

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ROGER DEIBER DA SILVA PIMENTA

**CICLO TÉRMICO EM SOLDAS PRODUZIDAS POR ELETRODOS REVESTIDOS  
BÁSICOS AGLOMERADOS COM SILICATO E POLÍMERO:  
TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS**

BELO HORIZONTE

2022

ROGER DEIBER DA SILVA PIMENTA

**CICLO TÉRMICO EM SOLDAS PRODUZIDAS POR ELETRODOS REVESTIDOS  
BÁSICOS AGLOMERADOS COM SILICATO E POLÍMERO:  
TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Cláudio Turani Vaz

BELO HORIZONTE

2022

ROGER DEIBER DA SILVA PIMENTA

**CICLO TÉRMICO EM SOLDAS PRODUZIDAS POR ELETRODOS REVESTIDOS  
BÁSICOS AGLOMERADOS COM SILICATO E POLÍMERO:  
TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado no curso de Graduação em  
Engenharia de Materiais do Centro Federal  
de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
como requisito parcial para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia de  
Materiais.

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Aline Silva Magalhães

---

Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz

---

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Dedico este trabalho à minha mãe Andreia e ao meu pai Antonio, por sempre me apoiarem e se esforçarem como podiam para o meu sucesso. À Dani pelo companheirismo e ajuda de sempre.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, os quais sou imensamente grato por tudo, pelo apoio e incentivo aos meus estudos, pelos esforços e sacrifícios que sempre fizeram para que eu pudesse ter uma boa educação e sem os quais nada disso seria possível. Sempre buscaram me proporcionar a segurança e as condições para que eu pudesse ingressar neste curso e, da forma que podiam, me deram a força e o apoio para concluí-lo.

À minha irmã Stephany, pelas conversas jogadas fora e por todo o companheirismo principalmente nos últimos anos.

À Dani, meu amor e principal ouvinte dos meus dramas, reclamações e dificuldades durante todo este período, mas também que sempre me apoiou, confortou e esteve ali para comemorar junto comigo todas as surpresas, vitórias e conquistas que obtive.

Ao meu orientador Prof. Cláudio Turani Vaz, pela parceria, dicas, orientação de excelência, disponibilidade e ajuda durante todo o período deste trabalho. Sem o seu apoio este trabalho talvez não teria saído do zero.

À professora Aline Magalhães pelas dicas e observações acerca da produção do trabalho.

Ao CEFET por me proporcionar oportunidades maravilhosas durante este curso.

Aos técnicos da instituição, por manterem a estrutura funcional e sempre estarem dispostos a ajudar quando precisei.

Aos meus professores, da graduação e do técnico, que tanto me ensinaram e me forneceram a base para o que hoje tento aplicar profissionalmente.

Aos amigos que me acompanharam durante este período e dividiram junto comigo todas as dificuldades do curso e me proporcionaram momentos incríveis durante estes anos.

Agradeço a mim, por não ter desistido e permanecer acreditando no meu sonho.

E a todos que de alguma forma contribuíram ao longo dessa jornada e que me auxiliaram de alguma forma na produção deste trabalho.

“Você vive e aprende. De qualquer forma, você vive”.

(Douglas Adams)

## RESUMO

Processos de soldagem são amplamente utilizados industrialmente, seja em pequena ou em grande escala como na produção de componentes de variadas dimensões e valores. Mais do que apenas empregar os processos de soldagem já consolidados, cada vez mais esforços vêm sendo aplicados tanto no desenvolvimento de novas tecnologias quanto de ferramentas para compreender e aprimorar as já existentes. Neste contexto, o estudo e análise dos processos por meio do emprego de novas técnicas se faz extremamente necessária. Em paralelo, a evolução dos equipamentos destinados à coleta e análise dos dados produzidos resultou em um grande volume de dados que, na maioria dos casos, é inviável de se analisar sem a ajuda de ferramentas computacionais. Este trabalho propõe a aplicação de métodos computacionais visando o tratamento de dados oriundos do monitoramento da temperatura em cordões de solda depositados utilizando eletrodos revestidos básicos da classe E7018 aglomerados com silicato e polímero. A aplicação das ferramentas matemáticas e a utilização de softwares e algoritmos computacionais para tratamentos dos dados obtidos se demonstrou bastante benéfica, possibilitando a comparação entre os ciclos de resfriamento obtidos além da análise de regiões específicas de maior interesse onde, por exemplo, são observadas as mudanças de fase no estado sólido.

Palavras-chave: Metal de solda. Ciclo térmico. Transformação de fase. Algoritmo Dynamic Time Warping..

## **ABSTRACT**

Welding processes are widely used industrially at small or large scale, such as in production of components of varied dimensions and values. More than using welding processes already developed, efforts are being made in the development of new technologies and tools to comprehend and approximate the existing. In this context, processes studies and analysis by applying new techniques are extremely necessary. In parallel, the evolution of equipment destined to collect and analyze data produced resulted in a big volume of data that, mostly, is hard to be studied without computational tools. The work goal is to apply computational methods to treat data provided by monitoring temperature in weld beads produced by utilization of basic coated welding electrodes E7018 agglomerated with silicate and polymer. The application of mathematical tools, softwares and algorithms to treat the obtained data proved to be quite beneficial, enabling the comparison between the cooling cycles obtained in addition to the analysis of specific regions of bigger interest where, by example, were observed phase changes in the solid state.

Key words: Welding metal. Cooling cycle. Phase transformation. Dynamic Time Warping Algorithm.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Experimento com arco elétrico de Davy	18
Figura 2 - Linha do tempo do surgimento dos processos de soldagem	19
Figura 3 - Fluxo geral de calor na soldagem por fusão	20
Figura 4 - Processos de soldagem e sua faixa usual de intensidade da fonte	21
Figura 5 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido	22
Figura 6 - Diagrama Fe-C	25
Figura 7 - Diagrama TRC esquemático	26
Figura 8 - Ciclo térmico de soldagem	28
Figura 9 - Demonstração da combinação “um-para-um” ao se considerar o cálculo de distância euclidiano	30
Figura 10 - Demonstração da combinação “um-para-muitos” ao se considerar o cálculo do algoritmo DTW	30
Figura 11 - Matriz esquemática do caminho gerado pelo custo acumulado entre duas séries temporais	32
Figura 12 - Representação esquemática do sistema de aquisição de dados utilizado na medição da temperatura do metal de solda	33
Figura 13 - Velocidade de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 5% de polímero	37
Figura 14 - Velocidade de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 13% de polímero	38
Figura 15 - Velocidade de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo aglomerado com silicato	38
Figura 16 - Velocidade de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 5% de polímero após tratamento de suavização dos dados	39
Figura 17 - Velocidade de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 13% de polímero após tratamento de suavização dos dados	40
Figura 18 - Velocidade de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com silicato após tratamento de suavização dos dados	40

Figura 19 - Sobreposição das curvas temperatura x tempo do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 5% de polímero	41
Figura 20 - Sobreposição das curvas temperatura x tempo do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 13% de polímero	42
Figura 21 - Sobreposição das curvas temperatura x tempo do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com silicato	42
Figura 22 - Sobreposição das curvas temperatura x tempo do metal de solda produzido com utilização de eletrodos diferentes	43
Figura 23 - Histograma do número de pontos por temperatura do cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com 5% de polímero	45
Figura 24 - Histograma do número de pontos por temperatura do cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com 13% de polímero	46
Figura 25 - Histograma do número de pontos por temperatura do cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com silicato	46
Figura 26 - Derivada da temperatura pelo tempo no cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com 5% de polímero	48
Figura 27 - Taxa de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo aglomerado com 5% de polímero no intervalo de 6s a 8s	49
Figura 28 - Derivada da temperatura pelo tempo no cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com 13% de polímero	50
Figura 29 - Taxa de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo aglomerado com 13% de polímero no intervalo de 7s a 8s	51
Figura 30 - Derivada da temperatura pelo tempo no cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com silicato	52
Figura 31 - Taxa de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo aglomerado com silicato no intervalo de 7s a 10s	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores da somatória de distância entre curvas dos cordões de solda produzidos com eletrodo aglomerado com 5% de polímero	43
Tabela 2 - Valores da somatória de distância entre curvas dos cordões de solda produzidos com eletrodo aglomerado com 13% de polímero	44
Tabela 3 - Valores da somatória de distância entre curvas dos cordões de solda produzidos com eletrodo aglomerado com silicato	44
Tabela 4 - Valores da somatória de distância entre curvas de cordões de solda produzidos com eletrodos diferentes	44
Tabela 5 - Valores aproximados dos intervalos de temperaturas de Ar3 a Ar1 dos cordões de solda produzidos com a utilização de cada um dos eletrodos	53

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01	20
Equação 02	21
Equação 03	27

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVOS	17
2.1.	Objetivo Geral	17
2.2.	Objetivos Específicos	17
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1.	Histórico do Arco Elétrico na Soldagem	18
3.2.	A Física do Arco Elétrico	20
3.2.1.	O arco elétrico como fonte de energia para soldagem por fusão	20
3.2.2.	Características térmicas do arco elétrico	21
3.3.	Soldagem com eletrodo revestido	22
3.3.1.	Processo de soldagem	22
3.3.2.	Tipos de revestimento	23
3.4.	Metalurgia da soldagem	24
3.5.	Fluxo de calor e ciclo térmico de soldagem	26
3.5.1.	Importância do ciclo térmico na soldagem	26
3.5.2.	Técnicas para medição de temperatura em soldagem	28
3.6.	Distorção Dinâmica do Tempo (Dynamic Time Warping - DTW)	29
4.	METODOLOGIA	33
4.1.	Dados coletados	33
4.2.	Tratamento de dados	34
4.3.	Elaboração de gráficos e utilização do algoritmo de DTW para comparação das curvas obtidas	35
4.4.	Elaboração de gráficos para análise e comparação dos resultados obtidos na região de interesse	35
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1.	Suavização dos gráficos de velocidade de resfriamento	37
5.2.	Sobreposição das curvas de velocidade de resfriamento e aplicação do algoritmo de Dynamic Time Warping (DTW)	41
5.3.	Produção de histogramas para avaliação do perfil do resfriamento na região de mudança de fase	45

5.4.	Produção de gráficos de derivada por tempo para avaliação do perfil da curva de resfriamento	47
6.	CONCLUSÃO	54
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	APÊNDICES	59
	APÊNDICE A - Algoritmo dynamic time warping produzido para o cálculo das distâncias entre duas curvas de resfriamento	59

## 1. INTRODUÇÃO

A sociedade americana de soldagem (American Welding Society - AWS) define os processos de soldagem como “operações que visam obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição”. Definição esta que engloba os processos atualmente definidos como soldagem, que são amplamente utilizados, desde a fabricação à recuperação de peças, em pequena ou larga escala.

Estes variam entre si quanto a execução, materiais e maquinários utilizados, entre outros fatores, porém mantém como ponto em comum a utilização de fontes para o fornecimento de energia e elevação da temperatura do material o qual se deseja soldar, sendo portanto os fatores relacionados à temperatura e fornecimento de calor de grande importância para a investigação e implementação de melhorias no processo. Dentre as diferentes fontes de energia para processos de soldagem por fusão, têm-se como a mais utilizada atualmente o arco elétrico justificando, portanto, a necessidade de se entender as características de sua utilização e as mudanças provocadas nos materiais.

Variações de temperatura observadas durante a operação provocam alterações macro e microestruturais do material. Tais mudanças alteram de forma significativa o comportamento mecânico na região, uma vez que propriedades como a resistência mecânica, a dureza dentre outros fatores dependem diretamente da microestrutura. As mudanças resultantes provêm da alteração que se tem na temperatura do material ao longo do tempo, conhecida como ciclo térmico, onde a fonte aquece o material acima de sua temperatura *liquidus* através da passagem rápida pela região seguida pelo resfriamento a velocidades elevadas. A determinação do ciclo térmico em diferentes regiões de uma junta soldada pode ser estimada por modelos matemáticos e determinada a partir do monitoramento da temperatura através de diferentes técnicas experimentais. Análise esta que, juntamente com o estudo da microestrutura do material e de diagramas de fase ou constitucionais, permitem avaliar o impacto gerado pelo processo na região de solda e prever ou determinar posteriormente as diferentes propriedades do material na região da junta em relação ao restante de sua estrutura.

Com base nisso, propõe-se neste trabalho o tratamento de dados de temperatura coletados a partir da inserção de um termopar na poça de fusão durante a soldagem com eletrodos revestidos básicos aglomerados com silicato e polímero.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Tratar e analisar os dados de temperatura coletados através da inserção de um termopar na poça de fusão de soldas produzidas por eletrodos revestidos básicos aglomerados com silicato e polímero.

### **2.2 Objetivos específicos**

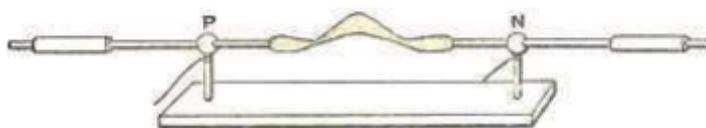
- Propor ferramentas matemáticas a serem empregadas no tratamento dos dados de ciclo térmico coletados em processo de solda;
- Promover o tratamento de dados de maneira a reduzir os ruídos gerados em função da técnica empregada para monitorar a temperatura;
- Verificar a possibilidade de se identificar temperaturas de transformação de fase no estado sólido do metal de solda.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Histórico do arco elétrico na soldagem

O arco elétrico pode ser definido como o fenômeno observado quando se tem uma descarga elétrica sustentada entre dois pontos por um gás ionizado a alta temperatura, ao qual se dá o nome de plasma. Esse fenômeno foi publicado pela primeira vez na revista “Monthly Magazine” e posteriormente por Sir Humphry Davy durante o século XIX em seu livro “Elements of Chemical Philosophy” enquanto ele, químico, trabalhava como professor na Royal Institution da Grã Bretanha com o que era considerado a bateria elétrica mais poderosa do mundo à época. Davy descreve em seu livro o experimento o qual tinha desenvolvido que produzia uma chama elétrica, que ainda não era chamada de arco elétrico, a qual conseguia produzir energia suficiente para fundir rapidamente metais os quais não se conseguia fundir à época, tal experimento se encontra esquematizado na figura 1 abaixo. A partir de sua observação, Sir Humphry desenvolve então a primeira lâmpada incandescente, ao se utilizar da passagem de uma alta corrente elétrica sobre um fino fio de platina, tal lâmpada não tinha um brilho ou duração necessária para um uso prático porém demonstrava de forma eficaz a descoberta do arco elétrico (KNIGHT, 1992).

Figura 1 - Experimento com arco elétrico de Davy



FONTE: ROSSI, 2011

Após a descoberta de Sir Humphry Davy, o mesmo, bem como outros cientistas, se debruçaram sobre o arco elétrico, visando estudar as suas propriedades e futuras possíveis aplicações, teve-se então, o início das descobertas das características específicas do arco elétrico e das suas implicações.

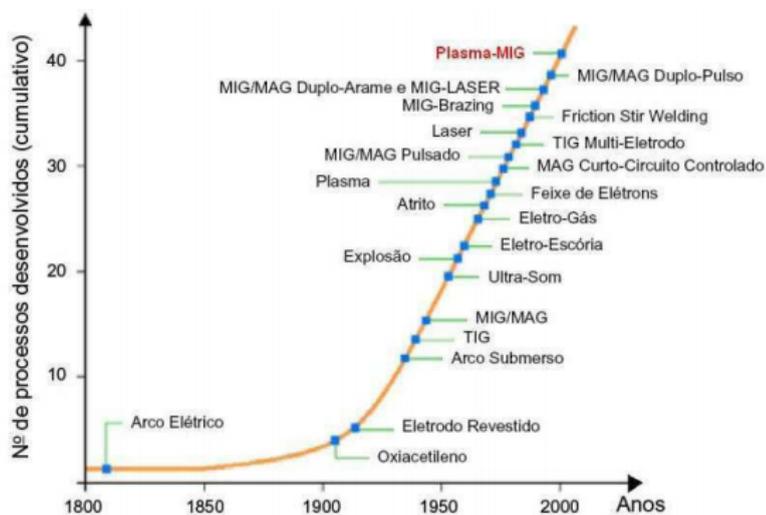
Dentre as descobertas que impulsionaram o desenvolvimento de técnicas envolvendo o arco elétrico, destaca-se a patente de um processo inovador de produção de aço, desenvolvido em 1856 por Henry Bessemer. Este processo leva a um aumento na produção de aço, fazendo com que a escala se torne verdadeiramente industrial, o que acabou por levar a

necessidade do desenvolvimento de novas técnicas de união do aço produzido, se possível de forma mais ágil que as existentes, geralmente se utilizando de parafusos. Em 1865, é gerada a primeira patente de soldagem por arco elétrico, quando o inglês Wilde demonstrou, com sucesso, a união de duas pequenas peças de ferro ao passar uma corrente elétrica através delas, gerando uma solda por fusão. (ROSSI, 2011)

Ao passar do tempo, mesmo com o alto desenvolvimento tecnológico nas áreas metalúrgicas, fez-se necessário que os processos de soldagem fossem também aperfeiçoados já que, em grande parte dos processos e peças, a solda ainda era tida como a parte mais frágil do material. Em 1904, partindo desta necessidade, Oscar Kjellberg, um engenheiro sueco, desenvolveu a primeira solda com eletrodo revestido. Partindo da necessidade de se melhorar a soldagem que era executada em reparos de navios e caldeiras, o engenheiro, inventor e fundador da ESAB revestiu eletrodos com cal e os utilizou no processo de soldagem com arco elétrico. A função desse revestimento no eletrodo era facilitar a abertura do arco e aumentar sua estabilidade. Kjellberg patenteou este processo de soldagem com eletrodo revestido e a partir daí se teve a produção de eletrodos revestidos com diferentes materiais, visando sempre a melhoria no processo de soldagem, facilitação e estabilização do arco elétrico e proteção da região da solda contra contaminantes (FORTES, 2005).

É importante notar a evolução observada na união de materiais após a descoberta do arco elétrico, uma vez que possibilitou o surgimento de inúmeros novos processos. Na figura 2 é demonstrada linha do tempo de desenvolvimento dos processos de soldagem após a descoberta do arco elétrico:

Figura 2 - Linha do tempo do surgimento dos processos de soldagem



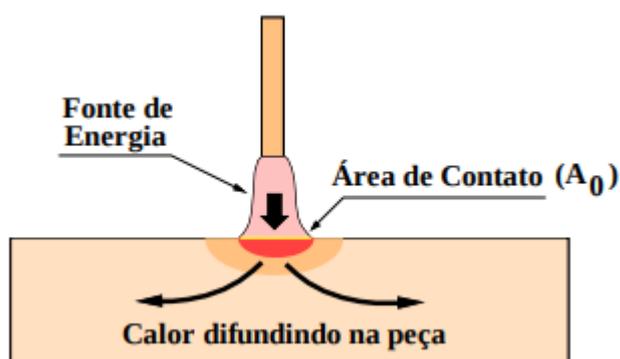
Fonte: ROSSI, 2011

## 3.2. A Física do Arco Elétrico

### 3.2.1. O arco elétrico como fonte de energia para soldagem por fusão

Os processos de soldagem por fusão se baseiam na aplicação localizada de energia em uma região específica, no caso a junta, para que se tenha a fusão localizada do material, levando à união química as partes quando resfriarem e solidificarem novamente (WAINER *et al.*, 2019). Para que se promova com sucesso a fusão localizada do material, deve-se ter uma fonte de capaz de fornecer energia a uma densidade suficiente para promovê-la antes que o calor seja dissipado pelo restante do material, como demonstrado na figura 3:

Figura 3 - Fluxo geral de calor na soldagem por fusão



Fonte: MODENESI, 2012

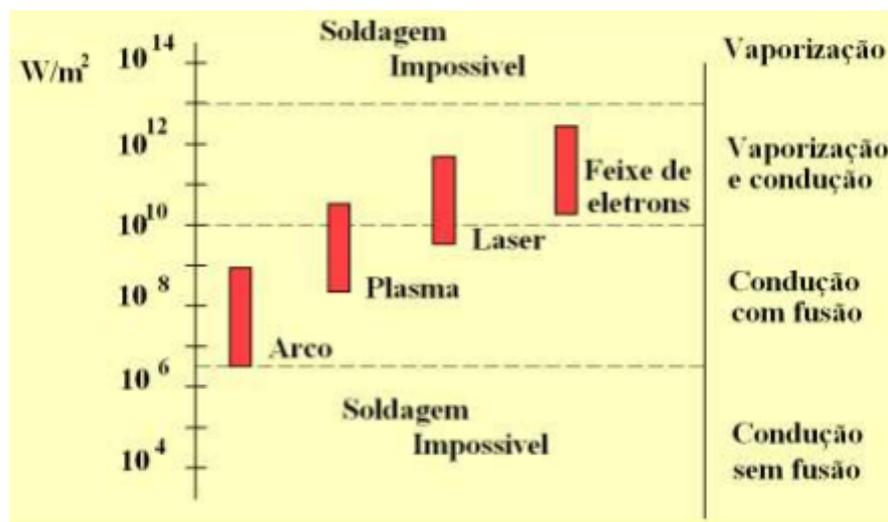
Para que se tenha uma fonte de energia que atenda a esses requisitos, alguns fatores devem ser observados. A potência específica ( $P_{esp}$ ) é utilizada para quantificar a capacidade de fornecimento de energia de uma fonte a uma determinada área. No caso de fontes elétricas como o arco, a tensão e corrente são utilizadas para determinar a potência específica a partir da seguinte relação:

$$P_{esp} = \frac{\eta UI}{A_0} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (01)$$

Onde  $\eta$  representa a fração de energia gerada pela fonte que é transferida para a peça,  $U$  é a tensão da fonte em questão,  $I$  a corrente aplicada e  $A_0$  a área de contato entre fonte e peça. De acordo com Modenesi (2012) para ser adequada a soldagem por fusão, a fonte a ser

utilizada deve possuir uma potência específica entre  $10^6$  e  $10^{13}$  W/m<sup>2</sup>, abaixo desse valor a energia é dissipada para o restante da peça sem que haja a fusão localizada da área que se deseja soldar e, em valores acima deste intervalo, o calor é tão concentrado que vaporiza a região antes de se ter a fusão do material. Como é possível avaliar na figura 4, o arco elétrico é passível de ser utilizado como fonte para processos de soldagem por se enquadrar neste perfil:

Figura 4 - Processos de soldagem e sua faixa usual de intensidade da fonte



Fonte: MODENESI, 2012

### 3.2.2 Características térmicas do arco elétrico

Como é possível perceber a partir da análise da figura 4, o arco elétrico se apresenta como uma opção para emprego em soldagem, conseguindo transformar de forma efetiva a energia elétrica em energia térmica e transferindo essa para a peça de modo a promover a fusão localizada.. É possível estimar o calor gerado em um arco elétrico a partir da seguinte equação:

$$Q = V I t \quad (02)$$

Onde se tem “Q” como a energia térmica gerada, em Joules, “V” representa a queda de potencial no arco, em Volts, “I” representa a corrente elétrica no arco, em Amperes e “t” é o tempo de operação, em segundos.

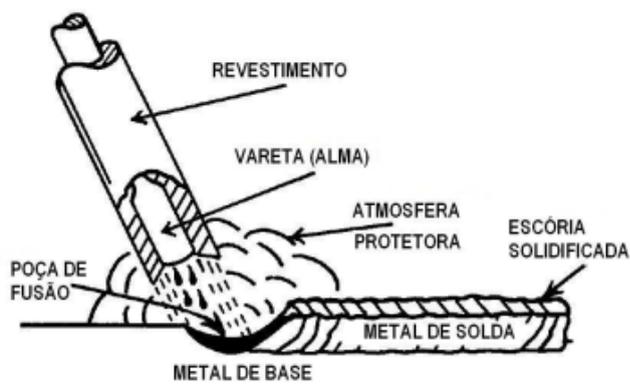
Para garantir a ionização do plasma, mantendo a sua capacidade de condução de corrente, deve-se produzir durante o tempo de operação uma alta temperatura no arco elétrico.

### 3.3 Soldagem com eletrodo revestido

#### 3.3.1 Processo de soldagem

Dentre os processos de soldagem, um dos mais utilizados ao longo de muitas décadas é o SMAW (Shielded Metal Arc Welding ou soldagem ao arco com eletrodos revestidos). Neste tem-se a aplicação de calor a partir de um arco elétrico produzido entre a peça de trabalho e a extremidade de um eletrodo metálico revestido (LAGE, 2015). O calor gerado pelo arco elétrico funde, não somente a peça e o eletrodo consumível, mas também o revestimento deste eletrodo, como demonstrado na figura 5:

Figura 5 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido



Fonte: FORTES, 2005

Durante a fusão do eletrodo consumível, gotas deste metal se desprendem e são transferidas para a poça de fusão, provendo metal de adição a solda. As gotas de metal são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos na fusão do material de revestimento do eletrodo. Durante a solidificação, o cordão de solda é também protegido da atmosfera pela escória que se forma, que deve ser removida ao final do processo (CRUZ, 2015).

Durante o processo de soldagem com eletrodos revestidos, é necessário uma interrupção constante para que se execute a troca de eletrodos, que geralmente possuem comprimento suficiente apenas para poucos centímetros de cordão de solda. Tal fator faz com que a solda com eletrodo revestido seja considerada um processo de baixa produtividade.

Além da necessidade de troca dos eletrodos, a remoção da escória também é um fator de diminuição da produtividade do processo (MODENESI, 2000). Devido a estes fatores, a soldagem com eletrodos revestidos é limitada a processos onde a produtividade não é um fator chave e onde se tem uma presença de maior mão de obra qualificada, uma vez que ela é necessária para a produção de um cordão de solda satisfatório.

### 3.3.2 Tipos de revestimento

Os eletrodos revestidos são classificados de acordo com as matérias primas do revestimento sendo os principais tipos: rútilicos, básicos e celulósicos. Por serem nomeados de acordo com os principais compostos que os constituem, têm-se que os eletrodos rútilicos são os que possuem alta quantidade de rutila ( $\text{TiO}_2$ ), facilitando a abertura e manutenção do arco elétrico enquanto os básicos possuem altas quantidades de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{CaF}_2$  apresentando um depósito de baixo hidrogênio (CRUZ, 2015).

A definição das matérias primas a serem utilizados no revestimento dos eletrodos se baseia no que se deseja obter como resultado da soldagem, sendo portanto escolhidas para desempenhar funções variadas. Dentre as principais funções dos materiais de revestimento, pode-se citar algumas delas, em que FORTES (2005) define os principais objetivos dos compostos de revestimento como sendo os seguintes:

- Estabilização do arco: Com o objetivo de facilitar a abertura do arco de soldagem e mantê-lo estável com menos esforço, atuando portanto na diminuição do gasto de energia necessário para abrir e manter o arco elétrico;
- Controle da integridade do metal de solda e adição de elementos de liga ao mesmo: Com o objetivo de proteger o metal de solda dos gases produzidos durante o processo, estes compostos atuam de forma a auxiliar na estabilidade do metal de solda, evitando que ele se altere negativamente durante o processo e forme ligas benéficas ao objetivo final durante a sua fusão e solidificação;
- Proteção do metal de solda: Sendo a função mais importante dos revestimentos, os compostos escolhidos com este objetivo devem ser capazes de garantir que o metal de solda, durante a sua transferência, não seja contaminado pelas partículas de oxigênio ou nitrogênio presentes no ar, fazendo com que ele chegue à poça de solda sem alterações malélicas em sua estrutura, como aumento da porosidade ou da fragilidade de sua estrutura.

Dentre os eletrodos utilizados comercialmente, pode-se citar como o mais tradicional o que pertence a classe E7018, que possui revestimento básico de baixo hidrogênio aglomerados com silicatos solúveis como os de sódio ou potássio. Além dos silicatos, os eletrodos E7018 possuem níveis consideráveis de pó de ferro, o que justifica a preferência dos soldadores por este modelo pois a adição de pó de ferro resulta numa alta melhoria na estabilidade do arco, o deixando mais fácil de ser manuseado e reduzindo o nível de respingos (CAVALCANTI, 2011).

Com o objetivo de melhorar características operacionais, entre outros motivos, estudos avaliam o emprego de materiais que diferem dos usualmente utilizados na produção de revestimento para os eletrodos. Têm-se então a adição de novos compostos aos habituais como, por exemplo, polímeros. Há um esforço no estudo de eletrodos revestidos aglomerados com polímeros e das suas propriedades quando da sua utilização em processos de soldagem, tendo-se aglomerados de resina orgânica, resina fenol formaldeído e furânica como relatado no estudo de Sorokin (2004), entre outros polímeros como os utilizado nos estudos de Vaz (2012, 2015 e 2017), ou no estudo de Menezes (2019), onde se utiliza eletrodos aglomerados com polímero para soldagem subaquática molhada.

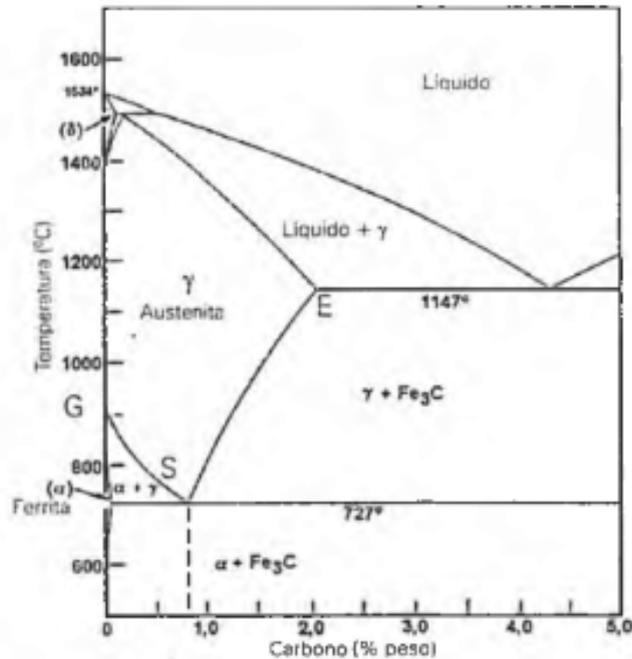
### **3.4 Metalurgia da soldagem**

A soldagem por fusão se baseia na aplicação de calor sobre a peça que se deseja soldar até que a mesma se funda e, então, seja resfriada até retornar ao seu estado inicial. Tal ciclo térmico produz alterações no material com que se trabalha, sendo elas micro e macroestruturais. As propriedades mecânicas da solda dependem da estrutura da junta após o processamento. Daí, portanto, a importância do ciclo térmico observado durante o processo uma vez que, ao se alterar características como a velocidade de resfriamento, obtém-se alterações que resultará em diferente comportamento mecânico (VASCONCELOS, 2009).

Por produzir estas variações de temperatura e deformações plásticas em uma pequena região de solda em um tempo relativamente pequeno, os processos de soldagem podem ser considerados como tratamentos termo mecânicos aplicados nos materiais com que se trabalha. As alterações estruturais decorrentes das variações de temperatura nas diferentes composições de aço carbono são descritas no diagrama de equilíbrio Fe-C, apresentado abaixo na figura 6, tal diagrama tem como objetivo demonstrar as fases do aço quando se tem

variações lentas de temperatura (no equilíbrio) , mas ainda serve como referência, se utilizado com cuidado em situações onde há variações bruscas de temperatura (MODENESI, 2000).

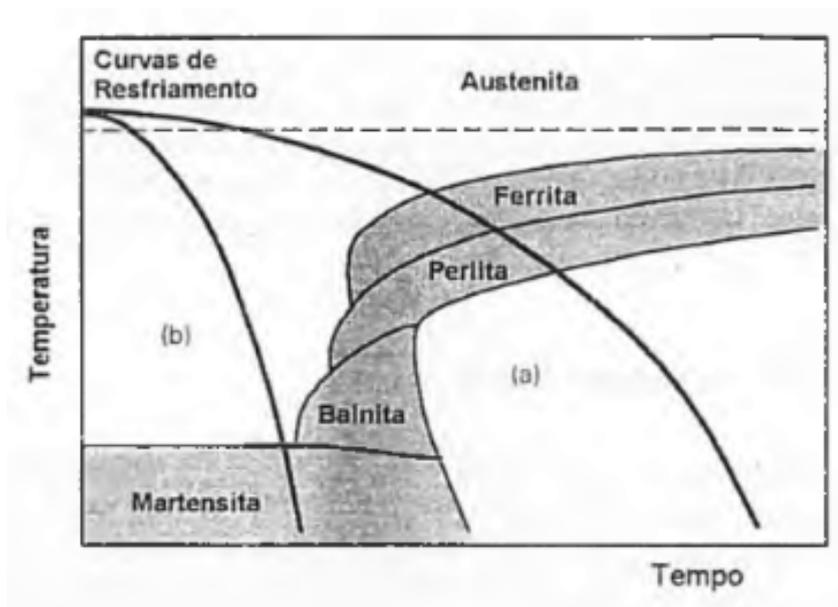
Figura 6 - Diagrama Fe-C



Fonte: MODENESI, 2000

Por se tratar de um diagrama em que são consideradas situações de equilíbrio, ele é consideravelmente limitado em algumas situações, como quando se tem resfriamento brusco a partir do campo austenítico há a formação de martensita, uma fase metaestável que por ser obtida em condição fora do equilíbrio, não é prevista no diagrama (MODENESI, 2000). Por ser uma fase com elevada dureza, a martensita é desejada como constituinte de alguns produtos com finalidades específicas, este é um dos fatores que demonstra a importância do conhecimento dos fenômenos metalúrgicos em processos envolvendo aço. Para complementar as previsões do diagrama Fe-C, é possível consultar também outros como o transformação no resfriamento contínuo (TRC), onde se tem a demonstração de curvas com diferentes velocidades de resfriamento resultando em estrutura final diferente, como demonstrado esquematicamente na figura 7:

Figura 7 - Diagrama TRC esquemático



Fonte: MODENESI, 2000

### 3.5 Fluxo de calor e ciclo térmico de soldagem

#### 3.5.1 Importância do ciclo térmico na soldagem

Um dos grandes problemas ao se analisar o material obtido e as características do mesmo após um processo de soldagem é a definição correta da energia utilizada, uma vez que o calor que a peça realmente recebe é menor que o calor gerado pela fonte. Para que o processo de soldagem se desenvolva, é necessário um fornecimento de calor de forma intensa e localizada, para que não se dissipe pela peça e o metal de base na região desejada possa atingir a sua temperatura de fusão. Além da dissipação pela peça, outros fatores atuam na redução do calor efetivo aplicado na fusão da peça, como perdas de calor por salpico, aquecimento do bocal, radiação e convecção (HACKENHAAR, 2016).

O aporte térmico é a energia que se é efetivamente transmitida à peça por unidade de comprimento de soldagem. A determinação deste fator se faz importante pois, de acordo com JUNIOR (2013): “A aplicação do conceito potência de soldagem e rendimento térmico do arco sem levar em consideração a velocidade com que a fonte de energia se desloca sobre a peça não tem aplicações técnicas”. Tal grandeza é calculada pela seguinte equação:

$$H = \frac{\eta VI}{v} \quad (03)$$

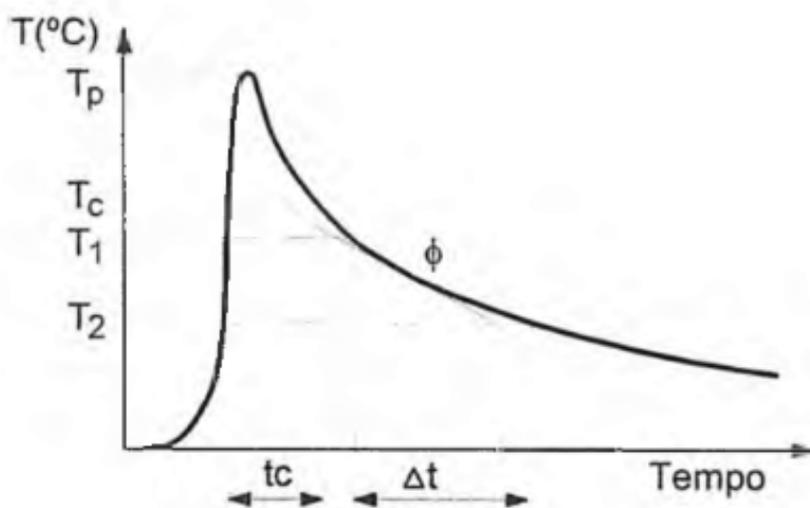
Onde H é a energia de soldagem em Joules por milímetro (J/mm),  $\eta$  representa a eficiência térmica do processo, V é a tensão no arco em volts (V), I é a corrente de soldagem em amperes (A) e v é a velocidade de soldagem em milímetros por segundo (mm/s). Esta equação é importante pois determina quanto de calor está sendo fornecido à peça para que ocorra a fusão, outro fator importante a se conhecer é a forma como se dá a dissipação do calor pela própria peça para as suas regiões com menor temperatura.

A dissipação de calor pela peça faz com que somente o aporte térmico seja insuficiente para se ter uma análise completa do fluxo de calor no cordão de solda. Fatores como a geometria das peças e o tipo de materiais empregados no processo afetam diretamente a dissipação da energia aplicada pela peça sem que ela atue efetivamente na fusão dos metais (JUNIOR, 2013).

É importante citar a contribuição de Daniel Rosenthal, cientista polonês, responsável pela principal teoria utilizada na produção de ciclos térmicos. Grande parte dos problemas envolvendo fluxo de calor em soldagem tiveram soluções baseadas ou adaptadas nas ideias de Rosenthal. Os estudos de fluxo de calor prévios a ele já eram bastante utilizados para previsões de fluxo e dissipação de calor em soldagem, sua grande contribuição foi produzir um modelo de extração tridimensional de calor, onde um cordão de solda depositado sobre uma superfície sólida sofre extração de calor em todas as direções. Apesar de serem importantes para as futuras modelagens de processos de soldagem e ter sido comprovada por experimentos posteriores, as ideias de Rosenthal nem sempre são aplicáveis pois, em situações reais de soldagem, nem sempre se consegue classificar o fluxo de calor como bidimensional ou tridimensional (JUNIOR, 2013).

Além dos modelos matemáticos, a avaliação da variação de temperatura pode ser medida experimentalmente com o auxílio de termopares durante o processo de soldagem, e os resultados destas medições podem ser plotadas num gráfico em função do tempo produzindo o ciclo térmico de soldagem. (ZAMIN, 2010) cuja forma é apresentada na figura 8:

Figura 8 - Ciclo térmico de soldagem



Fonte: MODENESI, 2000

Os pontos demonstrados no gráfico representam as seguintes características:

- Temperatura de pico ( $T_p$ ): É a temperatura máxima atingida no ponto observado pelos termopares durante o processo. Tem importância para se avaliar as transformações microestruturais no ponto;
- Tempo de permanência ( $t_c$ ): É a medida do tempo em que o material apresentou temperatura acima da temperatura crítica ( $T_c$ ), que é a temperatura mínima na qual o material está sujeito a alterações em sua microestrutura ou em suas propriedades;
- Velocidade de resfriamento ( $\Phi$ ): É a derivada da curva em uma temperatura escolhida, determina a velocidade com que o material está dissipando energia naquele dado momento.

### 3.5.2 Técnicas para medição de temperatura em soldagem

Visando a importância da verificação e análise das temperaturas atingidas na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF) durante a soldagem, é importante conhecer os diferentes equipamentos e técnicas utilizados para coleta de seus valores. Dentre as técnicas utilizadas, pode-se citar a medição por pirômetros, capazes de medir a irradiação térmica da superfície de um material e informar a sua temperatura, lápis de fusão, onde se marca o material antes do processo e, ao atingir a temperatura de referência a marcação é

degradada, informando que o material atingiu tal temperatura e termopares, equipamento referência para a produção deste estudo.

Termopares são sensores de temperatura, construídos a partir da junção de dois condutores metálicos que, quando unidos em suas extremidades e expostos a temperaturas diferentes geram uma diferença de potencial onde, por sinais elétricos e conversões é possível verificar a temperatura do material a partir da diferença de potencial. A reação elétrica dos termopares foi descoberta em 1821 por Thomas Seebeck, o físico estoniano notou que, ao se aplicar uma diferença de temperatura entre as junções de um circuito fechado formado por condutores distintos, ocorre uma circulação de corrente entre a chamada extremidade quente, em contato com o material o qual se deseja obter a temperatura, e a extremidade fria. A partir das leis da termelétrica definidas por Seebeck, é possível então a utilização dos termopares para a transformação da energia térmica em elétrica e verificação da temperatura (DIEHL, 2013).

### **3.6 Distorção Dinâmica do Tempo (Dynamic Time Warping - DTW)**

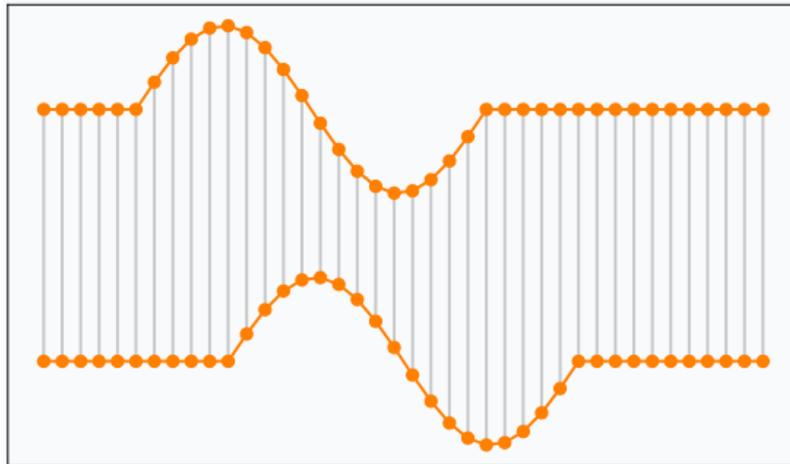
Acompanhando a evolução da tecnologia e dos novos modelos descobertos, a modelagem de sistemas de dados, bem como a sua análise ganharam um grande avanço com o auxílio da computação e da produção de softwares voltados para a análise de dados.

Dentre as novas técnicas descobertas para a análise de dados com auxílio de recursos computacionais está a distorção dinâmica do tempo, ou DTW (abreviação de Dynamic Time Warping), um algoritmo criado para se poder calcular a similaridade entre duas séries temporais com velocidades diferentes, ou seja, quando o número de dados entre os dois conjuntos não coincide. Como forma de se calcular a similaridade entre diferentes curvas em um espaço euclidiano pode-se encontrar a diferença da medida da área abaixo de cada curva e, então, se comparar a diferença entre a área da curva analisada com as outras curvas no mesmo espaço. O problema destes dois métodos é que eles não funcionam bem para curvas que possuam uma quantidade diferente de pontos, fazendo com que a análise fique defasada, sendo portanto o ponto onde o DTW se apresenta mais vantajoso (TAVENARD, 2021).

A grande vantagem da utilização do algoritmo DTW é que, diferentemente da medida de distância euclidiana, onde se faz uma medida de distância de pontos “um-para-um”, o algoritmo produz uma comparação entre as curvas ao construir combinações “um-para-muitos”, que diminui ou reduz em grande parte o erro apresentado pela análise a

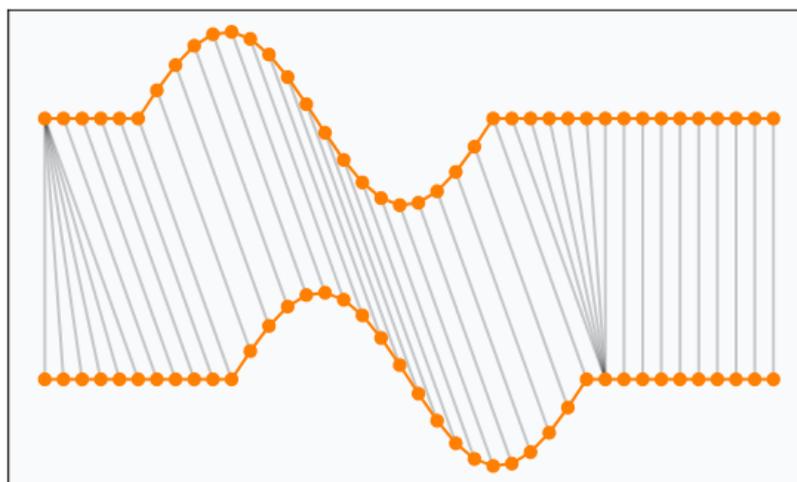
partir da distância euclidiana quando se tem duas curvas com um número diferente de pontos (SENIN, 2008). A diferença de análise do cálculo da distância entre as duas curvas pode ser melhor observada nas figuras 9 e 10:

Figura 9 - Demonstração da combinação “um-para-um” ao se considerar o cálculo de distância euclidiano



Fonte: TAVENARD, 2021

Figura 10 - Demonstração da combinação “um-para-muitos” ao se considerar o cálculo do algoritmo DTW



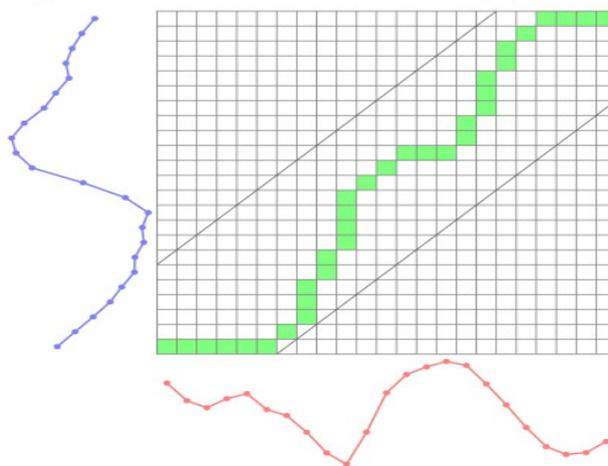
Fonte: TAVENARD, 2021

O cálculo euclidiano de distância entre curvas, demonstrado na figura 9, alinha os pontos um a um e calcula a distância entre eles, produzindo uma média da distância geral ao final. Este tipo de cálculo não é indicado para a análise de distância entre curvas com

quantidades diferentes de pontos. Já a figura 10 demonstra a combinação de cálculo da distância de um ponto para muitos na proposta do DTW, essa forma de análise é similar a um ajuste das duas curvas, onde os vales e picos de uma curva serão comparados aos vales e picos da outra, respectivamente, bem como suas regiões de plateau. Isso busca uma forma mais exata de se calcular a distância entre curvas com quantidade diferente de pontos em seu conjunto (ZHANG, 2015).

O algoritmo é produzido de forma a produzir uma matriz de “custo acumulado” da distância entre os pontos das duas séries temporais. Separa-se os valores da abcissa de cada série e se constrói uma matriz  $N \times M$  onde  $N$  e  $M$  são a quantidade de pontos de cada matriz. Tomando-se então uma das duas séries como referência, é calculado então a distância entre o primeiro valor da primeira série temporal e o primeiro valor da segunda temporal, diferença que irá ocupar o espaço (1,1) da matriz, a diferença entre o primeiro valor da série referência e o segundo valor da segunda série ocupa o espaço (1,2) da matriz e assim sucessivamente até se preencher a primeira linha. Utiliza-se então a segunda série como referência e se repete o processo até preencher a primeira coluna. Os outros elementos da matriz são preenchidos ao se pegar o menor valor dos elementos adjacentes já calculados e somar à repetição do processo com o segundo item de cada série, e assim sucessivamente. A matriz produzida é então seguida de acordo com o caminho de menores valores obtidos, que irão ser somados entre si e o valor final da soma representa a distância entre as duas curvas, onde, quanto mais perto de zero, mais próximas as séries estão (SENIN, 2008). A figura 11 representa uma esquematização da matriz de representação em uma avaliação de duas séries temporais com o mesmo padrão onde é possível notar que o caminho acumulado é igual a zero, demonstrando a similaridade entre elas:

Figura 11 - Matriz esquemática do caminho gerado pelo custo acumulado entre duas séries temporais



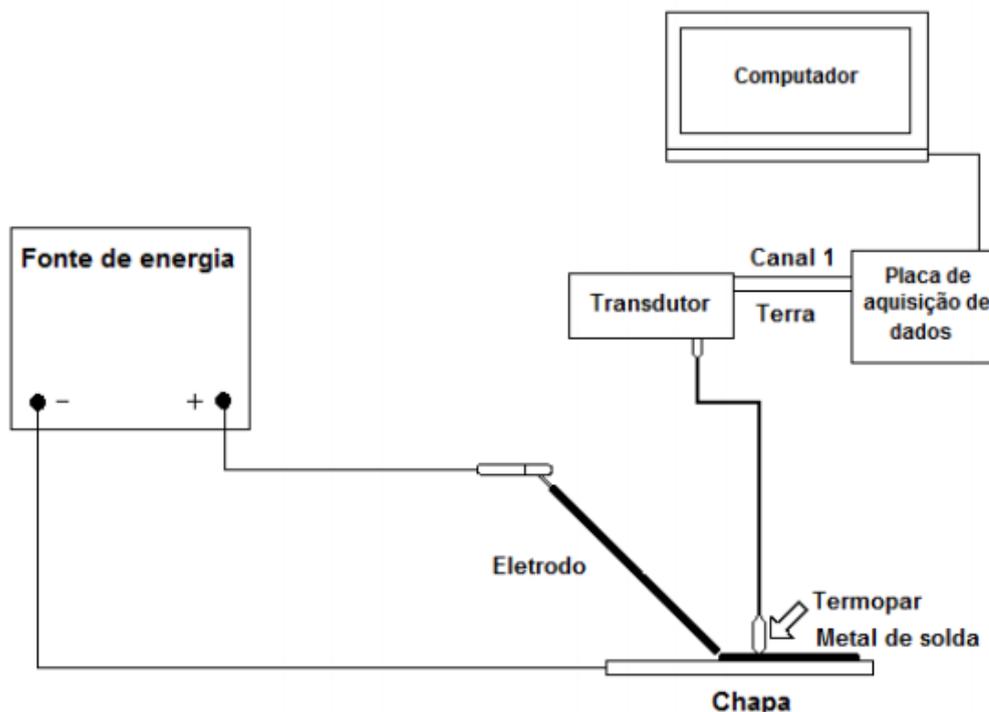
Fonte: Zhang, 2015

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Dados coletados

Os dados de temperatura analisados neste estudo foram coletados em estudo anterior onde foram depositados cordões de solda empregando eletrodos revestidos básicos aglomerados com silicato e polímero sobre chapas de aço ASTM A36 com espessura de  $\frac{1}{2}$ ". O monitoramento da taxa de resfriamento no metal foi obtido a partir da inserção de termopar do tipo S (Platina/Ródio) com diâmetro de 0,30mm na poça de fusão durante a deposição dos cordões de solda seguindo o esquema demonstrado na figura 12:

Figura 12 - Representação esquemática do sistema de aquisição de dados utilizado na medição da temperatura do metal de solda.



Fonte: VAZ, 2014

Os eletrodos utilizados para a produção dos dados estudados eram de três tipos: aglomerado com silicato (classe E7018), aglomerado com 5% e 13% de polímero.

Os termopares foram inseridos na poça de fusão 30 segundos após o início da soldagem. Após o monitoramento, os fios foram cortados e soldados novamente antes de nova medição. Os dados gerados pela inserção do termopar foram amplificados a partir da utilização de transdutores da marca Thermitrans, modelo TH30-1G e transformados em dados digitais em uma placa de aquisição de dados da marca Data Translation, modelo DT9816. Realizou-se medições e captura de dados a uma taxa de 100 pontos/segundo.

#### 4.2 Tratamento de dados

Os dados de temperatura da poça de solda ao longo do tempo foram coletados no passo anterior e transferidos para planilhas. Foi feita a análise dos dados a partir do conjunto de coletas de 3 amostras de cada eletrodo, sendo portanto o conjunto total de 9 amostras de temperatura por tempo, produzindo tabelas com uma média de 4100 pontos em cada coleta.

A partir das tabelas produzidas com os dados de temperatura e tempo, foram produzidos gráficos de temperatura x tempo, sendo a temperatura o eixo das ordenadas e o tempo o eixo das abcissas.

O tratamento de dados foi feito a partir da conversão das tabelas para arquivos de texto e seu devido tratamento utilizando o programa SINAL desenvolvido pelo professor Paulo José Modenesi do Departamento de Engenharia Metalúrgica de Materiais da UFMG. Para tratamento inicial dos dados de temperatura teve-se o objetivo de reduzir o ruído provocado pelo grande número de dados e a sensibilidade dos termopares, fazendo com que as curvas obtidas se tornassem mais suaves, reduzindo o efeito provocado pelos valores muito destoantes. Para esta redução de ruído foi aplicado às tabelas um filtro passa baixa considerando o valor de média. Este tipo de filtro se baseia na substituição de cada valor de temperatura pela média dos valores de seus  $2(Nf)$  vizinhos mais próximos, onde  $Nf$  representa um valor de 0 a 100.

Para o tratamento dos dados obtidos foi-se escolhido um  $Nf$  de 20, buscando uma suavização da curva e dos ruídos sem que se alterasse de forma significativa o aspecto da curva ou os seus valores.

### **4.3 Elaboração de gráficos e utilização do algoritmo de DTW para comparação das curvas obtidas**

A partir dos dados suavizados após a passagem do filtro, fez-se a produção de gráficos com o objetivo de se analisar a distância entre as curvas obtidas para cada conjunto de dados, primeiramente comparando-se curvas de mesmo tipo de eletrodo e, posteriormente, comparando curvas de eletrodos diferentes entre si.

A análise e comparação dos resultados foi feita primeiramente partindo de uma sobreposição dos gráficos das três coletas de dados dos eletrodos e comparando as curvas primeiramente entre os eletrodos de cada tipo entre si, e posteriormente comparando 3 curvas, sendo cada uma correspondente a um eletrodo diferente.

A análise apenas visual dos dados obtidos não é muito confiável, portanto com o objetivo de não se possuir apenas esse tipo de comparação da semelhança entre as curvas, partiu-se para a utilização de um algoritmo para obter uma comparação matemática entre as curvas. Utilizou-se o Google Colab, software gratuito da empresa Google, onde se é possível produzir algoritmos em linguagem de programação Python, bastante utilizado atualmente para a análise de grandes massas de dados. Com o auxílio do software e da linguagem de programação, foi possível produzir um algoritmo que reproduzisse o que propõe o DTW. O algoritmo utilizado se encontra no apêndice A deste documento e a partir dele obteve-se a soma do custo de distância das curvas de cada eletrodo entre si, e das curvas de eletrodos diferentes entre si, com o objetivo de se verificar se há similaridade entre as curvas para um mesmo ou diferentes eletrodos.

### **4.4 Elaboração de gráficos para análise e comparação dos resultados obtidos na região de interesse**

A partir dos dados com redução do ruído após a aplicação do filtro, fez-se a produção de gráficos com o objetivo de se ter uma observação mais focada na região de interesse, entre 900°C e 500°C, região que, de acordo com o diagrama Fe-C é onde ocorre a transformação de fase da austenita em ferrita. Esta análise foi pensada com o objetivo de se conseguir analisar a temperatura de transformação de fase de austenita em ferrita e cementita nos cordões de solda produzidos. O objetivo de se analisar melhor este intervalo de temperatura foi encontrar uma possível atenuação na curva de resfriamento, o que indicaria

que o calor está sendo proveniente da transformação de fase, e não da redução de temperatura do cordão de solda.

O primeiro tratamento com o objetivo de uma melhor visualização dos dados na região de interesse foi a produção de histogramas da quantidade de pontos por temperatura, com o objetivo de se avaliar em quais faixas de temperatura se obtinham os maiores números de pontos indicando se há ou não alteração na inclinação e como esta ocorre..

Após a análise dos histogramas, produziu-se gráficos da derivada da temperatura pelo tempo, visando-se ter mais um método de se observar a mudança de inclinação das curvas produzidas com os dados obtidos ao se observar a variação e os valores de derivada obtidos em cada região do gráfico, com foco em se analisar a região de interesse.

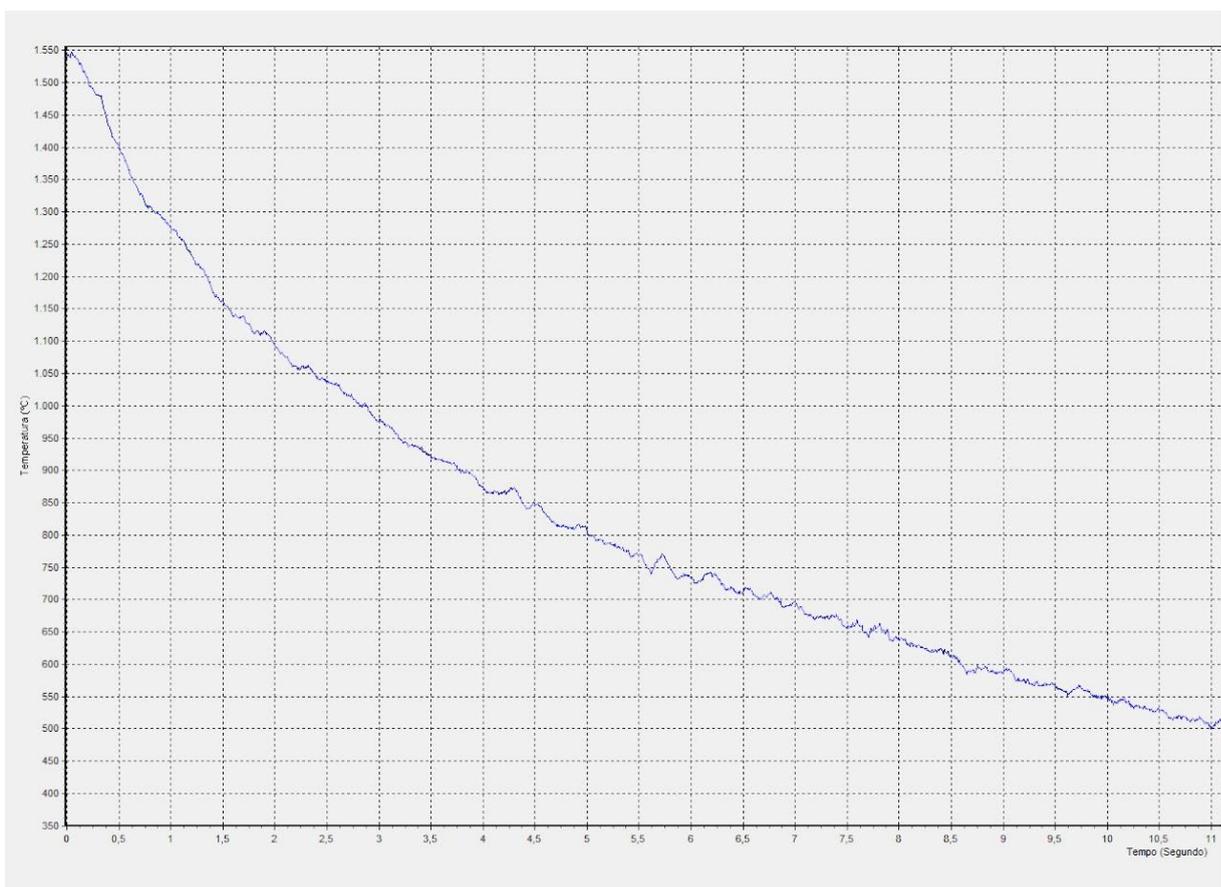
A partir dos gráficos de derivada por tempo, buscou-se então analisar a partir de qual ponto no tempo a derivada se aproximava de zero sem grandes variações posteriores. Comparou-se então o tempo relativo a este ponto, com o tempo no gráfico tratado das curvas de resfriamento, analisando-se qual a temperatura do cordão de solda nesta situação. A avaliação desse ponto se faz importante pois a derivada próxima a zero indica uma relativa estabilização da curva de resfriamento, indicando as temperaturas do intervalo de Ar3 a Ar1 do cordão de solda produzido, onde se tem início a transformação da austenita em ferrita.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Suavização dos gráficos de velocidade de resfriamento

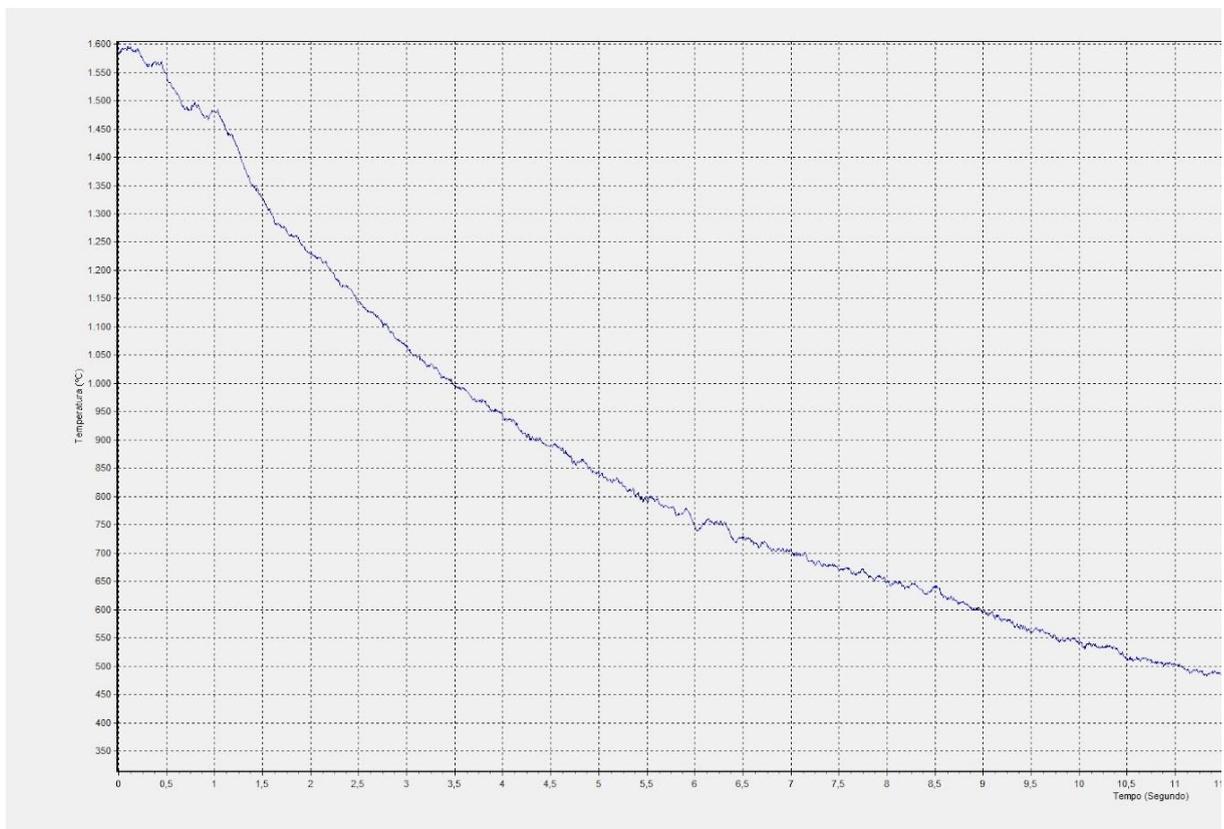
A partir dos gráficos produzidos com os dados gerados no item 4.1, foi possível perceber a grande quantidade de ruído que se apresenta na curva gerada a partir dos dados de variação de temperatura sem tratamento. As figuras de 13 a 15 apresentam exemplos de curvas para cada eletrodo testado:

Figura 13 - Temperatura do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 5% de polímero



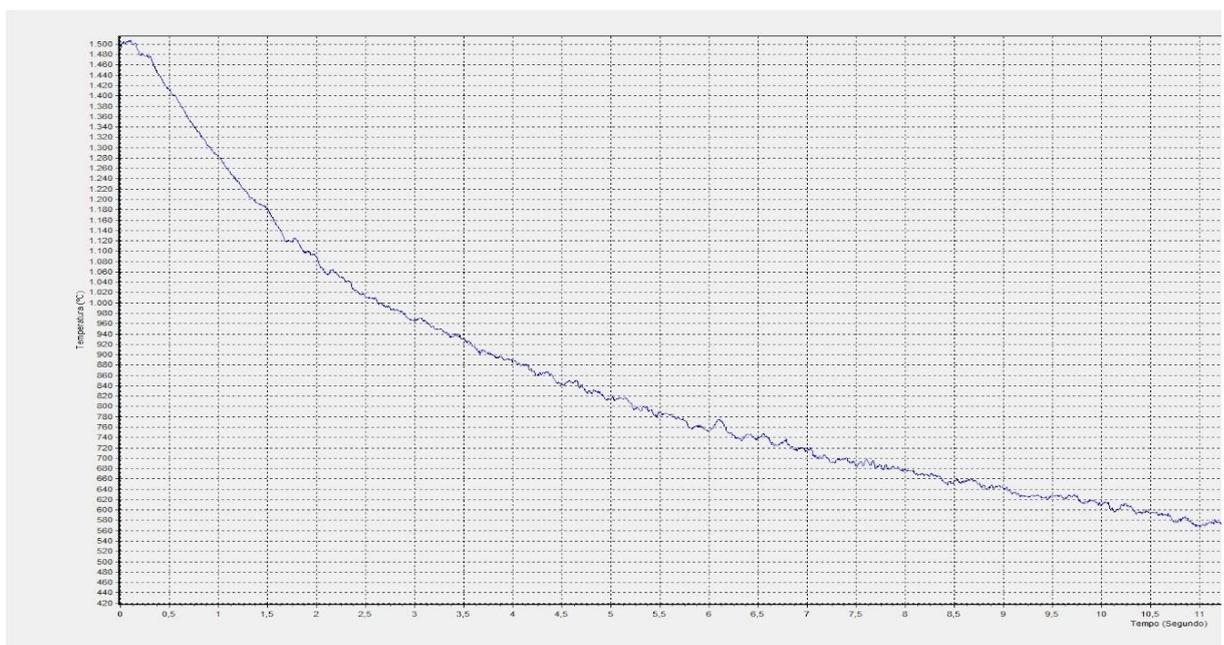
Fonte: Próprio autor

Figura 14 - Temperatura do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 13% de polímero



Fonte: Próprio autor

Figura 15 - Temperatura do metal de solda produzido com utilização de eletrodo aglomerado com silicato.



Fonte: Próprio autor

Prosseguiu-se então com a aplicação do filtro passa baixa para eliminação do ruído (suavização da curva) possibilitando uma análise mais precisa dos dados obtidos, sem a interferência destes. As figuras 16 a 18 demonstram os gráficos suavizados obtidos a partir dos dados que produziram os gráficos 13 a 15.

Figura 16 - Temperatura do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 5% de polímero após tratamento de suavização dos dados



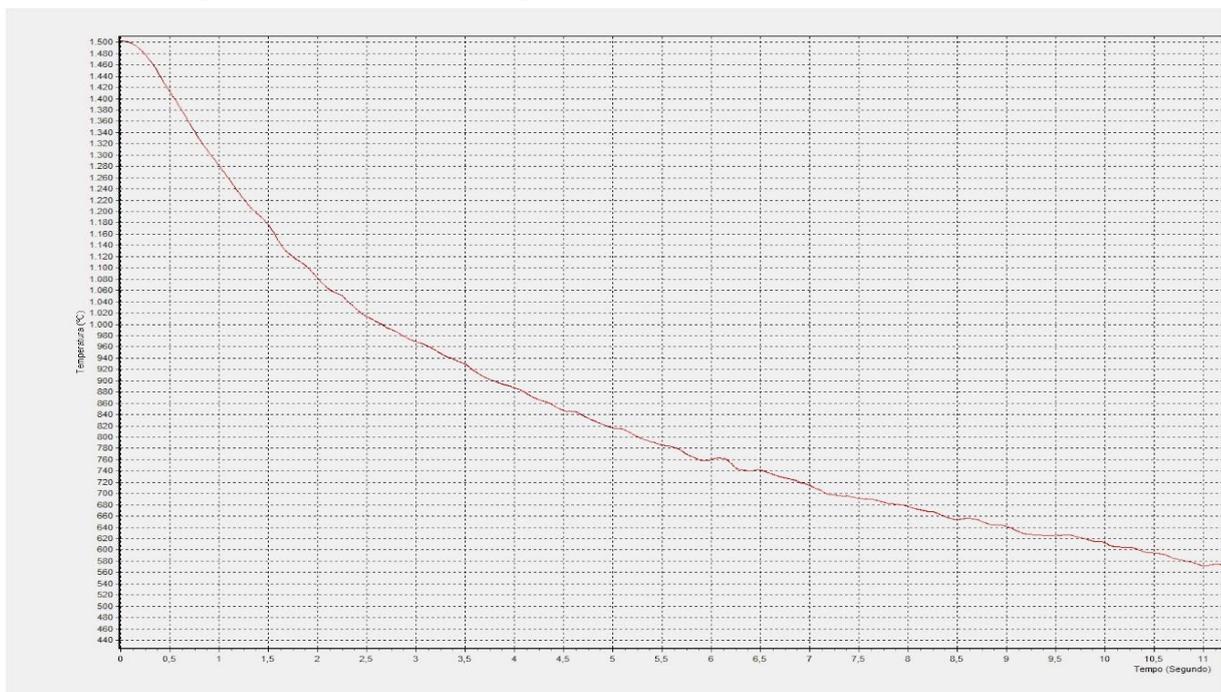
Fonte: Próprio autor

Figura 17 - Temperatura do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 13% de polímero após tratamento de suavização dos dados



Fonte: Próprio autor

Figura 18 - Temperatura do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com silicato após tratamento de suavização dos dados



Fonte: Próprio autor

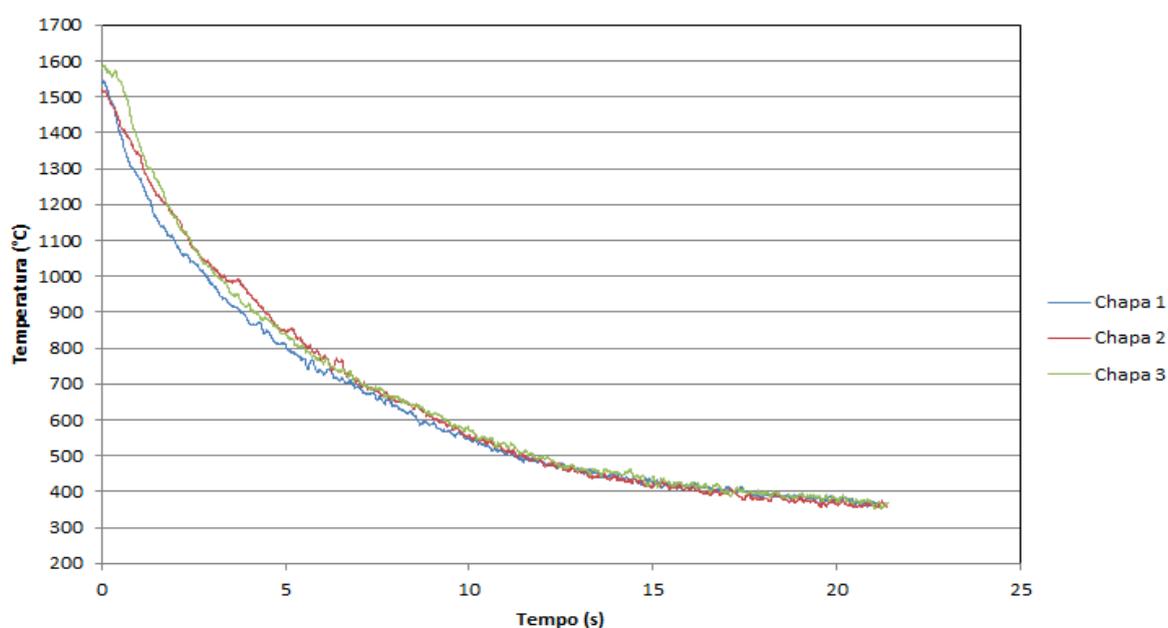
É possível notar o quanto as curvas se apresentam mais suaves após a aplicação dos filtros, estando sem a ação dos valores destoantes e com uma menor influência dos ruídos, possibilitando que as análises posteriores possam ser feitas com maior confiança devido ao fato de se conseguir reduzir o efeito das variações provenientes da sensibilidade dos termopares.

É possível notar também nas figuras de 16 a 18 que, apesar de se obter uma suavização dos dados e remoção dos ruídos, o filtro utilizado não desconfigura o padrão da curva, demonstrando que o filtro não distorce o resultado obtido.

## 5.2 Sobreposição das curvas de velocidade de resfriamento e aplicação do algoritmo de Dynamic Time Warping (DTW)

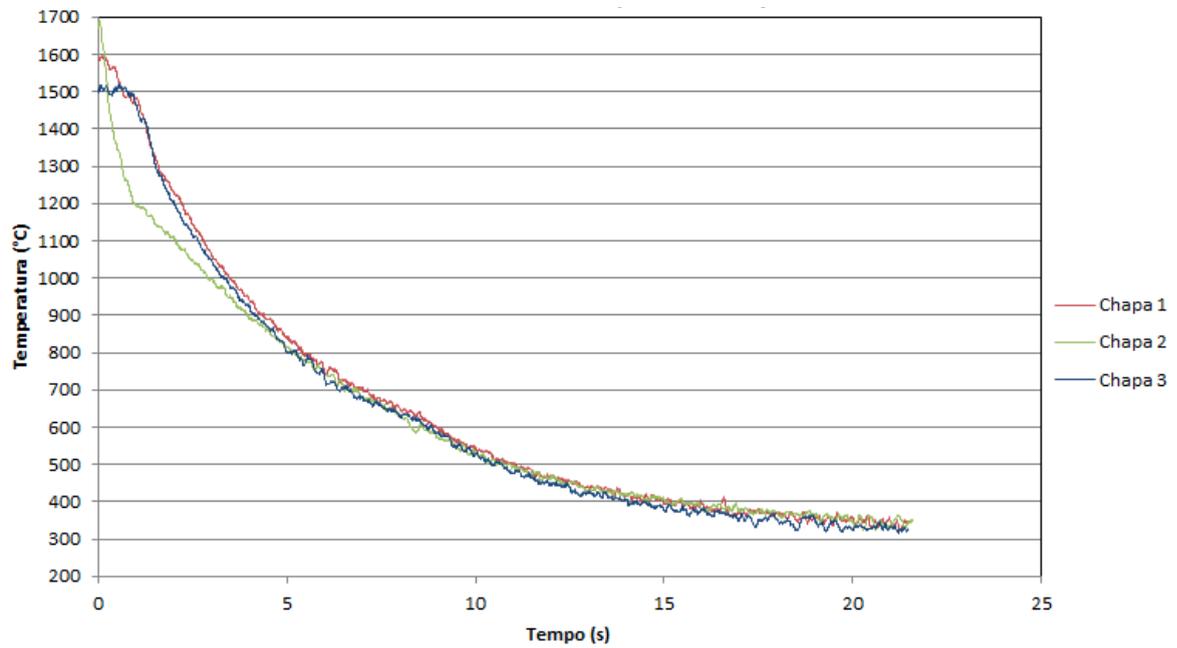
Nas figuras 19 a 22 são apresentados os gráficos de temperatura em função do tempo no metal de solda depositado com os mesmos e eletrodos diferentes. Comparando estas curvas é possível verificar maior semelhança entre as obtidas na soldagem com o mesmo eletrodo se comparada às que foram produzidas empregando eletrodos de diferentes tipos.

Figura 19 - Sobreposição das curvas temperatura x tempo do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 5% de polímero



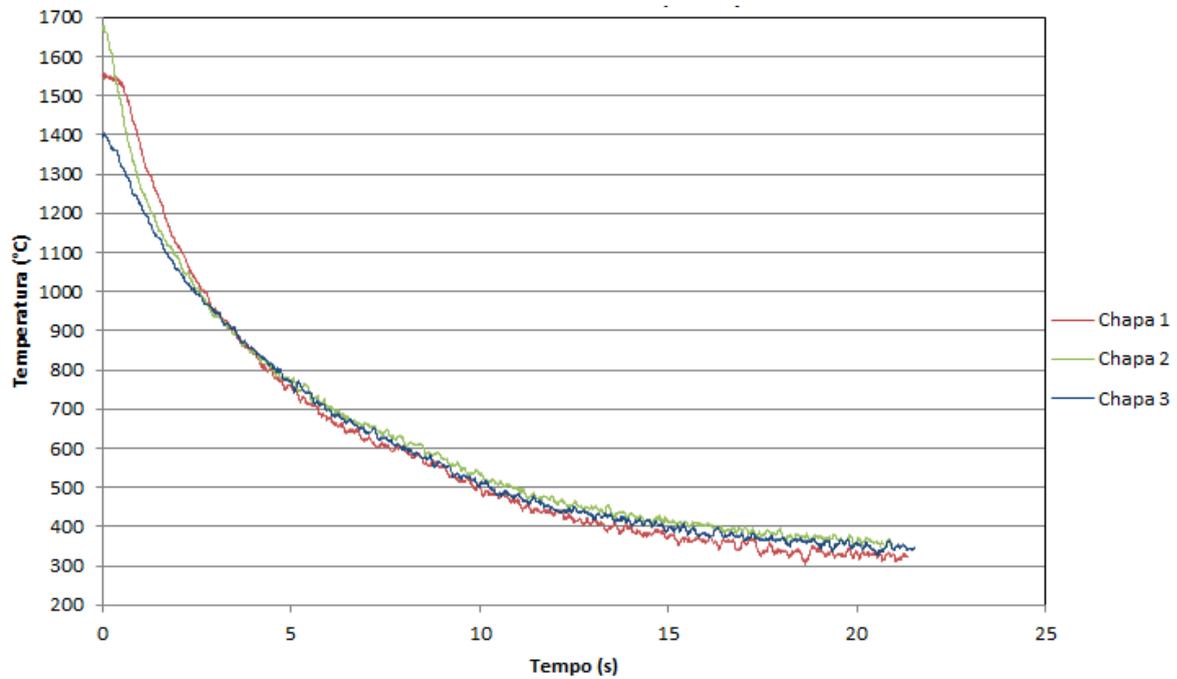
Fonte: Próprio autor

Figura 20 - Sobreposição das curvas temperatura x tempo do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com 13% de polímero



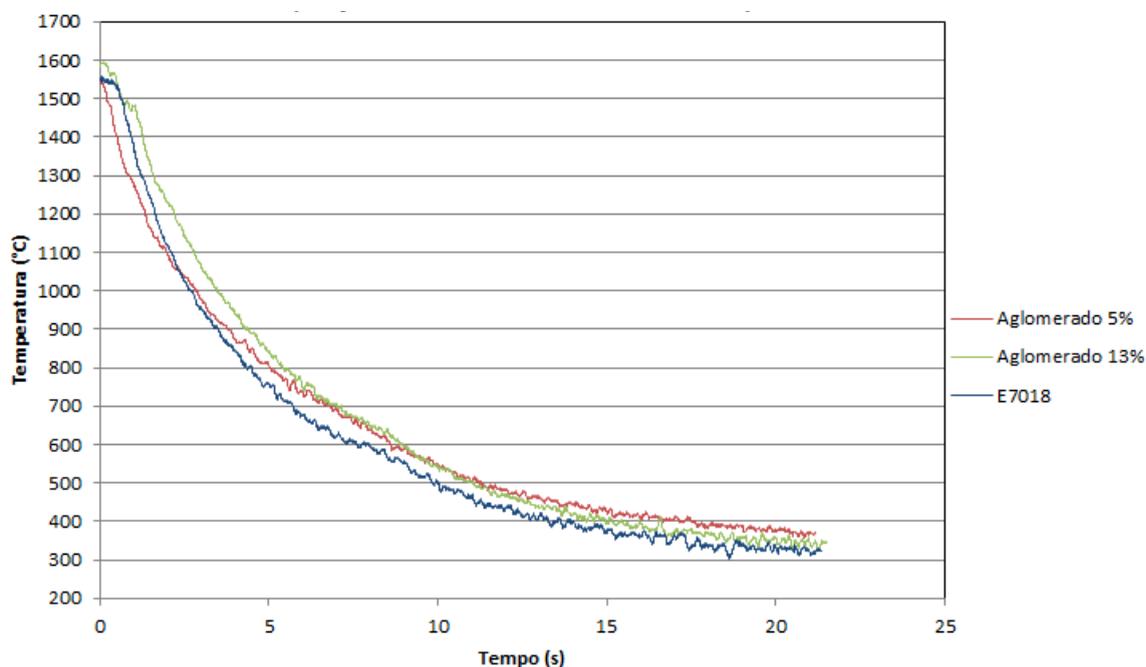
Fonte: Próprio autor

Figura 21 - Sobreposição das curvas temperatura x tempo do metal de solda produzido com utilização de eletrodo revestido aglomerado com silicato



Fonte: Próprio autor

Figura 22 - Sobreposição das curvas temperatura x tempo do metal de solda produzido com utilização de eletrodos diferentes



Fonte: Próprio autor

Para ir além de uma análise visual, foi-se aplicado a todos os conjuntos de dados de cada amostra de velocidade de resfriamento o algoritmo DTW produzido comparando, de duas em duas, as curvas entre eletrodos do mesmo tipo e entre eletrodos de tipos diferentes, seguindo o padrão apresentado nos gráficos desta seção. As tabelas contendo os valores totais das distâncias curva a curva de eletrodos iguais e curva a curva de eletrodos diferentes são apresentadas a seguir, bem como as médias das distâncias entre curvas de eletrodos dos mesmos materiais para efeito de comparação:

**Tabela 1 - Valores da somatória de distância entre curvas dos cordões de solda produzidos com eletrodo revestido aglomerado com 5% de polímero**

	Valor
Distância curva 1 a curva 2	8655
Distância curva 1 a curva 3	10498
Distância curva 2 a curva 3	13686
Média	10946

Fonte: Próprio autor

**Tabela 2 - Valores da somatória de distância entre curvas dos cordões de solda produzidos com eletrodo revestido aglomerado com 13% de polímero**

	Valor
Distância curva 1 a curva 2	11555
Distância curva 1 a curva 3	17374
Distância curva 2 a curva 3	16198
Média	15042

Fonte: Próprio autor

**Tabela 3 - Valores da somatória de distância entre curvas dos cordões de solda produzidos com eletrodo revestido aglomerado com silicato**

	Valor
Distância curva 1 a curva 2	15342
Distância curva 1 a curva 3	22789
Distância curva 2 a curva 3	20586
Média	19572

Fonte: Próprio autor

**Tabela 4 - Valores da somatória de distância entre curvas de cordões de solda produzidos com eletrodos diferentes**

	Valor
Distância aglomerado 5% a Aglomerado 13%	18209
Distância aglomerado 5% a aglomerado com silicato	31992
Distância aglomerado 13% a aglomerado com silicato	30945

Fonte: Próprio autor

Com o auxílio do algoritmo de DTW foi possível se obter matematicamente uma comprovação dos valores de distância entre as curvas produzidas a partir da soldagem com os diferentes tipos de eletrodos. Comparando-se as médias das distâncias entre as curvas de eletrodos do mesmo material com as distâncias obtidas entre as curvas de eletrodos diferentes, é possível perceber que apenas a média das distâncias entre as curvas dos cordões de solda produzidos com eletrodo aglomerado com silicato foi maior do que uma das distâncias entre curvas de eletrodos diferentes (a distância entre os eletrodos aglomerados com polímero), demonstrando que eletrodos do mesmo material, produzem cordões de solda com velocidades

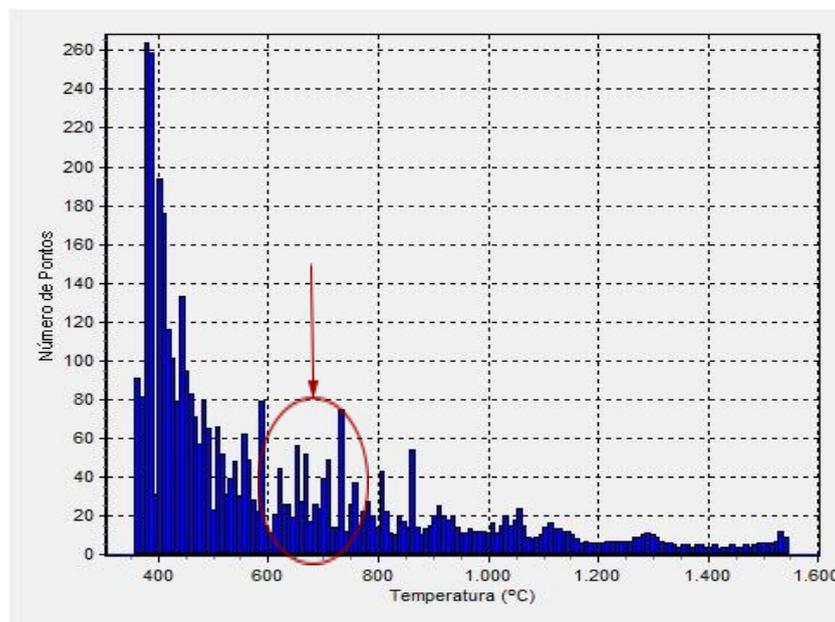
de resfriamento mais similares entre si do que cordões de solda produzidos com eletrodos de materiais diferentes.

Ao se analisar a tabela 4, é possível notar que a distância entre as curvas dos cordões de solda produzidos pelos eletrodos aglomerados com polímero são mais similares entre si do que ao se comparar as curvas dos cordões de solda produzidos utilizando-se estes mesmos eletrodos em relação ao eletrodo aglomerado com silicato, sendo quase o dobro da distância.

### 5.3 Produção de histogramas para avaliação do perfil do resfriamento na região de mudança de fase

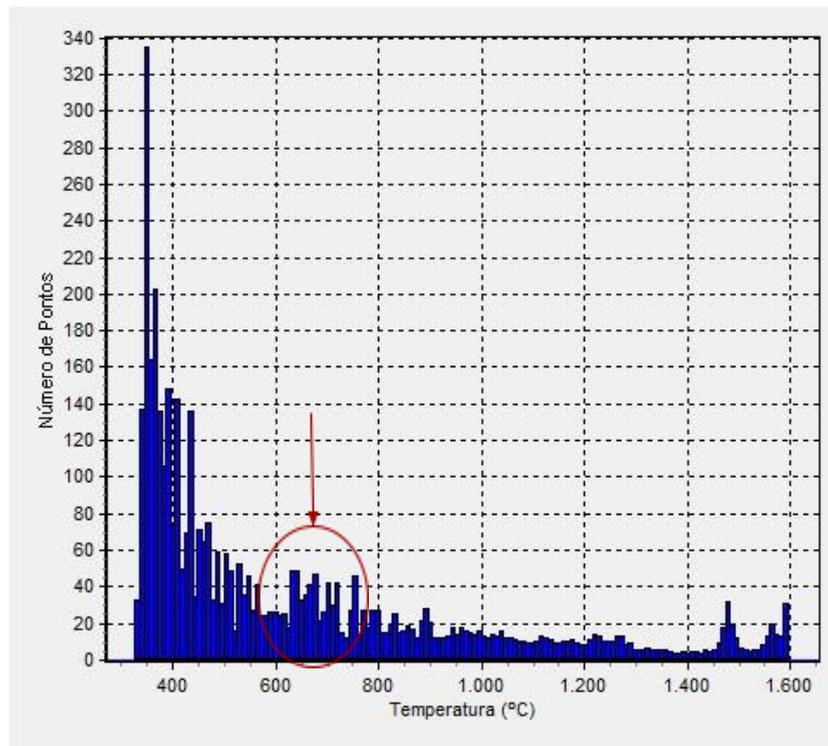
Com o objetivo de se analisar melhor o perfil do resfriamento do cordão de solda produzido a partir da utilização dos eletrodos do estudo, produziu-se histogramas da quantidade de pontos por faixa de temperatura a partir dos dados coletados. Os histogramas produzidos para cada um dos eletrodos estão apresentados a seguir:

Figura 23 - Histograma do número de pontos por temperatura do cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com 5% de polímero



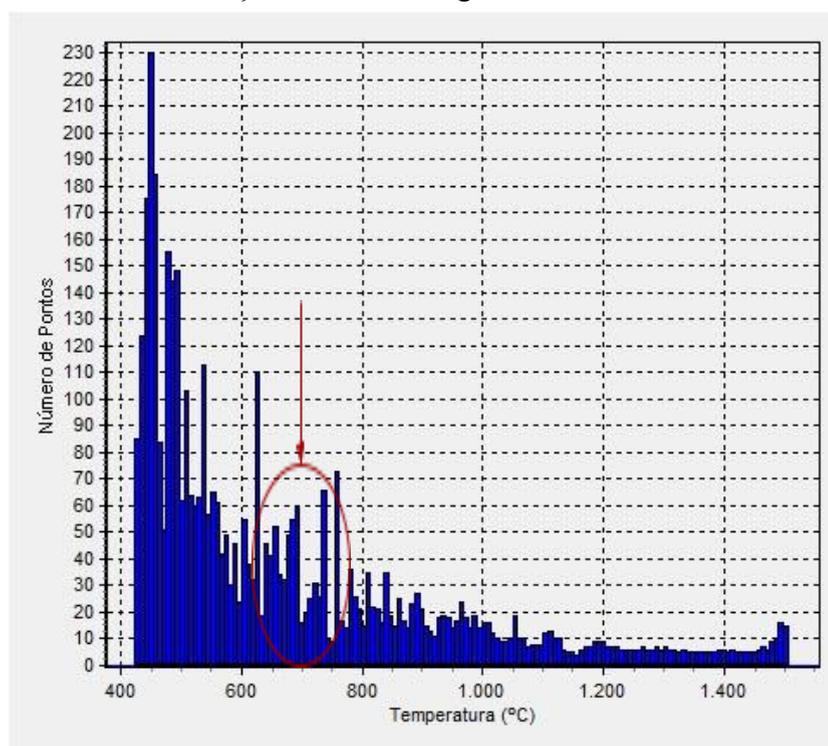
Fonte: Próprio autor

Figura 24 - Histograma do número de pontos por temperatura do cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com 13% de polímero



Fonte: Próprio autor

Figura 25 - Histograma do número de pontos por temperatura do cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com silicato



Fonte: Próprio autor

Seguindo o intento de se analisar o perfil da queda de temperatura na região de mudança de fase, os histogramas produzidos auxiliam a perceber que, desconsiderando-se os picos na região principalmente de temperaturas abaixo de 400°C, a região em que se há a maior incidência de pontos é no intervalo de aproximadamente 600°C a 800°C. A intenção de se desprezar os pontos abaixo de 400°C é devido ao fato de que, ao se analisar com auxílio dos gráficos da seção 5.2, percebeu-se que abaixo dessa temperatura, as curvas formam um platô, devido à estabilização da temperatura a partir desta região, causando o alto número de pontos como pode-se observar no histograma.

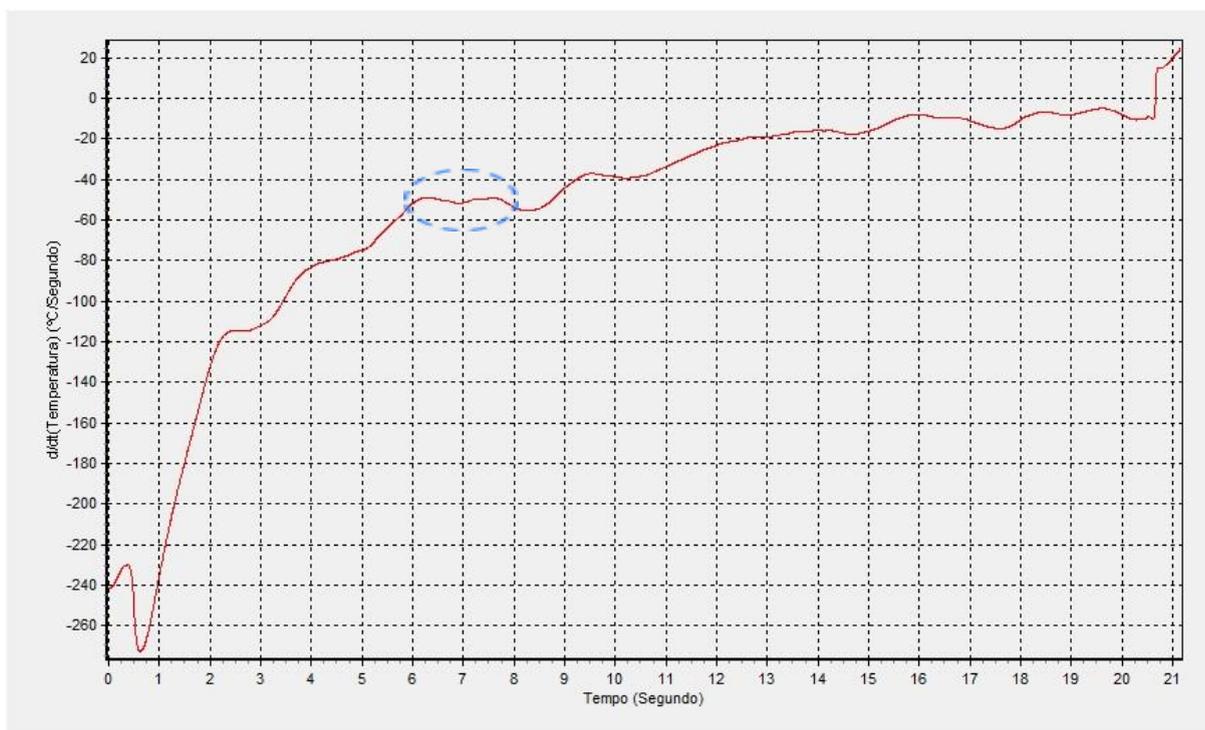
Ao se analisar os histogramas, é possível perceber um padrão, não tão expressivo no caso do eletrodo com 13% de polímero, porém a forma ainda segue o padrão dos outros dois eletrodos. Nos histogramas produzidos, a região de maior incidência de pontos é a região abaixo de 750°C, região onde possivelmente se encontra a temperatura de Ar1 dos cordões de solda produzidos, onde se tem o fim da transformação de fase da austenita em ferrita e cementita.

O diagrama Fe-C ilustrado na figura 6 demonstra que, para aços com baixo teor de carbono, ao se reduzir a temperatura, na região abaixo de 750°C, têm-se a transformação de fase da austenita em ferrita e cementita. Em substâncias de elevada pureza, a temperatura permanece constante durante o processo de transformação de fase, sendo o ganho ou perda de calor direcionado para a transformação de fase do material. Por se tratar de uma liga e pela situação de resfriamento não ter sido no equilíbrio, o aço do cordão de solda permanece a ter uma queda de temperatura durante a transformação de fase da austenita, porém com menor taxa, visto que parte da energia agora está direcionada para a cinética de mudança de fase das partículas. A alta quantidade de pontos na região circulada dos histogramas demonstra que, apesar de nos gráficos de taxa de resfriamento não se perceber um platô evidente, há uma redução na taxa de resfriamento nesta região.

#### **5.4 Produção de gráficos de derivada por tempo para avaliação do perfil da curva de resfriamento**

Para se avaliar o comportamento da velocidade de resfriamento dos cordões de solda produzidos e identificar a temperatura onde há a redução na taxa de resfriamento referente a Ar1 (transformação da austenita em ferrita e cementita), produziu-se gráficos da derivada da temperatura por tempo em cada situação como demonstrado a seguir:

Figura 26 - Derivada da temperatura pelo tempo no cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com 5% de polímero



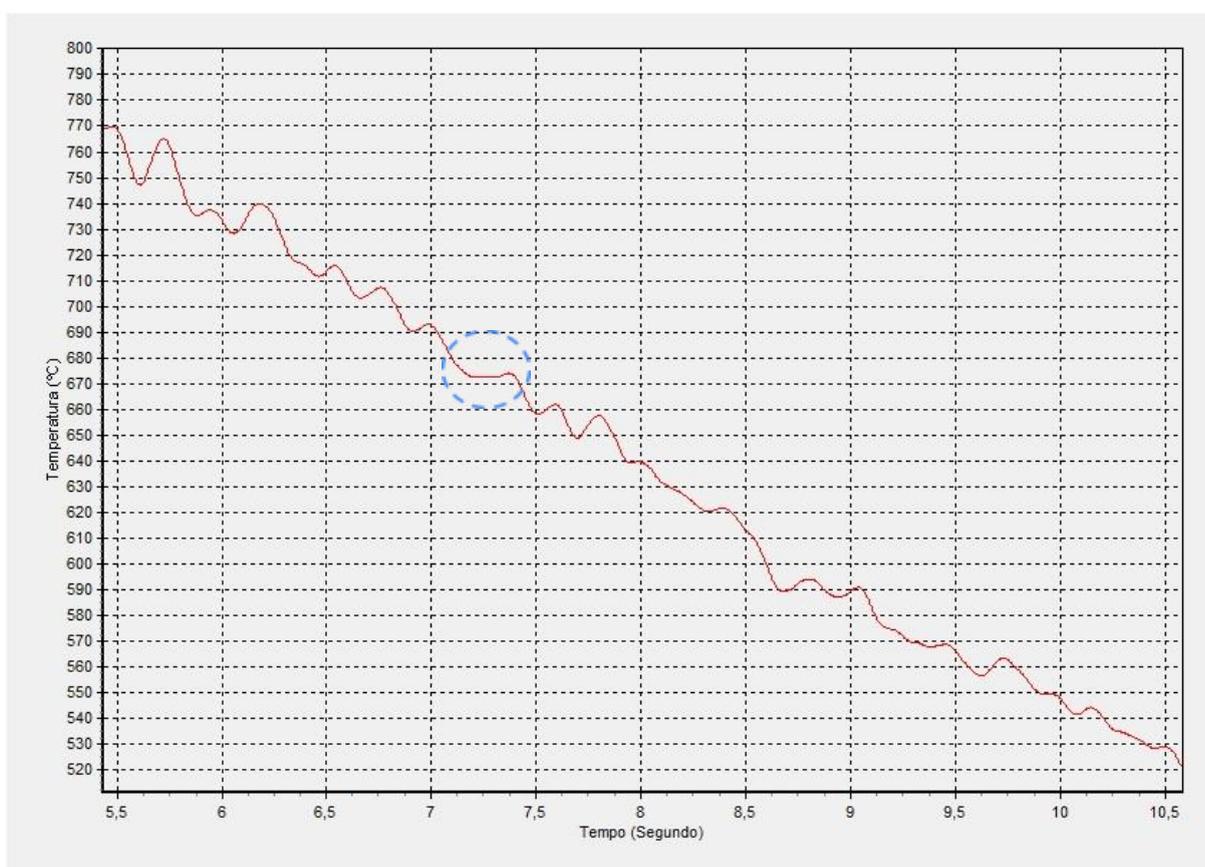
Fonte: Próprio autor

Por se tratar da taxa de variação da temperatura em determinado tempo, a análise de sua derivada auxilia bastante na percepção de como a curva de resfriamento dos cordões de solda produzidos se comportaram durante o resfriamento.

Ao se analisar os gráficos de derivada da temperatura pelo tempo apresentados acima é possível perceber a queda inicial bastante acelerada da temperatura, devido aos valores negativos da derivada nos primeiros segundos de resfriamento. Após essa queda, o valor da derivada passa a se aproximar de zero, indicando uma redução na taxa de resfriamento. Verificando o gráfico da figura 28, é possível notar que no intervalo de 6s a 8s, o valor da derivada está bastante próximo de zero, e não há uma variação significativa da derivada neste intervalo. Por se tratar de uma liga e por não estar em uma situação de equilíbrio, a temperatura do cordão de solda produzido não permanecerá inalterada durante as transformações de fase, pois os outros componentes presentes continuam a reduzir suas temperaturas com a perda de calor. Devido a isto, considerou-se que estar com a derivada bem próximo de zero e permanecer com pouca alteração, a temperatura  $A_{r1}$ , onde se tem a transformação de fase da austenita do cordão de solda em ferrita e cementita, está na região de 6s a 8s.

Visando encontrar a temperatura do cordão de solda na região de tempo considerada, produziu-se uma aproximação, na região de tempo observada, do gráfico de taxa de resfriamento do eletrodo aglomerado com 5% de polímero para obter os valores de temperatura. A aproximação está representada a seguir e demonstra um pequeno platô indicando o intervalo onde se pode ter a temperatura Ar1 e, conseqüentemente, a temperatura onde ocorre a transformação da austenita em ferrita e cementita no cordão de solda produzido nesta situação é de aproximadamente 680°C a 670°C:

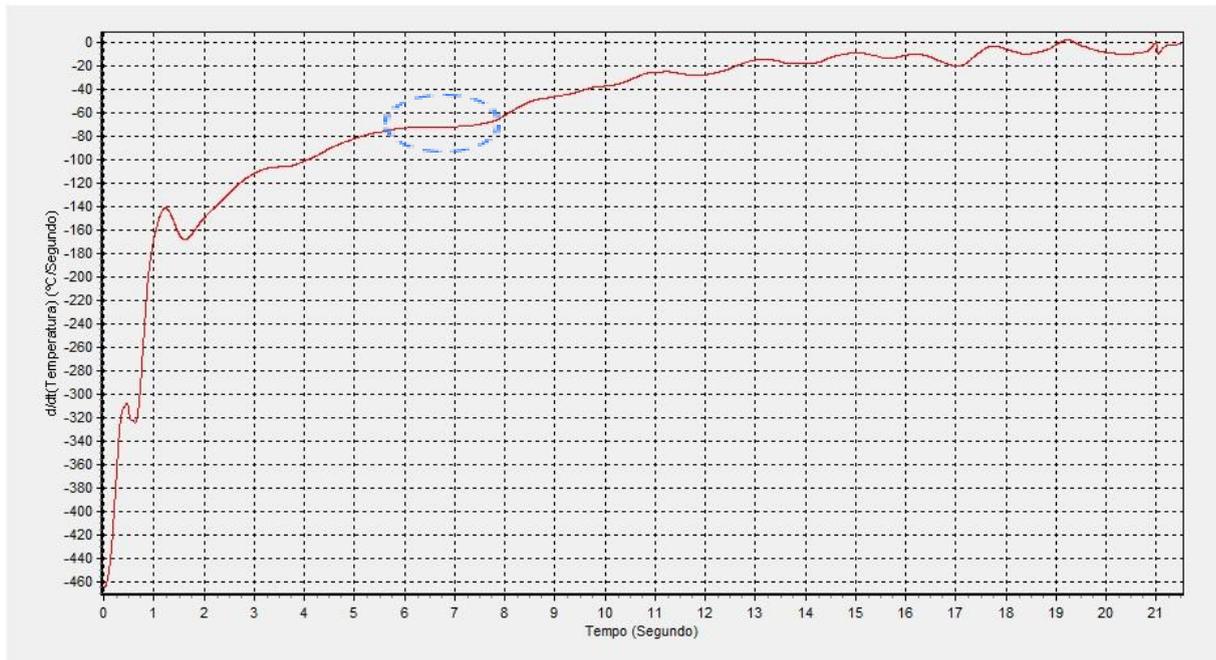
Figura 27 - Taxa de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo aglomerado com 5% de polímero no intervalo de 6s a 8s



Fonte: Próprio autor

Prosseguiu-se com a mesma avaliação para os gráficos de derivada por tempo dos cordões de solda produzidos com utilização do eletrodo aglomerado com 13% de polímero e com utilização do eletrodo aglomerado com silicato:

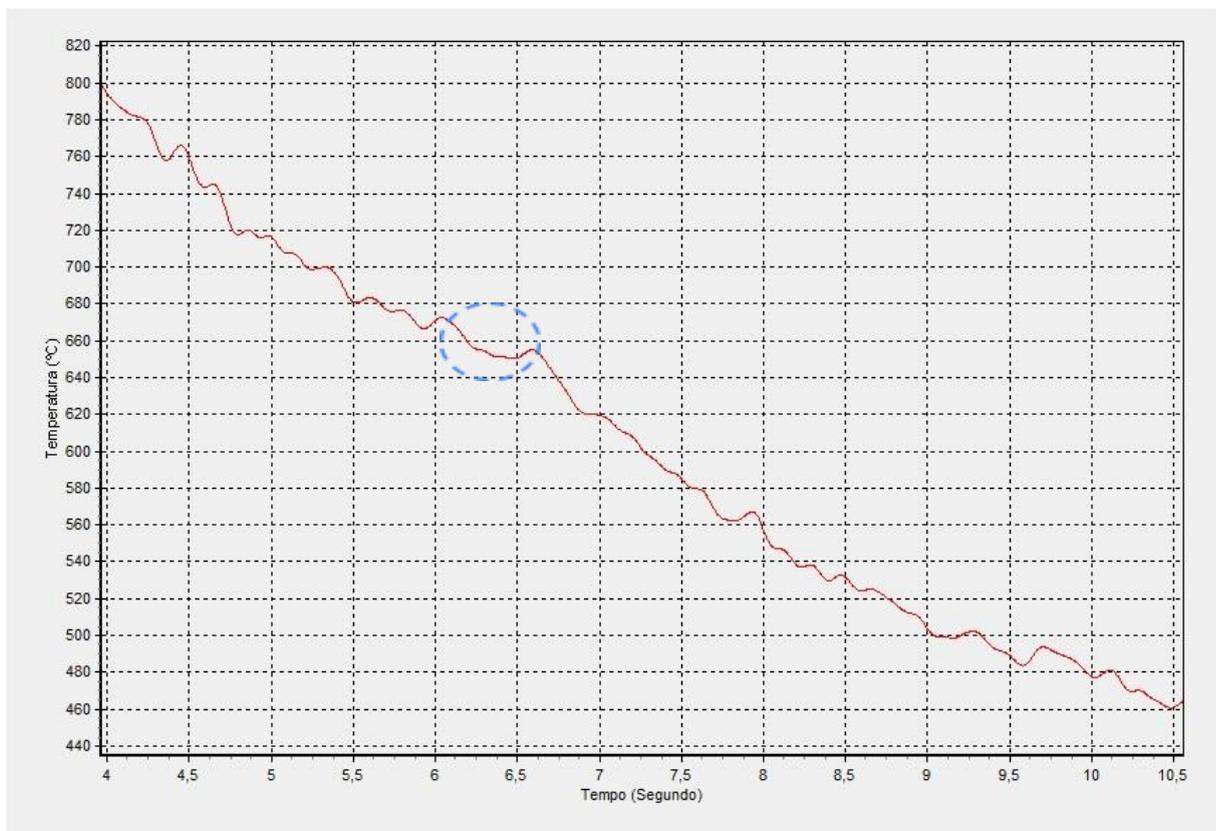
Figura 28 - Derivada da temperatura pelo tempo no cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com 13% de polímero



Fonte: Próprio autor

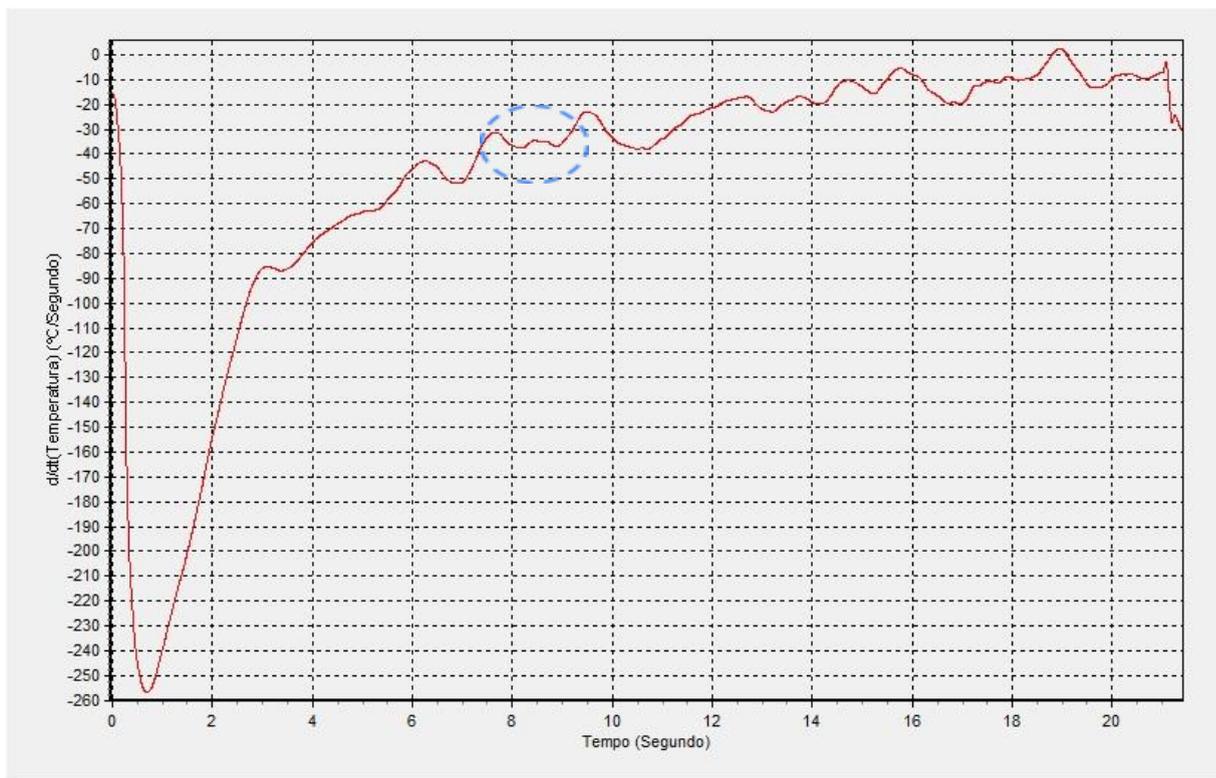
Na situação do cordão de solda produzido com o eletrodo aglomerado com 13% de polímero, é possível se notar que o perfil da derivada é bastante semelhante. O ponto onde se observa essa aproximação nesta situação é a partir dos 6s, finalizando logo após os 7s. Ao se avaliar a aproximação do gráfico da taxa de resfriamento, é possível notar que o perfil também possui um pequeno platô, correspondente ao intervalo onde se poderia encontrar a temperatura Ar1 na região de 660°C a 650°C:

Figura 29 - Taxa de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo aglomerado com 13% de polímero no intervalo de 7s a 8s



Fonte: Próprio autor

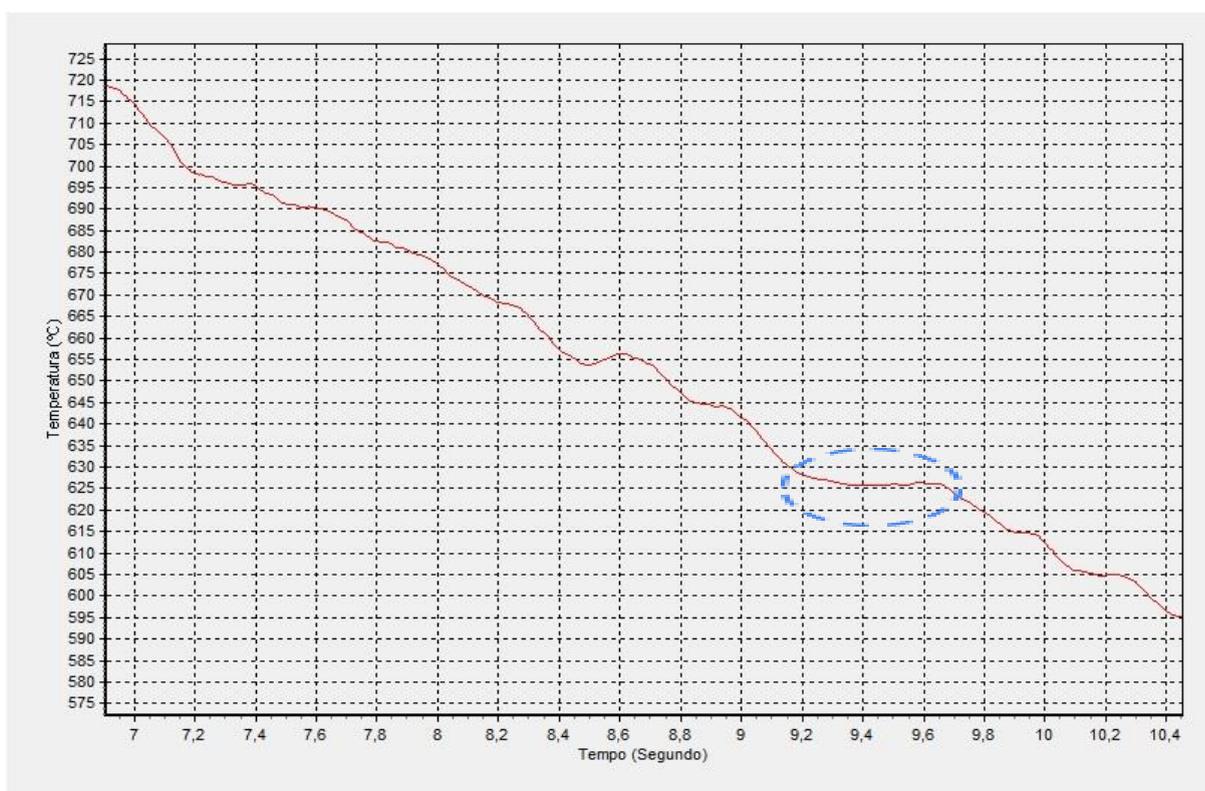
Figura 30 - Derivada da temperatura pelo tempo no cordão de solda produzido com utilização do eletrodo aglomerado com silicato



Fonte: Próprio autor

Aplicando a mesma avaliação para a derivada da temperatura do cordão de solda produzido com o eletrodo aglomerado com silicato, percebe-se que a aproximação a zero e diminuição da variação de seu valor é a no intervalo de 8s a 9s, ponto que, ao se verificar na aproximação no gráfico de taxa de resfriamento, é possível encontrar um platô mais proeminente que os apresentados pelos outros eletrodos que representa a temperatura de aproximadamente 625°C:

Figura 31 - Taxa de resfriamento do cordão de solda produzido com utilização de eletrodo aglomerado com silicato no intervalo de 7s a 10s



Fonte: Próprio autor

Portanto, com o auxílio das ferramentas matemáticas e computacionais utilizadas, foi possível chegar aos valores próximos referentes ao intervalo de temperaturas para Ar1 do cordão de solda produzido por cada eletrodo, podendo-se observar o intervalo no qual ocorre a transformação de fase da austenita em ferrita e cementita. Os valores aproximados de cada intervalo de temperaturas se encontram representados na tabela a seguir:

**Tabela 5 - Valores aproximados dos intervalos de temperaturas para Ar1 dos cordões de solda produzidos com a utilização de cada um dos eletrodos**

<b>Eletrodo utilizado</b>	<b>Intervalo aproximado da temperaturas (°C)</b>
Eletrodo aglomerado com 5% de polímero	<b>680 a 670</b>
Eletrodo aglomerado com 13% de polímero	<b>670 a 650</b>
Eletrodo aglomerado com silicato	<b>625</b>

Fonte: Próprio autor

## 6. CONCLUSÃO

O emprego de ferramentas matemáticas e computacionais se mostrou bastante benéfico no tratamento e preparo de dados coletados em processos de solda, permitindo uma análise mais detalhada dos dados. A pesquisa sobre métodos a serem aplicados no tratamento dos dados demonstrou um benefício na aplicação de softwares já difundidos não especificamente com o objetivo de se aplicar na análise de dados coletados em processos de soldagem mas que, quando ajustados para este, apresentam resultados significativos.

O tratamento de ruídos a partir da utilização de um filtro passa baixa auxiliou na posterior análise dos dados, realizando de maneira bastante eficaz a redução da quantidade de dados discrepantes. O algoritmo DTW se mostrou bastante benéfico quando aplicado aos dados coletados no estudo prévio, podendo-se obter uma confirmação matemática que corrobora a observação visual dos gráficos sobrepostos, comprovando o benefício de sua utilização em casos de produção de curvas com perfil semelhante porém que possuem velocidades diferentes, inviabilizando a comparação visual ou com outras técnicas.

O tratamento dos dados coletados foi benéfico de um modo geral, principalmente ao se analisar os resultados finais dos histogramas que, após o tratamento inicial e as análises anteriores, puderam ser observados com mais confiança e demonstraram perfis bastante interessantes para o estudo de caso produzido. Com os resultados apresentados pelos histogramas, foi possível perceber a predominância de pontos na região de interesse, comprovando a análise prévia que, mesmo com condições de resfriamento fora do equilíbrio, é possível se aproximar a região de transformação de fase da austenita em ferrita.

A produção dos gráficos de derivada por tempo a partir dos softwares utilizados se mostrou essencial para corroborar a análise advinda dos histogramas produzidos, sendo possível se obter uma aproximação dos valores de temperatura de transformação de fase.

A aplicação dos modelos matemáticos e computacionais no estudo de caso produzido se mostrou bastante proveitosa para os objetivos procurados, auxiliando em grande parte nas análises que se desejava fazer e facilitando a obtenção de dados mais confiáveis do que os dados crus vindos de maneira direta dos equipamentos de coleta.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a aplicação de outros modelos e/ou algoritmos computacionais para a comparação entre séries temporais de temperatura de resfriamento de processos de soldagem;
- Efetuar a análise metalográfica do cordão de solda proveniente de processos de soldagem juntamente com as análises matemáticas sugeridas neste estudo, visando a análise mais profunda sobre as mudanças de fase;
- Analisar metalograficamente os cordões de solda produzidos com utilização dos eletrodos utilizados no estudo, visando verificar se há semelhança entre as estruturas geradas que corroborem a proximidade maior entre as curvas de eletrodos aglomerados com polímero quando comparadas à curva de resfriamento quando da utilização do eletrodo aglomerado com silicato;
- Explicar a influência de diferentes tipos de aglomerados na produção de curvas de resfriamento de cordões de solda.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAVALCANTI, C, A, N. **Comparação entre o comportamento de eletrodos revestidos utilizando dispositivos de soldagem por gravidade e com controle automático do comprimento do arco elétrico**. Monografia (Grau em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CRUZ, A. A. Estudo dos defeitos no processamento de soldagem por eletrodo revestido. **Revista eletrônica ciência e desenvolvimento**, Amazonas, v. 1, n. 1, p. 48-54, 2015.

DIEHL, I. L. **Análise de diferentes configurações de termopar para medição de temperaturas próximas a cordões de solda**. Monografia (Bacharelado em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.

FORTES, C. **Apostila de metalurgia da soldagem**. 2004. Disponível <<https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>> Acesso em 07 jul. 2021.

FORTES, C. **Apostila de eletrodos revestidos**. 2005. Disponível <[https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1\\_apostilaeletrodosrevestidos\\_ok.pdf](https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf)> Acesso em: 06 jul. 2021.

HACKENHAAR, W. **Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem MAG em diferentes geometrias de juntas**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2016.

JUNIOR, M, C, S. **Introdução ao estudo do fluxo de calor para soldagem a arco elétrico**. Monografia (Grau de especialista em engenharia da soldagem) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

KNIGHT, D. **Humphry Davy: Science & power**. Cambridge: Cambridge university press, 1992.

LAGE, F, C. **Produção e caracterização química, térmica e mecânica de resinas epóxi a base de óleos vegetais para a aplicação em soldagem a arco com eletrodos revestidos**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

MENEZES, P, H, R; PESSOA, E, C, P; BRACARENSE, A, Q. Comparison of underwater welding performed with silicate and polymer agglomerated electrodes. **Journal of materials processing technology**. v. 266, p. 63-72, 2019.

MODENESI, P. J; MARQUES, P. V. **Introdução aos processos de soldagem**. 2000. Disponível <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/0/03/Perguntas\\_.pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/0/03/Perguntas_.pdf)> Acesso em: 05 jul. 2021.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico**. 2012. Disponível <<https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf>> Acesso em 07 jul. 2021.

ROSSI, M. L. **Uma contribuição ao conhecimento da física do arco aplicada em soldagem**. Dissertação (Pós-Graduação em engenharia mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2011.

SENIN, P. Dynamic time warping algorithm review. **Researchgate**. 2008. Disponível <[https://www.researchgate.net/profile/Pavel-Senin/publication/228785661\\_Dynamic\\_Time\\_Warping\\_Algorithm\\_Review/links/02bfe5100f11a7929f000000/Dynamic-Time-Warping-Algorithm-Review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Pavel-Senin/publication/228785661_Dynamic_Time_Warping_Algorithm_Review/links/02bfe5100f11a7929f000000/Dynamic-Time-Warping-Algorithm-Review.pdf)> Acesso em 24 set. 2021.

SOROKIN, L. Electrodes with plastic coatings for welding low-carbon steels. **Welding international**. v. 18, p. 232-241, 2004.

TAVENARD, R. **An introduction to dynamic time warping**. 2021. Disponível <<https://rtavenar.github.io/blog/dtw.html>> Acesso em 24 set. 2021.

VASCONCELOS, R. C; MACIEL, T. M; GURGEL, J. M. A. M. Estudo teórico e experimental da condução de calor no processo de soldagem ao arco submerso. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande - PB, v. 4.1, p. 1-13, 2009.

VAZ, C. T. **Influência do polímero utilizado como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda**. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2014.

VAZ, C, T; BRACARENSE, A, Q. The effect of the use of PTFE as a covered-electrode binder on metal transfer. **Soldagem & inspeção**. v. 20, p. 160-170, 2015.

VAZ, C, T; BRACARENSE, A, Q; FELIZARDO, I; PESSOA, E, C, P. Impermeable low hydrogen covered electrodes: Weld metal, slag and fumes evaluation. **Journal of materials research and technology**. v. 1, p. 64-70, 2012.

VAZ, C, T; BRACARENSE, A, Q; REZENDE, L, S; MENEZES, P, H, R. Arames tubulares celulósicos: Influência da adição de polímeros sobre a estabilidade do processo e propriedades do metal de solda produzido. **Soldagem & inspeção**. v. 22, p. 374-388, 2017.

WAINER, E; BRANDI, S, D; MELLO, F, D, H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. Ed. 11. São Paulo: Editora Blucher, 2019.

ZAMIN, P, V. **Estudo do ciclo térmico na zona afetada pelo calor produzida pelo processo de soldagem MAG**. Monografia (Grau em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ZHANG, Z; TANG, P; DUAN, R. Dynamic time warping under pointwise shape context. **Information Sciences**. v. 315, p. 88-101, 2015.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Algoritmo dynamic time warping produzido para o cálculo das distâncias entre duas curvas de resfriamento

```

def dtw(s, t):
    n, m = len(s), len(t)
    dtw_matrix = np.zeros((n+1, m+1))
    for i in range(n+1):
        for j in range(m+1):
            dtw_matrix[i, j] = np.inf
    dtw_matrix[0, 0] = 0

    for i in range(1, n+1):
        for j in range(1, m+1):
            cost = abs(s[i-1] - t[j-1])
            last_min = np.min([dtw_matrix[i-1, j], dtw_matrix[i, j-1],
dtw_matrix[i-1, j-1]])
            dtw_matrix[i, j] = cost + last_min
    return dtw_matrix

import pandas as pd

coluna1 = pd.read_csv(DADOS_ELETRODO_1, sep=',', header=None)
coluna2 = pd.read_csv(DADOS_ELETRODO_2, sep=',', header=None)
coluna3 = pd.read_csv(DADOS_ELETRODO_3, sep=',', header=None)

a = coluna1.iloc[:,0].values
b = coluna2.iloc[:,0].values
c = coluna3.iloc[:,0].values

dist_ab = dtw(a, b)
dist_ac = dtw(a, c)
dist_bc = dtw(b, c)

print(dist_ab)
print("-----")
print(dist_ac)
print("-----")
print(dist_bc)
print("-----")

```