

Desenvolvimento de Sistema de Controle para Aparato de Soldagem por Atrito Rotativo

Gabriel Kenig

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP/SPO
São Paulo, S.P., Brasil
gabriel.kenig@aluno.ifsp.edu.br
<https://orcid.org/0000-0002-3774-3946>

Jessica Curvelo Nascimento

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP/SPO
São Paulo, S.P., Brasil
jessica.curvelo@aluno.ifsp.edu.br
<https://orcid.org/0000-0001-9351-4462>

Luis Roberto Kanashiro

FATEC Santo André
Santo André, S.P., Brasil
luisroberto.kanashiro@usp.br
<https://orcid.org/0000-0001-8119-4801>

Eriki Masahiko Takara

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – CNEN/SP
São Paulo, S.P., Brasil
eriki@vidjaya.com.br
<https://orcid.org/0000-0002-2748-7635>

José dos Santos Garcia Neto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – CNEN/SP
São Paulo, S.P., Brasil
garcia@vidjaya.com.br
<https://orcid.org/0000-0002-0754-1884>

Oswaldo Luis Asato

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Paulo – IFSP/SZN
Suzano, S.P., Brasil
asato@ifsp.edu.br
<https://orcid.org/0000-0002-9673-3094>

Percy Javier Igei Kaneshiro

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP/GRU
Guarulhos, S.P., Brasil
percyigei@ifsp.edu.br
<https://orcid.org/0000-0003-2148-4131>

Francisco Yastami Nakamoto

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP/SPO
São Paulo, S.P., Brasil
nakamoto@ifsp.edu.br
<https://orcid.org/0000-0002-6799-7365>

Abstract— *The friction rotary welding (FRW) is a solid state material welding method that is able to weld not only similar but dissimilar materials as well. The FRW allows the union between two pieces of metal converting mechanical energy into thermal welding. The friction generated by the rotational momentum between the two surfaces generates enough heat to fuse the materials without reaching the fusion temperature, this mechanical connection can be done through atomic diffusion. The equipment needed to perform the FRW process needed a new control system. This paper presents the development of this new control system through a top-down approach based on successive refinement using modeling tools developed to model dynamic systems to discrete events. The result presented in this paper is the control system algorithm in Enhanced Mark Flow Graph, a high level Petri Net derivative and a systematic to map the model in C++ in order to use it in a PIC microcontroller.*

Keywords—*Rede de Petri, C++, Enhanced Mark Flow Graph, microcontrolador 18F4550.*

I. INTRODUÇÃO

Segundo Miyagi (1996), controlar pode ser definido como a aplicação de ações pré-planejadas para que aquilo que se considera como objeto de controle atinja certos objetivos, ou seja, controlar significa impor um comportamento dinâmico desejado ao sistema. O objeto de controle do presente trabalho é um aparato adaptado para a realização da soldagem por atrito rotativo ou *Friction Rotary Welding* (FRW). O FRW é um processo de soldagem no estado sólido para a união de peças de material similar ou dissimilar (AWS, 1997; MEYER, 2003; PIRES, 2007; MAALEKIAN, 2007). O processo FRW permite a união de peças mediante a conversão direta da energia mecânica para energia térmica. A partir do movimento rotativo entre as superfícies de contato, o atrito gera o calor necessário para promover a união das peças abaixo da temperatura de fusão do material, permitindo a união metalúrgica entre elas por meio da difusão atômica (AWS,

1997; ELMER, 1994). Os parâmetros de controle do processo FRW são a velocidade de rotação, a pressão de atrito, o tempo de atrito, a pressão de recalque e o tempo de recalque que influenciam nas propriedades físicas e mecânicas da união (AWS, 1991; MEYER, 2003). A base para o aparato é um torno mecânico convencional modelo S20 da marca ROMI nas dependências do Departamento de Mecânica do IFSP-Câmpus São Paulo (Fig. 1) que foi adaptado e instrumentalizado por Kanashiro (2017) para a realização do processo FRW de material similar da liga de alumínio AA6351-T6. Posteriormente, a partir dos trabalhos desenvolvidos no aparato, união similar de latão 65/35 (FURLANETO, 2017), união dissimilar de Cobre Eletrolítico e Liga CuCrZr (SABOR, 2018) e união similar da liga Bronze-Alumínio-Níquel CuAl10Ni5Fe5 (TCHERNOV, 2019), verificou-se a necessidade de incluir um novo parâmetro de processo FRW que é o comprimento total da perda de material.



Figura 1 – Aparato para FRW.

A modelagem do processo de solda FRW foi realizada mediante utilização da metodologia de projeto de sistema de controle PFS/E-MFG (*Production Flow Schema/Enhanced Mark Flow Graph*) (MIYAGI, 1996; SANTOS FILHO et al., 2011; NAKAMOTO, 2008; MAZZONI et al., 2018). O PFS é uma ferramenta gráfica e matemática desenvolvida para modelar as atividades do processo produtivo (MIYAGI, 1996), permitindo a aplicação de refinamento sucessivo mediante abordagem *top-down* do comportamento desejado a ser controlado e, a partir do modelo PFS, realiza-se o mapeamento para uma Rede E-MFG (SANTOS FILHO, 2001) que é o algoritmo de controle para o aparato. O E-MFG é uma rede de alto nível, derivadas das Redes de Petri, caracterizada pela individualização da marca, ou seja, a marca com atributos. O aparato possui uma placa controladora com bases na arquitetura Microchip 18F4550. Desta forma, neste trabalho é proposto uma sistemática para mapeamento da rede E-MFG para a linguagem C++.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

i. Processo FRW

A soldagem por atrito utiliza o calor gerado pelo movimento relativo dos materiais a serem unidos, a fim de plastificar o material na zona de contato e em associação com a pressão adequada produz um material unido metalurgicamente (AKINLABI e MAHAMOOD, 2020). No processo de soldagem FRW, a pressão é aplicada simultaneamente a introdução de movimento relativo em um dos componentes, o que ocasiona na geração de calor causado pelo atrito. O movimento relativo dos componentes a serem soldados é obtido ao se manter uma das peças fixas, enquanto a outra sofre rotação com aplicação de uma pressão axial, conforme as etapas apresentadas na figura 2 (AWS, 1997; AKINLABI e MAHAMOOD, 2020).

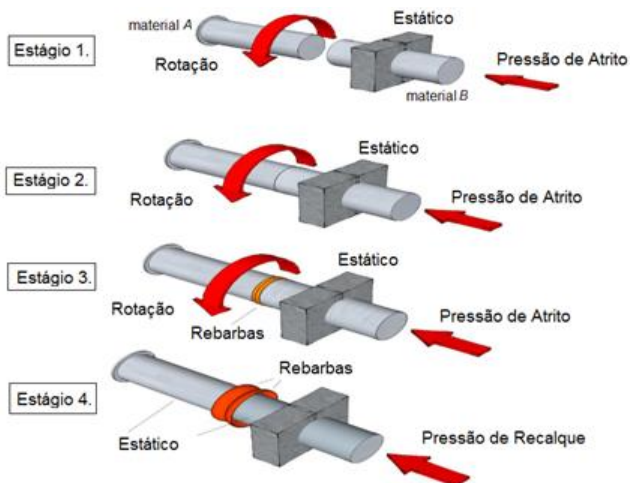


Figura 2 – Soldagem por atrito rotativo (Adaptado de KANASHIRO, 2017).

A FRW possui duas variantes: inercial e convencional, sendo a convencional a mais utilizada. No método convencional um dos componentes a serem soldados é submetido a uma rotação, enquanto o outro componente é fixado no equipamento. No momento em que a velocidade de rotação (rpm) é estabilizada, uma pressão inicial denominada pressão de atrito (P_a) é aplicada, estabelecendo o contato entre os componentes durante um tempo previamente definido, o tempo de atrito (T_a). Após a finalização desta etapa, o freio do

equipamento é acionado cessando o movimento do componente rotacionado, onde se inicializa a aplicação da pressão de recalque (P_r), por um determinado tempo de recalque (T_r) encerrando o processo (KUMAR RAJAK et al., 2020; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020). O comportamento destas variáveis durante o processo de soldagem é demonstrado na figura 3.

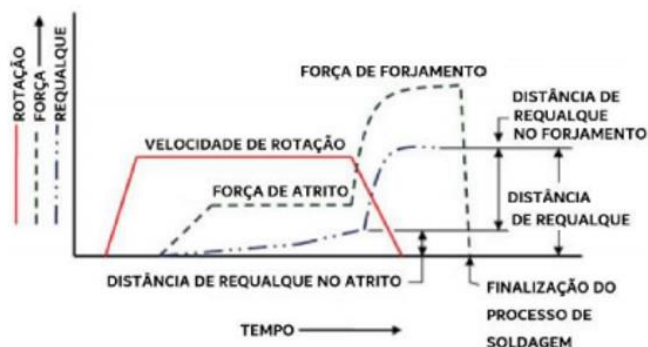


Figura 3 - Evolução dos parâmetros de FRW (Adaptado de AWS, 1997).

De acordo com a literatura, os principais parâmetros que influenciam na qualidade da junta soldada e em suas propriedades mecânicas são a velocidade de rotação, pressão de atrito, tempo de atrito, pressão de recalque, tempo de recalque e temperatura (AWS, 1997; AKINLABI e MAHAMOOD, 2020;). O aumento ou a diminuição excessiva desses valores alteram diretamente as características da junta. Sendo assim, na velocidade de rotação caso o valor predefinido no processo seja elevado, ocorre o aumento dos compostos intermetálicos, maior extensão da recristalização na região de solda, mas também no encurtamento axial sofrido pela peça. Na fase de atrito, uma carga insuficiente impede a expulsão dos óxidos e impurezas que geram a rebarba, conforme apresentado na figura 4.

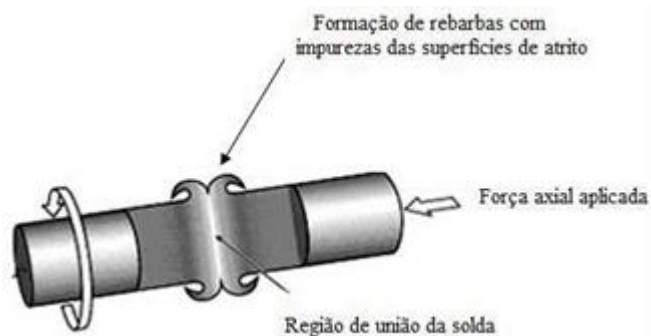


Figura 4 – Formação de rebarba (Adaptado de KANASHIRO, 2017).

Os tempos com valores excedidos dos considerados ótimos limitam a produtividade do processo, assim como o gasto excessivo de material. Entretanto caso os valores sejam insatisfatórios, ocorre o aquecimento desigual na interface causando aprisionamento de óxidos. Outros parâmetros como a taxa de queima de material, geometria da peça, óxidos e filmes de revestimento, diâmetro das amostras também são considerados por alguns autores como um parâmetro de soldagem por atrito rotativo, visto que influenciam

diretamente nas características mecânicas e metalúrgicas da solda (MAALEKIAN, 2007; UDAY et al., 2010; HANDA; CHAWLA, 2014; KUMAR RAJAK et al., 2020; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020).

O processo FRW apresenta como características uma estreita Zona Termicamente Afetada (ZTA), a presença de material deformado plasticamente em volta a região de solda (rebarbas) e a ausência da zona de fusão, visto que as temperaturas de fusão dos materiais envolvidos na soldagem não são atingidas (ELMER, 1994; MEYER, 2003). Neste método, a menor área superficial do material é afetada pelo calor, gerando uma redução nas tensões, nos defeitos e também na perda de material (MAALEKIAN, 2007; UDAY et al., 2010; HANDA; CHAWLA, 2014; KUMAR RAJAK et al., 2020; AKINLABI; MAHAMOOD, 2020). A técnica de soldagem por atrito é considerada recente, e por este motivo há um elevado potencial para sua aplicação na área industrial (ROMBAUT; DE WAELE; FAES, 2011). Um dos mais importantes benefícios da FRW se deve a possibilidade de união de materiais dissimilares, os quais não são viáveis pelos métodos de soldagem por fusão. ROMBAUT; DE WAELE; FAES, 2011, realizaram estudos na soldagem por atrito rotativo entre a alumina (Al_2O_3) com o aço maciço utilizando, entre os dois corpos de prova, uma lâmina de 1 milímetro de grossura de alumínio. Sabor (2018), analisou os parâmetros da soldagem por atrito rotativo entre o cobre eletrolítico e a liga CuCrZr para manutenção da condutividade elétrica. Neste procedimento também ocorre a viabilidade na união de materiais similares, como estudado por Kanashiro (2017) a união entre a liga da alumínio AA6351- T6, por Furlaneto (2017) com a união similar de latão 65/35 e por Akata e Sahin (2003), na investigação do efeito da diferença dimensional em amostras do aço carbono AISI 1040.

ii. Aparato FRW

O aparato para realização do processo FRW é baseado em um torno mecânico convencional da marca ROMI modelo S20 (Fig. 1) o qual foi adaptado para suportar as aplicações de cargas necessárias para o processo. O torno possui passagem de 300 mm de diâmetro por 500 mm entre as extremidades, potência de 5,5 kW e velocidade de rotação máxima de 6150 rpm. Posiciona-se a fixação dos corpos de prova no aparato a 30 mm para fora das castanhas das placas de fixação para cada amostra. Esta distância é recomendada para que ocorra a conformação do material, a qual está relacionada com a formação de rebarba (KANASHIRO, 2017; SABOR, 2018). O equipamento foi ajustado alterando-se a relação das polias, retirada do suporte de ferramentas, adaptação de um atuador hidráulico acoplado ao contraponto móvel acionado por uma bomba hidráulica e instrumentalização para mapeamento das variáveis de controle. A instrumentalização dos parâmetros processo FRW foi realizada mediante a instalação dos sensores de posição, rotação, pressão da bomba hidráulica e temperatura no aparato. O controle do processo é realizado mediante atuação nas válvulas, direcional e redutora de pressão proporcional eletrônica, variador de frequência (inversor de frequência) para controle do motor, conforme apresentado na figura 5 e 6. O aparato possui uma placa controladora com bases na arquitetura Microchip 18F4550. No presente trabalho foi incorporado ao aparato um sensor de posição para registrar a perda total de material.

iii. Ferramentas de Modelagem

Production Flow Schema (PFS) é uma ferramenta gráfica desenvolvida para sistematizar a modelagem de Sistemas a Eventos Discretos (SED) por redes (HASEGAWA et al., 1988; MIYAGI, 1996). O SED são sistemas em que a evolução dos estados ocorre de forma assíncrona com bases na ocorrência de eventos que causam uma transição instantânea de estados (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 2008). O PFS possui os elementos estruturais apresentados na figura 7.

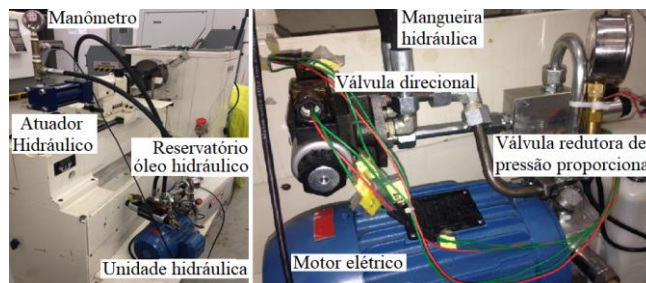


Figura 5 – Suporte do atuador hidráulico e bomba hidráulica (KANASHIRO, 2017).

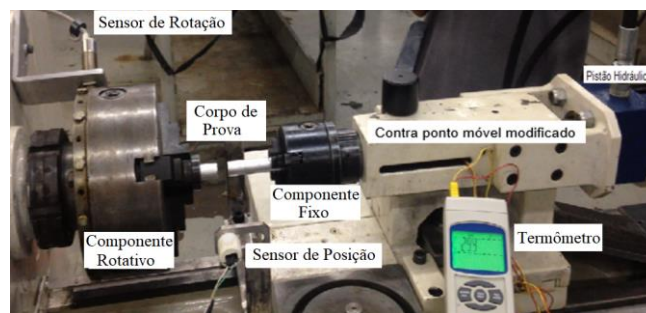


Figura 6 – Instrumentalização para controle da velocidade e posição (KANASHIRO, 2017).



Figura 7 – Elementos do PFS.

O elemento atividade corresponde a um macro-evento que representa a realização de uma ação no objeto de controle. O elemento distribuidor corresponde ao estado que se encontra o objeto de controle antes e depois de sofrido a ação. Os arcos orientados fazem a correlação entre distribuidor/atividade e atividade/distribuidor. O PFS permite modelar conflito, concorrência, paralelismo e sincronismo de atividades (Fig. 8).

A partir de uma atividade ou um distribuidor é possível aplicar a abordagem *top-down* com refinamento sucessivo, permitindo o aprimoramento do modelo até o nível de abstração necessária que define o comportamento do sistema modelado.

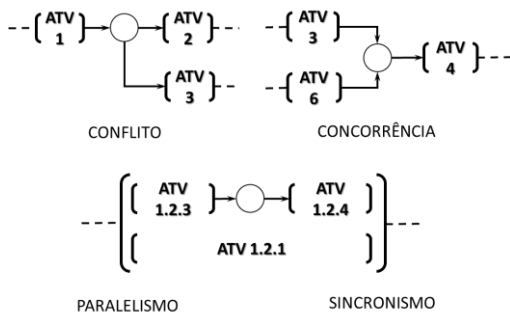


Figura 8 – Conflito, concorrência, paralelismo e sincronismo no PFS.

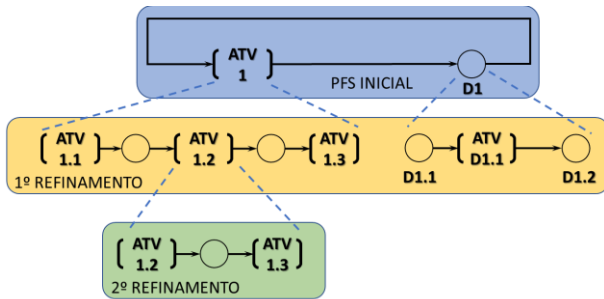


Figura 9 – Abordagem *top-down* com refinamento sucessivo.

Redes de Petri (RdP) é um modelo gráfico e matemático proposto por *Carl Adam Petri* para a modelagem de sistemas de comunicação (REISIG, 1985; MURATA, 1989; MIYAGI, 1996; CASSANDRAS e LAFORTUNE, 2008). A RdP é representada por um grafo direcionado, bi-partido e ponderados com uma marcação inicial, composto de nós e transições, interligado por arcos orientados. Os arcos podem possuir um peso k que representa k arcos paralelos e as marcações são atribuídos nos nós. A figura 10 apresenta um exemplo de RdP com pesos nos arcos. Uma RdP é uma sêxtupla $RdP = \{P, T, A_r, K, W, M_0\}$, sendo que:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ é um conjunto finito de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições;
- $A_r \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é um conjunto finito de arcos;
- $K: P \rightarrow N \cup \{\infty\}$ é a função de capacidade;
- $W: A_r \rightarrow N^+$ é a função de ponderação;
- $M_0: P \rightarrow N$ é a função de marcação inicial que satisfaz $\forall p \in P: M_0(p) \leq K(p)$.

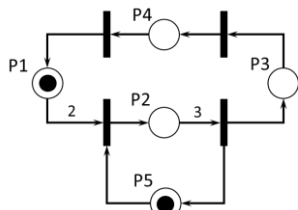


Figura 10 – Exemplo de RdP (Adaptado de Nakamoto, 2020).

Enhanced Mark Flow Graph (E-MFG) é uma ferramenta gráfica e matemática, derivadas das Redes de Petri (RdP) (PETERSON, 1981; REISIG, 1985; MURATA, 1989; MIYAGI, 1996; CASSANDRAS e LAFORTUNE, 2008).

Classificada como uma rede de alto nível, a característica principal da rede E-MFG é a individualização das marcas, ou seja, as marcas possuem atributos (Fig. 11). Os atributos das marcas podem ser lidos, processados e alterados no *Box* Controlador mediante execução de uma função. A comunicação da rede E-MFG para elementos externos é realizada mediante o emprego de arcos sinal de saída para um elemento externo e mapeamento de eventos externos por meio de arco inibidor/habilitador nas transições.

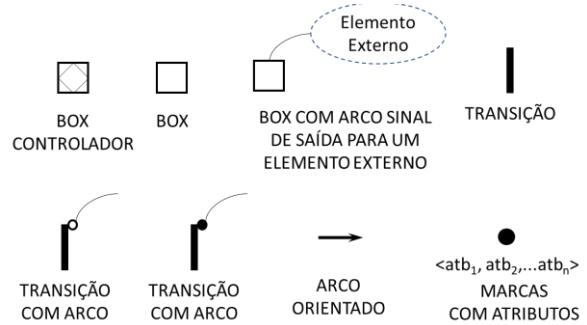


Figura 11 – Elementos do E-MFG.

Metodologia PFS/E-MFG é uma metodologia modificada com bases na metodologia PFS/MFG proposta por Miyagi (1996) para o mapeamento de uma rede de alto nível E-MFG. Inicialmente apresentado no trabalho de Santos Filho (1995), a metodologia foi empregada em diversos trabalhos envolvendo a modelagem e controle de Sistemas de Manufatura Avançada, como apresentados em Nakamoto et al. (2003), Nakamoto et al., (2009), Asato (2015), Kubo (2016), Kubo (2017), Guirro (2019), Silva Junior (2019), Guirro (2020). O modelo E-MFG é mapeado a partir do PFS da seguinte forma (Fig. 12): (i) O elemento Atividade no PFS é mapeado por uma transição inicial, um *Box* Controlador ou *Box* com arco sinal de saída e uma transição final. (ii) O distribuidor é mapeado em *Box* no E-MFG. (iii) Os arcos orientados permanecem mantendo a relação de conexão entre os elementos conectados. A marcação inicial é atribuída ao distribuidor inicial no PFS, sendo que, de acordo com o modelo PFS, os atributos da marca são considerados como parâmetros que definem o comportamento dinâmico da rede E-MFG. Cabe salientar que os atributos podem ser alterados pelo *Box* Controlador do E-MFG.

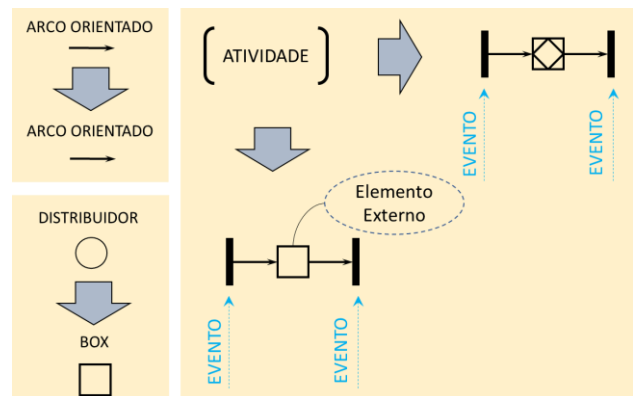


Figura 12 – Sistemática PFS/E-MFG.

III. METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento do sistema de controle para o aparato FRW (figura 1), foi adaptada da metodologia proposta por Miyagi (1996):

1. Identificação do objetivo do sistema;
2. Compreensão do objeto de controle;
3. Organização dos conhecimentos sobre o sistema de controle (dispositivos de monitoramento, atuação, sensoriamento e comando);
4. Abstração e análise das funções de controle (modo de operação e monitoramento);
5. Definição das funções de controle e fluxo de controle;
6. Definição e alocação dos sinais de entrada e saída;
7. Desenvolvimento e implementação do projeto de sistema de controle;
8. Teste e validação.

As etapas 1 a 4 correspondem à análise das necessidades. As etapas 5 e 6 correspondem à definição das necessidades. As etapas 4 a 7 ocorrem de forma cíclica até a verificação do atendimento das necessidades definidas na metodologia.

IV. DESENVOLVIMENTO

O processo a ser modelado é o controle do aparato FRW de acordo com o apresentado na figura 3. Os parâmetros do processo de soldagem FRW adotados por Kanashiro (2017) são a velocidade relativa, a pressão de atrito, o tempo de atrito, pressão de forjamento e o tempo de forjamento para cada tipo de material a ser soldado. Além destes parâmetros, o novo algoritmo de controle deverá monitorar a evolução da temperatura e a queima de material durante o processo de soldagem FRW e armazenar as informações do experimento em uma base de dados.

i. Modelagem da estrutura de dados da marca

A modelagem da estrutura de dados foi considerada os parâmetros adotados por Kanashiro (2017) e o comprimento total da queima de material após a soldagem (Fig. 13).

EXPERIMENTO FRW	
ID_EXPERIMENTO:	INTEIRO
DATA:	DATA_HORA
VELOCIDADE_REFERENCIAL:	REAL
PRESSAO_DE_ATRITO:	REAL
TEMPO_DE_ATRITO:	REAL
PRESSÃO_DE_FORJAMENTO:	REAL
TEMPO_DE_FORJAMENTO:	REAL
COMPRIMENTO_QUEIMA:	REAL

Figura 13 – Modelo relacional dos parâmetros do processo FRW.

ii. Modelagem do PFS do processo FRW

A partir do comportamento do processo apresentado na figura 3, foi desenvolvido o modelo PFS inicial e o primeiro refinamento, conforme apresentado na figura 14.

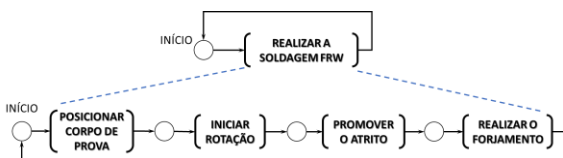


Figura 14 – Modelo PFS inicial e o primeiro refinamento.

A figura 15 apresenta a continuidade do refinamento sucessivo do modelo PFS.

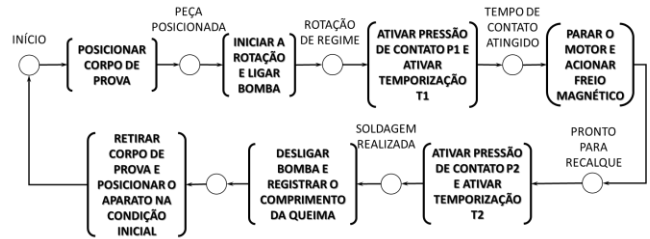


Figura 15 – Modelo PFS final do processo FRW.

iii. Mapeamento do E-MFG a partir do PFS

A partir do modelo relacional da estrutura de dados na figura 13, foi proposto a individualização da marca com os atributos conforme apresentado na figura 16.

- < ID_EXPERIMENTO; DATA; VELOCIDADE_REFERENCIAL; PRESSAO_DE_ATRITO; TEMPO_DE_ATRITO; PRESSÃO_DE_FORJAMENTO; TEMPO_DE_FORJAMENTO; COMPRIMENTO_QUEIMA;
- >

Figura 16 – Atributos da marca E-MFG.

As atividades identificadas no modelo PFS foram consideradas como base as funções implementadas a priori no aparato FRW. Desta forma, identificam-se as seguintes funções de controle que serão executadas nos *Box* Controladores do modelo E-MFG:

- F1: Função para posicionamento do corpo de prova;
- F2: Função que configura o controlador do motor com o parâmetro de velocidade referencial;
- F3: Função que configura os parâmetros de pressão P da válvula proporcional;
- F4: Função para acionamento do freio magnético;
- F5: Temporizador que recebe como parâmetro o tempo T e retorno o sinal de saída Q;
- F6: Função que realiza a leitura e registro do comprimento da queima do material.

O mapeamento do modelo PFS para o E-MFG por meio da metodologia PFS/E-MG apresentou a seguinte rede:

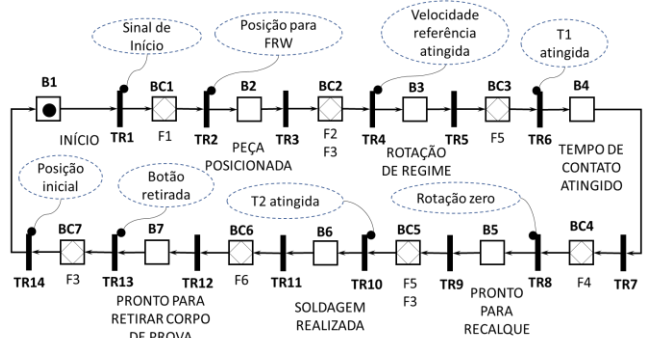


Figura 17 – Rede E-MFG mapeada.

Desta forma, apresentam-se os seguintes conjuntos:

- Transições $TR = \{TR_1, TR_2, TR_3, TR_4, TR_5, TR_6, TR_7, TR_8, TR_9, TR_{10}, TR_{11}, TR_{12}, TR_{13}, TR_{14}\}$;
- Box $B = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7\}$;
- Box Controlador $BC = \{BC_1, BC_2, BC_3, BC_4, BC_5, BC_6, BC_7\}$.

iv. Validação do modelo E-MFG

A validação do modelo E-MFG do processo de soldagem FRW foi realizado utilizando o simulador *Visual Object Net++*. O simulador baseado em Redes de Petri foi desenvolvido por Reiner Drath da *Ilmenau University of Technology*, Alemanha (DRATH, 2021). A partir do modelo E-MFG do processo de soldagem FRW, foi mapeado um modelo RdP para analisar o comportamento dinâmico do disparo das transições (Fig. 18). Apesar do simulador não permitir a execução das funções de controle identificadas no presente trabalho, foi possível verificar a dinâmica do comportamento do modelo E-MFG para o controle do processo de soldagem por atrito FRW.

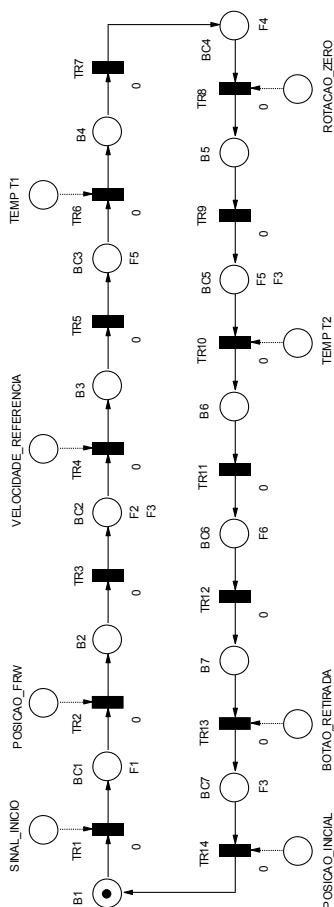


Figura 18 – Modelo simulado no *Visual Object Net++*.

v. Sistematização do E-MFG para C++

A sistematização do E-MFG para C++ foi desenvolvida com bases no trabalho de Thomas (1988). Basicamente, o quantitativo de Transições e de Box serão mapeados para uma estrutura *Switch/Case* em uma execução de *loop* por meio do

comando *while()* para a execução no controlador 18F4550. Logo, a quantidade de *Case* é definida pela quantidade de *Box* da rede E-MFG. A execução da rotina no *Case* está vinculada ao *Box* que possui a marcação, conforme o algoritmo apresentado na figura 19.

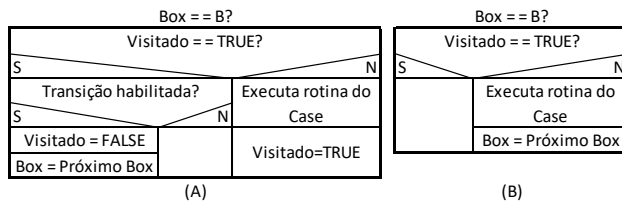
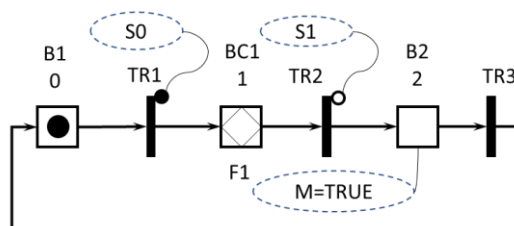


Figura 19 – Algoritmo para mapeamento dos Boxes do E-MFG para linguagem C++.

O algoritmo apresentado na figura 19A é utilizado quando a transição para o próximo *Box* depende de um evento mapeado por uma porta habilitadora e/ou inibidora para ser disparada, permanecendo a marca no *Box* até que a condição de disparo seja satisfeita. O algoritmo apresentado na figura 19B é utilizado quando a transição para o próximo *Box* depende apenas da execução da rotina do *Case*. A figura 20 apresenta um exemplo da aplicação da sistemática proposta.



```

void main()
{
    //Declaração de variáveis

    while(true)
    {
        visit = false;
        box = 0;
        switch(box)
        {
            case 0:
                //Box B1
                visit = true;
                if (S0)
                {
                    visit = false;
                    box = 1;
                }
                break;

            case 1:
                //Box BC1
                visit = true;
                F1();
                if (S1==false)
                {
                    visit = false;
                    box = 2;
                }
                break;

            case 2:
                //Box B2
                M = true;
                box = 0;
                break;
        }
    }
}
    
```

Figura 20 – Exemplo da sistematização E-MFG/C++.

vi. Mapeamento modelo E-MFG do processo de soldagem FRW para C++.

Por meio da sistemática E-MFG/C++ proposta, são apresentados os pseudocódigos o conjunto de Box Controladores do modelo E-MFG do processo de soldagem FRW, apresentadas nas figuras 21 a 27.

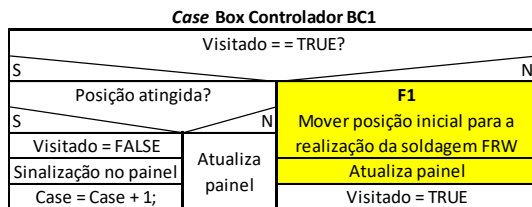


Figura 21 – Pseudocódigo do Box Controlador BC1.

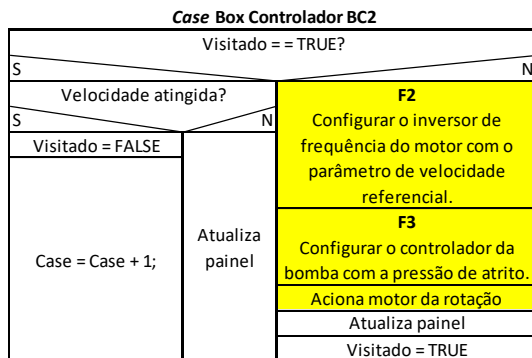


Figura 22 – Pseudocódigo do Box Controlador BC2.

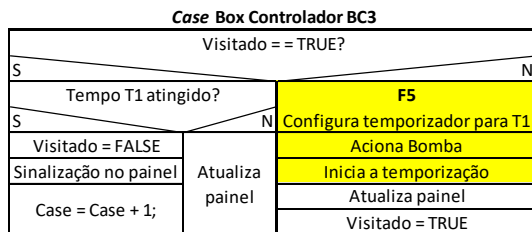


Figura 23 – Pseudocódigo do Box Controlador BC3.

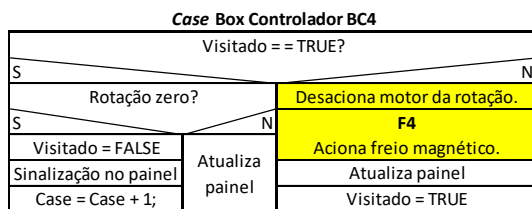


Figura 24 – Pseudocódigo do Box Controlador BC4.

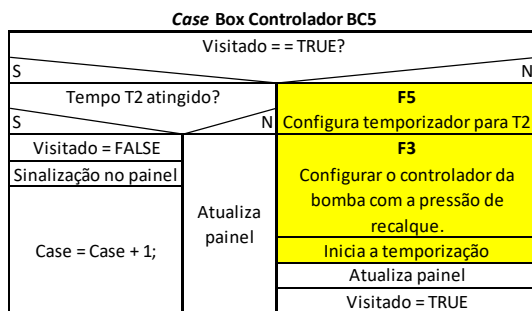


Figura 25 – Pseudocódigo do Box Controlador BC5.

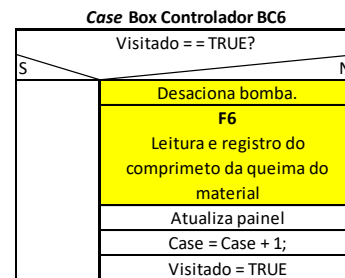


Figura 26 – Pseudocódigo do Box Controlador BC6.

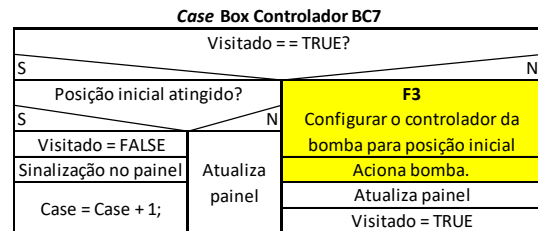


Figura 27 – Pseudocódigo do Box Controlador BC7.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento do projeto de sistema de controle do aparato de soldagem por atrito *Friction Rotary Welding* (FRW), por meio de uma abordagem *top-down* de desenvolvimento estruturado com bases no refinamento sucessivo, utilizando ferramentas *Production Flow Schema* (PFS) e *Enhanced Mark Flow Graph* (E-MFG). O modelo E-MFG gerado foi simulado no *Visual Object Net++*, analisando-se o comportamento dinâmico do disparo das transições. Foi apresentado o mapeamento da rede E-MFG para o código em linguagem C++ para execução no microcontrolador PIC 18F4550. Cabe destacar que a etapa 8 da metodologia de projeto será realizada, sendo prevista a necessidade de ajuste dos parâmetros de *hardware* e/ou *software* para o teste e validação do algoritmo de controle do aparato FRW. Destacam-se como as principais contribuições do presente trabalho, a aplicação da metodologia PFS/E-MFG para projeto de sistema de controle para microcontroladores, permitindo explorar as possibilidades para o desenvolvimento em sistemas de controle embarcado, e a proposta de sistematização para o mapeamento de uma rede de alto nível para o código em linguagem C++.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), em especial ao Departamento de Mecânica do Câmpus São Paulo pelo suporte para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Guirro, D.N., Asato, O.L., dos Santos, G.A., Nakamoto, F.Y., "Manufacturing operational management modeling using interpreted Petri nets", *Gestao e Producao*, São Paulo, 2020, 27(2). <https://doi.org/10.1590/0104-530x3920-20>
- [2] Kubo, R.H., Asato, O.L., dos Santos, G.A. and Nakamoto, F.Y., "Modeling of allocation control system of multifunctional resources for manufacturing systems". 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2016), Curitiba, 2016, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2016.7874596>

- [3] Nakamoto, F.Y., Miyagi, P.E., Santos Filho, D.J. dos, "Automatic generation of control solution for resource allocation using Petri net model". *Revista da Produção*, São Paulo, 2009, vol.19, n1, p.8-26. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132009000100002>
- [4] Nakamoto, F.Y., Miyagi, P.E., Santos Filho, D.J. dos, "Systematization of the project of the production system control", IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2003, conference-paper vol.2, p.868-873. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132009000100002>
- [5] Boehm, B.W., "A spiral model of software development and enhancement". *Computer*, 1988, Volume 21, Issue 5, p.61-72. <http://dx.doi.org/10.1109/2.59>
- [6] Groover, M.P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Pearson, 4th Edition, Pearson, 2015. 793p. ISBN 978-0-133-49961-2.
- [7] Maalekian, M., "Friction Welding – Critical Assessment of Literature". *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, v. 12, n.8, p.738-759. <https://doi.org/10.1179/174329307X249333>
- [8] Miyagi, P. E., *Controle Programável - Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos*. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 194p. 1996. ISBN 978-8-521-20079-6.
- [9] Peterson, J.L., *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Englewood cliffs, Prentice-Hall. 1981. 290p. <https://doi.org/10.1093/comjnl/25.1.129>
- [10] Reisig, W., *Petri Nets: An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1985, 161p. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-69968-9>
- [11] Murata, T., "Petri Nets: Properties, Analysis and Applications". *Proceeding of the IEEE*, 1989, vol. 77 n° 4, pp.541-580. <https://doi.org/10.1109/5.24143>
- [12] Cassandras, C.G., Lafortune, S., *Introduction to Discrete Event Systems*, 2th Edition, Springer Science: New York, 2007. P.769. 2008. ISBN 978-0-387-33332-8. <http://doi.org/10.1007/978-0-387-68612-7>
- [13] Thomas, B.H., "A scheme for translating control flow in the C programming language to Grafset with examples". Gaithersburg, MD: U.S. Dept. of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 1988. (<https://purl.fdlp.gov/GPO/gpo104288>).
- [14] Akinlabi, E.T., Mahamood, R.M. *Solid State Welding: friction and friction stir welding processes*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2020. 157 p. ISBN 978-3-030-37015-2. Mechanical Engineering Series.
- [15] Kanashiro, L.R., "Desenvolvimento e instrumentação de equipamento e estudo dos parâmetros da soldagem por atrito rotativo na união similar AA6351-T6. 2017". 98 f. Dissertação (Mestrado em Processos de Fabricação) – Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [16] Sabor, W.C., "Análise dos Parâmetros da Soldagem por Atrito Rotativo Coaxial entre o Cobre Eletrolítico e a Liga CuCrZr para Garantir Condutividade Elétrica". 2018. 110f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) – Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2018.
- [17] Furlanetto, T., "Estudo dos Parâmetros de Soldagem por Atrito Rotativo na União de Material Similar Latão 65/35". 2017. 74f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) – Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [18] Tchernov, D.P., "Estudo dos Parâmetros de Soldagem por Atrito Convencional da Liga Bronze-Alumínio-Níquel CuAl10Ni5Fe5". 2019. 175f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) – Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2019.
- [19] Kumar Rajak, D., Pagar, D.D., Menezes, P.L., Eyvazian, A., "Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding" *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, Volume 34, 2020, Issue 24, p.2613-2637. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1780716>
- [20] Handa, A., Chawla, V. "Investigation of mechanical properties of friction-welded AISI 304 with AISI 1021 dissimilar steels". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, volume 75, p.1493–1500. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6238-0>
- [21] Uday, M.B., Ahmad Fauzi, M.N., Zuhailawati, H., Ismail, A. B., "Advances in friction welding process: a review". *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, Volume 15, 2010 - Issue 7. <https://doi.org/10.1179/136217110X12785889550064>
- [22] Rombaut, P., Waele, W.D., Faes, K., "Friction Welding of Steel to Ceramic". *Conference: Sustainable Construction and DesignAt: Ghent* Volume: 2011. p. 448-457.
- [23] Akata, H.E. and Sahin, M., "An investigation on the effect of dimensional differences in friction welding of AISI 1040 specimens". *Industrial Lubrication and Tribology*, 2003, Vol. 55 No. 5, pp. 223-232. <https://doi.org/10.1108/00368790310488887>
- [24] Drath, R., *Visual Object Net++*. 2021. Disponível em: <<https://www.r-drath.de/visualobjectnet-download.html>>. Acesso em: 19/02/2021.
- [25] Asato, O.L. ; Pessoa, M.A.O. ; Junqueira, F. ; Santos Filho, D.J. ; Okamoto Junior, J. ; Miyagi, P.E., "Using the enhanced-mark flow graph for dynamic resource allocation in distributed manufacturing". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 29, p. 1238-1251, 2016. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1126000>
- [26] Santos Filho, D.J., Miyagi, P.E., "Enhanced mark flow graph to control autonomous guided vehicles". *International Conference on Computer Applications in Production and Engineering*, 1995, pp.856-865. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-34879-7_89
- [27] Silva Junior, I.C da, "Proposta de Arquitetura de Multiagentes para a Execução do Comissionamento Virtual de Sistemas de Manufatura Avançada". 2019. Dissertação (Mestrado em Automação e Integração da Manufatura) – Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2019.
- [28] Mazzoni, U.R.C., "Sistematização para a Modelagem em Redes de Petri de Alto Nível". 2019. Dissertação (Mestrado em Automação e Integração da Manufatura) – Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2019.
- [29] Kubo, R.H., "Proposta de Sistema de Controle para Alocação de Recursos Multifuncionais e Transporte (VGAs) Tolerante a Falha". 2017. Dissertação (Mestrado em Automação e Integração da Manufatura) – Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [30] Guirro, D.N., "Requisitos para Modelagem do Sistema de Execução da Manufatura com Bases na Norma ANSI/ISA S95". 2017. Dissertação (Mestrado em Automação e Integração da Manufatura) – Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2019.