

Desenvolvimento de ferramenta de simulação do processo de soldagem resistência a ponto com Python para fins acadêmicos

Alexandre Alvarenga Palmeira^{1,2}; 0000-0002-9271-8858

Cirlene Fourquet Bandeira²; 0000-0001-7034-2477

Leticia Alvim Dias¹; 0009-0000-3586-0439

Aloano Regio de Almeida Pereira²; 0000-0002-3217-4772

Osni Augusto Souza da Silva²; 0000-0002-6248-9249

Raniel Miranda Pinheiro²; 0009-0003-4646-8215

Yuri Gustavo Jovêncio Miranda²; 0009-0001-4458-6651

1 – UERJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ

2 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ

alex.a.palmeira@gmail.com

Resumo: A soldagem por resistência a ponto é um processo essencial na indústria moderna, sendo controlável e adaptável a diferentes materiais e espessuras. Parâmetros como corrente elétrica, tempo e pressão podem ser ajustados para garantir a eficiência da solda. Este trabalho visa analisar o comportamento de uma solda por resistência de ponto depositada entre duas ou mais superfícies, considerando as características do material e a seu teor de composição no material para definir a viabilidade da solda por resistência de ponto. Com base na referência consultada, utilizou-se o software PyCharm Community Edition 2024.2.1, em linguagem Python, para desenvolver uma rotina de programação que inclui "calculadoras" (subrotinas). Essas subrotinas permitem que o algoritmo avalie diferentes parâmetros da soldagem a ponto, com base nos dados de entrada fornecidos pelo usuário. Foram criadas as seguintes "calculadoras" específicas: Classificação dos eletrodos de soldagem a ponto pela Resistance Welding Manufacturing Alliance (RWMA), Calculado de Diâmetro do Ponto de Solda, Calculadora de Soldabilidade, Calculadora de Energia, Penetração e Indentação de Soldagem, Calculadora do ciclo de trabalho, Calculadora do Calor Gerado pela Solda. Sendo considerado os parâmetros de solda, definição de qual aço utilizar, as características de material, as condições impostas e utilizando as formulações diretamente calculadas pelo software livre PyCharm Community Edition 2024.2.1, na linguagem PYTHON, pode-se obter: a Classificação dos eletrodos de soldagem a ponto pela RWMA; o Diâmetro do Ponto de Solda; a Soldabilidade do material; a Energia, Penetração e Indentação de Soldagem; o Ciclo de trabalho; o Calor Gerado pela Solda.

Palavras-chave: Soldagem. Soldagem de Ponto. PYTHON.

INTRODUÇÃO

A execução da solda por resistência a ponto em metais e seus respectivos parâmetros de regulação para a solda, é um processo muito importante para a indústria moderna. Esse processo é altamente controlável e adaptável a diferentes materiais e espessuras, com variáveis críticas, como corrente elétrica, tempo e pressão, que podem ser ajustadas. (INABA; FUJII; SAKURAI, 2009).

A solda por resistência a ponto destaca-se pela capacidade de produzir ligações duráveis e de alta resistência em componentes críticos, incluindo carrocerias de automóveis, estruturas de aeronaves e conexões elétricas em dispositivos eletrônicos complexos entre outros (CAVANAUGH; SCHMIDT; GRANDT, 2017).

Para realização da solda por resistencia a ponto, é necessário ter a superfície da chapa metálica e tipificado, pois o processo é controlado. O software livre *PyCharm Community Edition 2024.2.1* na linguagem *PYTHON*, foi utilizado com a função de verificar a qualidade da solda e materiais para utilização para solda na peça. Os recursos tecnológicos, são utilizados, para complementar a informação em nossa mente, que deve ser compreendida, absorvida e integrada com as condições locais (TANENBAUM, 2023).

Segundo Vargas (2006), os principais parâmetros que afetam o resultado da soldagem incluem corrente de soldagem, tensão do arco, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, extensão e diâmetro do eletrodo, densidade de corrente, polaridade e calor imposto. Todos os tipos de aço podem ser soldados, e metais com propriedades diferentes podem ser unidos se forem capazes de formar ligas ou com a introdução de um material intermediário. A resistência elétrica da peça, embora não seja um parâmetro direto, influencia significativamente a geração de calor durante o processo.

De acordo com Nascimento (2008) e Aventa (2016), os principais parâmetros da soldagem por resistência a ponto são a intensidade de corrente, a pressão aplicada pelos eletrodos e a duração da corrente. Fatores secundários incluem o material, a forma e a condição dos eletrodos. A escolha do equipamento, a habilidade do soldador e as propriedades do material também influenciam o controle e o resultado da

soldagem. Diferentes métodos de soldagem apresentam características únicas, exigindo abordagens específicas.

O presente trabalho objetiva simular o processo de solda por resistência a ponto, o software livre PyCharm Community Edition 2024.2.1 em linguagem PYTHON, de forma a analisar o comportamento de uma solda por resistência de ponto depositada entre duas ou mais superfícies, considerando as características do material e a seu teor de composição no material.

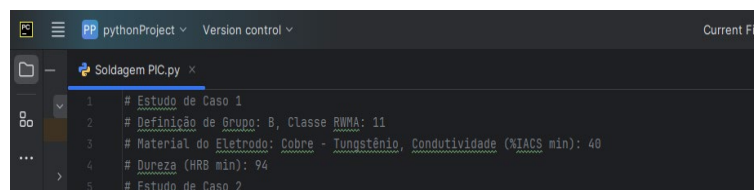
MÉTODOS

Tomando como base a referência bibliográfica consultada, utilizou-se o software livre PyCharm Community Edition 2024.2.1 em linguagem PYTHON, onde foi desenvolvida uma rotina de programação, na qual foram desenvolvidas “calculadoras” (ou subrotinas), onde através dos dados de entrada inserido pelo usuário, o algoritmo é capaz de avaliar diferentes parâmetros da soldagem a ponto. Para tanto foram desenvolvidas as seguintes “calculadoras”: 1 – Classificação dos eletrodos de soldagem a ponto pela Resistance Welding Manufacturing Alliance (RWMA); 2 – Calculado de Diâmetro do Ponto de Solda; 3 – Calculadora de Soldabilidade; 4 – Calculadora de Energia, Penetração e Indentação de Soldagem; 5 – Calculadora do ciclo de trabalho; 6 – Calculadora do Calor Gerado pela Solda.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, a seguir (Estudo de caso 1), são atribuídos valores e definições para a calculadora de “Classificação dos eletrodos de soldagem a ponto pela *Resistance Welding Manufacturing Alliance* (RWMA)”, a qual apresentará o tipo de solda ponto.

Figura 1 – Classificação dos eletrodos de soldagem pela RWMA



```
1 # Estudo de Caso 1
2 # Definição de Grupo: B, Classe RWMA: 11
3 # Material do Eletrodo: Cobre - Tungstênio, Condutividade (%IACS min): 40
4 # Dureza (HRB min): 94
5 # Estudo de Caso 2
```

Fonte: autoria própria

Os dados do eletrodo considerado para o cálculo são constituídos de cobre-tungstênio, a condutividade é de 40% e a dureza é de 94 HBR. De acordo com a

literatura esses materiais são indicados para aplicações na qual a função é ter muita condutividade elétrica e capacidade de conformação.

Na Figura 2 são inseridos os diâmetros dos pontos de solda e é possível, determinar a solda (simétrica, assimétrica ou parcial) e determinar os valores iniciais utilizados.

Figura 2 – Calculado de Diâmetro do Ponto de Solda

```
# Estudo de Caso 2
# Calcular diâmetro do ponto de solda
# dp -> diâmetro do ponto de solda
# d1 e d2 -> média aritmética dos diâmetros
# Simétrico
# dp = (d1+d2)/2
# ad -> diâmetro assimétrico atribui o mesmo valor
# dp -> diâmetro do ponto de solda
# d1 e d2 -> média aritmética dos diâmetros
# Assimétrico
# ad = dp = (d1+d2)/2
# dp -> diâmetro do ponto de solda
# d2 e d3 -> média aritmética dos diâmetros
# Parcial
# dp = (d2+d3)/2
# Diâmetro 1 (d1) = 5 mm
# Diâmetro 2 (d2) = 6 mm
# Diâmetro 3 (d3) = 0 mm (pode ignorar este valor porque é relevante apenas para o tipo de diagrama "Partial")
# Diagrama Simétrico
print('Estudo de Caso 2')
v1 = float(input('Digite o Diâmetro 1: '))

Soldagem PIC >
:
Digite o Diâmetro 2: 6
Portanto, o diâmetro do ponto de solda seria de 5.5 mm com base nessas entradas.
Estudo de Caso 3
Digite o Teor de Carbono(%):
```

Fonte: autoria própria

O cálculo consiste em uma média própria do diâmetro 1 e diâmetro 2 com seus valores agregados, resultam em 5,5 milímetros de diâmetro do ponto de solda. O diâmetro 3 é ignorado, dentre as configurações de solda.

Variáveis de fórmulas para o cálculo de solda por resistência a ponto.

Symmetrical (Simétrico) é definido por d_p que é o diâmetro do ponto de solda e d_1 e d_2 , são as médias aritméticas dos diâmetros.

$$d_p = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

Asymmetrical (Assimétrico) é definido por a_d que é igual ao diâmetro assimétrico atribui o mesmo valor, d_p diâmetro do ponto de solda e d_1 e d_2 média aritmética dos diâmetros.

$$ad = dp = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2)$$

Partial (Parcial) é definida pelo d_p que é o diâmetro do ponto de solda e d_2 e d_3 que são as médias aritméticas dos diâmetros.

$$d_p = \frac{d_2 + d_3}{2} \quad (3)$$

Na calculadora da Figura 3, onde o valor é inserido da própria calculadora e gera o cálculo de carbono equivalente. A calculadora nesta etapa tem o objetivo de ser uma ferramenta de avaliação do teor de carbono equivalente.

Figura 3 – Calculadora de Soldabilidade

```
Soldagem PIC.py
29 DiametroPontoSolda, 'mm com base nessas entradas.')
30 # Estudo de Caso 3
31 # C -> teor de carbono
32 # Mn -> teor de manganês
33 # Cr -> teor de cromo
34 # Mo -> teor de molibdênio
35 # V -> teor de vanádio
36 # Ni -> teor de níquel

un Soldagem PIC
:
Digite o Diâmetro 2: 6
Portanto, o diâmetro do ponto de solda seria de 5.5 mm com base nessas entradas.
Estudo de Caso 3
Digite o Teor de Carbono(%): 0.1
Digite o Teor de Cromo(%): 0.1
Digite o Teor de Vanádio(%): 0
Digite o Teor de Cobre(%): 0.1
Digite o Teor de Manganês(%): 0.3
Digite o Teor de Molibdênio(%): 0.2
Digite o Teor de Níquel(%): 0
Digite o Teor de Espessura da Peça(milímetros): 3
Calculo do Carbono Equivale é igual a: 0.2166666666666667 Material Altamente Soldável
Estudo de Caso 4
Digite o Teor de Carbono(%): |
```

Fonte: autoria própria

Na Figura 4 tem a calculadora similar a Figura 3, porém com mudanças nos valores e gerando uma classificação de carbono, elevada. A fórmula é descrita abaixo, para ambos os casos.

$$CE_{equiv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (4)$$

C é o teor de carbono, Mn é o teor de manganês, Cr é o teor de cromo, Mo é o teor de molibdênio, V é o teor de vanádio, Ni é o teor de níquel e Cu é o teor de cobre.

Figura 4 – Calculadora de Soldabilidade

```
52 print('Estudo de Caso 4')
53 t9 = float(input('Digite o Teor de Carbono(%): '))
54 t10 = float(input('Digite o Teor de Cromo(%): '))
55 t11 = float(input('Digite o Teor de Vanádio(%): '))
56 t12 = float(input('Digite o Teor de Cobre(%): '))
57 t13 = float(input('Digite o Teor de Manganês(%): '))
58 t14 = float(input('Digite o Teor de Molibdênio(%): '))
59 t15 = float(input('Digite o Teor de Níquel(%): '))
60 t16 = float(input('Digite o Teor de Espessura da Peça(milímetros): '))
61 CEquiv = t9 + (t13/6) + ((t10+t14+t11)/5) + ((t15+t12)/15)
62 print('Calculo do Carbono Equivale é igual a: ',
63       CEquiv, 'Material Dificilmente Soldável')

Soldagem PIC
:
Estudo de Caso 4
Digite o Teor de Carbono(%): 0.1
Digite o Teor de Cromo(%): 0.1
Digite o Teor de Vanádio(%): 1
Digite o Teor de Cobre(%): 0.1
Digite o Teor de Manganês(%): 0.3
Digite o Teor de Molibdênio(%): 0.2
Digite o Teor de Níquel(%): 1
Digite o Teor de Espessura da Peça(milímetros): 3
Calculo do Carbono Equivale é igual a: 0.4833333333333334 Material Dificilmente Soldável
Estudo de Caso 5
Digite a Corrente de Soldagem(A):
```

Fonte: autoria própria

A Figura 5, demonstra uma calculadora de corrente com base no tempo e em fórmulas específicas e os valores são atribuídos e gerados.

Figura 5 – Calculadora de Energia, Penetração e Indentação de Soldagem

```

# Estudo de Caso 5
print('Estudo de Caso 5')
CS = float(input('Digite a Corrente de Soldagem(A): '))
TS = float(input('Digite o Tempo de Soldagem(ms): '))
TSS = float(input('Digite o Tempo de Pós-Pressão(ms): '))
TSC = float(input('Digite o Tempo de Subida de Corrente(ms): '))
TDC = float(input('Digite o Teor de Descida de Corrente(ms): '))
EnergiaConsumida = CS * (TS + TSS + TSC + TDC)
PenetracaoSolda = CS * (TS + TSS)
Indentacao = CS * (TSC + TDC)

```

run Soldagem PIC x

```

Digite o Teor de Espessura da Peça(milímetros): 3
Calculo do Carbono Equivale é igual a: 0.4833333333333334 Material Dificilmente Soldável
Estudo de Caso 5
Digite a Corrente de Soldagem(A): 150
Digite o Tempo de Soldagem(ms): 800
Digite o Tempo de Pós-Pressão(ms): 300
Digite o Tempo de Subida de Corrente(ms): 100
Digite o Teor de Descida de Corrente(ms): 50
Energia Consumida durante a Soldagem: 187500.0 kA*s
Penetração da Solda: 165000.0 mm
(i): 22500.0 kA*s
Digite o tempo Total:

```

Fonte: autoria própria

Energia Consumida=Corrente × (Tempo de Soldagem + Tempo de Pós-Pressão + Tempo de Subida de Corrente + Tempo de Descida de Corrente) (5)

Penetração da Solda=Corrente × (Tempo de Soldagem + Tempo de Pós-Pressão)(6)

Indentação=Corrente × (Tempo de Subida de Corrente + Tempo de Descida de Corrente) (7)

A Figura 6, a soldagem por resistência a ponto, o ciclo de trabalho ou chamado *DUTY CYCLE* é uma medida importante para a determinação da capacidade de um equipamento de soldagem em operar sem superaquecer. Os valores atingidos de tempo de operação e tempo de descanso, são importantes para definir o tempo de produtividade a partir de parâmetros.

$$DutyCycle(\%) = (Tempo\ Funcionamento \frac{(horas)}{24}) \times 100 \quad (8)$$

A Figura 7 apresenta o calor gerado, concluindo o cálculo sequencial do software livre PyCharm Community Edition 2024.2.1, de linguagem *PYTHON*.

Figura 6 – Calculadora do ciclo de trabalho.

```
Soldagem PIC.py
78 print('Estudo de Caso 6')
79 # DutyCycle(%) = (tempo Funcionamento (Horas/24) * 100
80 Tem = float(input('Digite o tempo Total: '))
81 DC = float(input('Digite a corrente máxima: '))
82 DutyCycle = float(input('Digite o Duty Cycle: '))
83 TempoDeOperacao = Tem * (DC/100)
84 DutyCycleC = Tem * (60/100)
85 print('O tempo de Operação é ', Tem, ' minutos')
86 print('O tempo do Duty Cycle é ', DutyCycleC, ' minutos')
87 Tdescanso = (Tem - DutyCycleC)
88 print('O tempo de descanso é ', Tdescanso, ' minutos')
89 HorasTempoOP = Tem/60
90 HorasTempoCycle = DutyCycleC/60
91 print('O tempo de Operação é ', HorasTempoCycle, ' hora(s)')
92 print('O tempo do Duty Cycle é ', (Tdescanso/60), ' hora(s)')

Run Soldagem PIC
:
Digite o tempo Total: 480
Digite a corrente máxima: 50
Digite o Duty Cycle: 60
O tempo de Operação é 480.0 minutos
O tempo do Duty Cycle é 288.0 minutos
O tempo de descanso é 192.0 minutos
O tempo de Operação é 4.8 hora(s)
O tempo do Duty Cycle é 3.2 hora(s)
Qual é o valor da corrente elétrica: |
```

Fonte: autoria própria

Figura 7 – Calculadora do Calor Gerado pela Solda

```
Soldagem PIC.py
92 print('O tempo do duty cycle é ', (Tdescanso/60), ' hora(s)')
93 # Estudo de Caso 7
94 print('Estudo de Caso 7')
95 # Q=I².R.T
96 I = float(input('Qual é o valor da corrente elétrica: '))
97 R = float(input('Qual é o valor da Resistência Total elétrica: '))
98 T = float(input('Qual é o tempo de soldagem: '))
99 Q = I*I*R*T
100 print('O valor de quantidade gerada: ', Q, ' J')
101

Run Soldagem PIC
:
Estudo de Caso 7
Qual é o valor da corrente elétrica: 100
Qual é o valor da Resistência Total elétrica: 05
Qual é o tempo de soldagem: 10
O valor de quantidade gerada: 500000.0 J
Process finished with exit code 0
|
```

Fonte: autoria própria

Calcula a quantidade de calor gerada durante o processo de soldagem por resistência a ponto utilizando a lei de *joule*.

$$Q = I^2 . R . T \quad (9)$$

Onde o Q é a quantidade de calor gerada (em joules) o I é a corrente elétrica (em amperes) o R é a resistência total (em ohms) e o T como o tempo de soldagem (em segundos).

CONCLUSÕES

Sendo considerado os parâmetros de solda, definição de qual aço utilizar, as características de material, as condições impostas e utilizando as formulações diretamente calculadas pelo software livre PyCharm Community Edition 2024.2.1, na

linguagem *PYTHON*, pode-se obter: a Classificação dos eletrodos de soldagem a ponto pela Resistance Welding Manufacturing Alliance (RWMA); o Diâmetro do Ponto de Solda; a Soldabilidade do material; a Energia, Penetração e Indentação de Soldagem; o Ciclo de trabalho; o Calor Gerado pela Solda.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao UniFOA pelo apoio no desenvolvimento técnico-científico através dos pelos mecanismos de desenvolvimento disponibilizados e pelo incentivo discente através do programa Institucional de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

AVENTA. **Saiba mais sobre os efeitos das variáveis de soldagem**. 2016. Disponível em: <<https://encurtador.com.br/5FsqE>> Acesso em 05 de Set de 2024.

INABA, Y., FUJII, H., & SAKURAI, K. (2009). **Resistance welding processes and thermal simulations**: Review. Journal of Materials Processing Technology, 209(8), 3662-3677.

INFO SOLDA. **Soldagem por Resistência**. 2013. Disponível em: <<https://encurtador.com.br/dEqdU>> Acesso em 05 de Set de 2024.

NASCIMENTO, Vinicius. **Seleção de Parâmetros de Soldagem a Ponto por Resistência**. Baseado na Medição da Resistência Elétrica entre Chapas. Uberlândia, 2008.

SILVA. **DESENVOLVIMENTO DE PORTAL WEB SOBRE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA PARA FINS DE ORIENTAÇÃO A PROFISSIONAIS DE NÍVEL MÉDIO**. Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda, Rio de Janeiro, RJ, 2024.

TANENBAUM, Andrew S. **Tecnologia da informação: uma perspectiva global**. 7. ed. São Paulo: Pearson Education, 2023.

VARGAS. **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistências: Uma Abordagem Estatística**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. 143p.