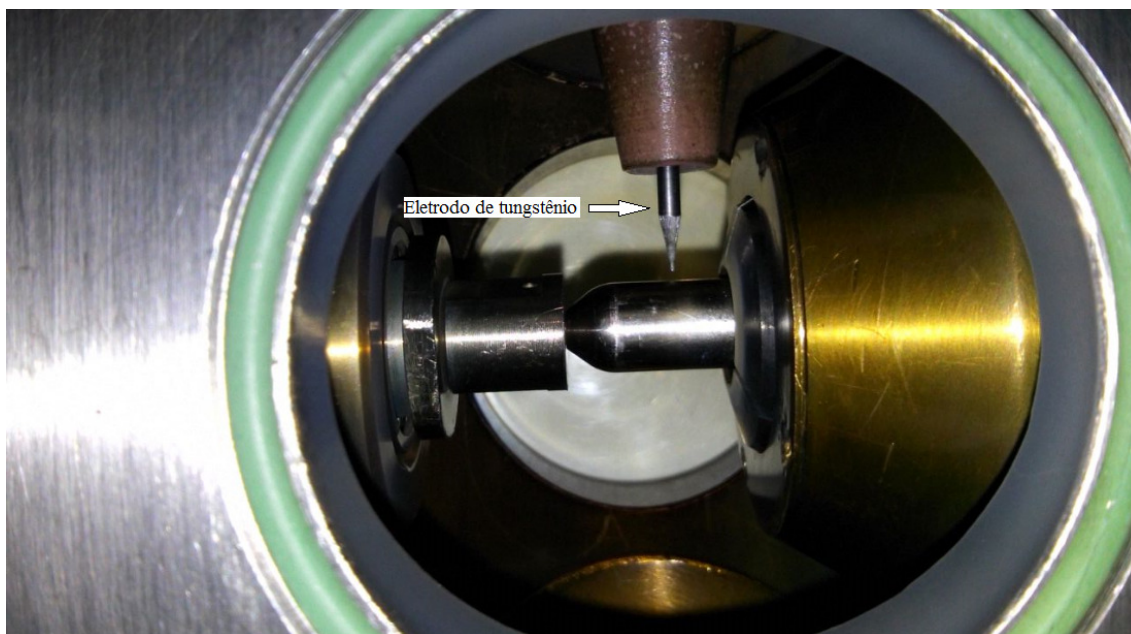


Figura 24: Imagem do interior da câmara de soldagem TIG  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

A figura 25, exibe o eletrodo de tungstênio EWCe-2.



Figura 25: Eletrodo de tungstênio EWCe-2  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Na figura 26, podemos observar a máquina de solda TIG.



Figura 26 máquina de solda TIG  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

#### 4.2.2 Execução da soldagem por resistência e pressão

O processo de Soldagem por Resistência e Pressão automático, utilizado foi o do tipo topo a topo por resistência pura.

As extremidades das peças, onde ocorreria à formação da junta soldada, não necessitaram de chanfro, pois quanto maior fosse o contato entre as duas peças, melhor seria. As superfícies das juntas foram limpas para garantir o perfeito contato elétrico e uma solda uniforme.

Um porta tampão segurava o Tampão Terminal por meio de sucção, a pinça de fixação prendia o Tubo de Revestimento na posição de soldagem e o eletrodo se fechava em cima dele, ocorrendo o contato elétrico, a sucção era então desligada e a extremidade do Tampão ia de encontro a extremidade do Tubo, o calor gerado pela passagem de corrente elétrica e a pressão exercida pelo eletrodo de liga de cobre, deformavam a extremidade das peças, as unindo e gerando a junta soldada.

Os valores utilizados para parâmetros como: os valores de corrente elétrica, a força e preparação dos eletrodos foram os pré-estabelecidos em projeto.

A realização de cada solda aconteceu em aproximadamente 3 segundos. Foram soldados 60 corpos de prova.

A figura 27, mostra a câmara de soldagem por resistência e pressão.

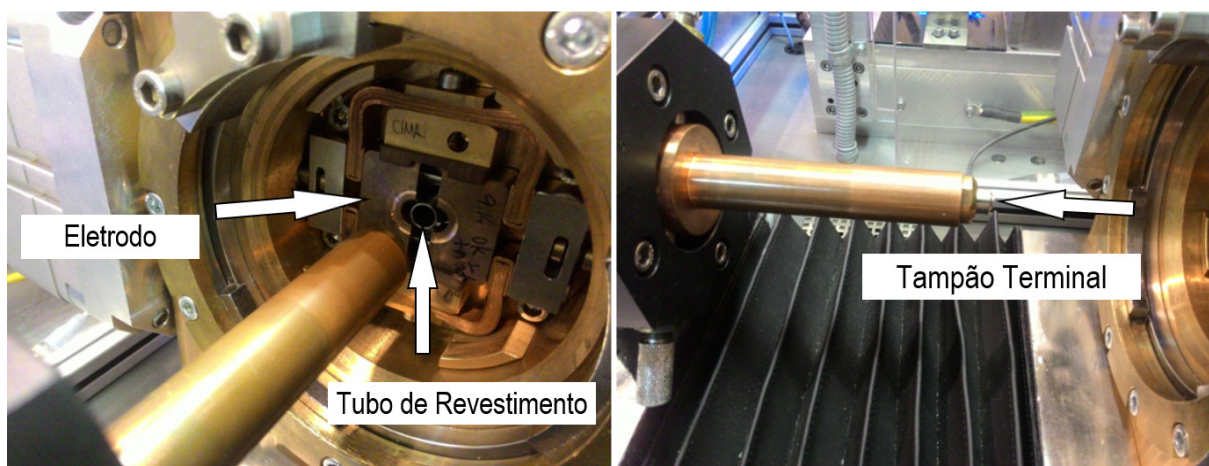


Figura 27: Imagem da câmara de soldagem por resistência e pressão  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

A figura 28, mostra o eletrodo de liga de cobre.

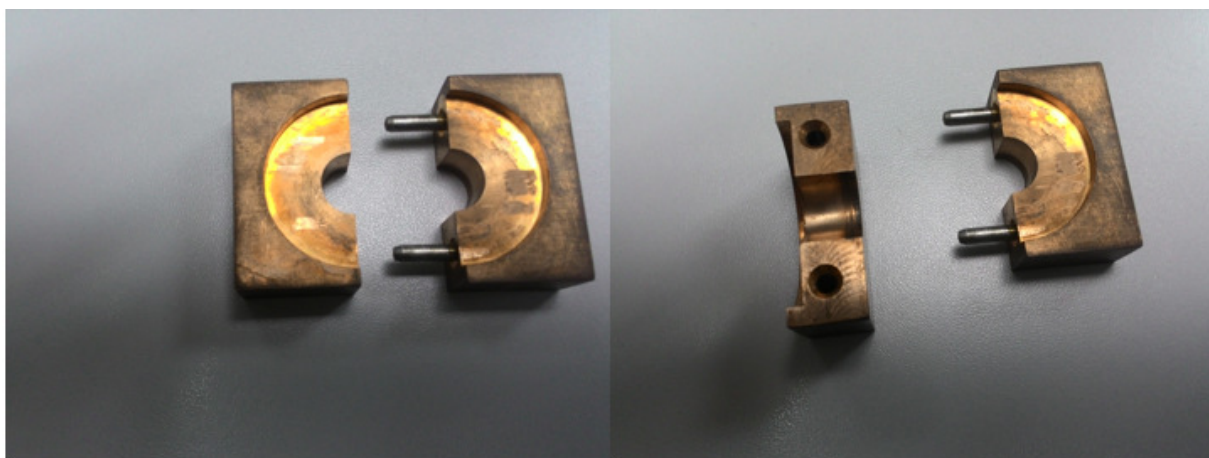


Figura 28: Eletrodo de liga de cobre  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

A figura 29, exibe a máquina de solda por resistência e pressão



Figura 29: Máquina de solda resistência e pressão  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

#### 4.2.3 Ensaios e medições

Os ensaios foram realizados com a pretensão de avaliar a resistência mecânica e a resistência à corrosão dos cordões de solda. Além de propiciar a detecção de possíveis discontinuidades oriundas dos processos de soldagem em ligas de zircônio.

Ensaios não destrutíveis são qualquer tipo de ensaio ao qual um material pode ser submetido, de maneira que não haja alteração de forma permanente de suas propriedades químicas, físicas, mecânicas ou dimensionais, de forma a não prejudicar, nem interferir na sua futura utilização.

Os ensaios não destrutíveis empregados foram: ensaio visual, ensaio dimensional e ensaio radiográfico.

Além dos ensaios não destrutíveis os corpos de prova foram submetidos aos ensaios destrutíveis de arrebentamento, metalográfico e de corrosão.

Ensaio destrutivos são aqueles que deixam alguma marca ou sinal permanente na peça impossibilitando o seu uso futuro.

Em uma solda, uma descontinuidade é qualquer tipo de alteração de sua estrutura esperada. Isto não quer dizer que uma solda que apresente uma descontinuidade é uma solda defeituosa. Esse fator depende para qual utilização a solda será empregada e quais os níveis de descontinuidade aceitáveis foram estabelecidos em projeto.

#### 4.2.3.1 Ensaio aplicados na solda TIG

Na figura 30, é possível verificar como foi o processo de realização da soldagem TIG nos corpos de prova e a sequência de realização dos ensaios.

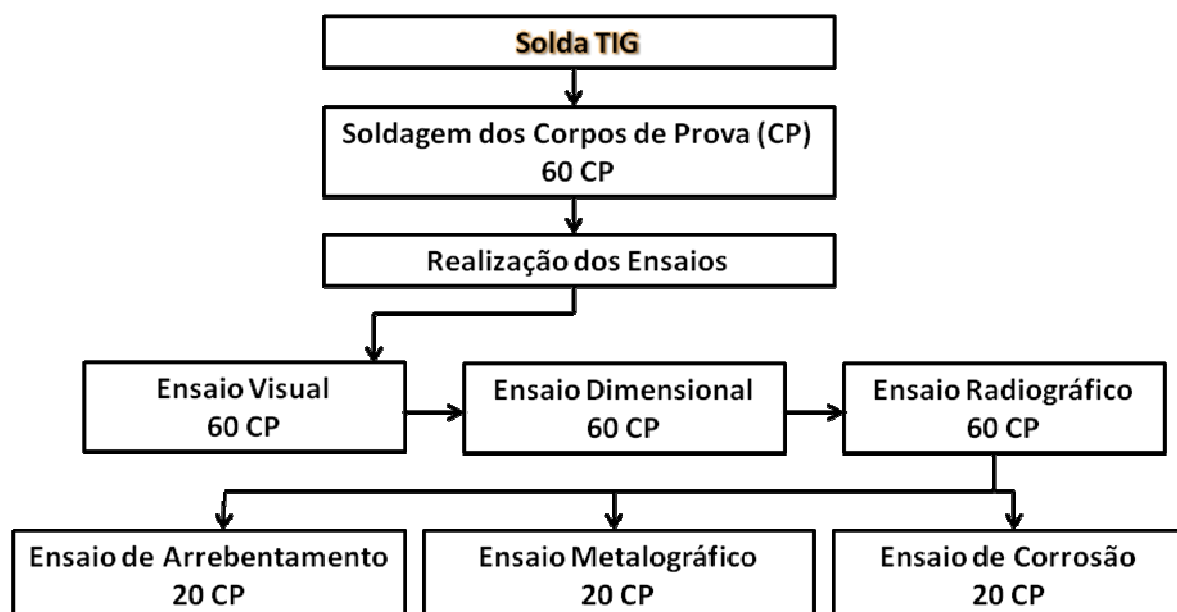


Figura 30: Fluxograma da solda TIG  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

##### 4.2.3.1.1 Ensaio visual

Todos os corpos de prova soldados foram submetidos à inspeção visual com auxílio de uma lupa de 10 vezes de aumento.

Finalizada a operação de soldagem, o ensaio visual tem como finalidade detectar possíveis falhas no cordão de solda (CS). Para a sua aprovação, a superfície do mesmo deve se apresentar lisa e uniforme, livre de impurezas, colorações e descontinuidades como: poros, trincas e mordeduras.

#### 4.2.3.1.2 Ensaio dimensional

O ensaio foi realizado em todos os corpos de prova soldados, utilizando um anel calibrado para verificação da saliência da nervura de solda, ou seja, a altura da convexidade do cordão de solda. O intuito da realização desse ensaio era verificar se a altura da nervura não excedia o valor especificado no projeto.

O diâmetro interno do anel calibrado = diâmetro do tubo + 2 × nervura máxima especificada em projeto.

Na figura 31 abaixo, podemos observar o que é uma nervura de solda.

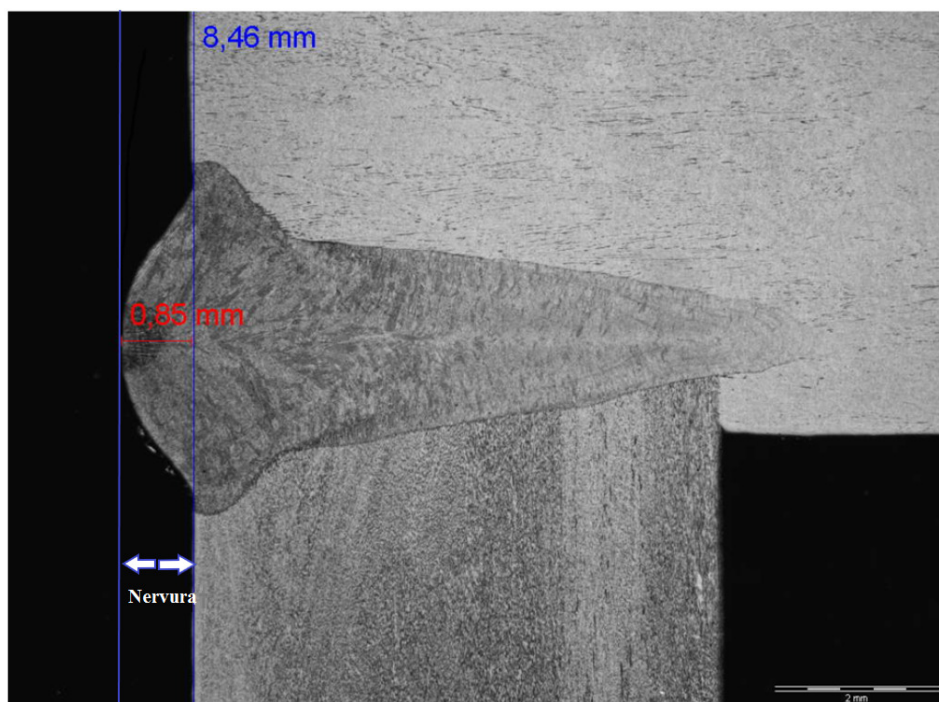


Figura 31: Micrografia demonstrando um reforço de solda  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

O anel calibrado além de verificar se a altura da nervura excede o valor especificado no projeto, tem a função de verificar o batimento, ou seja, se o eixo do Tampão Terminal está alinhado ao eixo do Tubo de Revestimento. A figura 32, exhibe o anel calibrado.

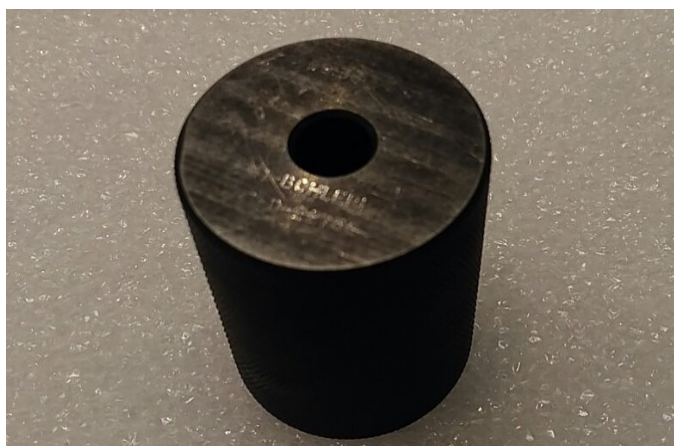


Figura 32: Anel Calibrado  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

#### 4.2.3.1.3 Ensaio radiográfico

Todos os corpos de prova soldados pelo processo TIG foram sujeitos ao ensaio radiográfico. O propósito da realização desse ensaio foi detectar a presença de poros, inclusão de tungstênio, trincas, falta ou excesso de penetração.

O ensaio radiográfico utiliza raios X e raios  $\gamma$  (gama), para revelar a presença de discontinuidades internas na solda. As soldas foram radiografadas em duas posições defasadas  $90^\circ$  uma da outra e em conformidade com a norma ASTM E 1032: Método de Teste Padrão Para Exame Radiográfico De Soldas.

O ensaio se baseia na capacidade dos raios X e  $\gamma$  de penetrarem materiais sólidos, onde acontece a absorção diferenciada de radiação, ou seja, onde existe um vazio ou uma discontinuidade, menos material se encontra presente para absorver a radiação.

Essa absorção diferenciada pode ser detectada por um filme, no qual a radiação, após atravessar o corpo de prova irá impressionar o filme, formando uma imagem do corpo de prova. A chamada radiografia.

#### 4.2.3.1.4 Ensaio de arrebentamento

A realização do ensaio foi de acordo com a DIN 50104. O objetivo desse ensaio era demonstrar que a solda resiste a uma carga mínima. Para o resultado do ensaio, ser considerado positivo, o rompimento deveria ocorrer fora da região do cordão de solda, pois esse deve ser mais resistente que os materiais de base e a pressão de arrebentamento não poderia ser inferior à pressão mínima admissível de projeto.

O ensaio de arrebentamento em corpos de prova soldados pelo processo TIG, foi realizado em um equipamento, onde o corpo de prova (CP) foi pressurizado com óleo hidráulico e submetido à alta pressão até estourar.

O início do ensaio consistiu no recuo do pistão, para a entrada de óleo na câmara, em seguida, o pistão foi acionado e se deslocou comprimindo e exercendo pressão sobre o fluido, o corpo de prova foi então pressurizado pelo fluido e no momento em que a pressão atingiu um valor superior ao limite de resistência do corpo de prova, ocorreu o arrebentamento.

O manômetro registrou a leitura do valor da pressão de arrebentamento. O ensaio foi realizado em 20 corpos de prova soldados.

#### 4.2.3.1.5 Ensaio metalográfico

A preparação metalográfica foi realizada em 20 corpos de prova soldados. A preparação apronta a amostra para posterior avaliação micrográfica em relação à qualidade da solda, verificando a existência de poros, trincas e possíveis inclusões.

Os corpos de prova foram cortados longitudinalmente por meio de um disco de corte abrasivo. O corte foi feito descentralizado de 1 mm em relação ao centro do Tubo de Revestimento, a fim de que um dos lados dos corpos de prova permanecesse com 50% do diâmetro. Posteriormente foi feito um corte transversal, tornando as amostras de tamanho adequado para o embutimento.

As amostras foram preparadas em concordância a norma ASTM E-3. Após o corte, foi realizado o embutimento a quente, onde uma amostra de cada vez, foi colocada em uma prensa de embutimento com baquelite, um tipo de resina sintética, que apresenta dureza relativamente alta.

A figura 33, mostra o embutimento de uma amostra do corpo de prova TIG.



Figura 33: Embutimento da amostra do corpo de prova TIG  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Após o embutimento foi necessário o nivelamento das amostras, através da etapa de lixamento. Foi utilizada uma máquina politriz com lixas de diferentes granulometrias e água como abrasivo. A finalidade dessa operação foi eliminar marcas superficiais, visando obter condições que favorecessem o polimento.

Antes de iniciar o polimento, as amostras foram submetidas à limpeza por meio de aparelho de lavagem por ultrassom, para que ficassem livres de poeiras.

O polimento visa à obtenção de uma superfície polida com aspecto especular. Para realização desta etapa foi utilizada uma máquina politriz automática e como abrasivo uma pasta de diamante.

Finalizado o polimento, as amostras foram atacadas quimicamente, por meio de um reagente ácido, responsável pela visualização da solda no metal de base.

Concluído o ataque, as amostras foram analisadas no microscópio óptico usando objetiva de 50 x de aumento. Além de verificar a existência de descontinuidades e possíveis inclusões, o ensaio metalográfico permite mensurar a dimensão da profundidade de penetração e da largura do cordão de solda.

#### 4.2.3.1.6 Ensaio de corrosão

O ensaio de corrosão foi realizado em um equipamento denominado autoclave, que simula a temperatura e a pressão de um reator. Foram ensaiados 20 corpos de prova soldados e a realização do ensaio foi conforme norma ASTM G2.

Os corpos de prova foram lavados com álcool etílico e secados com auxílio de um secador e posteriormente colocados em suporte de aço inoxidável e imersos na autoclave.

Após a realização do ensaio os corpos de prova foram submetidos à inspeção visual em relação aos aspectos da camada de óxido na região do cordão de solda e na região termicamente afetada.

Para a sua aprovação, os corpos de prova devem se apresentar com a superfície uniformemente escurecida e sem a presença de linhas ou pontos claros, que caracterizam a corrosão. Os pontos claros podem ser óxidos oriundos de inclusões durante a soldagem ou oriundos da própria morfologia do Tubo de

Revestimento. O nível de controle da corrosão deve ser tal que se mantenha a integridade do Tubo de Revestimento, prevenindo uma possível falha por perfuração do mesmo, ou o crescimento dessa corrosão.

#### 4.2.3.2 Ensaios aplicados na solda por resistência e pressão

A figura 34, exibe a o processo de realização da soldagem por resistência e pressão nos corpos de prova e a sequência de ensaios aos quais eles foram submetidos.

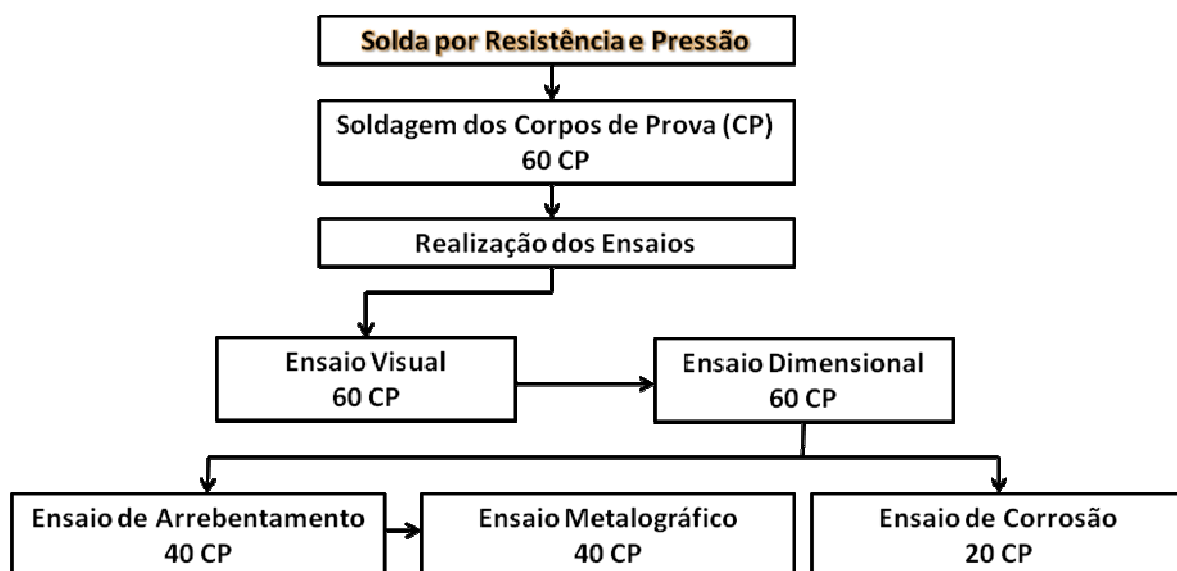


Figura 34: Fluxograma da solda por Resistência e Pressão  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

##### 4.2.3.2.1. Ensaio visual

Todos os corpos de prova soldados por resistência e pressão, foram submetidos à inspeção visual com auxílio de uma lupa de 10 vezes de aumento.

Tratando-se do mesmo ensaio e das mesmas condições de análise, temos o mesmo procedimento descrito no item 4.2.3.1.1.

##### 4.2.3.2.2 Aquisição das dimensões da nervura de solda

O sistema de medição automático se encontra acoplado na própria máquina de soldagem e tem a função de aprovar ou reprovar o corpo de prova soldado por meio de medição a laser da altura e da largura da nervura da solda, mediante a comparação com os valores especificados em projeto, salientando que o ponto crítico para aprovação/reprovação é altura da nervura. Mediante a realização da solda, os corpos de prova já eram medidos.

#### 4.2.3.2.3 Ensaio de arrebentamento

Para os corpos de prova soldados pelo processo por resistência e pressão, o ensaio de arrebentamento foi realizado através de um equipamento, onde um material macio de resina de PVC, seguido de um disco de vedação de neoprene foram colocados dentro do CP e um punção foi impulsionado sobre esses materiais, gerando uma pressão interna até que ocorreu o rompimento do CP.

É uma condição de simulação bem próxima da realidade, apesar de não se utilizar um gás. Não se utiliza um gás, pois não se conseguiria uma estanqueidade perfeita, utilizando os corpos de prova, por isso para a pressurização perfeita dos mesmos se adota a utilização da resina de PVC e do disco de neoprene.

O ensaio foi realizado em 40 corpos de prova soldados com o propósito de demonstrar que a solda resiste a uma carga mínima de pressão, especificada em projeto.

#### 4.2.3.2.4 Ensaio metalográfico

A preparação metalográfica foi realizada conforme descrito no item 4.2.3.1.5. No caso da metalografia da solda por resistência e pressão o objetivo do ensaio é a observação da antiga linha de contato (Tampão Terminal/Tubo de Revestimento), para análise da sua integridade, pois se a linha de contato se apresentar com falhas, é um indicativo de falta de segurança operacional e de que a solda não está nas condições especificadas de resistência.

Sendo o ensaio realizado nos mesmos 40 corpos de prova, que foram submetidos ao ensaio de arrebentamento.

Na Figura 35, podemos observar o corte longitudinal descentralizado, descrito no 4.2.3.1.5.



Figura 35: Corte Longitudinal do corpo de prova  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

A figura 36 exibe uma amostra do corpo de prova soldado por resistência e pressão, embutido a quente com baquelite.



Figura 36: Embutimento da amostra do Corpo de Prova Resistência e Pressão  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

#### 4.2.3.2.5 Ensaio de corrosão

A realização do ensaio foi conforme descrito no item 4.2.3.1.6, sendo submetidos ao ensaio 20 corpos de prova soldados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resultados da Solda TIG

#### 5.1.1 Ensaio visual

Durante o ensaio visual foram observadas a regularidade dos cordões, aspectos de possíveis inclusões, presença de poros, colorações, descontinuidades e anormalidades de uma forma geral.

Padrões qualificados pela engenharia, que são os CP representativos de condições aceitáveis de limites da solda, foram utilizados.

Como os cordões de solda se mostraram uniformes e sem a presença de anormalidades, todos os corpos de prova foram aprovados em relação à condição visual.

A figura 37, mostra um corpo de prova TIG com cordão de solda aprovado no ensaio visual.

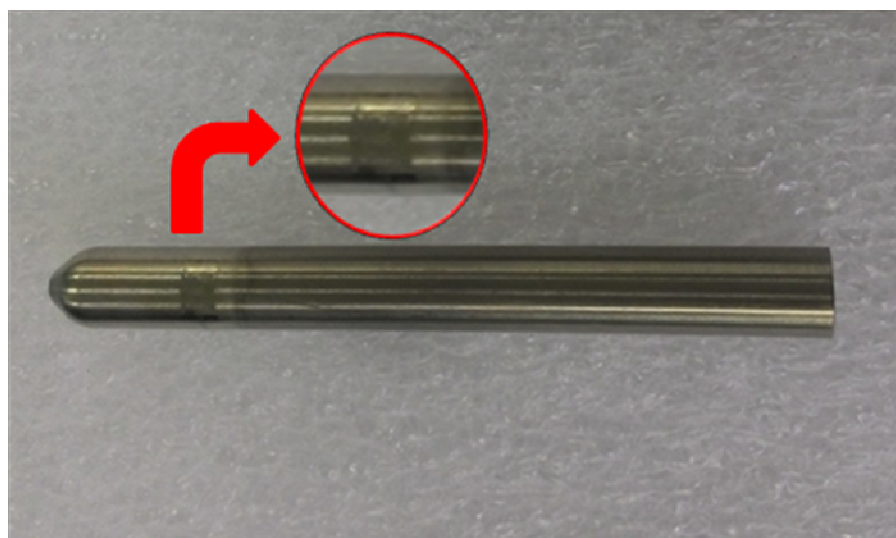


Figura 37: CP TIG com cordão de solda aprovado  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Na Figura 38, podemos observar o que seria um defeito no cordão de solda, durante a realização da solda houve inclusão de tungstênio.



Figura 38: Cordão de solda com inclusão de tungstênio  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

### 5.1.2 Inspeção dimensional

Na inspeção dimensional passou-se o anel calibrado em todos os corpos de prova, verificando se a altura da nervura se encontrava dentro da altura máxima estabelecida em projeto. Como o anel calibrado passou sem interferência em todos os corpos de prova, comprovou-se que a nervura dos mesmos estava dentro da faixa especificada e que o Tampão Terminal e o Tubo de Revestimento foram soldados com os centros alinhados um em relação ao outro.

### 5.1.3 Ensaio radiográfico

O ensaio radiográfico realizado nos corpos de prova demonstrou que internamente os cordões de solda não apresentavam nenhum tipo de trincas, poros ou inclusão que pudesse comprometer a qualidade da solda.

A figura 39 expõe uma radiografia isenta de defeitos.

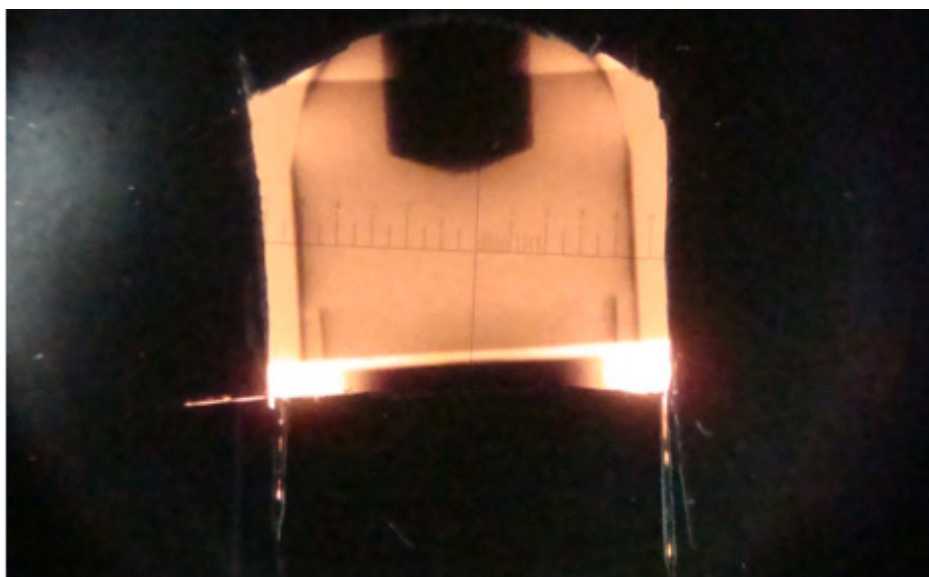


Figura 39: Radiografia de uma solda isenta de defeitos  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Nas figuras 40 e 41 podemos observar a presença de inclusão de tungstênio e a existência de um poro respectivamente.

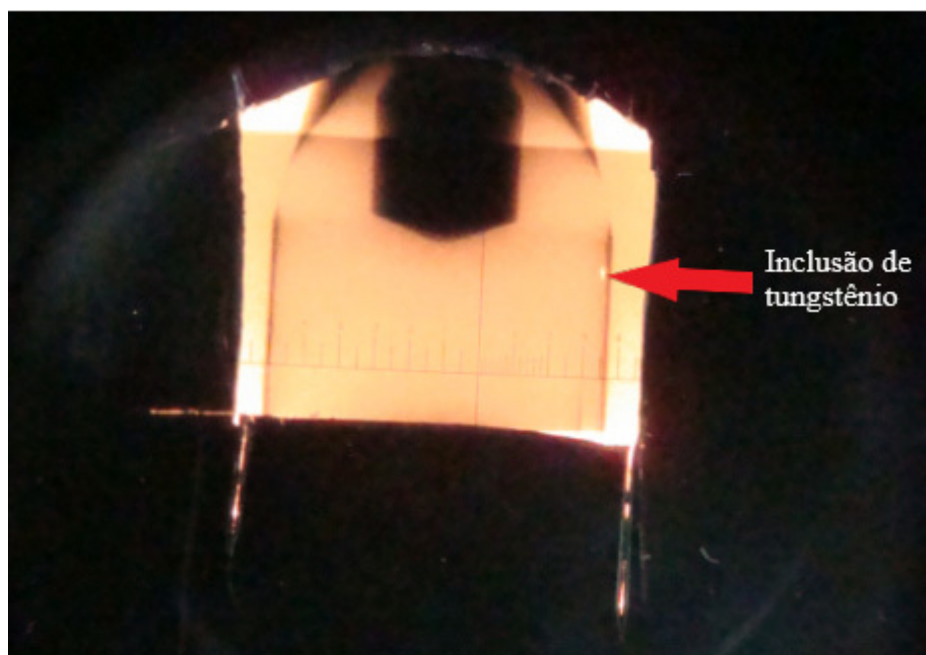


Figura 40: Exemplo de uma radiografia onde houve inclusão de tungstênio na região da solda

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

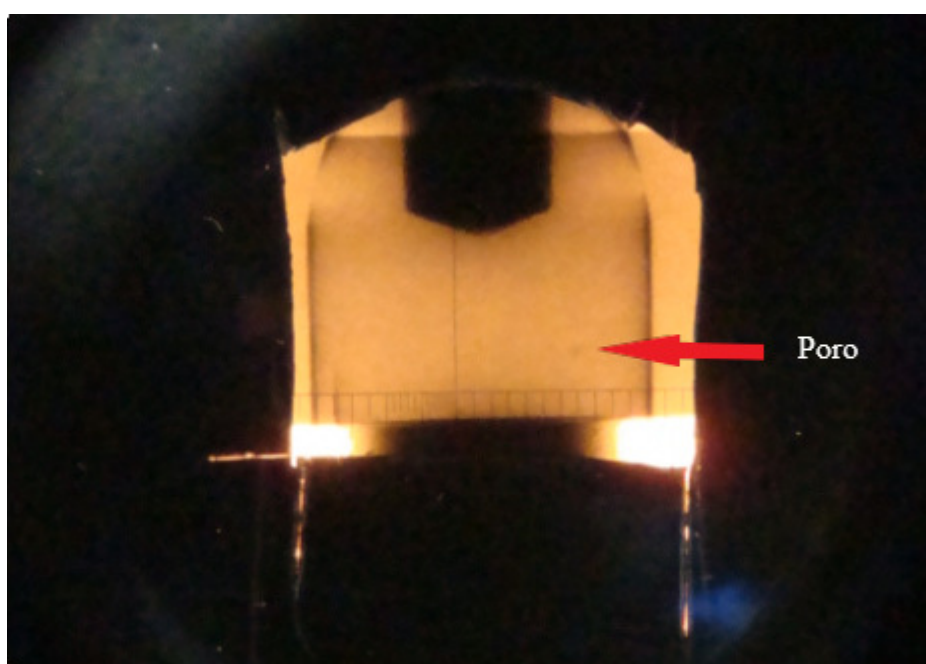


Figura 41: Exemplo de uma radiografia onde há existência de um poro na região do cordão de solda

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

#### 5.1.4 Ensaio de arrebentamento

No que se refere a resistência mecânica dos cordões de solda, o resultado foi conforme o esperado em projeto, eles resistiram à pressão mínima de arrebatamento e a ruptura ocorreu na região do Tubo de Revestimento, ou seja, fora da região de solda, comprovando que os cordões de solda se mostram-se mais resistentes que os materiais de base.

A tabela 5 apresentam os valores das pressões de arrebatamento dos corpos de prova. Frisando que as pressões nas quais ocorreram os arrebatamentos, estão de acordo com os valores especificados em projeto. Seguindo esta análise os corpos de prova foram aprovados nesse ensaio.

Tabela 5 – Dados obtidos no ensaio de arrebatamento da solda TIG

<b>PRESSÃO DE ARREBENTAMENTO (bar)</b>			
1263	1267	1245	1262
1264	1256	1263	1276
1264	1264	1262	1270
1267	1255	1263	1273
1255	1262	1256	1287

\* **Local da Fratura** → TR

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

A figura 42 mostra, o histograma das pressões de arrebatamento nos corpos de prova soldados pelo processo TIG.

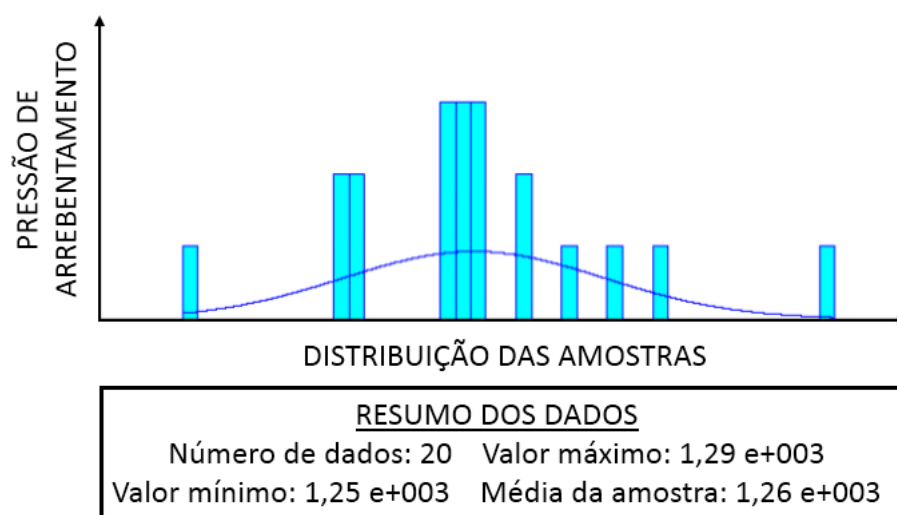


Figura 42: Histogramas das pressões de arrebentamento dos corpos de prova da solda TIG

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Para uma melhor análise dos resultados obtidos nos ensaios foi utilizado o software ARENA. Ao inserir-se os dados relativos a um ensaio, ele gera o histograma e ao selecionarmos uma de suas funções específicas, automaticamente a curva que melhor representa a distribuição das amostras é inserida no histograma.

Para os dados do ensaio de arrebentamento, o histograma apresentou uma distribuição normal. Esse tipo de distribuição trabalha com uma média e um desvio padrão (a posição central e as variações existentes nos dados), isso significa dizer uma pressão de arrebentamento média e a probabilidade de que ela seja um pouco menor ou um pouco maior. As classes (barras), são os intervalos e sua altura corresponde a frequência em que as pressões aparecem nas amostras.

A figura 43 demonstra o local de ruptura dos corpos de prova.

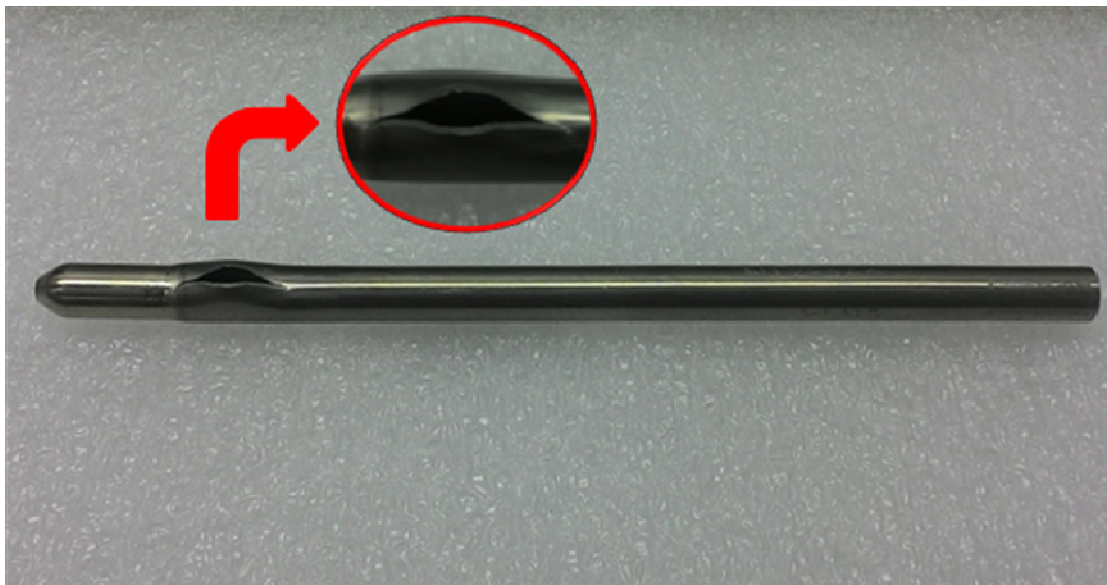


Figura 43: Corpo de prova TIG arrebetado na região do Tubo de Revestimento  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

#### 5.1.5 Ensaio metalográfico

As amostras foram analisadas na área do cordão de solda e não foram detectadas as presenças de poros, inclusões e trincas.

Na figura 44 podemos observar a região da solda.

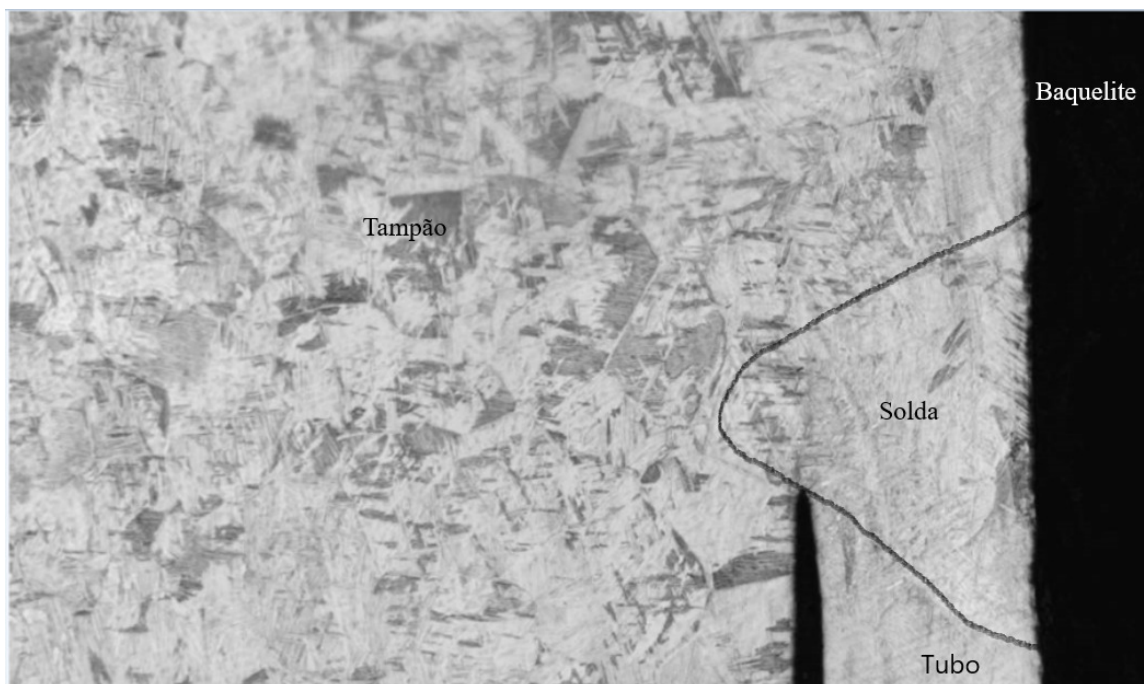


Figura 44: Micrografia de uma junta soldada TIG  
 Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

As dimensões da zona fundida foram medidas e os resultados obtidos da profundidade de penetração das amostras estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Dados obtidos na medição da profundidade de penetração da solda TIG

PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO (mm)			
2,22	2,44	2,38	2,27
2,55	2,38	2,28	2,11
2,3	2,54	2,28	2,3
2,49	2,28	2,35	2,18
2,32	2,44	2,32	2,14

\* Profundidade de Penetração > 1,00 mm

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

A figura 45, expõe o histograma das profundidades de penetração da solda TIG, com distribuição do tipo triangular. Esse tipo de distribuição trabalha com a penetração média, a mínima e a máxima.

O processo demonstrou-se uniforme, apresentando valores de penetração da solda bem regulares.

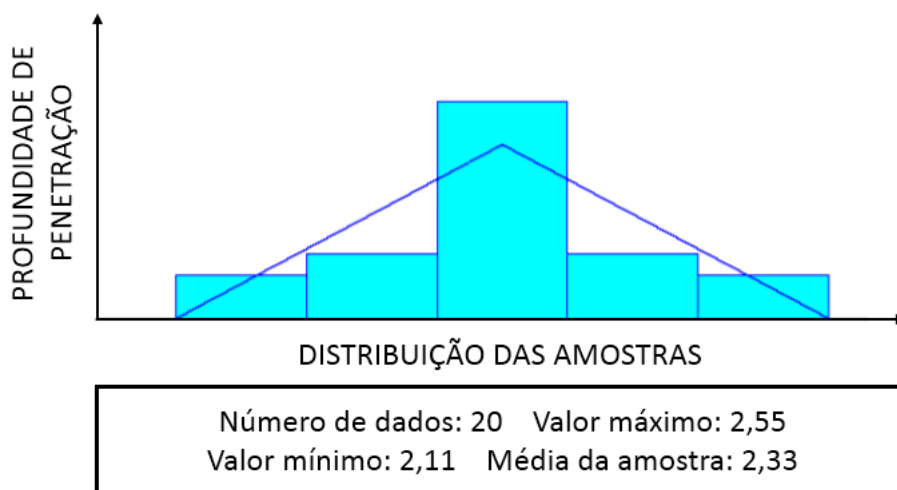


Figura 45: Histograma das profundidades de penetração das amostras dos corpos de prova da solda TIG

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Durante a realização da medida da espessura da parede das amostras foram encontrados os valores expressos na tabela 7.

Tabela 7 – Dados obtidos na medição da espessura da parede da solda TIG

ESPESSURA DA PAREDE (mm)			
0,56	0,55	0,54	0,53
0,53	0,57	0,54	0,57
0,55	0,54	0,54	0,58
0,54	0,54	0,57	0,56
0,56	0,53	0,53	0,56

\* Espessura da Parede > 0,50  
mm

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

A figura 46 exibe o histograma das espessuras da parede da solda TIG. A curva que melhor representou a distribuição dos valores foi a curva beta. A variável beta, é normalmente utilizada para modelar valores restritos entre zero e um

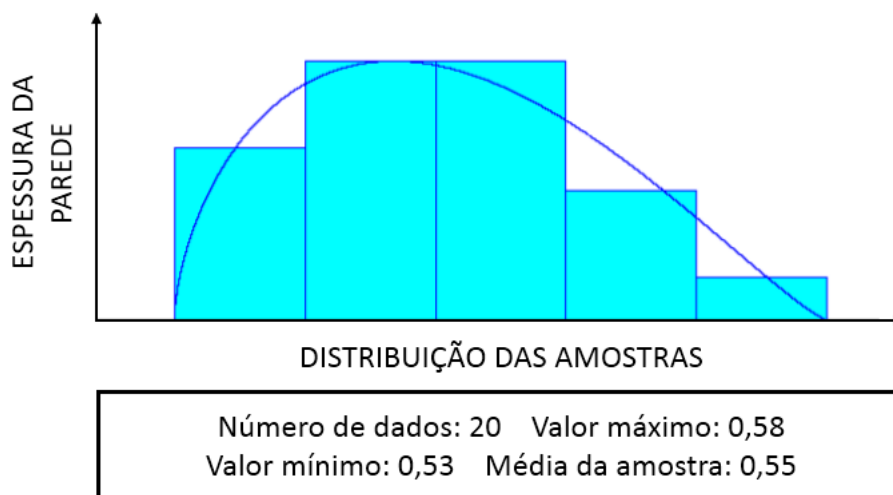


Figura 46: Histograma das espessuras da parede das amostras dos corpos de prova da solda TIG

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

#### 5.1.6 Ensaio de corrosão

Após a realização do ensaio de corrosão, os 20 corpos de prova foram inspecionados, juntamente com os cordões de solda. Eles se apresentaram com a superfície escurecida e sem a presença de corrosão, sendo, portanto, aprovados.

A figura 47 exibe um corpo de prova após o ensaio de corrosão, com a superfície escurecida e sem a presença de corrosão.



Figura 47: CP TIG após realização do Ensaio de Corrosão  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

## 5.2 Resultados da Solda por Resistência e Pressão

### 5.2.1 Ensaio visual

Todos os corpos de prova soldados pelo processo por resistência e pressão foram aprovados no ensaio visual, as superfícies dos cordões de solda se apresentaram uniformes, sem a presença de descontinuidades e colorações.

A figura 48, exibe um corpo de prova soldado por resistência e pressão com cordão de solda aprovado no ensaio visual.

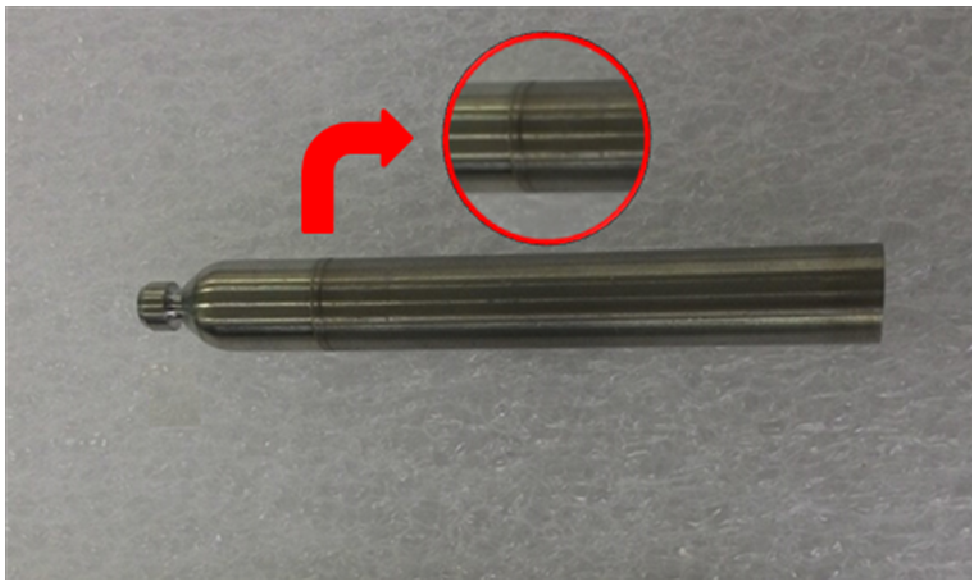


Figura 48: CP soldado por resistência e pressão aprovado

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Na figura 49 podemos observar a ocorrência de um defeito no cordão de solda, onde durante o processo de soldagem ocorreu fusão sobre o Tampão Terminal.

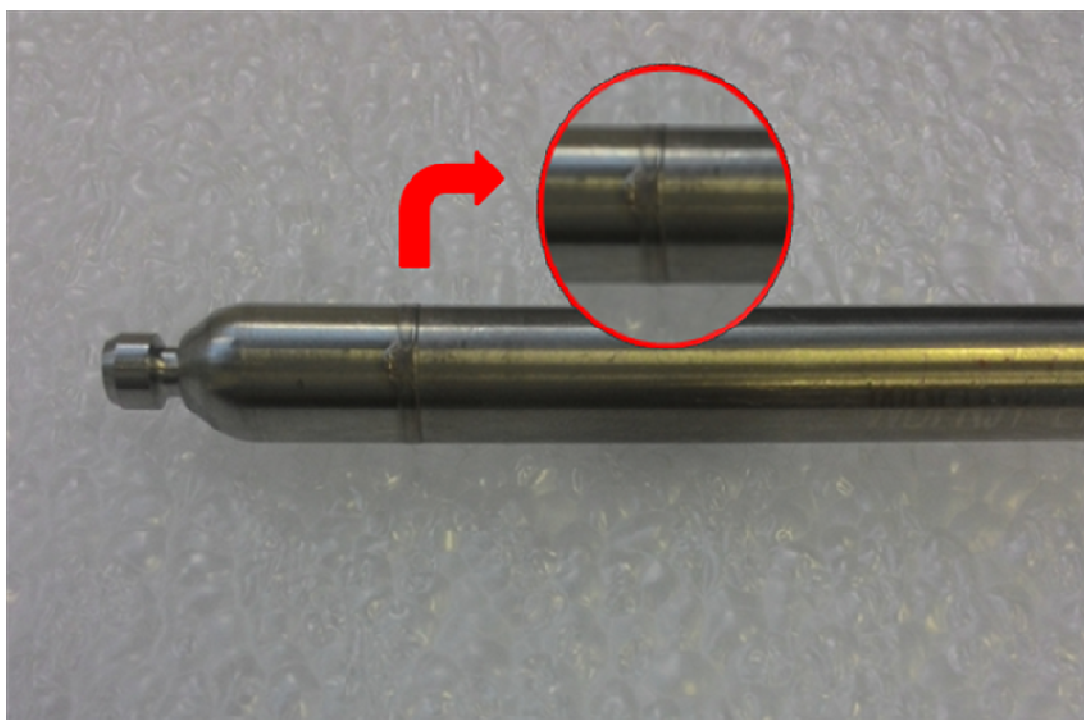


Figura 49: CP soldado por resistência e pressão com a presença de fusão sobre o Tampão Terminal

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

### 5.2.2 Aquisição das dimensões da nervura de solda

O sistema acoplado na máquina de solda por resistência e pressão mensurou as dimensões do cordão de solda e os valores estão representados na tabela 8.

Tabela 8 – Dados obtidos na medição da largura máxima da nervura da solda

<b>LARGURA MÁXIMA DA NERVURA (mm)</b>			
1,48	1,46	2,18	1,48
1,49	1,65	1,56	1,47
1,52	1,48	1,49	1,47
1,46	1,45	1,48	1,51
1,51	1,57	1,35	1,46
1,45	1,43	1,48	1,44
1,48	1,46	1,53	1,48
1,46	1,43	1,52	1,49
1,42	1,79	1,5	1,36
1,43	2,29	1,46	1,48

**\* Largura Máxima da Nervura  $\leq$  2,40 mm**

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

O histograma da figura 50, representa a distribuição dos valores da largura máxima da nervura encontrada nos cordões de solda, a curva que melhor representou essa distribuição foi a log-normal.

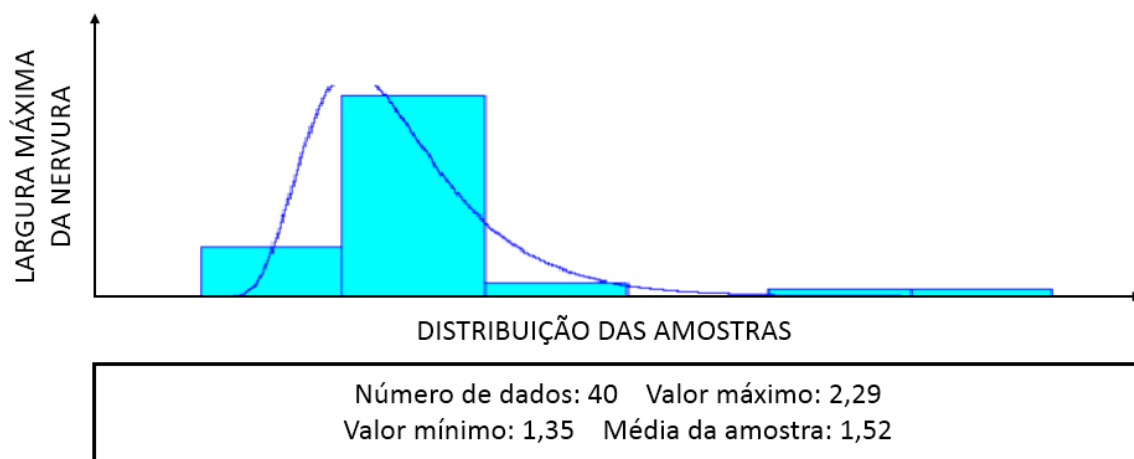


Figura 50: Histograma das larguras máximas da nervura da solda  
 Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Ainda se referindo à largura da nervura dos cordões de solda, só que agora a mínima, os valores encontrados estão expostos na tabela 9.

Tabela 9 – Dados obtidos na medição da largura mínima da nervura da solda

<b>LAGURA MÍNIMA DA NERVURA (mm)</b>			
1,25	1,21	1,26	1,22
1,26	1,24	1,25	1,25
1,25	1,26	1,27	1,24
1,26	1,24	1,25	1,23
1,25	1,26	1,18	1,22
1,25	1,26	1,25	1,19
1,24	1,25	1,28	1,21
1,22	1,25	1,24	1,23
1,18	1,23	1,29	1,14
1,22	1,23	1,23	1,23

**\* Largura Mínima da Nervura  $\geq$   
1,00 mm**

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

O histograma da figura 51, representa os valores encontrados na medição da largura mínima da nervura. O histograma apresenta uma distribuição normal.

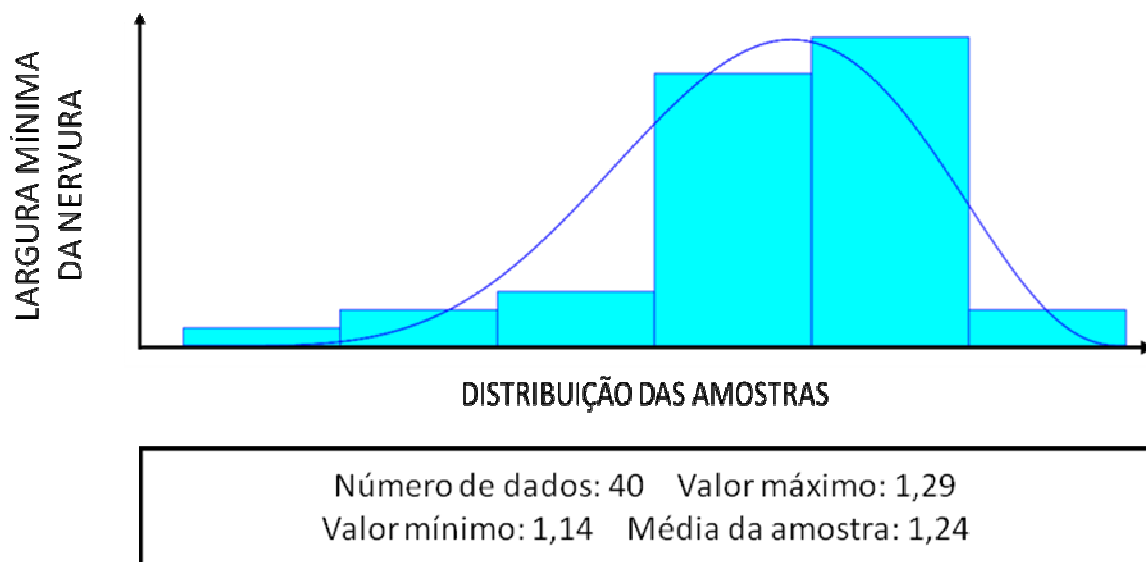


Figura 51: Histograma das larguras mínimas da nervura da solda  
 Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Além da medição da largura máxima e mínima da nervura, foram realizadas a medição da altura máxima da mesma. Os valores encontrados estão registrados na tabela 10.

Tabela 10 – Dados obtidos na medição da altura máxima da nervura da solda

<b>ALTURA MÁXIMA DA NERVURA (mm)</b>			
0,07	0,07	0,07	0,075
0,0076	0,07	0,08	0,078
0,07	0,078	0,07	0,076
0,07	0,07	0,08	0,078
0,07	0,07	0,07	0,07
0,07	0,075	0,078	0,07
0,07	0,07	0,076	0,07
0,07	0,07	0,08	0,07
0,07	0,072	0,07	0,08

0,07	0,079	0,07	0,07
------	-------	------	------

\* **Altura Máxima da Nervura  $\leq$  0,080 mm**

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

O histograma que melhor representa a distribuição das amostras, exibe uma curva triangular, conforme figura 52.

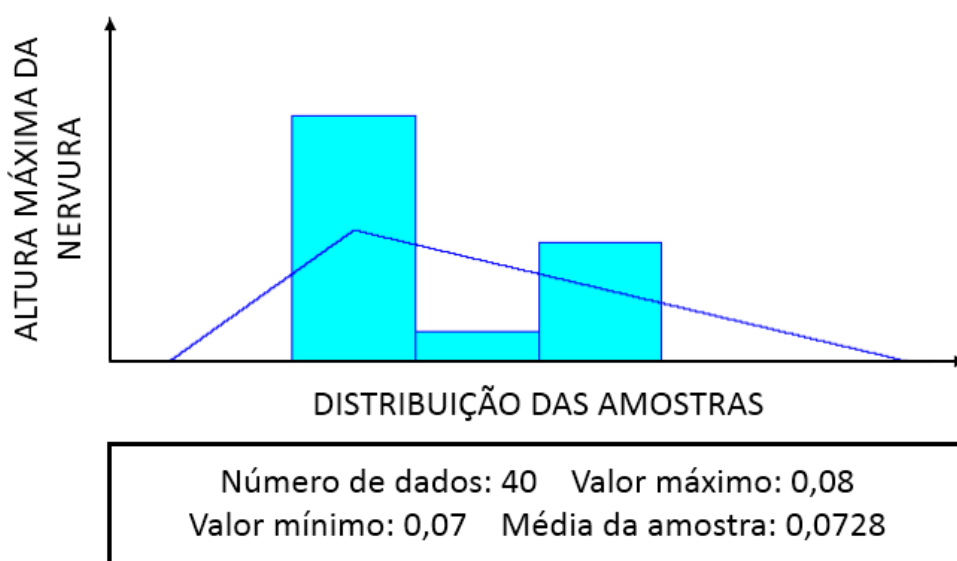


Figura 52: Histograma das alturas máximas da nervura da solda  
 Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Bem como, foram mensuradas as dimensões da altura mínima da nervura dos cordões de solda. Os valores foram demonstrados na tabela 11.

Tabela 11 – Dados obtidos na medição da altura mínima da nervura da solda

<b>ALTURA MÍNIMA DA NERVURA (mm)</b>			
0,04	0,04	0,05	0,05
0,05	0,04	0,04	0,04
0,04	0,05	0,05	0,05
0,05	0,05	0,05	0,05
0,05	0,05	0,04	0,05

0,05	0,04	0,04	0,05
0,04	0,05	0,04	0,04
0,05	0,05	0,04	0,04
0,05	0,04	0,04	0,05
0,04	0,05	0,05	0,04

\* **Altura Mínima da Nervura  $\geq$  0,030 mm**

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

O histograma da distribuição das amostras da altura mínima da nervura, figura 53 apresenta curva triangular.

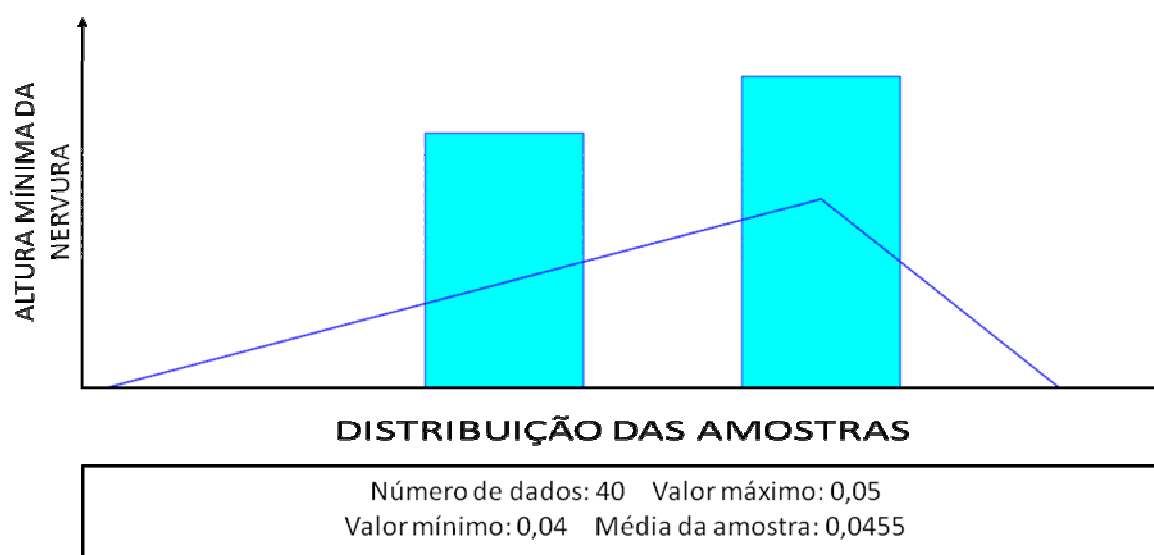


Figura 53: Histograma das alturas mínimas da nervura da solda

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

É importante acentuar, que as dimensões mensuradas nos cordões de solda dos corpos de prova, tanto as larguras com as alturas estão dentro dos valores máximos e mínimos estabelecidos na especificação de projeto. Portanto os corpos de prova foram aprovados.

### 5.2.3 Ensaio de arrebentamento

A solda dos 40 corpos de prova soldados submetidos ao ensaio demonstrara-se resistentes mecanicamente, resistindo a uma pressão mínima de arrebetamento e comprovando serem mais resistentes que os materiais de base.

A tabela 12 apresentam os valores das pressões de arrebetamento dos corpos de prova.

Tabela 12 – Dados obtidos no ensaio de arrebetamento da solda por resistência e pressão

<b>FORÇA DE ARREBETAMENTO (bar)</b>			
2345	2327	2361	2430
2313	2458	2346	2500
2321	2329	2303	2538
2319	2388	2373	2408
2337	2339	2396	2426
2337	2378	2398	2418
2357	2363	2410	2422
2337	2363	2392	2442
2388	2398	2347	2426
2359	2394	2406	2428

\* **Local da Fratura** → TR

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

De acordo com a figura 54, no histograma gerado com as pressões de arrebetamento a curva que melhor representou a distribuição das pressões foi a beta.

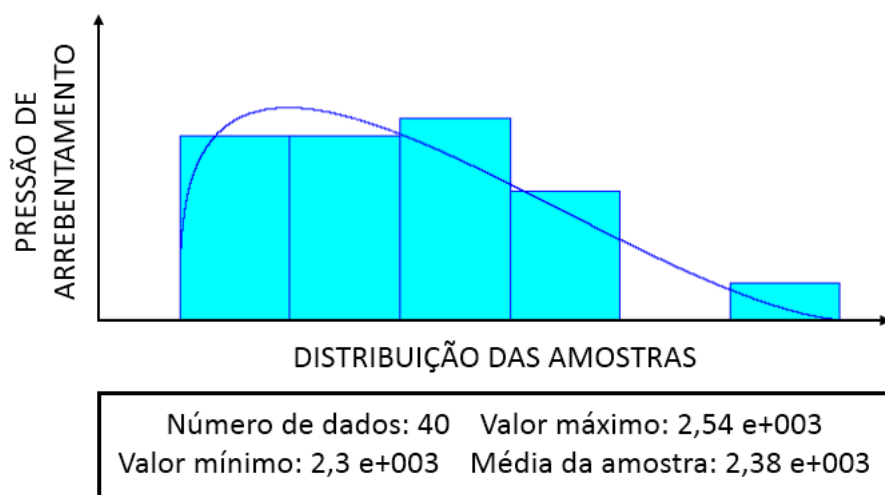


Figura 54: Histograma das pressões de arrebentamento dos corpos de prova da solda por resistência e pressão  
 Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

A figura 55, de um corpo de prova soldado pelo processo por Resistência e Pressão, expõe a ruptura do mesmo, sendo essa localizada na região do Tubo de Revestimento.

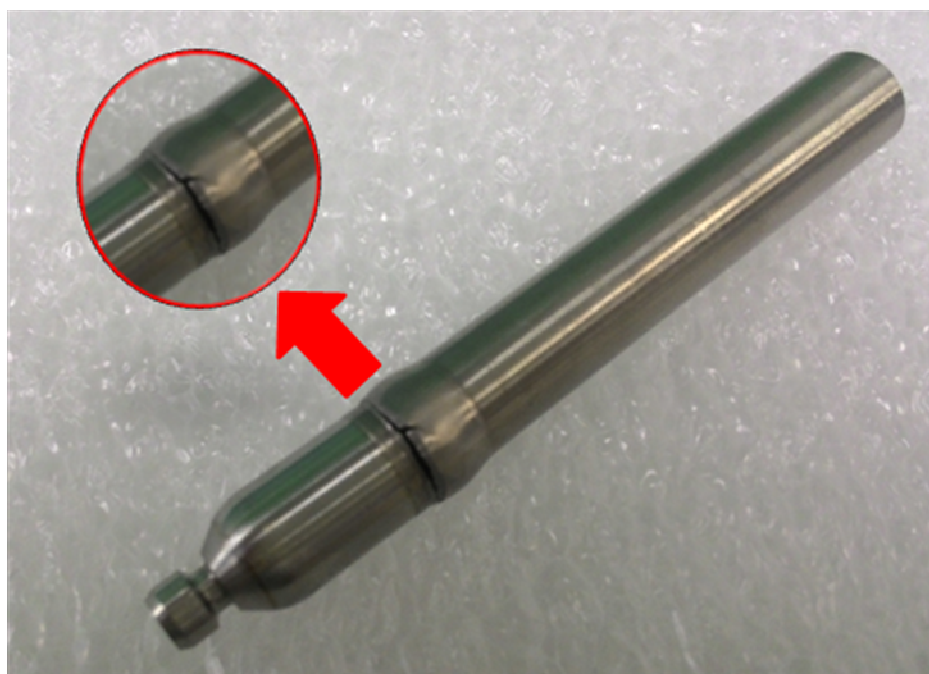


Figura 55: Corpo de Prova Resistência e Pressão Arreventado na região do Tubo de Revestimento  
 Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

#### 5.2.4 Ensaio metalográfico

O ensaio metalográfico, nos permitiu visualizar a antiga linha de contato entre as peças, além de possibilitar a verificação de que o arrebitamento dos corpos de prova realmente ocorreu fora da região do cordão de solda. Sendo, desse modo os 40 corpos de prova aprovados na metalografia.

Na figura 56, podemos observar a antiga linha de contato e a região onde ocorreu o arrebitamento, localizado no Tubo de Revestimento.

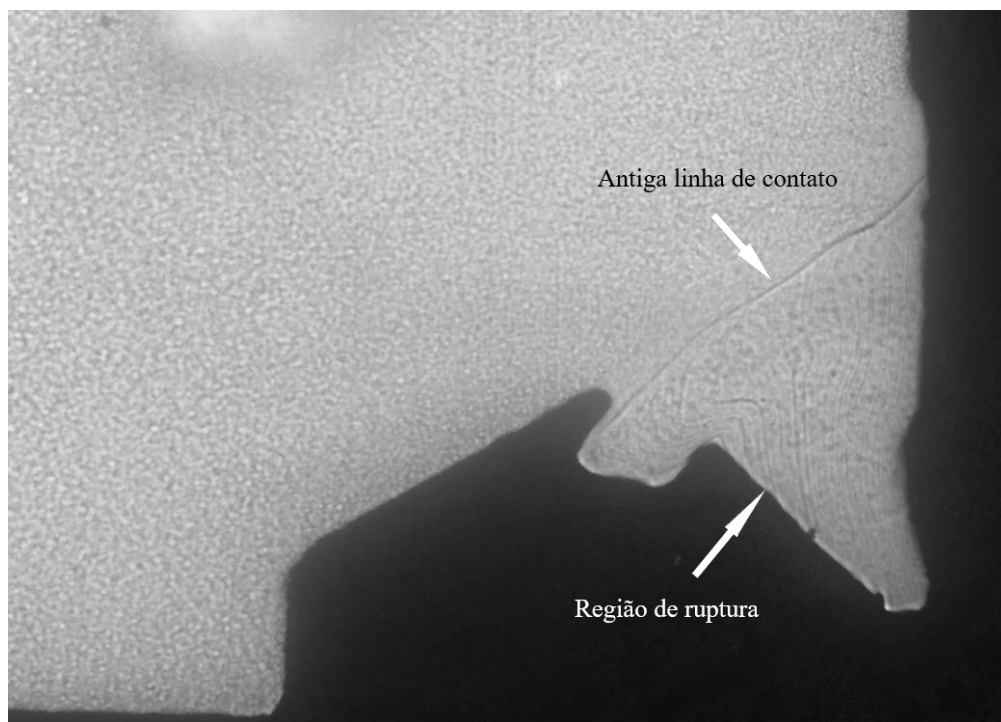


Figura 56: Micrografia de uma junta soldada por Resistência e Pressão  
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

Na figura 57, podemos visualizar a região de formação da solda.

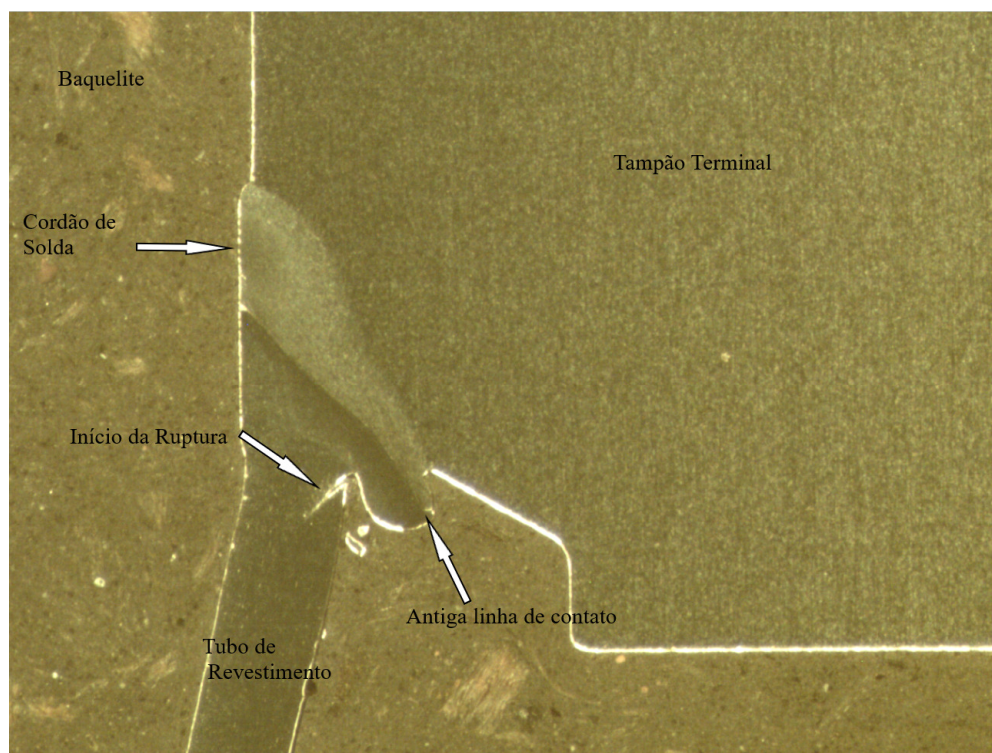


Figura 57: Macrografia de uma junta soldada por Resistência e Pressão observada no microscópio óptico

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

#### 5.2.5 Ensaio de corrosão

O ensaio de corrosão comprovou a resistência da solda e das peças soldadas à corrosão, onde a superfície dos corpos de prova se apresentara uniformemente escurecidas e sem a presença de corrosão. Sendo, portanto os mesmos aprovados nesse ensaio.

A figura 58, expressa um corpo de prova após a realização do ensaio de corrosão, onde o mesmo foi aprovado, pois se apresenta com a superfície uniformemente escurecida e sem a presença de corrosão.



Figura 58: Corpo de prova soldado por Resistência e Pressão após realização do ensaio de corrosão

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2018)

### 5.3 Discussão

Os resultados encontrados neste trabalho comprovam que tanto o processo de soldagem TIG, como o por Resistência e Pressão, se mostram adequados para a união do Tampão Terminal ao Tubo de Revestimento, apresentando soldas de boa qualidade sem a presença de poros, trincas e outras discontinuidades.

As soldas resultantes de ambos os processos se mostraram resistentes mecanicamente e mais resistentes que o material de base dos corpos de prova, ocorrendo o arrebentamento no Tubo de Revestimento, fora da região do cordão de solda.

A simulação da temperatura e da pressão de um reator, realizada pela autoclave durante o ensaio de corrosão fundamentou que os cordões de solda do processo TIG e do Resistência e Pressão, assim como os materiais do Tubo de Revestimento e do Tampão Terminal, apresentam resistência à corrosão (inclusive não afetando o cordão de solda) não sendo propícios ao aparecimento de corrosão sob tensão quando em serviço no reator.

Das diferenças expostas nesse trabalho, fica evidente que o processo de soldagem por Resistência e Pressão se apresenta mais vantajoso, pois requer menos tempo para a realização da solda, cerca de 3 segundos enquanto a TIG leva em média 2 minutos. O processo por Resistência e Pressão possibilita um aumento da produtividade do processo.

Uma outra vantagem do processo de Resistência e Pressão em relação ao processo TIG é a não necessidade de realização do ensaio radiográfico.

No processo de soldagem TIG, os corpos de prova estão sujeitos a um nível maior de contaminação, pois se trata de um processo onde a fonte de calor é um arco elétrico, com temperaturas muito elevadas, sendo os materiais de base expostos a temperaturas, acima de suas zonas de fusão, ficando muito reativos e sujeitos a contaminações por tungstênio e óxidos. Outro fenômeno que pode vir a ocorrer durante a solidificação é a formação de trincas e poros, que são descontinuidades que reduzem a resistência mecânica e a resistência à corrosão da solda. Devido à os problemas que podem acontecer durante o processo de soldagem TIG, ele demanda a necessidade de realização de ensaio radiográfico, com o propósito de inspecionar a solda internamente sem a destruição da mesma.

Para a soldagem por Resistência e Pressão as temperaturas às quais as juntas são expostas são muito inferiores, limitando-se a uma fusão incipiente, não havendo a ocorrência dos fenômenos citados anteriormente. A soldagem ocorre mediante um aquecimento provocado pela resistência a passagem de corrente elétrica entre as partes de contato, provocando o efeito Joule de dentro para fora e reduzindo os riscos de contaminação. Sendo assim não há necessidade da realização do ensaio radiográfico.

As radiações ionizantes que são utilizadas com a finalidade de produzir imagens internas dos materiais ensaiados, juntamente com os materiais utilizados para a realização do ensaio radiográfico, são altamente perigosos. Cuidados especiais em relação ao ser humano e o meio ambiente devem ser tomados. O excesso de exposição a radiação pode provocar problemas de saúde à pessoa

exposta, devido a esse fato medidas de segurança devem ser criteriosamente tomadas, como o isolamento da área de realização do ensaio e a utilização de filmes dosimétricos.

Além do custo dos equipamentos e materiais necessários para a sua realização, o ensaio radiográfico é relativamente demorado, requerendo profissionais devidamente treinados, qualificados e certificados para realizarem a interpretação do filme de solda.

Apesar do elevado investimento nos equipamentos de soldagem por Resistência e Pressão, a aquisição dos mesmos se justifica pelo fato de que a longo dos anos o investimento trará retornos, e pelo fato dele possuir um sistema de medição automático acoplado na própria máquina de solda, que reduz o tempo de realização do ensaio metalográfico. Na solda TIG deve-se verificar a existência de possíveis descontinuidades e inclusões, o ensaio era também usado para mensurar as dimensões de profundidade de penetração e largura do cordão de solda, já na solda realizada por Resistência e Pressão o ensaio é utilizado para observar a antiga linha de contato (Tampão Terminal/Tubo de Revestimento) e analisar sua integridade, pois a realização da medição da altura e da largura da nervura da solda já acontece na própria máquina. Quando a solda é formada e finalizada suas dimensões são mensuradas por medição a laser.

## 6. CONCLUSÃO

Através dos conhecimentos adquiridos na realização do presente trabalho, foi possível conhecer um pouco mais os processos de soldagem TIG e por resistência e pressão. Sabendo que no processo de soldagem TIG as peças a serem soldadas são submetidas a um aporte muito maior de calor, do que no processo de resistência e pressão, onde a formação do cordão de solda se dá por geração de calor e esse não propicia a fusão e posteriormente a solidificação do material, ao contrário, nesse processo é atribuída uma força, através da geração de pressão que gera a deformação, formando o cordão de solda.

Os resultados obtidos através da realização dos ensaios não-destrutíveis e destrutíveis nos corpos de prova soldados, mostraram que tanto o processo de soldagem TIG, como o processo de soldagem por resistência e pressão formam soldas de boa qualidade, resistentes mecanicamente e com resistência à corrosão à altas temperaturas.

No entanto avaliando os resultados, ficou evidente que apesar da solda TIG atender as exigências para sua aplicação na soldagem das varetas combustíveis, a solda por resistência e pressão possui algumas vantagens a mais em relação à TIG, se mostrando superior.

Ao chegar nesta concordância, os resultados das análises obtidas, apontaram que a mudança ocorrida entre os processos de soldagem aplicados nas ligas de Zircônio, foi satisfatória e desempenhou melhorias no processo de soldagem das varetas combustíveis. Entre as benfeitorias pode-se citar no tempo requerido para a formação da solda, a não necessidade de realização do ensaio radiográfico, que é um ensaio não destrutível, que requer tempo pra sua execução, profissionais treinados e certificados e que expõe esse profissional a radiações causando risco à saúde.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, J. O. **Comparação entre eletrodos de tungstênio puro e dopados no processo de soldagem GTAW com CA onda retangular.** UFU - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p. 110, 1999. Disponível em: <[https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14798/1/JokamotoMS\\_PR.pdf](https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14798/1/JokamotoMS_PR.pdf)>. Acesso em: 03 Fevereiro 2018. Dissertação de Mestrado.

BARBOSA, R. H.; CARNEIRO, M. R. D. **Estudo dos parâmetros de solda a ponto com ênfase na soldagem de aços galvanizados,** Campos dos Goytacazes. Disponível em: <[http://bd.centro.iff.edu.br/bitstream/123456789/24/1/Estudo%20dos%20par%C3%A2metros%20de%20solda%20a%20ponto%20com%20%C3%AAnfase%20na%20soldagem%20de%20a%C3%A7os%20galvanizados%20\(FINAL\).docx](http://bd.centro.iff.edu.br/bitstream/123456789/24/1/Estudo%20dos%20par%C3%A2metros%20de%20solda%20a%20ponto%20com%20%C3%AAnfase%20na%20soldagem%20de%20a%C3%A7os%20galvanizados%20(FINAL).docx)>.

BATISTA, M. **Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência,** São Paulo, p. 194, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-03072013-152640/publico/DissertacaoEditada.pdf>>. Acesso em: 06 Fevereiro 2018.

BRACARENSE, A. Q. **Processos de soldagem por resistência,** Belo Horizonte, 2000. Disponível em: <<http://www.asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo26.pdf>>. Acesso em: 22 Janeiro 2018.

BRANCO, H. L. O. **Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas,** Curitiba, p. 113, 2004. Disponível em: <[http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao\\_042.pdf](http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_042.pdf)>. Acesso em: 19 Janeiro 2018.

CARDOSO, E. M. **Energia nuclear e suas aplicações.** CNEM, Rio de Janeiro, p. 52, 2012. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/apostila-educativa-aplicacoes.pdf>>. Acesso em: 22 Janeiro 2018.

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA. **Tecnologia Mecânica.** Etec, 2008. Disponível em: <[http://www.etepiracicaba.org.br/cursos/apostilas/mecanica/3\\_ciclo/tecnologia\\_mecanica.pdf](http://www.etepiracicaba.org.br/cursos/apostilas/mecanica/3_ciclo/tecnologia_mecanica.pdf)>. Acesso em: 02 Fevereiro 2018.

CETRE DO BRASIL. **Noções básicas sobre ensaios não destrutivos, qualificação SNQC, segurança, processos de fabricação, processos de soldagem e terminologia.** CETRE do Brasil. São Paulo, p. 221. 2008.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento.** 2ª. ed. São paulo: McGraw-Hill, v. II, 1986. 315 p.

COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção**, Itajubá, p. 106, 2004. Disponível em: <<https://saturno.unifei.edu.br/bim/0031062.pdf>>.

CUNHA, T. V. D. **Desenvolvimento de equipamento e metodologia de parametrização para a soldagem orbital TIG**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 109. 2008.

DELGADO, L. C. **Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame**. Repositório Institucional UFSC, Florianópolis, p. 82, 2000. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/79168>>. Acesso em: 15 Janeiro 2018.

DIAS, J. S. A. D. C. M. R. D. E. B. R. H. . 2. **Uma metodologia para otimização de parâmetros de soldagem através de solda por resistência aplicada em chapas de aço "intestinal free"**, Rio de Janeiro, p. 97, 2011. Disponível em: <[http://bd.centro.iff.edu.br/bitstream/123456789/24/1/Estudo%20dos%20par%C3%A2metros%20de%20solda%20a%20ponto%20com%20%C3%A2nfase%20na%20soldagem%20de%20a%C3%A7os%20galvanizados%20\(FINAL\).docx](http://bd.centro.iff.edu.br/bitstream/123456789/24/1/Estudo%20dos%20par%C3%A2metros%20de%20solda%20a%20ponto%20com%20%C3%A2nfase%20na%20soldagem%20de%20a%C3%A7os%20galvanizados%20(FINAL).docx)>. Acesso em: 3 Fevereiro 2018.

ELETRONUCLEAR. **Energia Nuclear. Eletrobrás Eletronuclear**, 2018. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/SaibaMais/Espa%C3%A7odoConhecimento/Pesquisaescolar/EnergiaNuclear.aspx>>. Acesso em: 22 Janeiro 2018.

ELETRONUCLEAR. Angra 1. **Eletrobras Eletronuclear**, 2018. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Aempresa/CentralNuclear/Angra1.aspx>>. Acesso em: 18 Janeiro 2018.

ESAB. **Revista Solução** ESAB 100 anos. ESAB, Suécia, 2005. Disponível em: <[http://www3.esab.com.br/Revista\\_Solucao\\_200505.pdf](http://www3.esab.com.br/Revista_Solucao_200505.pdf)>. Acesso em: 03 Abril 2018.

FELIPE, E. C. B.; LADEIRA, A. C. Q. **Estudo da separação do par zircônio e háfnio por troca iônica**. ResearchGate, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/276228941\\_ESTUDO\\_DA\\_SEPARACAO\\_DO\\_PAR\\_ZIRCONIO\\_E\\_HAFNIO\\_POR\\_TROCA\\_IONICA](https://www.researchgate.net/publication/276228941_ESTUDO_DA_SEPARACAO_DO_PAR_ZIRCONIO_E_HAFNIO_POR_TROCA_IONICA)>. Acesso em: 28 Março 2018.

FILHO, I. G. S. **Estudo de influência dos parâmetros de soldagem de revestimento resistente à corrosão na diluição pelo processo TIG modalidade Arame Quente**, Curitiba, p. 103, 2007. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/diretorias/dirppg/programas/ppgem/banco-teses/dissertacoes/2007/FilhoIrineuGomesdaSilva.pdf>>. Acesso em: 18 Maio 2018.

HENON, B. K. **Advances in Automatic Hot Wire GTAW (TIG) Welding**. Arc Machines Inc., 2018. Disponível em: <

studies/advances-automatic-hot-wire-gtaw-tig-welding>. Acesso em: 12 Janeiro 2018.

HOLT, R. A. A. D. Z. 2. **The Beta to alpha phase transformation in Zircaloy-4**, adaptado de ZIMMERMANN, 2014. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, p. 322 - 334, 1970. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-15102014-163235/publico/Tese\\_Angelo\\_Zimmermann.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-15102014-163235/publico/Tese_Angelo_Zimmermann.pdf)>. Acesso em: 24 Janeiro 2018.

JUNQUEIRA, F. S. **Caracterização estrutural comparativa de juntas soldadas de ligas de Zr resultantes de soldagem TIG e RPW**, Volta Redonda, p. 123, 2014.

LOBO, R. M. **Análise microestrutural do Zrcaloy-4 submetido a diferentes tratamentos termo-mecânicos. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**, São Paulo, p. 120, 2002. Disponível em: <[http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Raquel%20de%20Moraes%20Lobo\\_M.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Raquel%20de%20Moraes%20Lobo_M.pdf)>. Acesso em: 06 Setembro 2017. Tese de Mestrado.

LOBO, R. M.; ANDRADE, A. H. P. **Novas ligas de zircônio para aplicação nuclear**, Campos do Jordão, 2010. Disponível em: <[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/42/052/42052598.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/052/42052598.pdf)>. Acesso em: 06 Setembro 2017.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais industriais**. Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <[www.cetem.gov.br/livros/item/download/64\\_3b01456126f4249cfda6180592db4b30](http://www.cetem.gov.br/livros/item/download/64_3b01456126f4249cfda6180592db4b30)>. Acesso em: 24 Outubro 2017.

**MANUAL de tecnologia da fabricação e soldagem**, São Paulo, 2002. Disponível em: <[http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec\\_NOTURNO/TM354/Manual%20de%20Processos%20de%20Soldagem.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM354/Manual%20de%20Processos%20de%20Soldagem.pdf)>. Acesso em: 05 Fevereiro 2018.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. **Soldagem I - Introdução aos Processos de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 51. 2000.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem fundamentos e tecnologia**, Belo Horizonte, 2007.

NERIS, M. M. **Soldagem dos Metais**, Santos, 2012. Disponível em: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/solda.html>>. Acesso em: 29 Janeiro 2018.

OLIVARES, E. A. G.; DÍAZ, V. M. V. **Estudo do Processo TIG Hot-Wire com Material de Adição AISI - 316L Analisando o Efeito do Sopro Magnético do Arco sobre a Diluição do Cordão de Solda**, 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/si/v21n3/0104-9224-si-21-3-330.pdf>>. Acesso em: 09 Janeiro 2018. Artigo Técnico.

PAES, L. E. **Soldagem TIG orbital - técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade**, Florianópolis, p. 206, 2016. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/176703/347848.pdf?sequenc e=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 09 Janeiro 2018.

PEREIRA, L. A. T. **Desenvolvimento de processos de reciclagem de cavacos de Zircaloy via refusão em forno elétrico a arco e metalúrgia do pó.** Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, São Paulo, p. 118, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-27052014-090225/pt-br.php>>. Acesso em: 17 Janeiro 2018. Tese de Doutorado.

PIGOZZO, I. O. **Soldagem TIG Orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz,** Florianópolis, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/134664/333915.pdf?sequenc e=1>>. Acesso em: 09 Maio 2018.

ROHDE, R. A. **Metalografia de preparação de Amostras,** 2010. Disponível em: <<http://www.urisan.tcche.br/~lemm/metalografia.pdf>>. Acesso em: 22 Março 2018. SENAI-RJ. Soldagem TIG. SENAI-RJ. Rio de Janeiro. 2009.

SOARES, A. R. et al. **Caracterização microestrutural da soldagem TIG em varetas combustíveis.** ResearchGate, 20 Maio 2016. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/303373010\\_Caracterizacao\\_microestrutur al\\_da\\_soldagem\\_TIG\\_em\\_varetas\\_de\\_combustivel\\_nuclear](https://www.researchgate.net/publication/303373010_Caracterizacao_microestrutur al_da_soldagem_TIG_em_varetas_de_combustivel_nuclear)>. Acesso em: 13 Janeiro 2018.

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA - UNISANTA. **Soldagem dos Metais. Soldagem dos Metais.** Disponível em: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT4.pdf>>. Acesso em: 29 Janeiro 2018.

VIEIRA, F. D. **Desenvolvimento de tocha e de procedimento para a soldagem MIG/MAG em chanfro estreito de peças espessas em aço ao carbono,** Florianópolis, p. 105, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/100519/314679.pdf?sequenc e=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 11 Janeiro 2018. Tese de Mestrado.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalúrgia.** 4ª Reimpressão. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

WEMAN, K. Reta Solução ESAB 100 anosvi. **ESAB Welding Equipment AB,** 2005. Disponível em: <[http://www.esab.com/videos/English/HNG%20Intro\\_MP4%2020130404.mp4](http://www.esab.com/videos/English/HNG%20Intro_MP4%2020130404.mp4)>. Acesso em: 30 Março 2018.

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY. **The art off innovation: optimized Zirlo cladding.** Westinghouse Electric Company, 2017. Disponível em: <<http://www.westinghousenuclear.com/About/News/Features/View/The-Art-of-Innovation-Optimized-ZIRLO-Cladding>>. Acesso em: 26 Outubro 2017.

WIKIPÉDIA, A ENCICLÓPEDIA LIVRE. **James Prescott Joule**. WIKIPÉDIA, 2017. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/James\\_Prescott\\_Joule](https://pt.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule)>. Acesso em: 05 FEVEREIRO 2018.

ZIMMERMANN, A. J. O. **Encruamento, Recristalização e Textura Cristalográfica de Zircônio Puro e da Liga de Zircaloy-4**. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, São Paulo, p. 191, 2014. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-15102014-163235/publico/Tese\\_Angelo\\_Zimmermann.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-15102014-163235/publico/Tese_Angelo_Zimmermann.pdf)>. Acesso em: 02 Janeiro 2018. Tese de Doutorado.