

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Eduardo Rivelino da Luz**

**Uma nova técnica de otimização Multiobjetivo de modelos probabilísticos multivariados de um processo de soldagem MIG em Tubos de Alumínio AA6063**

Tese submetida para avaliação por banca examinadora, em 26 de julho de 2021, para conferir ao autor o título de *Doutor em Ciências em Engenharia de Produção*.

**Área de Concentração:** Engenharia de Produção

**Orientador:** Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva

**Itajubá**  
**Julho de 2021**

**Eduardo Rivelino da Luz**

**Uma nova técnica de otimização Multiobjetivo de modelos probabilísticos multivariados de um processo de soldagem MIG em Tubos de Alumínio AA6063**

Tese submetida para avaliação por banca examinadora, em 26 de julho de 2021, para conferir ao autor o título de *Doutor em Ciências em Engenharia de Produção*.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva (Orientador)

Prof. Dr. Antônio Fernando Branco Costa

Prof. Dra. Juliana Helena Daroz Gaudêncio

Prof. Dr. Marcelo Machado Fernandes

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi

**Presidente da Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva

**Itajubá**

**Julho de 2021**

## AGRADECIMENTOS

Sempre, em primeiro lugar, agradeço a Deus pela vida e pela sabedoria que me concede em todo tempo e em todo lugar.

À minha esposa, Anna Carolina, à minha filha Sofia e aos meus filhos Luiz Eduardo e Gabriel, pelo apoio incondicional e por serem tudo na minha vida. Amo vocês.

Aos meus pais e irmãos, obrigado pela formação do meu caráter, por me moldarem e por sempre acreditarem e confiarem em mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Anderson Paiva, por me aceitar como seu orientando, pela compreensão das minhas limitações, pelo apoio e pela generosidade com que me conduziu nesta jornada.

A todos os professores do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão por terem contribuído tanto para meu crescimento intelectual. Especialmente aos caros Professores Dr. Carlos Mello, Dr. José Henrique e Dr. Sebastião Costa. Este último me inspirou a realizar este trabalho.

Aos membros da banca, professores Dr. Branco, Dr. Balestrassi, Dra. Juliana, Dr. Marcelo Fernandes e Dr. Rogério Peruchi pelas correções, orientações e contribuições acadêmicas.

Aos meus colegas do programa, que estiveram comigo durante as várias horas dedicadas ao estudo, por todo carinho, gentileza e troca de experiências que me proporcionaram. Obrigado Renata, Alexandre, Clara, Kelly e Robson.

Em hipótese alguma, poderia deixar de agradecer, de uma forma muito especial, aos meus amigos Estevao Romão e Simone Streitenberger. Muito obrigado por dedicarem suas horas para me ajudar a superar minhas dificuldades e me mostrar que eu podia realizar esta tarefa. “É nós”, Estevao e Simone!

"A nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em levantarmo-nos  
sempre depois de cada queda."

*Oliver Goldsmith*

## RESUMO

Para auxiliar na resolução do problema de melhoria de processos, restrições e melhores condições de operação de soldagem, este trabalho aplica as metodologias de *Design of Experiments* (DoE), Otimização Multiobjetivo e a Estatística Multivariada em conjunto para dar o suporte necessário no gerenciamento do processo produtivo de soldagem MIG (*Metal Inert Gas*), de anéis de proteção anti-corona, fabricado com tubos de alumínio na liga 6063 (*Aluminum Alloy 6063 - AA6063*), T4, de 100 mm de diâmetro e espessura de 2mm de parede. Esse tipo de processo pode ser controlado por um número relativamente pequeno de variáveis de entrada, ou seja, a taxa de alimentação do arame ( $W_f$ ), a tensão ( $V$ ), a velocidade de soldagem ( $Fr$ ) e a distância da ponta de contato à peça de trabalho ( $C_f$ ). Além disso, muitas saídas podem ser avaliadas e otimizadas simultaneamente. No presente trabalho, as variáveis de rendimento ( $Y$ ), diluição ( $D$ ), índice de reforço do cordão ( $RI$ ) e índice de penetração ( $PI$ ) foram investigadas. Para considerar a natureza multivariada do problema, técnicas como a Análise Fatorial e os intervalos de confiança simultâneos de Bonferroni foram aplicadas combinadas com restrições elípticas. As variáveis respostas foram modeladas matematicamente por meio de regressão de Poisson e os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que modelos precisos foram alcançados. O método de intersecção de limite normal (NBI) produziu um conjunto de configurações viáveis para as variáveis de entrada, que permite ao experimentador encontrar a melhor configuração do sistema em relação ao nível de importância de cada resposta. A aplicação demonstrou a solução de parâmetro ótimo para o processo de soldagem em AA6063 e apresentou características de minimização da geometria do cordão de solda para contribuir com a melhor eficiência e eficácia do gerenciamento produtivo do processo de soldagem. Um procedimento experimental de confirmação foi realizado com sucesso para validar os resultados teóricos obtidos no modelo de previsão.

Palavras-chave: Soldagem, *Design of Experiments* (DoE), Otimização Multiobjetivo, Estatística Multivariada, Restrições elípticas, Intervalos de Bonferroni, AA6063 (*Aluminum Alloy 6063*).

## ABSTRACT

To assist in solving the problem of process improvement, restrictions and better welding operation conditions, this work applies the Design of Experiments (DoE), Multiobjective Optimization and Multivariate Statistics methodologies together to provide the necessary support in the management of the production process of MIG welding (Metal Inert Gas), of anti-corona protection rings, manufactured with tubes aluminum alloy 6063 (Aluminum Alloy 6063 - AA6063), T4, 100 mm in diameter and 2 mm thick. This type of process can be controlled by a relatively small number of input variables, that is, the wire feed rate (WF), voltage (V), welding speed (Fr) and the distance from the contact tip to the part of work (Cf). In addition, many outputs can be evaluated and optimized simultaneously. In the present work, the variables of yield (Y), dilution (D), reinforcement index (IR) and penetration index (PI) were investigated. To consider the multivariate nature of the problem, techniques such as Factor Analysis and Bonferroni's simultaneous confidence intervals were applied combined with elliptical constraints. The response variables were modeled mathematically using Poisson regression and the results obtained were satisfactory, since accurate models were achieved. The normal bound intersection method (NBI) produced a set of viable configurations for the input variables that allows the experimenter to find the best configuration of the system in relation to the level of importance of each response. The application demonstrated the optimal parameter solution for the welding process in AA6063 and presented characteristics of minimizing the weld bead geometry to contribute to the better efficiency and effectiveness of the productive management of the welding process. An experimental confirmation procedure was successfully performed to validate the theoretical results obtained in the prediction model.

Keywords: Welding, Design of Experiments (DoE), Multiobjective Optimization, Multivariate Statistics, Elliptical Constraints, Bonferroni's simultaneous confidence intervals, AA6063 (Aluminum Alloy 6063).

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Descrição gráfica do método NBI .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 2 - Algoritmo NBI para gerar conjuntos ideais de Pareto .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 3 - CCD para (a) 2 e (b) 3 fatores .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 4 - CCF para 3 fatores .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 5 - Elipsoide das médias e dos dados originais, mostrando os intervalos de Bonferroni..</b>	<b>34</b>
<b>Figura 6 - Processo GMAW (a) Equipamentos do Processo. (b) Detalhes da tocha GMAW e do funcionamento do processo. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 7 - Modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG. (a) Curto-circuito, (b) Pulsado, (c) Globular e (d) Goticular (“Spray”). ....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 8 - Trinca Longitudinal .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 9 - Trinca Transversal.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 10 - Trinca de cratera .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 11 - Falta de Penetração.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 12 - Falta de Fusão.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 13 - Porosidade.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 14 - Solubilidade x Temperatura.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 15 - Mordedura .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 16 - Classificação da pesquisa científica em Engenharia de Produção .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 17 - Geometria do cordão de solda .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 18 - Croqui do anel de corona objeto deste estudo .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 19 - Anel de Corona pronto para embalagem e expedição.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 20 - Conjunto de solda Aristo Power 460 - ESAB.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 21 - Sistema semiautomático de solda dos corpos de prova .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 22 - Vista interna do corpo de prova - peça cilíndrica dentro do tubo .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 23 - Corpos de prova runs 01, 07 e 20 do CCF.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 24 - Imagens obtidas nos experimentos 3, 9 e 15 do CCF e suas medidas de geometria ..</b>	<b>75</b>
<b>Figura 25 - Esquema sequencial do experimento .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 26 - Processo de remoção do reforço.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 27 - Elipse das médias Índice de reforço x Rendimento.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 28 - Elipse das médias Índice de penetração x Índice de reforço .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 29 - Elipse das médias Índice de penetração x Rendimento.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 30 - Região Elíptica para as médias do Índice de penetração (PI) e Índice de reforço (RI) com restrições .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 31 - Região elíptica para as medias do índice de penetração (PI) e do Rendimento (Y) com restrições. ....</b>	<b>86</b>

<b>Figura 32 - Scatterplot 3D dos fatores normalizados e dos respectivos pesos .....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 33 - Gráfico de contorno de mistura - Entropia.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 34 - Gráfico de contorno de mistura – Mahalanobis .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 35 - Experimento de Validação (CP 4).....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 36 - Experimento de validação (CP 1) a partir das perspectivas de cada quadrante .....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 37 - Imagens do corpos de prova do experimento de confirmação .....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Composição química de AA6063 .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabela 2 - Níveis estabelecidos para os fatores .....</b>	<b>67</b>
<b>Tabela 3 - Taxas de fusão e deposição em função do tempo de soldagem e da massa dos corpos de prova.....</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 4 - Experimentos projetados e os valores para as respostas investigadas .....</b>	<b>79</b>
<b>Tabela 5 - Matriz de correlação das variáveis originais .....</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 6 - Scores de fatores rotacionadas para cada experimento.....</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 7 - Cargas fatoriais rotacionadas ordenadas e comunalidades .....</b>	<b>81</b>
<b>Tabela 8 - Matriz Payoff considerando a otimização individual .....</b>	<b>83</b>
<b>Tabela 9 - Matriz Payoff adaptada considerando restrições elípticas e intervalos de restrições de Bonferroni.....</b>	<b>86</b>
<b>Tabela 10 - Resultados do método NBI – Parte I .....</b>	<b>87</b>
<b>Tabela 11 - Resultados do método NBI – Parte II.....</b>	<b>88</b>
<b>Tabela 12 - Arranjo de mistura do tipo simplex lattice .....</b>	<b>90</b>
<b>Tabela 13 - Resumo dos parâmetros obtidos na otimização .....</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 14 - Geometria do cordão de solda - Experimentos de Validação.....</b>	<b>94</b>
<b>Tabela 15 - Relação entre as áreas de reforço e de penetração.....</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 16 - Tabela comparativa entre o modelo de previsão e os resultados reais para as respostas investigadas .....</b>	<b>96</b>
<b>Tabela 17 - Comparação da matriz payoff adaptada com as restrições de Bonferroni e as respostas reais Fonte:Autor 2021.....</b>	<b>96</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CDFW	<i>Continuous Drive Friction Welding</i> - Soldagem por fricção de acionamento contínuo
FSW	<i>Friction stir welding</i> - Soldagem por fricção
RSM	<i>Response Surface Methodology</i> - Metodologia de Superfície de Respostas
MOP	<i>Multiobjective Optimization Programming</i> – Problema de Otimização Multiobjetivo
NBI	<i>Normal Boundary Intersection</i> - Interseção Normal à Fronteira
DoE	<i>Design of Experiments</i> – Planejamento de experimentos
FA	<i>Factorial Analyse</i> - Análise fatorial (AF)
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> - Análise de Componentes Principais
CCD	<i>Central Composite Design</i> - Arranjo Composto Central
CCF	<i>Face centered central composite design</i> - composto central de face centrada
GRG	Generalized reduced gradient (gradiente reduzido generalizado)
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> - Soldagem a Gás Inerte de Metal (MIG)
AWS	<i>American Welding Society</i> - Sociedade Americana de Solda
MMSE	<i>Multivariate Mean Square Error</i> - Erro Quadrático Médio Multivariado
FMSE	<i>Factor Mean Square Error</i> - Erro Quadrático Médio do Fator
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> - Análise de variância
WLS	<i>Weighted least squares</i> - Mínimos quadrados ponderados
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> – Mínimos Quadrados Ordinários

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	19
1.4 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	20
1.5 OBJETIVO GERAL .....	21
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
1.7 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	22
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>23</b>
2.1 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E NBI .....	23
2.2 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	27
2.3 REGRESSÃO DE POISSON .....	30
2.4 INTERVALOS DE CONFIANÇA SIMULTÂNEOS.....	31
2.5 ANÁLISE FATORIAL (AF).....	34
2.6 PROPRIEDADES DAS LIGAS DE ALUMÍNIO QUE EXERCEM INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG .....	39
2.6.1 A LIGA DE ALUMÍNIO 6063 (AA6063) .....	41
2.7 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SOLDA MIG.....	42
2.7.1 IMPORTÂNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM .....	46
2.8 A QUALIFICAÇÃO DA MÃO DE OBRA DO SOLDADOR.....	47
2.9 ESPECIFICAÇÕES DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM (EPS) PARA O ALUMÍNIO NA LIGA 6063 .....	50
2.10 GERENCIAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	51
2.10.1 TIPO DE CORRENTE .....	51
2.10.2 QUALIDADE SUPERFICIAL DO ARAME.....	51
2.10.3 GÁS DE PROTEÇÃO .....	52
2.10.4 OUTROS CONSUMÍVEIS UTILIZADOS NO PROCESSO DE SODAGEM MIG .....	53
2.10.5 DESCONTINUIDADES NO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	54
2.10.6 A GESTÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM .....	60
2.11 ÍNDICES E TAXAS USADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	62
<b>3. MÉTODO DE PESQUISA.....</b>	<b>64</b>
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>

4.1 BREVE CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA E DESCRIÇÃO DO PRODUTO	69
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	71
4.3 APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE DOE, OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO E ANÁLISE MULTIVARIADA .....	77
<b>5. EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO .....</b>	<b>94</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>98</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Diante dos desafios mundiais de limitação de recursos, das crises econômicas e da necessidade de reduzir cada vez mais os custos operacionais das empresas, a busca incessante por processos otimizados e resultados organizacionais positivos tem sido uma constante tarefa nas organizações. A satisfação do cliente está relacionada com o rendimento da fábrica e o rendimento da fábrica está relacionado com o rendimento dos processos (HARRY, SCHROEDER, 2000).

Essa mudança progressiva de paradigma produtivo tem se disseminado para diversos setores, tornando-se um dos objetivos centrais daquelas indústrias que procuram maneiras melhores de gerenciamento como forma de garantir maior produtividade e competitividade (BLACK; HUNTER, 2003; PIERCY; RICH, 2009).

Processos de soldagem fazem parte desse grande arcabouço de operações industriais.

Dentre os estudos, como os de Razeai (2019), Valdenebro, Conesa e Portoles (2016), Braguine et al. (2018) e Senthil et al. (2020), atenção especial tem sido dada à soldagem de diferentes ligas de alumínio, cuja utilização pela indústria de energia é extremamente intensa devido à boa resistência à corrosão, boas propriedades mecânicas e excelente condutividade elétrica.

Restrições e melhores condições de operação são necessárias para melhor eficiência e eficácia organizacional no gerenciamento do processo de Soldagem GMAW – *Gas Metal Arc Welding* (mais conhecido como Soldagem a Gás Inerte de Metal - MIG), de anéis de proteção anti-corona.

Segundo Ilhan e Ozdemir (2007) e Murawwi *et al.* (2013), os anéis de proteção anti-corona são usados para melhorar o desempenho das cordas isolantes. Eles reduzem as descargas de corona, bem como o nível de ruído audível associado e os níveis de interferência de rádio e televisão. Os anéis corona também melhoram a distribuição de tensão ao longo da coluna isolante, reduzindo a porcentagem da tensão na unidade mais próxima da linha de transmissão de energia. Além disso, eles também aliviam a degradação corona de materiais não cerâmicos. São anéis metálicos em forma de toroidal fixados nas extremidades das buchas e fios isolantes. Eles também são chamados de anéis anti-corona e são usados para evitar a descarga corona que ocorre em linhas de alta tensão. Essa descarga, ou perda de corona, é um problema significativo

em linhas de alta tensão, causando perda de energia. Uma maneira de reduzir a descarga corona é usando anéis corona.

Conforme estudos de Abderrazzaq (2013), isoladores para tensões acima de 132 kV devem ser equipados com anéis corona como parte do sistema de isolamento.

Por projetos de empresas brasileiras, esses anéis são normalmente fabricados em liga de alumínio (AA) 6063 T4. Especificamente para este estudo, foi utilizado tubo com diâmetro de 100 mm e espessura de 2 mm de parede. A empresa fabrica outros desenhos de anéis de proteção anti-corona, com diferentes diâmetros e espessuras, mas no mesmo material com as mesmas características e propriedades (AA6063 T4).

A utilização do alumínio se deve ao seu peso, por ser mais leve quando comparado com outros metais, e porque o AA 6063 apresenta uma condutividade elétrica que atende a projetos de empresas, como o segmento de energia elétrica, consumidoras desse tipo de produto.

A soldagem do alumínio é uma tarefa realmente complexa e requer parâmetros bem definidos para apresentar um resultado satisfatório, sem defeitos como porosidade, trincas, falta de penetração, falta de fusão, falhas de preenchimento, mordeduras e outras falhas.

Para Miguel *et al.* (2015) e nos estudos de Valdenebro, Conesa e Portoles (2016), a metodologia experimental de mensuração de variáveis como penetração da solda e comprimento (largura) da zona termicamente afetada (ZTA) permitiu obter modelos mais bem ajustados do que os obtidos em outros estudos. Neste estudo, cujo objetivo principal era a otimização da ZTA, o RSM foi explorado. Esse método permitiu a otimização da função resposta, submetida a diferentes variáveis independentes após modelar a influência dessas variáveis com um número mínimo de experimentos. Uma estratégia sequencial foi realizada a fim de obter o máximo de informações com o mínimo de esforço. Uma vez identificadas as variáveis que influenciam a resposta, a superfície de resposta foi obtida e usada como referência para variar gradualmente as variáveis de entrada que afetam a resposta para melhorar seu valor.

A metodologia de otimização multiobjetivo pode ser aplicada como uma oportunidade de analisar as restrições e obter racionalização e melhoria de processos, com a aplicação mínima possível dos recursos disponíveis. De acordo com Coello (2006), a otimização multiobjetivo é utilizada para resolução de problemas no mundo real em várias áreas diferentes. Pode-se dividir em três áreas de aplicação: a área de engenharia é a que mais utiliza; aplicações em engenharia hidráulica, estrutural, aeronáutica e robótica e controle. Área industrial também utiliza em design e fabricação, programação e gerenciamento.

Para Uy e Telford (2009), o problema básico é a necessidade de avaliar alguns processos com determinadas entradas ou variáveis de teste, chamados fatores, e com variáveis de saída

mensuráveis, chamadas respostas. Esse processo pode ser um modelo de simulação de computador complexo ou um processo de fabricação, com matérias-primas, temperatura e configurações de pressão como as entradas e um produto sendo produzido, como a saída. Se as variáveis de entrada para o processo são diversas, as saídas irão variar, mesmo que a variação possa ser devido apenas a efeitos aleatórios ou ruído. A questão é: quais variáveis de entrada (fatores) estão causando a maioria da variabilidade na produção (respostas)? Em outras palavras, quais fatores são os “motivadores” significativos? *Design of Experiment* (DOE) é uma ferramenta eficaz para maximizar a quantidade de informações obtidas em um estudo enquanto minimizam a quantidade de dados a serem coletados, que, neste caso, minimiza o número de execuções experimentais.

Ainda para os mesmos autores, projetos experimentais fatoriais investigam a causa e os efeitos de muitos fatores diferentes em um único estudo: em vez de conduzir muitos estudos separados, cada um varia um fator de uma vez. Esses projetos permitem a estimativa da sensibilidade de cada fator e também a combinação de dois ou mais fatores por vez (chamados de interações). Deve ser observado que os estudos clássicos usando um fator de cada vez, enquanto mantiverem os outros fatores ("sistema") constantes, não resultarão no conhecimento sobre interações. Essa é outra vantagem de usar técnicas DOE para teste e avaliação de qualquer sistema de engenharia (UY e TELFORD, 2009).

Para Montgomery (1991), as técnicas de planejamento e análise de experimentos (*Design of Experiment* – DOE) são utilizadas para melhorar as características de qualidade dos produtos e processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos etc.).

Para ratificar esse enunciado, em um estudo de Conesa, Egea e Miguel (2017), um projeto experimental é apresentado para um processo de soldagem GMAW para maximizar a quantidade de informações com as seguintes características: modelagem baseada em superfície de resposta (RSM) para quantificar as variáveis de resposta de interesse; seleção de modelos estatísticos para obter os modelos mais informativos; verificação de modelo estatístico a modelos definitivos para garantir capacidades de inferência; e otimização multiobjetivo para identificar a fronteira de Pareto de soluções ótimas.

Vários artigos, como os de Koli (2020), Rezaei (2019), Valdenebro (2018 e 2016), Conesa (2017) e Duarte (2016), encontrados na literatura, usam técnicas como análise fatorial (AF), método de interseção normal à fronteira (*Normal Boundary Intersection* - NBI) e RSM para otimização multiobjetivo. No entanto, eles combinam NBI e erro quadrático médio multivariado (MMSE), desconsiderando as restrições multivariadas.

A AF pode contribuir para a descoberta de informações relevantes relacionadas à melhoria de processos com a aplicação da multivariada. Atribui-se aos trabalhos de Charles Spearman e Karl Pearson os primeiros passos da análise fatorial (Zeller e Carmines, 1980). Spearman (1904) testou a hipótese de que diferentes testes de habilidade mental - habilidades em matemática, verbais, raciocínio lógico, entre outras - poderiam ser explicadas por um fator comum de inteligência que ele denominou "g". De acordo com Kaplunovsky (2009), outra contribuição relevante foi feita por Thurstone (1935) ao desenvolver a ideia de *multiple factor analysis*.

Outras contribuições significativas podem ser creditadas a Hotelling ao propor "o método de componentes principais que permite o cálculo da única matriz de fatores ortogonais" (Kaplunovsky, 2009). Dessa forma, o desenvolvimento das diferentes técnicas de análise fatorial pode ser explicado a partir do acúmulo de diferentes trabalhos. De acordo com King (2001), "no modelo da análise fatorial, há muitas variáveis observadas cujo objetivo é gerar fatores subjacentes não observados. Ou seja, a principal função das diferentes técnicas de análise fatorial é reduzir uma grande quantidade de variáveis observadas em um número menor de fatores.

Hair et al (2006) definem fator como a combinação linear das variáveis (estatísticas) originais. Esse conceito está intimamente ligado a realizar auditorias dos fluxos de atividades de trabalho, com a finalidade de encontrar gargalos de produção, erros e desperdícios – tanto de recursos materiais e tempo, como de recursos financeiros. O objetivo principal é sempre alcançar maior eficiência e utilizar cada vez menos recursos.

Diante disso, o presente trabalho é motivado e justificado pela necessidade de obtenção de melhores resultados técnicos, eliminação de defeitos de soldagem, otimização dos recursos e redução de desperdícios no processo de soldagem MIG em tubos de liga de alumínio (AA) 6063 T4, 100 mm de diâmetro com uma espessura de parede de 2 mm.

Conforme discutido anteriormente, essa é a principal matéria-prima para a fabricação de anéis de proteção anti-corona, utilizados por diversas empresas do segmento de energia elétrica na montagem de disjuntores de média e alta tensão.

Assim, este trabalho propõe uma nova abordagem da metodologia desenvolvida em Luz *et al.* (2021) para otimização multiobjetivo no processo de soldagem MIG de anéis corona, visto que a resposta mais importante teve seu intervalo definido pelo gestor do processo, o que influenciou no estabelecimento do intervalo das outras respostas correlacionadas.

Um projeto composto de face centrada (CCF) com 4 variáveis de entrada, taxa de alimentação do arame ( $Wf$ ), tensão do arco ( $V$ ), distância da ponta de contato à peça de trabalho

( $Ct$ ) e frequência do motor ( $Fr$ ), resultando em 31 experimentos, foi usado. Os valores de saída, rendimento ( $Y$ ), diluição ( $D$ ), índice de reforço ( $RI$ ) e índice de penetração ( $PI$ ) foram modelados, permitindo estimar os valores individuais ótimos. Portanto, a metodologia aqui apresentada incorpora intervalos de confiança simultâneos e restrições elípticas ao problema de otimização multiobjetivo. Nesta tese, a técnica de regressão de Poisson também é aplicada para modelar os resíduos quadráticos das variáveis originais dos modelos de mínimos quadrados ordinários (OLS) e as próprias variáveis originais.

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Este trabalho trata da combinação do uso das metodologias de *Design of Experiment* (DoE), Otimização Multiobjetivo e da Análise Multivariada, incorporando intervalos de confiança simultâneos de Bonferroni e Regressão de Poisson, como instrumentos de correção e suporte ao gerenciamento produtivo do processo de soldagem.

Apesar das inúmeras possibilidades acompanhadas pelo uso de tecnologias cada vez mais avançadas, podemos afirmar que a capacidade de produção é finita e possui determinadas restrições.

De acordo com Pedroso e Correa (1996), para exemplificar essa afirmação, pode-se citar algumas das diversas possibilidades e restrições:

a. Em termos de ordens:

- as ordens, geralmente, apresentam datas de entrega diferentes;
- cada ordem, geralmente, está em um estado diferente de completude;
- as ordens podem apresentar *setups* com tempos e atividades variáveis, em função da ordem anterior;
- cada ordem pode ter roteiros alternativos, dependendo das características tecnológicas dos equipamentos;
- cada ordem pode, eventualmente, ser feita em máquinas alternativas com eficiências diferentes;
- cada ordem pode ser de clientes com importância relativa diferente;
- cada ordem pode necessitar de reprogramações frequentes, tanto em função dos clientes (alterações nas quantidades e nos prazos de entrega) quanto de ocorrências não previstas quanto aos recursos ou às operações.

b. Em termos de recursos:

- as máquinas geralmente quebram, bem como demandam manutenção;

- as matérias-primas podem não estar disponíveis;
  - as ferramentas podem não estar disponíveis;
  - os funcionários podem faltar.
- c. Em termos de operações:
- os problemas relacionados à qualidade geralmente ocorrem, requerendo retrabalhos;
  - as operações podem ter tempos de perecibilidade;
  - as operações podem demandar tempo de pós-produção (cura, secagem etc.);
  - as operações podem ter restrições para a definição de tamanhos de lote;
  - as operações podem ser feitas em recursos gargalo, demandando máxima utilização.

Para minimizar o impacto das restrições, é preciso encontrar meios de otimizá-las e tirar o melhor proveito do fluxo operacional da empresa. Conhecer a capacidade de produção e as restrições de uma indústria é fundamental para melhorar a eficiência no gerenciamento das operações e melhorar a produtividade nos processos de soldagem.

De acordo com o Manual de Soldagem da ALCAN (1993), a produtividade, em soldagem, pode ser definida como o comprimento de junta soldada por unidade de tempo.

Analisando a afirmação acima, vê-se que, para maximizar a produtividade, é necessário:

- ✓ Minimizar a quantidade de metal depositado;
- ✓ Maximizar o ciclo de trabalho;
- ✓ Maximizar a taxa de deposição.

Além disso, este estudo se propõe a estudar outras variáveis geométricas do cordão de solda e suas correlações que influenciam os resultados produtivos em processos de soldagem. Essas variáveis de geometria do cordão de solda são taxas e índices como: Taxa de Fusão, Taxa de Deposição, altura do Reforço, Área de Penetração, Largura, Rendimento, Área de reforço, Índice de penetração e Índice de reforço.

Algumas dessas variáveis citadas são obtidas através de uma relação e ou razão entre as próprias variáveis, como por exemplo, o rendimento, que é a relação entre a taxa de fusão e a taxa de deposição. As demais variáveis serão apresentadas com mais detalhes no capítulo 2 deste trabalho.

Essas variáveis serão agrupadas em clusters para reduzir a dimensionalidade da análise e, de acordo com o grau de similaridade entre as variáveis, será definido o número de fatores que representam as variáveis originais do problema apresentado. Esses fatores não apresentam correlação entre si, além de que seu uso possibilita redução significativa do número de variáveis no problema. Conforme Pereira (2001), cluster significa agrupamento, ou seja, visa agrupar

variáveis com características comuns, sem perder informações do conjunto em estudo.

Assim, será possível modelar esses fatores e encontrar o parâmetro ótimo para cada um deles aplicando o método de interseção normal à fronteira (NBI), tendo em vista que o resultado desta modelagem proporcionará a otimização dos parâmetros de soldagem, o que influenciará na racionalidade dos recursos utilizados no processo de soldagem e nas características da qualidade e estética visual do cordão de solda.

A ideia fundamental é a de racionalizar o uso dos recursos aplicados e encontrar melhores parâmetros de soldagem que possam garantir essa racionalidade dos processos como consumo de consumíveis, redução de energia, melhoria da qualidade e redução de custos relacionados ao processo de soldagem.

Isto posto, pode-se definir o problema de pesquisa com a seguinte pergunta de partida: Como o uso combinado de técnicas de análise multivariada, regressão de Poisson e otimização multiobjetivo podem auxiliar na melhoria de processos, restrições e melhores condições de operação para dar o suporte necessário a melhor eficiência e eficácia organizacional no gerenciamento do processo produtivo de soldagem MIG em tubos de AA6063 na confecção de anéis de proteção anti-corona?

### 1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O presente trabalho é motivado e justificado pela necessidade de se obter melhores resultados técnicos, eliminação de defeitos de soldagem, otimização racional dos recursos e redução dos desperdícios no processo de soldagem MIG na fabricação de anéis de proteção anti corona, utilizados por diversas empresas do segmento de energia na montagem de disjuntores de média e alta tensão; características estas que influenciam diretamente no gerenciamento do processo produtivo de soldagem. Sendo assim, este estudo apresentada tanto características de contribuição acadêmica quanto forte aplicação industrial.

Montgomery (2005) afirma que, considerando os aspectos e características fabris, experimentos realizados em estudos dentro de um ambiente industrial possuem o seu foco e direcionamento em basicamente estabelecer uma melhora no desempenho dos produtos confeccionados e também nos processos existentes de fabricação, onde a melhoria pode ser obtida.

Um trabalho de Valdenebro, Portoles e Conesa (2018) apresenta um estudo, realizado em laboratório, da influência dos parâmetros do processo de soldagem MIG na geometria do cordão de solda de AA6063-T5, utilizando o método de Taguchi e a Análise de Variância Univariada – ANOVA.

Outras pesquisas em plataformas de publicação de artigos científicos, como *Web of Science* e *Scopus*, foram realizadas para dar suporte, continuidade e justificativa ao ineditismo deste trabalho. Foram pesquisados diversos termos relacionados. Utilizou-se da plataforma *Scopus*, o maior banco de dados de resumos e citações da literatura com revisão por pares: revistas científicas, livros, processos de congressos e publicações do setor.

Pesquisou-se, nas plataformas citadas, os termos “*DoE and Welding and AA6063*”, cujo resultado foi de 12 entradas; destas, apenas 06 artigos tratavam efetivamente de processo de solda em AA6063; porém, os processos de soldagem encontrados foram *Continuous Drive Friction Welding* (CDFW) e o de solda por Fricção e Mistura Mecânica (em inglês: *Friction stir welding* - FSW). Nada relacionado ao processo de solda MIG em tubos AA6063 T4.

Também se pesquisou os termos “*factor analys and welding and AA6063*” e o resultado foi de 5 artigos, dos quais um tratava da extrusão de AA7075 e os outros quatro, de solda por fricção (FSW). Foram pesquisados também os termos “*welding parameter and AA6063*” e obtidas 71 respostas, porém nenhuma delas tratava de parâmetros de soldagem MIG em AA6063.

Essa busca, na *Scopus* e na *Web of Science*, demonstra uma ótima possibilidade de preenchimento de lacunas através deste trabalho, principalmente pelo uso da combinação das metodologias propostas, com destaque à análise multivariada.

Além das técnicas já citadas, adicionando a elas o uso das restrições elípticas e intervalos de confiança simultâneos de Bonferroni e a regressão de Poisson para modelar as respostas, fica aqui bem caracterizado o novo modelo de otimização multiobjetivo proposto e o ineditismo desta tese, assim como o caráter prático da pesquisa.

#### 1.4 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A utilização da soldagem como um processo de fabricação e ou manutenção nos diversos segmentos da indústria, tem se constituído em um marco para o crescimento e fortalecimento da indústria nacional. Esse fato tem levado pesquisadores e estudiosos da área como a empenharem-se na realização de estudos sobre os fenômenos associados à soldagem dos materiais. Como referência para esta afirmação, pode-se citar a revista *Welding in the World*, que publica documentos oficiais sobre todos os aspectos da união de materiais, incluindo soldagem, brasagem, solda, corte, pulverização térmica e técnicas de junção e fabricação aliadas. A cobertura abrange uma ampla gama de tópicos, incluindo avanços nos processos de junção; comportamento metalúrgico e material associado à união; propriedades de engenharia

e avaliação de juntas; aspectos de saúde e segurança e meio ambiente da união; aplicações industriais; desempenho de estruturas soldadas em serviço; teste de soldas e educação.

A análise multivariada, como instrumento de apoio à gestão produtiva no processo de soldagem, pode auxiliar na obtenção de respostas necessárias à adequação dos parâmetros de soldagem, bem como pode auxiliar no próprio controle das variáveis de resposta diferentemente de outros estudos, como já citado anteriormente, de Valdenebro, Portoles e Conesa (2018), que usa a análise univariada. Assim, pôde-se comprovar que as metodologias combinadas, em especial a técnica multivariada, podem ser amplamente utilizadas como ferramentas de controle ao gerenciamento produtivo do processo de soldagem.

Miguel *et al.*(2015) estabeleceu uma metodologia de controle para soldagem GMAW baseada na metodologia de superfície de resposta (*Response Surface Methodology* - RSM) considerando dois parâmetros, penetração e comprimento da zona termicamente afetada (ZTA). A metodologia experimental de mensuração de ambas as variáveis permitiu obter modelos mais bem ajustados do que os obtidos em outros estudos.

Como dito anteriormente, o ineditismo deste trabalho se dá através da aplicação de um novo modelo de otimização multiobjetivo com abordagem de restrições elípticas para modelos não lineares implementados no processo de soldagem MIG em AA6063. Encontram-se na literatura diversos trabalhos, como os de Valdenebro (2020), Braguine *et al.* (2018), Valdenebro (2018) e Costa *et. al* (2016), que utilizam técnicas como análise fatorial, *normal boundary intersection* e metodologia de superfície de resposta (RSM – *Response Surface Methodology*) para otimização multiobjetivo, entretanto esses trabalhos utilizam a abordagem híbrida de NBI-MMSE (erro quadrático médio) e ou desconsideram intervalos multivariados com restrições elípticas. Dessa forma, pretende-se utilizar os intervalos multivariados de Bonferroni para estabelecer os limites que as respostas multivariadas poderão encontrar. Restrições elípticas também serão utilizadas considerando a estrutura de variância e covariância entre as respostas. Um outro diferencial é que as respostas foram modeladas, inicialmente, utilizando o método de mínimos quadrados ordinários (OLS) e em seguida os resíduos quadráticos resultantes, foram modelados utilizando regressão de Poisson. Dessa forma, o algoritmo de mínimos quadrados ponderados pôde ser aplicado às respostas originais aumentando os ajustes dos modelos.

### 1.5 OBJETIVO GERAL

Propor uma nova metodologia de otimização multiobjetivo com técnicas multivariadas e intervalos de confiança simultâneos de Bonferroni como solução de parâmetros ótimos de soldagem MIG em tubos de alumínio AA6063.

## 1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Estabelecer os intervalos ideais das variáveis de entrada do processo;
- b. Estabelecer as variáveis de interesse e os seus sentidos de otimização de acordo com a decisão dos gestores do processo;
- c. Identificar a variável de resposta mais relevante e, a partir dela, obter os intervalos das outras respostas correlacionadas;
- d. Desenvolver e aplicar o método de otimização multiobjetivo utilizando intervalos de confiança simultâneos de Bonferroni e regressão de Poisson;
- e. Obter os valores ótimos dos parâmetros do processo de soldagem em tubos de alumínio AA 6063;
- f. Validar as respostas obtidas através do experimento de confirmação.

## 1.7 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta tese está dividida em seis capítulos. Em seu primeiro capítulo, é apresentada uma visão geral da pesquisa e seus objetivos. No capítulo dois, está descrita toda a fundamentação teórica na qual se assentam os conceitos científicos desta pesquisa. No capítulo três, é apresentado o método de pesquisa científica adotado para o desenvolvimento desta tese, no caso, o DOE, Otimização Multiobjetivos e Análise Multivariada. Já, no capítulo quatro, são apresentadas a análise dos resultados e a discussão das metodologias e técnicas aplicadas. No capítulo cinco, é abordada a execução do experimento de validação. Por fim, no capítulo seis, são apresentadas as conclusões e as outras inferências.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E NBI

O conceito de otimização, de acordo com Rao (2009), pode ser entendido como o ato de obter o melhor resultado sob dadas circunstâncias. Assim, nos mais diversos tipos de processos e operações de engenharia, engenheiros se deparam, em diferentes estágios de um ambiente industrial, com várias decisões relacionadas a aspectos tecnológicos ou gerenciais. O objetivo final pode ser traduzido tanto na minimização dos recursos necessários para uma determinada operação quanto na maximização dos resultados desejados. Portanto, desde que os recursos necessários ou os resultados desejados possam ser expressos como uma função de variáveis de decisão, entende-se a otimização como o processo de identificar as condições que proporcionem o valor máximo ou mínimo de uma função, a qual é denominada função objetivo.

Os processos industriais geralmente envolvem um número expressivo de metas que devem ser otimizadas simultaneamente. Embora nem sempre possa ser alcançada, essa característica não precisa ser negligenciada, uma vez que existe um conjunto de técnicas disponíveis para realizar uma otimização multiobjetivo (MO) que permite que o problema seja tratado em um comportamento mais real (MOTA, AFONSO e LYRA (2012)).

Segundo Das e Dennis (1998), a otimização multiobjetivo é uma ferramenta de tomada de decisão capaz de lidar com situações em que múltiplas características do processo precisam ser otimizadas ao mesmo tempo. Uma maneira genérica de descrevê-la é mostrada na Eq. (1).

$$\min_{x \in C} F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix}, n > 2, \quad \dots (MOP) \quad (1)$$

$$C = \{x: h(x) = 0, g(x) \leq 0, a \leq x \leq b\}$$

onde  $a$  e  $b$  garantem a limitação de espaço da solução e  $h(x)$  está relacionado à restrição de igualdade, enquanto  $g(x)$  se refere à restrição de desigualdade.

É fácil inferir que otimizar um cenário com múltiplos objetivos conflitantes levará não a uma única melhor solução, mas a um conjunto de soluções. Uma vez que haja uma relação de *trade-off* entre diferentes características do sistema, uma solução estará mais conectada com o melhor desempenho de determinada resposta do sistema, enquanto uma segunda será

direcionada para outro atributo e assim por diante (DAS e DENNIS, 1998). Todo esse grupo de soluções é denominado Pareto ótimo segundo menciona Matussi, Rossano e Simeone (2014).

Dentro desse contexto, os métodos baseados no conceito de eficiência de Pareto são opções adequadas para problemas de otimização multiobjetivo de forma simultânea. Eles apresentam não apenas um ponto de ótimo, mas um conjunto de soluções chamadas Pareto-ótimo, que delimitam a fronteira de Pareto, que é a fronteira de eficiência do problema. Com o conceito de eficiência de Pareto, vários métodos têm sido usados atualmente. Dentre eles, temos o método de intercessão normal à fronteira (*Normal Boundary Intersection* - NBI) (DAS e DENNIS, 1998).

Os problemas de otimização multiobjetivo são muito frequentes na vida real e alguns problemas podem surgir nesse contexto. Na medida em que o número de funções objetivas aumenta, o mais difícil é encontrar um ponto ideal para todas elas e, obviamente, melhorar um objetivo prejudicará outro.

O método *Normal Boundary Intersection* (NBI), proposto por Das e Denis (1998), é frequentemente aplicado em contextos multiobjetivos e supera as desvantagens do método da soma ponderada na busca de soluções ideais. É importante destacar que o conjunto de todos os pontos ideais é definido como uma fronteira de Pareto.

Para Duarte *et al.* (2016) e Oujebbour, Habbal e Ellaia (2013), o método NBI gera soluções viáveis e uniformes - a curva de Pareto, já mencionada por Das e Dennis (1998) -, que também supera as deficiências do método dos mínimos quadrados, e por meio da qual é possível analisar o contexto de forma mais prática e visual.

Na figura 1, o método NBI apontado é uma rotina de otimização desenvolvida para encontrar soluções de pareto-ótimas, uniformemente distribuídas, para um problema multiobjetivo não linear geral (Shukla, 2007). Nela, é possível observar que o método NBI traça a fronteira de Pareto por meio da solução de um grupo de problemas não lineares que representam a intercessão entre a fronteira e a linha normal ao plano utópico em cada nó. Dessa forma, retas “normais” à linha de utopia, uniformemente distribuídas, levam a pontos da fronteira de Pareto igualmente distribuídos (DAS e DENNIS, 1998).

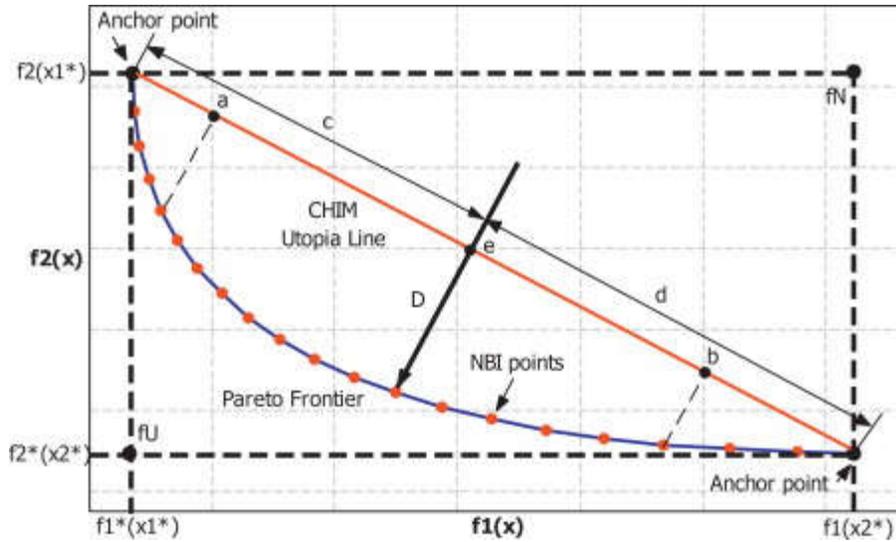


Figura 1 - Descrição gráfica do método NBI.  
Fonte: Adaptado de Shukla (2007)

Conforme Das e Dennis (1998), uma maneira geral de representar uma formulação de NBI é apresentada na Eq. (2), por meio de uma programação não linear restrita.

$$\begin{aligned}
 & \max_{x,t} t \\
 & s. t. \bar{\Phi}\beta + D\hat{n} = \bar{F}(x) \\
 & \quad h_i(x) = 0 \\
 & \quad g_j(x) \leq 0 \\
 & \quad a \leq x \leq b
 \end{aligned} \tag{2}$$

Em de Almeida *et al.* (2020),  $\bar{\Phi}$  indica a matriz Payoff normalizada,  $\beta$  é o vetor de pesos,  $D$  representa um escalar que é perpendicular à linha da utopia e  $\bar{F}(x)$  contempla o vetor de funções objetivo dimensionadas.

A matriz Payoff  $\Phi$ , como mostrado na Eq. (3), vem do estabelecimento dos mínimos individuais para uma função objetivo, de modo que este *i-ésimo* ponto ótimo  $x_i^*$  é também aplicado nas demais funções. Esse procedimento é repetido até que todas as funções objetivo sejam examinadas. Dessa forma, a posição  $\Phi_{ii}$  de todas as linhas da matriz mostra o valor ideal de  $f_i(x^*)$ , enquanto as demais posições apresentam os valores das demais funções avaliadas em  $x_i^*$ , linha por linha. Os valores da diagonal principal são então usados para normalizar as funções objetivo e esta é uma estratégia útil ao lidar com diferentes escalas ou unidades de variáveis (DUARTE *et al.* 2016; DAS e DENNIS, 1998; OUJEBBOUR, HABBAL E ELLAIA, 2013 e MOURA *et al.*, 2018).

$$\Phi = \begin{bmatrix} f_1^*(x_1^*) & \cdots & f_1^*(x_i^*) & \cdots & f_1^*(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ f_i^*(x_1^*) & \cdots & f_i^*(x_i^*) & \cdots & f_i^*(x_m^*) \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_m^*(x_1^*) & \cdots & f_m^*(x_i^*) & \cdots & f_m^*(x_m^*) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para normalizar os valores originais da matriz  $\Phi$ , dois vetores são construídos, um contendo os valores ótimos resultantes da otimização individual de todas as funções objetivo e outro composto pelos seus piores valores possíveis. O primeiro vetor é chamado de Utopia, enquanto o segundo é o Nadir e são representados pela Eq. (4) e Eq. (5) respectivamente (DUARTE *et al.* 2016; NAVES, DE PAULA e BALESTRASSI, 2017).

$$f^U = [f_1^*(x_1^*), \dots, f_i^*(x_i^*), \dots, f_m^*(x_m^*)]^T \quad (4)$$

$$f^N = [f_1^N, \dots, f_i^N, \dots, f_m^N]^T \quad (5)$$

Assim que esses vetores estiverem disponíveis, a Eq. (6) pode ser aplicada para gerar a matriz de Payoff normalizada  $\bar{\Phi}$  mostrada na Eq. (7).

$$\bar{f}_i(x) = \left[ \frac{f_i(x) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U} \right] \quad (6)$$

$$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \bar{f}_1^*(x_1^*) & \cdots & \bar{f}_1^*(x_i^*) & \cdots & \bar{f}_1^*(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \bar{f}_i^*(x_1^*) & \cdots & \bar{f}_i^*(x_i^*) & \cdots & \bar{f}_i^*(x_m^*) \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{f}_m^*(x_1^*) & \cdots & \bar{f}_m^*(x_i^*) & \cdots & \bar{f}_m^*(x_m^*) \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde  $\bar{f}_i(x)$  indica a versão normalizada da função objetivo  $f_i(x)$ .

A formulação genérica, apresentada na Eq. (2), pode ser simplificada, levando à formulação de cenários bi-objetivos, conforme ilustrado na Eq. (8).

$$\begin{aligned} \min_x F(x) &= \bar{f}_1(x) \\ \text{s. t. } \bar{f}_1(x) - \bar{f}_2(x) + 2\beta_1 - 1 &= 0 \\ x &\in \Omega \end{aligned} \quad (8)$$

$$g_j(x) \leq 0$$

$$h_{j+1}(x) = 0$$

A figura 2 representa um fluxo de um modelo de Algoritmo NBI para gerar conjuntos ideais de Pareto.

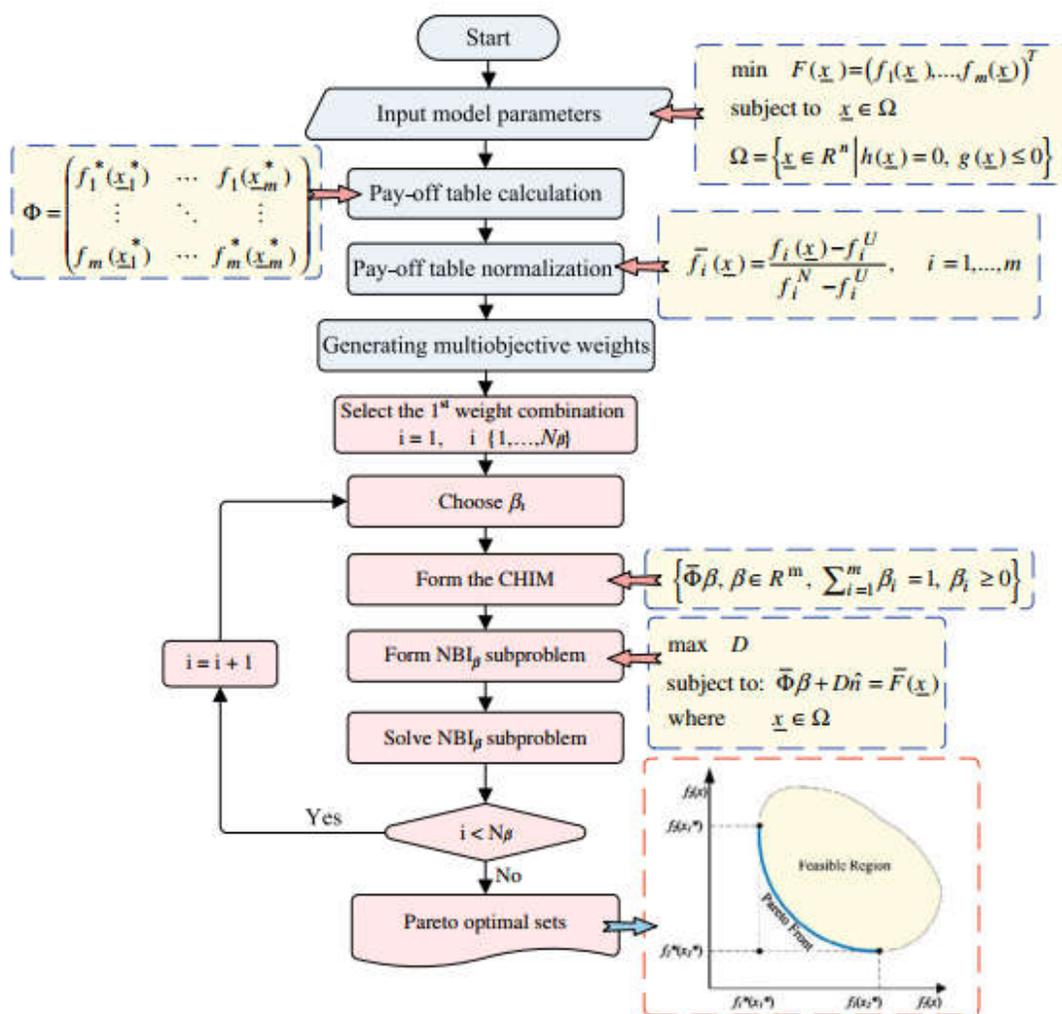


Figura 2 - Algoritmo NBI para gerar conjuntos ideais de Pareto  
Fonte: Vahidinasab e Jadid (2009)

## 2.2 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Para Montgomery (2013), a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é uma técnica de design de experimento (DoE) para modelar e analisar problemas complexos nos quais uma resposta ótima é buscada para uma variável de interesse influenciada por tantas outras variáveis de processo.

Por ser prática, econômica e de fácil implementação, conforme afirma Singh e Rao (2007), ela é amplamente aplicada no setor industrial, principalmente em cenários onde a qualidade do produto ou processo, ou mesmo as medidas de desempenho, são influenciadas por diversas variáveis de entrada (MYERS e MONTGOMERY, 2002) e porque essa relação é normalmente desconhecida (TORRES *et al.*, 2020).

Costa *et al.* (2016) aplicaram a otimização multivariada usando o RSM a um processo de fresagem a seco AISI 1045, considerado mais sustentável que o processo de fresagem convencional, por não utilizar fluídos de corte. Lu e Xu (2017) usaram essa metodologia para encontrar as melhores condições para uma nova estratégia de recuperação de ouro não lixiviado de cartões de memória descartados. Nasiri e Arsalani (2018) usaram o RSM para avaliar a influência de fatores experimentais, como concentração inicial de corante, tempo de contato, pH inicial e dosagem de adsorvente na eficiência de remoção de cristais violetas, para, posteriormente, encontrar a condição ótima dessas variáveis que maximizariam a função objetivo. No entanto, inúmeras aplicações disponíveis na literatura comprovam que, embora amplamente utilizadas nas indústrias, sua aplicação é bastante diversificada.

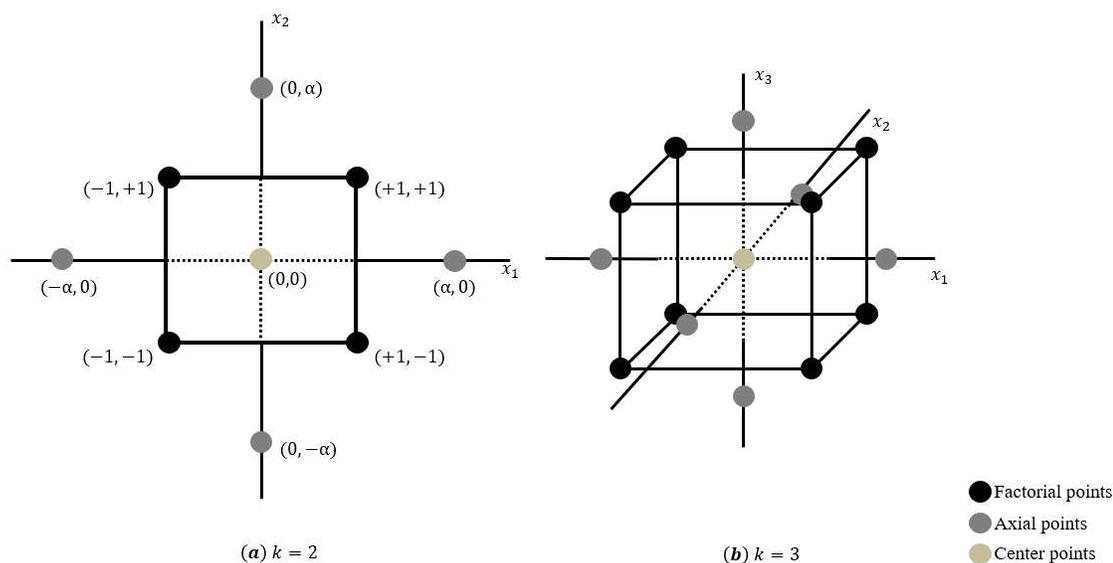
O RSM depende da elaboração de um desenho experimental para orientar, de forma mais assertiva, através de um número reduzido de experimentos, a obtenção de dados reais de saída do processo, de forma a possibilitar a definição de um modelo analítico que se aproxime da relação precisa entre as respostas de interesse e as variáveis de decisão, em alguma região de interesse (MYERS e MONTGOMERY, 2002).

De acordo com Almeida *et al.* (2018), o polinômio de segunda ordem, apresentado na Eq. (9), representa satisfatoriamente os problemas para a superfície de resposta. Na equação,  $Y$  representa a resposta de interesse do problema,  $\beta$  os coeficientes a serem estimados,  $k$  indica o número de variáveis independentes,  $x$  os parâmetros e, por fim,  $\varepsilon$  representa o erro associado às respostas. Os coeficientes são estimados usando o método de regressão amplamente usado chamado *Ordinary Least-Squares* - OLS (MYERS e MONTGOMERY, 2009; GAUDÊNCIO *et al.* 2019; BELINATO *et al.* 2019).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (9)$$

O projeto quadrático denominado *Central Composite Design* (CCD) para fatores  $k$  é amplamente utilizado para estimar superfícies de resposta de segunda ordem (COSTA *et al.*,

2016). O CCD consiste em um projeto fatorial  $2^k$ ,  $n_c$  execuções centrais e  $2^k$  execuções axiais como exemplificado na figura 3. Para Montgomery (2017) e Myers (2009), Naves, de Paula e Balestrassi (2017) e Duarte *et al.* (2016), os pontos axiais são úteis e necessários quando o projeto  $2^k$  não é eficiente no ajuste no modelo de primeira ordem, pois, por meio deles, é possível incorporar os termos quadráticos ao modelo. A adequação ou não dos modelos pode ser verificada por meio dos coeficientes  $R^2$  e  $R^2_{adj}$ , obtidos pela execução do teste ANOVA e também pela análise de normalidade dos resíduos.



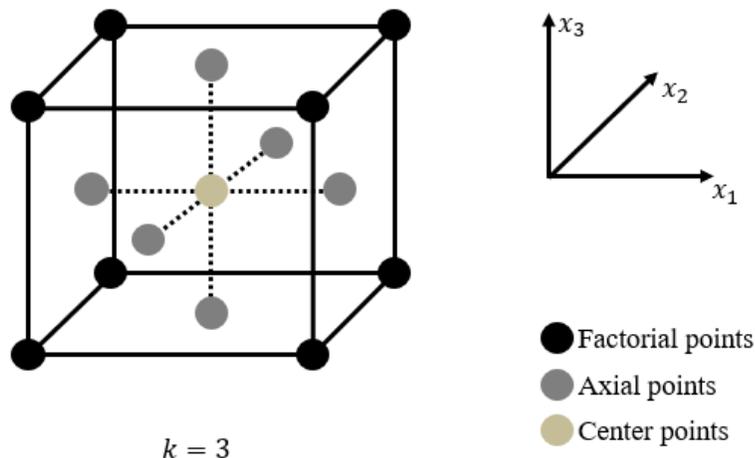
**Figura 3 - CCD para (a) 2 e (b) 3 fatores**  
**Fonte: Montgomery (2017)**

Se os modelos tiverem ajuste e resíduos adequados, isso se torna suficiente para a posterior aplicação de um algoritmo de otimização multiobjetivo para definir o ponto ótimo, ou o conjunto de pontos ótimos, que determinará as condições ótimas de operação do processo.

Basicamente, a região de operabilidade e interesse determina o valor para a distância axial  $\alpha$ , que pode variar de 1 a  $\sqrt{k}$ .

Considerando os contextos onde os intervalos nas variáveis de projeto são estritos, tornando a região de interesse igual à região de operabilidade, a região para o projeto pode ser um quadrado, um cubo ou um hipercubo, em vez da conhecida região esférica. Isso caracteriza uma variação do CCD, chamada de *Face-Centered Cube* (CCF), uma vez que os pontos axiais ficam nos centros das faces, conforme mostrado na figura 4, onde um CCF para  $k = 3$  é ilustrado. É fácil perceber que, nesta variação,  $\alpha = 1$ , ou seja, não há experimentos localizados fora do cubo, mas, sim, nos extremos da região. O CCF atende efetivamente casos de região de projeto cuboidal e não possui limitações quanto ao número de variáveis de projeto. Um ponto crucial

para determinar a adequação de um CCF é verificar se os pontos axiais fora das faixas são viáveis e, então, se devem ser considerados ou não para a região de interesse (MONTGOMERY, 2017 e MYERS, 2009).



**Figura 4 - CCF para 3 fatores**  
**Fonte: Montgomery (2017)**

### 2.3 REGRESSÃO DE POISSON

Para Myers e Montgomery (2002), quando a variável de resposta de interesse não é normalmente distribuída e representa uma contagem de algum evento relativamente raro, a regressão de Poisson é uma técnica que pode ser aplicada. Nesses casos, um modelo de probabilidade pode ser obtido conforme mostrado na Eq. (10), onde  $\mu_i$  e  $y_i$  representam a média e a  $i$ -ésima observação.

$$f(y_i) = \frac{e^{-\mu_i} \mu_i^{y_i}}{y_i!} \quad (10)$$

Segundo o mesmo autor, o modelo de Poisson é escrito em termos de resposta média. É necessário supor que existe uma função  $g$ , que estabelece a relação entre a média e um preditor linear como na Eq. (11). A função  $g$  é chamada de função link.

$$g(\mu_i) = \eta_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta} \quad (11)$$

Portanto, a Eq. (12) dará a relação entre a média e o preditor linear.

$$\mu_i = g^{-1}(\eta_i) = g^{-1}(\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\eta}) \quad (12)$$

Isso é muito útil em problemas de regressão de Poisson porque fornece apenas previsões não negativas para a variável de resposta. Além disso, o método de máxima verossimilhança é usado para estimar os parâmetros desconhecidos. Considerando uma amostra de  $n$  observações, onde  $y$  é a resposta de interesse e  $x$  representa os preditores, então a função de verossimilhança pode ser escrita conforme mostrado na Eq. (13) (MYERS E MONTGOMERY, 2010).

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}; \mathbf{y}) = \prod_{i=1}^n \frac{e^{-\mu_i} \mu_i^{y_i}}{y_i!} = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_i \exp\left(-\sum_{i=1}^n \mu_i\right)}{\prod_{i=1}^n y_i!} \quad (13)$$

Depois de selecionar a função de link, o log da verossimilhança mostrado na Eq. (14) é maximizado.

$$\ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}; \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n y_i \ln(\mu_i) - \sum_{i=1}^n \mu_i - \sum_{i=1}^n \ln(y_i!) \quad (14)$$

Uma vez que as estimativas dos parâmetros são encontradas, a equação de predição será como na Eq. (15) como função de log link escolhida.

$$\hat{y}_i = g^{-1}(\mathbf{x}_i^T \mathbf{b}) = \exp(\mathbf{x}_i^T \mathbf{b}) \quad (15)$$

#### 2.4 INTERVALOS DE CONFIANÇA SIMULTÂNEOS

Em problemas multivariados, construir intervalos de confiança simultâneos é mais sofisticado do que simplesmente analisar intervalos individuais, uma vez que o primeiro considera a estrutura de correlação das respostas analisadas.

Seja  $\mathbf{X}$  uma distribuição  $N_p(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$  e  $\mathbf{Z}$  a combinação linear  $\mathbf{a}^T \mathbf{X}$ , onde  $\mathbf{a}^T$  é um vetor constante, então,  $\mathbf{Z}$  tem uma distribuição  $N_p(\mathbf{a}^T \boldsymbol{\mu}, \mathbf{a}^T \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{a})$ . Em relação a uma amostra aleatória disponível de  $\mathbf{X}$ , é possível substituir  $\boldsymbol{\mu}$  e  $\boldsymbol{\Sigma}$  por  $\bar{\mathbf{x}}$  e  $\mathbf{S}$  respectivamente. Para um dado  $\mathbf{a}$ , o intervalo de confiança de 100 (1- $\alpha$ )% é baseado na Eq. (16) (JOHNSON e WICHERN, 2007).

$$t = \frac{\bar{z} - \mu_z}{s_z/n} = \frac{\sqrt{n}(a^T \bar{x} - a^T \mu)}{\sqrt{a^T S a}} \quad (16)$$

Isso leva à Eq. (17).

$$a^T \bar{x} - t_{n-1}(\alpha/2) \frac{\sqrt{a^T S a}}{\sqrt{n}} \leq a^T \mu \leq a^T \bar{x} + t_{n-1}(\alpha/2) \frac{\sqrt{a^T S a}}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

Considerando um determinado conjunto de dados e um vetor  $\mathbf{a}$ , o intervalo de confiança é o conjunto de valores para  $\mathbf{a}^T \mu$  que satisfaz a Eq. (18).

$$t^2 = \frac{n(a^T \bar{x} - a^T \mu)^2}{a^T S a} \leq t_{n-1}^2(\alpha/2) \quad (18)$$

Assim, de acordo com a desigualdade de Cauchy-Schwarz, maximizar  $t^2$  em termos do vetor  $\mathbf{a}$  leva à Eq. (19), onde  $T^2$  é a estatística de Hotelling e  $c^2$  é uma constante maior que  $t^2$ .

$$\max_{\mathbf{a}} \frac{n(a^T(\bar{x} - \mu))^2}{a^T S a} = n(\bar{x} - \mu)^T S^{-1}(\bar{x} - \mu) = T^2 \leq c^2 \quad (19)$$

Quando  $c^2 = p(n-1)F_{p,n-p}(\alpha)/(n-p)$ , é possível encontrar os intervalos que contêm  $\mathbf{a}^T \mu$  para todos  $\mathbf{a}$  com a probabilidade  $1 - \alpha = P[T^2 \leq c^2]$  conforme mostrado na Eq. (20).

$$a^T \bar{X} - \sqrt{\frac{p(n-1)}{n(n-p)} F_{p,n-p}(\alpha) a^T S a} \leq \mu \leq a^T \bar{X} + \sqrt{\frac{p(n-1)}{n(n-p)} F_{p,n-p}(\alpha) a^T S a} \quad (20)$$

A fim de encontrar o intervalo de confiança para cada média, basta assumir  $\mathbf{a}^T = [1, 0, \dots, 0]$ ,  $\mathbf{a}^T = [0, 1, \dots, 0]$  e assim por diante. Então, Eq. (21) pode substituir a Eq. (20).

$$\bar{x}_p - \sqrt{\frac{s_{pp}(n-1)p}{n(n-p)} F_{p,n-p}(\alpha)} \leq \mu \leq \bar{x}_p + \sqrt{\frac{s_{pp}(n-1)p}{n(n-p)} F_{p,n-p}(\alpha)} \quad (21)$$

Ao lidar com respostas correlacionadas, é importante considerar o problema como

multivariado. Isso significa que as variáveis variam concomitantemente, sendo recomendável analisá-las por meio de intervalos de confiança simultâneos. Uma explicação mais profunda sobre esse conceito pode ser encontrada em Luz *et al.* (2021) e Johnson e Wichern (2007).

Em Johnson e Wichern (2007), uma maneira sofisticada, chamada método de Bonferroni, é apresentada como uma abordagem alternativa para a obtenção desses intervalos conforme mostrado na Eq. (21).

Aplicando esse método, os intervalos são mais curtos e precisos. A Eq. (22) mostra como calculá-los (JOHNSON e WICHERN, 2007).

$$\bar{x}_p - t_{n-1} \left( \frac{\alpha}{2p} \right) \sqrt{\frac{s_{pp}}{n}} \leq \mu_p \leq \bar{x}_p + t_{n-1} \left( \frac{\alpha}{2p} \right) \sqrt{\frac{s_{pp}}{n}} \quad (22)$$

Os elipsoides de confiança para a média das variáveis são construídos de acordo com a Eq. (23) encontrado em Almeida *et. al* (2020), onde  $\mu_{y_i}$  indica a média das variáveis,  $p$  e  $n$  são o número de variáveis e o número de dados, respectivamente,  $F$  é a estatística associada ao nível de significância  $\alpha$ ;  $\lambda_i$  representa o autovalores,  $e_{ij}$  representa os elementos da matriz composta pelos autovetores e  $\theta$  é um ângulo que varia de 0 a  $2\pi$ .

$$\begin{bmatrix} \mu_{y_1} \\ \mu_{y_2} \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{p(n-1)}{n(n-p)} F_{(p,n-p)}(\alpha)} \times \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (23)$$

Da mesma forma, um elipsoide para os dados originais também pode ser construído aplicando a Eq. (24), o que resulta em um elipsoide maior do que o das médias.

$$\begin{bmatrix} \mu_{y_1} \\ \mu_{y_2} \end{bmatrix} + c \times \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (24)$$

Também é possível observar os intervalos de confiança de Bonferroni na figura 5, na qual está representado o elipsoide verde construído a partir da Eq. (23) e o azul usando a Eq. (24).

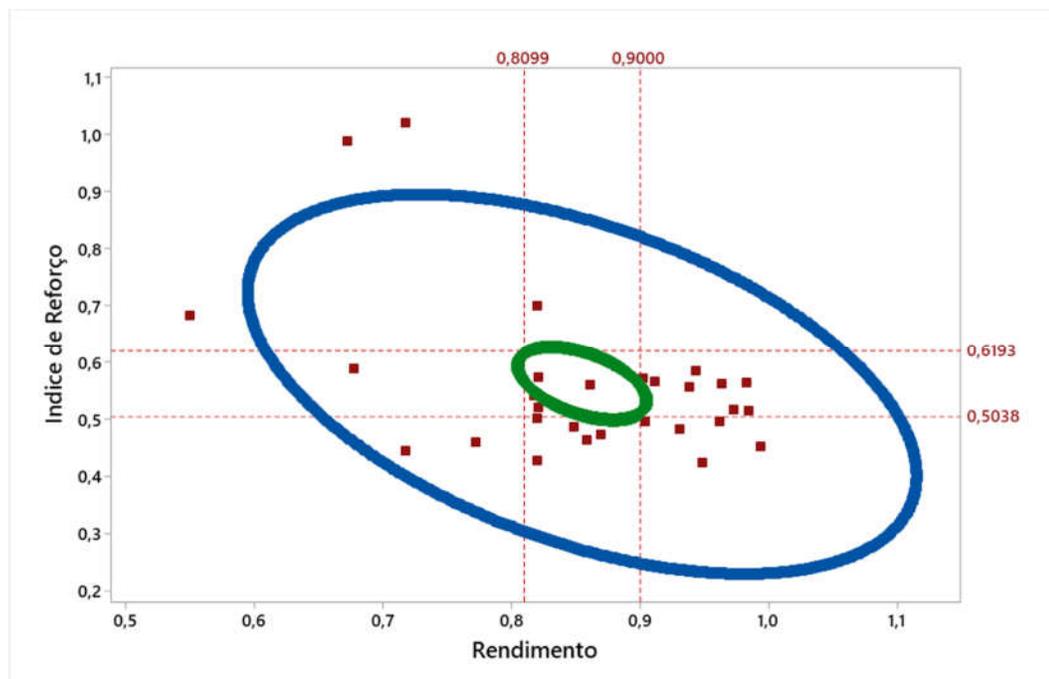


Figura 5 - Elipsoide das médias e dos dados originais, mostrando os intervalos de Bonferroni  
Fonte: Autor (2021)

## 2.5 ANÁLISE FATORIAL (AF)

Para Johnson e Wicherm (2007), o uso de técnicas de otimização multiobjetivo em conjunto com algumas ferramentas da estatística multivariada, como, por exemplo, a análise fatorial exploratória (*Factor Analysis - F.A.*) permitem uma visão diferenciada das variáveis de entrada e de saída, bem como suas correlações, permitindo assim identificar e separar o que é mais importante do que é menos importante e, como consequência, atuar na melhoria dos processos da fábrica, do começo ao fim de cada ciclo.

A AF, em seus resultados, apresenta alguns conceitos que devem ser entendidos, para que haja uma interpretação correta dos dados. Como, neste trabalho, utiliza-se o software Minitab, os resultados são apresentados com conceitos em língua inglesa.

Conforme Pereira (2001), tem-se os seguintes conceitos da AF:

- *eigenvalue*: corresponde aos autovalores e à variância total, que pode ser explicada pelo fator. Ou seja, avalia a contribuição do fator ao modelo construído pela AF. Se a explicação da variância pelo fator for alta, existe uma alta explicação desse fator ao modelo; se for baixa, existe uma baixa explicação do fator ao modelo.

- *factor loading*: é a proporção de variação da variável, que é explicada pelo fator ou, ainda, o quanto cada variável contribui na formação de cada componente.

- *factor score*: são os autovetores que definem as direções dos eixos da máxima

variabilidade. Representam a medida assumida pelos objetos estudados na função derivada da análise.

- *communality*: é a medida de quanto da variância, de uma variável, é explicada pelos fatores derivados pela AF. Avalia a contribuição da variável ao modelo construído pela AF, ou seja, o quanto cada variável participa na formação da outra. Na *communality*, os valores mais altos são os mais importantes para análise.

- *factor matrix*: é a matriz de correlação entre as variáveis originais e os fatores encontrados.

Para que se possa nomear os fatores, deve-se olhar a pontuação individual deles e ver quais variáveis possuem as mais altas pontuações. É necessário olhar também a pontuação do fator, para ver se as interpretações iniciais são confirmadas pela pontuação dele. Raramente, os resultados da AF são todos publicados, pois nem todos possuem uma contribuição significativa para a interpretação dos dados e à elaboração de conclusões para o assunto que está sendo abordado. Conforme Valentin (2000), as informações, que devem constar nas publicações, são:

- as dimensões da matriz de dados: número de variáveis e indivíduos;
- a natureza dos dados e as transformações eventuais;
- as figuras dos planos fatoriais;
- a necessidade de análises preliminares para testar a estabilidade e, se for preciso, eliminar certas variáveis ou observações.

Ainda de acordo com Johnson e Wichern (2007), a análise fatorial (F.A.) é uma técnica estatística multivariada que tem como objetivo principal agrupar variáveis originais de um conjunto por meio de suas correlações. Esses grupos de variáveis são conhecidos como “Fatores” e descrevem as relações de covariância entre muitas variáveis em uma quantidade bem pequena de variáveis “latentes” (subjacentes) e “não observáveis”. Logo, se variáveis apresentam algum tipo de correlação, é possível agrupá-las a partir dessas correlações. A ideia central de se criarem grupos é a de reduzir a dimensionalidade do número de variáveis, pois, quando os objetos se agrupam, pode-se trocar a representação desses objetos pela representação dos grupos.

Para reduzir a dimensionalidade do problema, é possível conduzir uma análise de componentes principais (PCA - *Principal Component Analysis*) substituindo a estrutura de dados original por um pequeno número de componentes principais (ZHANG & WANG, 2011).

Logo, a PCA é uma técnica de análise multivariada que minimiza a dimensionalidade dos dados, podendo representar, de maneira significativa, várias respostas correlacionadas em um

pequeno número de variáveis latentes não correlacionadas (COSTA et al. 2016).

Dessa forma já se identifica uma clusterização das variáveis objetos de estudo, e essa clusterização é a própria redução de dimensionalidade, pois, uma vez que se agrupam os objetos dentro de um determinado número de grupos que é menor que o número de observações de variáveis originais, já está se fazendo uma redução de dimensionalidade. Essa redução de dimensionalidade se dá por semelhança ou similaridade, ou seja, variáveis correlacionadas que apresentam comportamento comum. Logo, estes grupos que se formam são chamados de “fatores”, que são os “grupos de variáveis” ou “grupos de observações”, ou “fator”. Eles descrevem a relação de covariância entre muitas variáveis em uma quantidade bem pequena de variáveis latentes ou subjacentes. Esse “fator” representa a combinação linear de variáveis. (JOHNSON e WICHERM, 2007)

Tais agrupamentos se caracterizarão por apresentar mínimas variâncias dentro dos grupos formados enquanto que a variância entre grupos distintos será máxima. Esse conceito é conhecido como o princípio de Ward, que explica que grupos bem formados tem variância pequena, e o contrário possuem variâncias bem distintas. Dessa forma, observações ou variáveis dentro de um determinado grupo serão muito semelhantes, mas, entre grupos diferentes, muito distintas.

A F.A. pode ser considerada como uma extensão da PCA (*Principal Component Analysis*), visto que ambas as técnicas são empregadas para se obter uma aproximação da matriz de variância e covariância ( $\Sigma$ ). A diferença entre os métodos é que, na PCA, escreve-se o componente em função da variável, que pode ou não ser padronizada e, na F.A., escreve-se a variável em função de uma combinação linear dos fatores. Outra diferenciação entre as técnicas é que, na F.A., existe a possibilidade de rotacionar os eixos. A PCA não permite essa rotação. Esse procedimento permite rotacionar a elipse de confiança com a finalidade de se obter uma melhor explicação dos objetos de estudo. Trata-se de uma mudança de perspectiva para se obter algum outro tipo de informação. É como se o observador pudesse girar em torno do objeto e, em cada posição que esse observador se encontra, terá uma observação ou perspectiva visual diferente, ou não, o que pode permitir uma complementação de novas informações e melhor interpretação dos resultados (JOHNSON e WICHERM, 2007).

Ainda parafraseando Johnson e Wicherm (2007), um vetor aleatório  $X$ , com  $p$  componentes, possuem média  $\mu$  e matriz de variância e covariância ( $\Sigma$ ). Em um modelo “Fatorial”, o vetor  $X$  depende de um conjunto de variável aleatórias não-observáveis  $F_1, F_2, \dots, F_m$  chamados de “Fatores comuns”, acompanhados de  $p$  componentes de variação

adicionais chamados de erros ou “Fatores específicos”. Matematicamente, escreve-se conforme a Eq. (25):

$$\begin{aligned}
 X_1 - \mu_1 &= \ell_{11}F_1 + \ell_{12}F_2 + \cdots + \ell_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\
 X_2 - \mu_2 &= \ell_{21}F_1 + \ell_{22}F_2 + \cdots + \ell_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\
 &\vdots \\
 X_p - \mu_p &= \ell_{p1}F_1 + \ell_{p2}F_2 + \cdots + \ell_{pm}F_m + \varepsilon_p
 \end{aligned} \tag{25}$$

Em notação matricial, o Sistema de equações anterior pode ser escrito como mostrado na Eq. (26):

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{L}\mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{26}$$

Nas combinações lineares anteriores,  $\ell_{ij}$  é um coeficiente conhecido por “carregamento” (ou “loading”).

É importante mencionar que  $E(\mathbf{F}) = 0$ ,  $Cov(\mathbf{F}) = \mathbf{I}$  e  $E(\boldsymbol{\varepsilon}) = 0$ ,  $Cov(\boldsymbol{\varepsilon}) = \boldsymbol{\Psi}$ , onde  $\boldsymbol{\Psi}$  é uma matriz diagonal, logo a estrutura de covariância para  $\mathbf{X}$  pode ser escrita como na Eq. (27) (JOHNSON E WICHERN, 2007).

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\Sigma} &= Cov(\mathbf{X}) = E(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})' \\
 &= \mathbf{L}E(\mathbf{F}\mathbf{F}')\mathbf{L}' + E(\boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{F}')\mathbf{L}' + \mathbf{L}E(\mathbf{F}\boldsymbol{\varepsilon}') + E(\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}') \\
 &= \mathbf{L}\mathbf{L}' + \boldsymbol{\Psi}
 \end{aligned} \tag{27}$$

No equacionamento apresentado,  $\mathbf{L}$  é uma matriz cujos elementos são derivados de uma decomposição espectral, tal que:

$$\mathbf{L} = \left[ \sqrt{\lambda_1} \mathbf{e}_1 \mid \sqrt{\lambda_2} \mathbf{e}_2 \mid \cdots \mid \sqrt{\lambda_p} \mathbf{e}_p \right] \tag{28}$$

É fácil demonstrar que  $\mathbf{L}\mathbf{L}^T = \boldsymbol{\Sigma}$ , uma vez que:

$$\Sigma = \lambda_1 e_1 e_1^T + \lambda_2 e_2 e_2^T + \dots + \lambda_p e_p e_p^T \quad (29)$$

Em notação matricial, observa-se que:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} e_{11} & \sqrt{\lambda_2} e_{12} & \dots & \sqrt{\lambda_m} e_{1m} \\ \sqrt{\lambda_1} e_{21} & \sqrt{\lambda_2} e_{22} & \dots & \sqrt{\lambda_m} e_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt{\lambda_1} e_{p1} & \sqrt{\lambda_2} e_{p2} & \dots & \sqrt{\lambda_m} e_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_{11} & \ell_{12} & \dots & \ell_{1m} \\ \ell_{21} & \ell_{22} & \dots & \ell_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ell_{p1} & \ell_{p2} & \dots & \ell_{pm} \end{bmatrix} \quad (30)$$

e,

$$\mathbf{L}\mathbf{L}^T = \begin{bmatrix} \ell_{11} & \ell_{12} & \dots & \ell_{1m} \\ \ell_{21} & \ell_{22} & \dots & \ell_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ell_{p1} & \ell_{p2} & \dots & \ell_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ell_{11} & \ell_{21} & \dots & \ell_{p1} \\ \ell_{12} & \ell_{22} & \dots & \ell_{p2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ell_{1m} & \ell_{2m} & \dots & \ell_{pm} \end{bmatrix} = \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{21} & \dots & \sigma_{p1} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{p2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1m} & \sigma_{2m} & \dots & \sigma_{pm} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Em vista disso, é possível trabalhar com escores de fatores rotacionados não correlacionados em vez das variáveis correlacionadas originais em um problema de otimização. No entanto, em alguns casos, um fator explica diferentes variáveis com direção de otimização distinta. Esse conflito na direção da otimização pode ser superado usando a Eq. (32), que apresenta o erro quadrático médio do fator (FMSE) desenvolvido em Leite (2019), como uma extensão do erro quadrático médio multivariado (MEEM) proposto por Paiva et. al ((2009).

$$\text{FMSE}_i = [\hat{F}_i(\mathbf{x}) - T_i]^2 + \lambda_i \quad (32)$$

Vale a pena comentar que  $\hat{F}_i$  indica o valor ajustado para o  $i$ -ésimo fator,  $T_i$  representa o alvo e  $\lambda_i$  é a variância associada ao fator. O alvo do  $i$ -ésimo fator pode ser obtido através do produto  $\mathbf{Z}'\mathbf{L}_i$ , onde  $\mathbf{L}_i$  é o vetor de peso do fator e  $\mathbf{Z}$  é calculado subtraindo o alvo individual de cada variável original da média e dividindo esse resultado pelo desvio padrão da variável como mostrado na Eq. (33).

$$Z'_j = \left( \frac{\zeta_j - \mu_j}{\sigma_j} \right) \quad (33)$$

## 2.6 PROPRIEDADES DAS LIGAS DE ALUMÍNIO QUE EXERCEM INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG

Para Davis (1990), Praveen e Yarlagadda (2005), as principais propriedades das ligas de alumínio que exercem maior influência nos processos de soldagem são:

- a. Formação da camada de óxido: A formação da camada de alumina ( $Al_2O_3$ ) ocorre devido à elevada afinidade química que existe entre o alumínio e o oxigênio. Essa camada constitui uma proteção natural contra a corrosão, porém possui elevado ponto de fusão ( $2050^{\circ}C$ ) dificultando o processo de soldagem. Dessa forma, recomenda-se a minimização da espessura dessa camada por meios químicos ou mecânicos como escovamento e/ou usinagem. O aumento dessa camada pode ser associado com processos prévios de anodização, tratamentos térmicos ou com a condição de estocagem do material em ambientes úmidos.
- b. Solubilidade do hidrogênio: A solubilidade quase nula do hidrogênio no alumínio sólido é a causa principal de porosidade na soldagem das ligas de alumínio (DAVIS, 2002). Entretanto, em temperaturas elevadas, como ocorre nas poças de fusão, grandes quantidades de hidrogênio podem ser absorvidas. Devido à rápida solidificação da poça de fusão, a solubilidade do hidrogênio decai rapidamente. Dessa maneira, o hidrogênio que exceder o limite de solubilidade formará bolhas de gás caso não consiga sair da poça em solidificação. Esse é um dos principais problemas na soldagem do alumínio, pois reduz a resistência à fadiga e à tração da junta soldada (PRAVEEN e YARLAGADDA, 2005). As principais fontes de hidrogênio na soldagem são umidade nas superfícies a serem soldadas ou no metal de adição e metal base ou de adição de sujidades com óleo lubrificante. A formação de bolhas devido à solubilidade do hidrogênio é característico da soldagem a arco.
- c. Características térmicas: Embora a temperatura de fusão seja inferior à dos metais ferrosos, uma quantidade maior de calor é necessário para compensar as perdas que ocorrem devido à elevada condutividade térmica e calor específico das ligas de alumínio.

Conforme descrito por Okumura e Taniguchi (1982), algumas das características de composição das ligas de alumínio são:

- a. Alumínio puro para uso industrial – série 1000 – Apresenta uma pureza compreendida entre 99,0% e 99,9%. Esse material é dotado de boa resistência à corrosão, altas condutibilidades térmica e elétrica e excelente flexibilidade. Sua soldabilidade e usinabilidade

são bastante satisfatórias, apesar de sua baixa resistência mecânica.

b. Liga de Al-Cu – série 2000 – Esta é uma série típica de ligas tratadas termicamente. Suas propriedades mecânicas são comparáveis às do aço doce, graças ao tratamento de endurecimento por precipitação após a solubilização. Sua resistência à corrosão, entretanto, é inferior à das outras séries. Sua soldabilidade também deixa muito a desejar, razão pela qual esta liga é empregada quase que exclusivamente em estruturas rebitadas. As especificações 2017 (duralumínio) e 2024 (superduralumínio) são bastante conhecidas como materiais empregados em estruturas de aeronaves.

c. Liga de Al-Mn – série 3000 – As ligas Al-Mn não são termicamente tratadas e os diferentes níveis de resistência mecânica são conseguidos mediante encruamento a frio. As principais vantagens desta série é que a resistência à corrosão, a usinabilidade e a soldabilidade são tão boas quanto às do alumínio puro, aliadas ainda às suas altas propriedades mecânicas.

d. Liga Al-Si – série 4000 – Esta série também não é tratável termicamente. Devido ao silício, a temperatura de fusão desta liga é mais baixa, o metal possui uma excelente fluidez e dificilmente ocorrem problemas de trincas, razões que tornam esta liga bastante indicada como material de enchimento, na soldagem de fundidos e de ligas tratadas termicamente.

e. Liga Al-Mg – série 5000 – As ligas desta série são, às vezes, combinadas com manganês, e também não são tratadas termicamente. Têm uma resistência à ruptura superior à da liga Al-Mn, são facilmente soldáveis e resistentes à corrosão, principalmente em atmosfera marítima. O magnésio, elemento de liga que caracteriza a série 5xxx, é responsável pelo aumento da resistência mecânica sob trabalho a frio. A quantidade de Mg não pode exceder o limite de 5,5% em peso nas ligas trabalhadas. Valores acima desse limite podem formar precipitados de magnésio preferencialmente nos contornos de grão com uma fase anódica ( $Mg_5Al_3$  ou  $Mg_5Al_8$ ), que causa susceptibilidade à corrosão sob tensão e ao trincamento intergranular (BRAY, 1992; ANDERSON, 2005). Especificamente na liga Al 5052, o teor de magnésio deve ser entre 2,20% e 2,80% e o cromo deve ficar entre 0,15% e 0,35%. Outros elementos que complementam a composição dessa liga são manganês, cobre e zircônio, que não podem ultrapassar a quantidade de 0,10%. A quantidade de ferro e silício deve ser respectivamente no máximo até 0,40% e 0,25% (ASTM B209M, 2001).

f. Liga Al-Mg-Si – série 6000 – Esta série reúne ligas de alumínio tratáveis termicamente e apresentam características satisfatórias de usinabilidade, resistência à corrosão e soldabilidade. No entanto, este tipo de liga pode sofrer uma perda de dureza na zona de solda, devido ao insumo de calor. Um exemplo típico desta série é a liga 6063, largamente empregada em esquadrias de alumínio para construções civis.

g. Liga Al-Zn – série 7000 – Esta série também é termicamente tratada e as ligas podem conter magnésio como elemento químico suplementar, ou ainda pequenas porcentagens de cobre e cromo. Essas ligas têm um limite de ruptura da ordem de 50 kgf/ mm<sup>2</sup> , sendo também conhecidas como ultraduralumínio. Por outro lado, sua resistência à corrosão, bem como sua soldabilidade, deixam muito a desejar.

### 2.6.1 A LIGA DE ALUMÍNIO 6063 (AA6063)

Os tubos e perfis de alumínio têm como maior vantagem a sua leveza. Enquanto os tubos de aço carbono são pesados, exigem uma equipe técnica especializada, além de maquinário para serem instalados, os tubos de alumínio são leves e fáceis de instalar. Os de aço são ásperos, apresentam rápido desgaste, bem como a corrosão que contamina os líquidos e os gases transportados. Já os produzidos em alumínio não sofrem corrosão.

Conforme definido por Sakthivel et al. (2020), AA 6063 é uma liga de alumínio, com os elementos de liga magnésio e silício. A Associação de Alumínio mantém o padrão para controlar sua composição. Geralmente, possui boas propriedades mecânicas e pode ser tratado e soldado termicamente. É semelhante à liga de alumínio HE9 na Grã-Bretanha. É a liga mais comum usada para extrusão de alumínio. Permite a formação de formas complexas com superfícies muito lisas adequadas para anodização e, portanto, é popular para aplicações arquitetônicas visíveis, como caixilhos de janelas, caixilhos de portas, telhados e caixilhos de sinalização. As aplicações que exigem maior resistência geralmente usam 6061 ou 6082. A composição química do AA6063 é mostrada na Tabela 1 .

**Tabela 1 - Composição química de AA6063**

Fonte: Sakthivel *et al.* (2020)

<b>Elemento</b>	<b>%</b>
Al	98,05%
Si	0,20%
Fe	0,35%
Cu	0,10%
Mg	0,90%
Mn	0,10%
Cr	0,10%
Zn	0,10%
Ti	0,10%

Segundo o manual de soldagem da Alcan Alumínio do Brasil (1993), o método mais comum e também o preferido para a soldagem do alumínio é o processo de transferência por aerossol, independentemente da espessura do material ou da posição de soldagem. A alta

condutividade térmica do alumínio é tal que, mesmo com o alto aporte térmico desenvolvido na soldagem com transferência por aerossol, a taxa de solidificação da poça de fusão é alta o suficiente para permitir a soldagem fora de posição.

O argônio puro é normalmente empregado como gás de proteção na soldagem semi-automática porque a poça de fusão fica facilmente controlável e a solda resultante exibe uma boa geometria de cordão e também boa integridade. Entretanto, se for desejada uma poça de fusão mais quente, por exemplo, para chapas grossas ou para soldagem automática, podem ser empregadas misturas argônio-hélio (ZHANG, et al. 2014). Embora a transferência por curto-circuito possa ser aplicada na soldagem de chapas de alumínio extremamente finas, recomenda-se a transferência por aerossol sempre que for possível. Se não for tomado o devido cuidado na limpeza da superfície da solda, a alta velocidade de solidificação da poça de fusão produzida pela transferência por curto-circuito, muito provavelmente, causará porosidade.

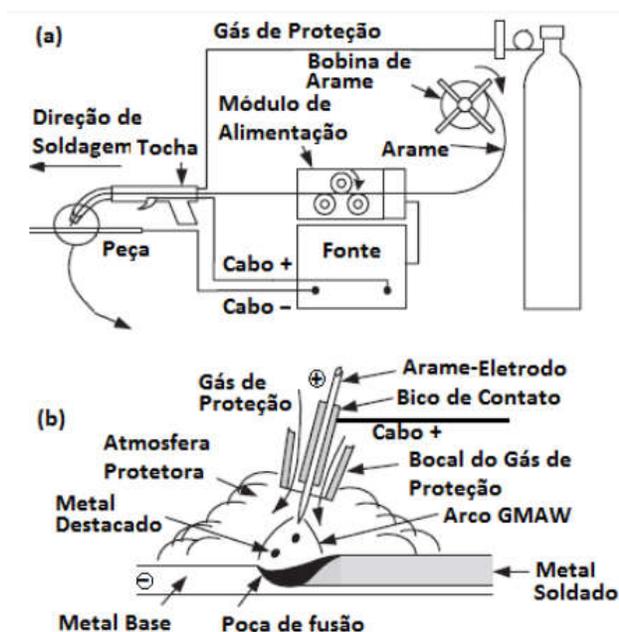
Segundo ESAB MIG Welding Handbook, EASAB MIG/MAG Welding e Svetsaren (2003), diferentemente da soldagem de aços, apenas a técnica de soldagem empurrando e a progressão ascendente podem ser empregadas na soldagem do alumínio. Isso é necessário para proporcionar a "limpeza" da peça à frente da poça de fusão. Nessa região, a película de óxido de alumínio no metal de base é quebrada pela ação do arco. Essa ação é necessária para se conseguir uma boa molhabilidade do metal de base e um depósito de solda íntegro. Se forem empregadas a técnica de soldagem puxando ou a progressão descendente, o cordão de solda poderá tornar-se poroso, descorado, e com uma molhabilidade pobre com o metal de base. Os cordões de solda devem ser depositados com a técnica filetando ou com ligeira oscilação. Grandes oscilações devem ser evitadas, pois o cordão de solda pode tornar-se excessivamente oxidado.

## 2.7 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SOLDA MIG

A soldagem com gás inerte de metal (MIG) é um processo de soldagem a arco que usa um eletrodo de arame sólido contínuo aquecido e alimentado na poça de fusão a partir de uma tocha de soldagem. Os dois materiais básicos são fundidos formando uma junção. A tocha alimenta um gás de proteção ao lado do eletrodo, ajudando a proteger a poça de fusão de contaminantes transportados pelo ar (ALBERTI, 2014).

A soldagem com gás inerte de metal (MIG) foi patenteada, pela primeira vez, nos EUA em 1949 para soldagem de alumínio. O arco e a poça de fusão, formados com um eletrodo de fio desencapado, eram protegidos por gás hélio, já disponível na época. Por volta de 1952, o processo tornou-se popular no Reino Unido para soldar alumínio usando argônio como gás de

proteção e para aços carbono usando  $\text{CO}_2$ . As misturas de  $\text{CO}_2$  e argônio- $\text{CO}_2$  são conhecidas como processos de gás ativo de metal (MAG). O MIG é uma alternativa atraente ao MAG, oferecendo altas taxas de deposição e alta produtividade (ZHANG, et al. 2014).



**Figura 6 - Processo GMAW (a) Equipamentos do Processo. (b) Detalhes da tocha GMAW e do funcionamento do processo.**  
 Fonte: Adaptado de Kou, 2003

Conforme descrito na AWS (1990), o processo de soldagem MIG/MAG baseia-se no estabelecimento de um arco elétrico entre arame-eletrodo e a peça metálica, onde o arame metálico é alimentado continuamente. O calor gerado pelo arco funde a ponta do eletrodo e a superfície do metal de base para formar a poça de fusão, a qual é protegida do ar atmosférico por intermédio de um gás de proteção. O processo pode ser semiautomático, mecanizado ou automático. Todos os metais comercialmente importantes, tais como, aços carbono, aços ligados, aços inoxidáveis, alumínio, cobre e suas ligas, níquel e suas ligas, podem ser soldados através deste processo.

O arame é alimentado de uma bobina por um motor e o soldador move a tocha de soldagem ao longo da linha de junta. Os fios podem ser sólidos (fios trefilados simples), ou tubular (compósitos formados de uma bainha de metal com um fluxo em pó ou enchimento de metal). Os consumíveis, geralmente, têm preços competitivos em comparação com os de outros processos. O processo oferece alta produtividade, pois o arame é alimentado continuamente (BENEDYK, 2010).

A soldagem manual MIG é frequentemente referida como um processo semiautomático,

já que a taxa de alimentação do arame e o comprimento do arco são controlados pela fonte de alimentação, mas a velocidade de deslocamento e a posição do arame estão sob controle manual. O processo também pode ser mecanizado quando todos os parâmetros do processo não são controlados diretamente por um soldador, mas ainda podem exigir ajuste manual durante a soldagem. Quando nenhuma intervenção manual é necessária durante a soldagem, o processo pode ser referido como automático (CALLISTER, 2002).

Para Scotti (2009), na soldagem MIG/MAG, existem quatro tipos de transferência metálica denominadas de curto-circuito, globular, goticular e pulsada. Esses modos são caracterizados pelo tamanho e pela frequência de destacamento das gotas fundidas. Os modos de transferência estão associados a diversos fatores, incluindo o nível de corrente, o diâmetro do arame, o comprimento do arco, o nível de tensão, as características da fonte de energia e o gás de proteção. Os três primeiros tipos, citados anteriormente, são classificados como modos de transferência naturais, enquanto o quarto modo é considerado como controlado, conforme figura 7 e descrições a seguir:

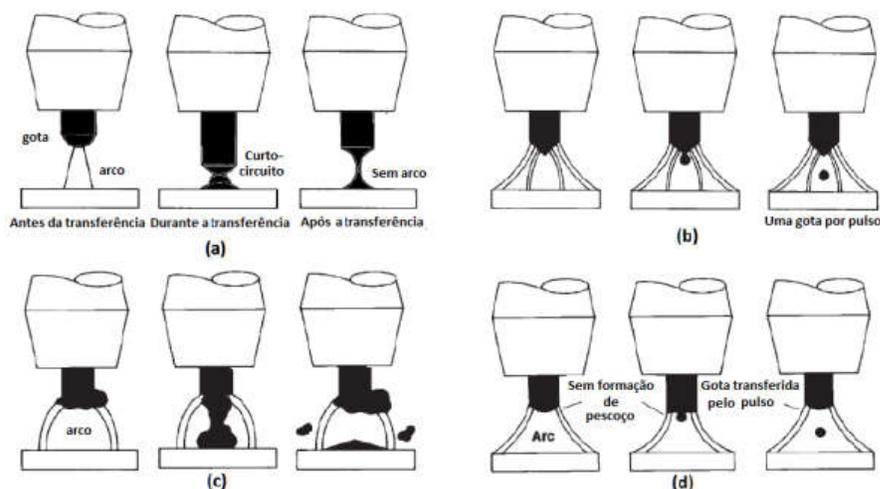


Figura 7 - Modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG. (a) Curto-circuito, (b) Pulsado, (c) Globular e (d) Goticular ("Spray").

Fonte: Adaptado de Scotti (2009)

- Transferência Globular - Caracteriza-se pela deposição de gotas de metal fundido com grandes diâmetros e com forma irregulares, as quais tendem a acumular na ponta do arame-eletrodo. É o modo de transferência mais indesejado na soldagem MIG/MAG. A gota é destacada principalmente pela força da gravidade, formando uma superfície irregular e respingos. Como consequência dos tamanhos das gotas, o processo é geralmente limitado à posição plana e horizontal.

- Transferência Curto-circuito – No curto-circuito, formam-se gotas fundidas na ponta do eletrodo e na poça de fusão, extinguindo o arco. As forças de tensão superficial da poça de fusão puxam o metal fundido do eletrodo e reacendem o arco. Esse processo é repetido cerca de 100 vezes por segundo, fazendo parecer que o arco é constante aos olhos humanos. Esse tipo de transferência produz soldas de melhor qualidade e com menos respingos em relação ao modo globular, permitindo soldagem em todas as posições.

- Transferência Goticular (“Spray”) – Esse modo foi o primeiro a ser utilizado na soldagem MIG/MAG. É caracterizado por gotas muito pequenas que são destacadas pela alta frequência, com resultado do uso de elevadas correntes (elevadas forças eletromagnéticas).

- Transferência por Arco Pulsado (P-GMAW) – Com esse modo de transferência, é possível obter uma sequência de pequenas gotas destacadas de uma forma regular. Isso é obtido pulsando a corrente de maneira calculada (frequência e duração). A vantagem desse modo é a regularidade da transferência com baixo aporte de energia.

Curto-circuito e transferência de metal pulsado são usados para operação de baixa corrente, enquanto a transferência de metal por spray é usada apenas com altas correntes de soldagem. Em curto-circuito ou transferência por 'mergulho', o metal fundido que se forma na ponta do fio é transferido pelo fio que mergulha na poça de fusão. Isso é obtido definindo uma baixa tensão; para um fio de 1,2 mm de diâmetro, a tensão do arco varia de cerca de 17 V (100 A) a 22 V (200 A). O cuidado no ajuste da tensão e da indutância em relação à velocidade de alimentação do arame é fundamental para minimizar respingos (ALBERTI, 2014).

A indutância é usada para controlar a oscilação de corrente que ocorre quando o fio mergulha na poça de fusão. Para transferência de gota ou spray, uma tensão muito mais alta é necessária para garantir que o fio não entre em contato, ou seja, curto-circuito, com a poça de fusão; para um fio de 1,2 mm de diâmetro, a tensão do arco varia de aproximadamente 27 V (250 A) a 35 V (400 A). O metal fundido na ponta do fio é transferido para a poça de fusão na forma de um spray de pequenas gotas (aproximadamente do diâmetro do fio e menores) (ZHANG, et al. 2014).

O modo pulsado foi desenvolvido como um meio de estabilizar o arco aberto em níveis de baixa corrente, ou seja, abaixo do nível de limite, para evitar curto-circuito e respingos. A transferência de metal é obtida aplicando pulsos de corrente, cada pulso tendo força suficiente para destacar uma gota (BENEDYK, 2010).

MIG pulsado sinérgico refere-se a um tipo especial de controlador que permite que a fonte de alimentação seja sintonizada (parâmetros de pulso) para a composição e diâmetro do fio, e a frequência do pulso seja definida de acordo com a velocidade de alimentação do fio.

Além da proteção geral do arco e da poça de fusão, o gás de proteção desempenha uma série de funções importantes (ZHANG, et al. 2014):

- Forma o arco de plasma;
- Estabiliza as raízes do arco na superfície do material;
- Garante a transferência suave de gotas derretidas do fio para a poça de fusão.

Para o mesmo autor, o gás de proteção tem um efeito substancial na estabilidade do arco e na transferência do metal e no comportamento da poça de fusão, em particular, sua penetração. Os gases de proteção de uso geral para soldagem MIG são misturas de argônio, oxigênio e CO<sub>2</sub>, e misturas de gases especiais podem conter hélio. Os gases normalmente usados para os diversos materiais são os aços (usa-se mistura de CO<sub>2</sub> argônio + 2 a 5% de oxigênio e para o argônio usa-se +5 a 25% de CO<sub>2</sub>) e os não ferrosos (por exemplo, ligas de alumínio, cobre ou níquel como o argônio e argônio / hélio) (ZHANG, et al. 2014).

Os gases à base de argônio, em comparação com o CO<sub>2</sub>, são geralmente mais tolerantes às configurações dos parâmetros e geram níveis mais baixos de respingos com o modo de transferência por mergulho. No entanto, existe um risco maior de falta de defeitos de fusão porque esses gases são mais frios. Como o CO<sub>2</sub> não pode ser usado nos modos de arco aberto (transferência pulsada ou spray) devido às altas forças do plasma posterior, gases à base de argônio contendo oxigênio ou CO<sub>2</sub> são normalmente empregados (ZHANG, et al. 2014).

MIG é amplamente utilizado na maioria dos setores da indústria e é responsável por mais de 50% de todo o metal de solda depositado. O MIG tem vantagem em termos de flexibilidade, taxas de deposição e adequação à mecanização. No entanto, deve-se notar que, embora MIG seja ideal para 'esguichar' metal, um alto grau de habilidade de manipulação é exigido do soldador MIG (LAKSHMINARAYANAN, et al. 2009).

### 2.7.1 IMPORTÂNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

O alumínio é um metal muito leve (peso específico de 2,7 g / cm<sup>3</sup>). Logo, o seu uso em automóveis e na indústria aeroespacial reduz o peso morto e o consumo de energia. A resistência do alumínio pode ser melhorada de acordo com as propriedades exigidas para várias aplicações, modificando a composição de suas ligas. O alumínio na liga AA6063 é um material altamente resistente à corrosão. Dessa forma, os parâmetros que afetam a qualidade e o resultado do processo de soldagem MIG podem incluir corrente, tensão, gases, velocidade e entrada de calor (SAMMONS, 2000).

Neste caso, a corrente mais alta na soldagem MIG pode causar respingos e danos à peça de trabalho. Mais uma vez, a configuração de corrente mais baixa na soldagem MIG leva

à aderência do arame de enchimento. Às vezes, uma área maior afetada pelo calor pode ser encontrada para menor corrente de soldagem, já que altas temperaturas precisam ser aplicadas por períodos mais longos de tempo para depositar a mesma quantidade de materiais de enchimento. O modo de corrente fixa irá variar a tensão a fim de manter uma corrente de arco constante (DUTRA, et al. 2010).

Já a tensão de soldagem pode ser fixa ou ajustável dependendo do equipamento de soldagem MIG. Uma alta tensão inicial permite fácil iniciação do arco e uma faixa maior de distância da ponta de trabalho. Tensão muito alta pode levar a grandes variáveis na qualidade da soldagem. A escolha do gás de proteção depende dos metais de trabalho e dos efeitos sobre o custo de soldagem, temperatura de solda, estabilidade do arco, velocidade de solda, respingos, vida útil do eletrodo etc (LAKSHMINARAYANAN, et al. 2009).

Além disso, a velocidade de soldagem é um parâmetro importante para a soldagem MIG. Se a velocidade de soldagem é aumentada, a potência ou aporte de calor por unidade de comprimento de solda diminui, portanto, menos resultados de reforço de solda e a penetração de soldagem diminui. Portanto, já na soldagem a arco, a energia é transferida do eletrodo de soldagem para o metal base por um arco elétrico (DUTRA, et al. 2010).

Nesse caso, quando o soldador inicia o arco, o metal base e o metal de enchimento são derretidos para criar a solda. Essa fusão é possível porque uma quantidade suficiente de energia (energia transferida por unidade de tempo) e densidade de energia é fornecida ao eletrodo. A entrada de calor é uma medida relativa da energia transferida por unidade de comprimento de solda (LAKSHMINARAYANAN, et al. 2009).

É uma característica importante porque, assim como a temperatura de pré-aquecimento e entre passes, influencia a taxa de resfriamento, o que pode afetar as propriedades mecânicas e a estrutura metalúrgica da solda e da zona termicamente afetada (ZTA). A entrada de calor é normalmente calculada como a razão da potência (ou seja, tensão x corrente) para a velocidade da fonte de calor (ou seja, o arco) (SAMMONS, 2000).

## 2.8 A QUALIFICAÇÃO DA MÃO DE OBRA DO SOLDADOR

A demanda por soldadores qualificados está crescendo. Para garantir que a indústria de soldagem esteja preparada para atender a essa demanda, os educadores e instrutores de soldagem de hoje devem ter certeza de que seus programas e métodos de treinamento estão equipando os jovens de hoje com as habilidades que os empregadores estão procurando. E, em uma força de trabalho que exigirá cada vez mais aqueles que são ágeis, adaptáveis e altamente qualificados, “aprimorar” os alunos acima para além dos fundamentos da soldagem apenas os

tornará mais empregáveis em indústrias (DUTRA, *et al.* 2010).

Com um número crescente de soldadores altamente treinados e qualificados e uma oferta excessiva de soldadores de nível básico, os empregadores de soldagem estão prestando mais atenção aos padrões de qualificação de soldagem. Isso significa que o treinamento além dos fundamentos da soldagem o tornará mais atraente e empregável em uma indústria competitiva e de alta demanda (FRAZIER, 2014).

Ao ser um soldador ágil, adaptável e altamente treinado, as chances de ser contratado são maiores, pois a maioria das empresas busca pessoas que tenham recebido treinamento formal. A razão para isso é que os empregadores consideram que os soldadores com treinamento formal estão mais bem preparados para assumir suas funções do que outros que já trabalharam ou esperam aprender no trabalho. Quando se trata de soldadores treinados e certificados, há menos casos de acidentes e lesões, em comparação com aqueles que não frequentaram uma escola de soldagem (POLMEAR, 1996).

De maneira geral, a soldagem é aplicada em uma ampla variedade de indústrias, como automotiva, manufatura, tecnologia, construção e muito mais. No entanto, nem todos os soldadores conseguem garantir um emprego em grandes empresas porque muitos empregadores procuram profissionais que possam comprovar que receberam educação adequada em uma escola de soldagem credenciada. Participar de um curso de treinamento expõe um soldador a mais oportunidades de carreira, incluindo tornar-se inspetor de soldagem, soldador subaquático ou até mesmo *freelancer*. Essa carreira permite que o soldador trabalhe em qualquer lugar, desde que tenha as qualificações adequadas (JHAVAR, *et al.* 2014).

Neste caso, os soldadores estudam os projetos e calculam as dimensões e, em seguida, usam essas informações para juntar as peças de metal. Eles costumam trabalhar na fabricação e na construção. Os soldadores ajudam a construir de tudo, de navios a carros, aviões e partes de edifícios e outras estruturas. Enquanto alguns soldadores obtêm diplomas universitários em suas áreas, muitos apenas são certificados. Tecnicamente, as certificações também não são exigidas, mas é recomendável adicionar uma certificação ao seu currículo. Alguns dos melhores soldadores trabalham como aprendizes antes de iniciar sua carreira (JHAVAR, *et al.* 2014).

Visto que as habilidades matemáticas ajudam os soldadores a realizar as tarefas com mais eficácia, elas podem ajudar os candidatos a empregos a se destacarem. É preciso ser capaz de calcular as dimensões a serem soldadas, ler projetos e interpretar esboços. A matemática também será útil quando o soldador cortar e aparar objetos de metal em dimensões específicas (SOUZA, 2011).

Além disso, a qualificação do soldador é importante pois, suas habilidades físicas podem

ajudar a torná-lo mais atraente para os empregadores. Especificamente, é preciso ser capaz de levantar, dobrar, torcer e inclinar-se para juntar ou desmontar objetos grandes. É preciso ter mãos firmes e pegada para segurar uma tocha no lugar por longos períodos de tempo (VARGA, *et al.* 2009).

Soldar é um trabalho físico, mas as tarefas administrativas também fazem parte da profissão. Os soldadores precisam ser capazes de documentar seu trabalho, ter boas habilidades organizacionais e manter o estoque, solicitando mais suprimentos quando necessário. Os soldadores também precisam ser capazes de planejar e gerenciar projetos. Isso pode envolver trabalhar sozinho ou efetivamente em equipe (SOUZA, 2011).

Dessa maneira, os soldadores qualificados devem ser capazes de prender peças de metal quebradas e derreter e aplicar solda ao longo das bordas adjacentes das peças de trabalho. Eles também devem ser capazes de monitorar a qualidade das soldas e componentes, reparar vazamentos e usar esmerilhadeiras ou outros acabadores de metal. Além disso, os soldadores devem ser capazes de configurar acessórios e máquinas-ferramentas e testar as bobinas quanto a vazamentos de ar (FRAZIER, 2014).

Contudo, enquanto o teste de aprovação do procedimento é realizado para demonstrar propriedades mecânicas aceitáveis, o teste de aprovação do soldador é realizado para demonstrar que o soldador tem um nível suficiente de habilidade para depositar metal de solda de qualidade aceitável. É adotada uma filosofia semelhante àquela para aprovação de procedimento - uma série de testes padrão são chamados, nas normas, a conclusão bem-sucedida dos quais fornece uma faixa de aprovação para uma série de variáveis essenciais (JHAVAR, *et al.* 2014).

Uma vez que o objetivo do teste é avaliar a habilidade do soldador, as variáveis essenciais são diferentes daquelas do teste de aprovação do procedimento. A especificação considera o processo de soldagem como uma variável essencial e restringe os processos abrangidos pela especificação a MIG, TIG e soldagem a arco de plasma, embora outros processos possam ser aprovados por concordância (ALCOA, 2010).

Por outro lado, o código da *American Society of Mechanical Engineers* (ASME, em português: Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos) cobre a aprovação do procedimento (qualificação) e a aprovação do soldador. Os soldadores são divididos em duas categorias, aqueles que realizam soldagem manual ou semiautomática (MIG) e aqueles que operam máquinas ou equipamentos de soldagem automática. O soldador deve ser fornecido com um procedimento de soldagem por escrito. Há uma série de variáveis essenciais para três dos processos relevantes para o alumínio (VARGA, *et al.* 2009).

Por esses fatos, a qualificação do soldador é importante, pois um teste de aprovação para uma solda de topo (ranhura) é por teste de dobra, embora possa ser substituído por radiografia - é permitido usar a primeira solda de produção feita pelo soldador para essa aprovação. A qualificação para uma solda de ângulo é por macro exame e teste de fratura. A aprovação é válida por um período de seis meses. Desde que o soldador solde com o processo relevante dentro desse período de seis meses, a aprovação pode ser prorrogada indefinidamente, a menos que haja qualquer razão para questionar a competência do soldador (POZA, *et al.* 2014).

## 2.9 ESPECIFICAÇÕES DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM (EPS) PARA O ALUMÍNIO NA LIGA 6063

Uma Especificação de Procedimento de Soldagem, ou EPS, é um documento formal, por escrito, que descreve os procedimentos de soldagem padrão. É como uma receita para soldadores, esses procedimentos fornecem uma orientação clara para que seus soldadores façam produtos de qualidade que atendam aos códigos e aos padrões da indústria. Eles incluirão todos os detalhes e as informações necessárias para fazer a solda desejada (VARGA, *et al.* 2009).

Esses são procedimentos comprovados e testados que incluem, mas não se limitam a, informações como os materiais necessários, as ferramentas necessárias, os processos a seguir, as técnicas a serem empregadas e, finalmente, a confirmação do resultado desejado (MARQUES, *et al.* 2011).

Além disso, a EPS pode ser usada para fornecer orientação ao soldador ou operador de soldagem para atender aos requisitos do código. Ela deve incluir todas as variáveis essenciais, não essenciais e complementares, ou seja, design da junta, material de base, metal de adição, posição, pré-aquecimento e tratamento térmico pós-soldagem, composição do gás, características elétricas etc (GHOSH, *et al.* 2002).

Uma EPS pode ir além de uma ótima solda. Embora ela garanta que o componente soldado atenda aos requisitos de projeto, a EPS também pode ajudar o empregador a tomar decisões de contratação. É possível empregar soldadores e operadores de soldagem cujas habilidades estão de acordo com este documento, bem ela pode ajudar a concluir uma inspeção rápida com tempos de teste rápidos. Como os funcionários seguirão padrões de segurança rígidos, é possível também reduzir o risco de responsabilidade da empresa (THOMAS, *et al.* 2003).

De maneira geral, inclusive para o alumínio, a EPS deve ser elaborada com base nas especificações do projeto e/ou do fabricante do equipamento ou da estrutura, dos consumíveis de soldagem, dos materiais de base e de acordo com a especificação do executante, observando

os requisitos estabelecidos pelas normas ou códigos aplicáveis. Alguns desses fatores podem ser tão ou mais importantes do que a resistência à tração (GHOSH, *et al.* 2002).

## 2.10 GERENCIAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

### 2.10.1 TIPO DE CORRENTE

De acordo com o Centro de Conhecimento ESAB, para soldagem TIG de aços carbono, normalmente, utiliza-se corrente contínua com polaridade negativa (CC-). Entretanto, para soldagem de ligas de alumínio por esse mesmo processo, recomenda-se a utilização de corrente alternada (CA). Isso se deve ao fato de a superfície da liga de alumínio formar uma camada de passivação, constituída de óxido de alumínio, que é um composto de alta estabilidade, baixa condutividade elétrica e alta temperatura de fusão. Isso implica o bloqueio do fluxo de elétrons quando é estabelecido do eletrodo para peça de trabalho (CC-); porém, quando a corrente alternada é usada, o fluxo de elétrons alterna-se entre CC- e CC+, momento no qual a camada de óxido é quebrada, permitindo, assim, o fluxo de corrente elétrica. Já para a soldagem MIG, recomenda-se o uso de CC+, pois, nesse caso, o próprio consumível é o eletrodo, motivo pelo qual o mecanismo de emissão eletrônica é alterado, não sendo necessário o uso de CA (ESAB MIG Welding Handbook, EASAB MIG/MAG Welding e SVETSAREN, 2003).

### 2.10.2 QUALIDADE SUPERFICIAL DO ARAME

Como comentado anteriormente, a qualidade superficial dos arames corresponde a um dos fatores mais importantes na soldagem das ligas de alumínio, pois pode afetar a consistência na alimentação do arame, bem como a sanidade do metal depositado (nível de porosidade, defeitos). Deve-se esperar de um bom arame para soldagem de Al, uma boa consistência em diâmetro e superfície limpa e adequada em rugosidade.

O arame também atua como metal de adição e anodo no arco de soldagem. Para fazer isso, o fio capta a corrente de soldagem por um contato de fricção entre o fio e o furo da ponta de contato. Os diâmetros do fio de enchimento variam de 0,8 mm a 3,2 mm, o que resulta em uma alta área de superfície para relação de volume (POLMEAR, 1996).

Essa área de superfície relativamente grande exige que o fio seja mantido extremamente limpo, uma vez que a contaminação da superfície dará origem a porosidade. Os fios devem ser armazenados em condições limpas e secas em suas embalagens fechadas, sempre que possível. Fios que estiveram armazenados por um período de tempo substancial, por exemplo, 6 meses ou mais, mesmo quando armazenados na embalagem original podem se deteriorar e dar origem

à porosidade. Se deixados na máquina de solda durante a noite ou nos fins de semana, devem ser protegidos contra contaminação, cobrindo a bobina com um saco plástico (JHAVAR, *et al.* 2014).

Em aplicações críticas, pode ser necessário remover a bobina da máquina e armazená-la em uma lata de aço entre os períodos de uso. A condensação pode se formar no fio se for trazido de um armazém frio para uma oficina de fabricação quente e, em condições de alta umidade, ela pode se formar novamente no fio. Algumas fontes de alimentação incorporam aquecedores no alimentador de arame para evitar que isso aconteça (ALCOA, 2010).

Se a condensação for problemática e esse recurso não estiver disponível, uma lâmpada de 40 watts instalada no gabinete do alimentador de arame fornece calor suficiente para manter o arame em estado seco. É possível obter dispositivos de limpeza de fio que se prendem ao fio no ponto em que ele entra no cabo de alimentação de fio (SAHEB, *et al.* 2012).

Esses dispositivos consistem em uma almofada de feltro que transporta um fluido de limpeza o qual remove contaminantes à medida que o fio passa para o cabo. Eles podem ser muito eficazes na remoção de vestígios de graxa e óleos, poeira etc. na superfície do fio. Melhor ainda é raspar o fio. Isso não apenas remove contaminantes e óxidos da superfície, mas endurece o arame, tornando-o mais fácil de alimentar e menos propenso a emaranhar (SANTIAGO, *et al.* 2014).

### 2.10.3 GÁS DE PROTEÇÃO

Existem dois gases normalmente empregados para a soldagem de Al: o argônio e o hélio. Esses gases são empregados como argônio puro, hélio puro ou misturas em diversos percentuais de ambos. Argônio puro é o gás de proteção mais popular, utilizado tanto para soldagem MIG quanto TIG, de ligas de alumínio. Misturas de argônio e hélio são a segunda mais empregada, e hélio puro é geralmente utilizada para aplicações especiais em TIG.

Quando se fala em gás de proteção, o argônio fornece o aporte de calor mais baixo e, portanto, as velocidades de soldagem mais lentas. Portanto, existe o risco de falta de defeitos de fusão e porosidade em seções espessas. O argônio também pode dar um depósito de fuligem preta na superfície da solda. Isso pode ser facilmente removido com uma escova de aço. Nessas soldas de seção mais espessa, pode-se observar uma boa penetração, característica da proteção de gás argônio (ZHANG, *et al.* 2014).

Argônio ou Hélio podem ser usados com sucesso para aplicações de soldagem MIG. Para a soldagem de materiais extremamente finos, é usado argônio puro. O argônio geralmente fornece um arco que opera de forma mais suave e silenciosa. O gás hélio aumenta a tensão do

arco em até 20% em comparação com o argônio, resultando em um arco muito mais quente, maior penetração e cordão de solda mais amplo. O cordão mais largo requer um posicionamento menos crítico do arco e ajuda a evitar a perda de arestas e defeitos do tipo de penetração. A poça de fusão de resfriamento mais quente e lento também permite que o hidrogênio se espalhe do metal de solda fundido, tornando este um método que pode ser usado para reduzir a quantidade de porosidade (SAMMONS, 2000).

O aumento do calor também permite que velocidades de soldagem mais rápidas sejam alcançadas, até três vezes a de uma junta semelhante feita com argônio como gás de proteção. O hélio, entretanto, é caro e fornece um arco menos estável do que o argônio. O hélio puro, portanto, encontra seu maior uso em aplicações de soldagem mecanizada ou automática (VARGA, *et al.* 2009).

Entretanto, apesar de ser possível aumentar a velocidade de soldagem em algumas circunstâncias utilizando hélio e/ou mistura hélio/argônio, vale ressaltar que os gases contendo hélio são mais caros e têm menor densidade que o argônio, motivo pelo qual se emprega maior vazão de gás.

Para soldagem manual e algumas aplicações mecanizadas, misturas de argônio e hélio dão bons resultados com características intermediárias entre os dois gases. Essas misturas são úteis em materiais mais espessos porque aumentam a entrada de calor e fornecem uma caixa de tolerância mais ampla de parâmetros de soldagem aceitáveis do que o argônio puro. Eles também irão melhorar a produtividade, permitindo o uso de velocidades de deslocamento mais rápidas (SOUZA, 2011).

O último ponto a ser feito em relação aos gases é a pureza e vale a pena enfatizar devido ao grande efeito que isso tem na qualidade da solda. Os gases de proteção devem ter pureza mínima de 99,998% e baixos níveis de umidade, idealmente com ponto de orvalho inferior a 50° C (inferior a 39 ppm H<sub>2</sub>O) (FRAZIER, 2014).

#### 2.10.4 OUTROS CONSUMÍVEIS UTILIZADOS NO PROCESSO DE SODAGEM MIG

Consumíveis de soldagem, como o nome indica, são peças que são consumidas - desgastadas ou gastas - durante o processo de soldagem. Os consumíveis incluem hastes e fios de soldagem, bem como peças da extremidade dianteira das pistolas de soldagem, como pontas de contato, bocais e difusores. À medida que os consumíveis se esgotam, o processo de soldagem deve ser interrompido e novos consumíveis precisam ser acoplados para continuar a soldagem. Portanto, é importante considerar quantos dos consumíveis são usados durante um

turno e com que frequência eles precisam ser trocados (THOMAS, *et al.* 2003).

O processo de calibração do manômetro de sistemas de soldagem envolve a conexão dos mesmos a uma estação de calibração para medição de tensão, amperagem e velocidade de alimentação do arame. Também é uma opção para determinar a vazão de gás da fonte de corrente de soldagem. O software de calibração analisa os valores registrados para seus sistemas de soldagem e os compara com as especificações padrão para identificar a discrepância entre os dois (CRUZ, *et al.* 2009).

Como regra geral, os sistemas de soldagem MIG a arco manual de metal e TIG podem ser calibrados. As empresas de processamento de metal certificadas por um padrão são obrigadas a calibrar seus equipamentos de soldagem regularmente. Os padrões cobertos aqui incluem a série ISO 9000, bem como EN ISO 3834-2, que estabelecem os princípios para o processo de garantia de qualidade para produtos soldados (MARQUES, *et al.* 2011).

Os bicos também são considerados consumíveis para o processo de solda MIG. Nesse caso, em sua maior parte, os bicos de soldagem da pistola MIG serão de latão ou cobre. Bicos de soldagem de latão têm melhores propriedades de resistência a respingos em aplicações de baixa amperagem do que bicos de cobre, mas perdem essa vantagem em aplicações de alta amperagem e podem quebrar quando falham. Bicos de soldagem de cobre têm melhor resistência geral a respingos e gerenciamento de calor em temperaturas mais altas (MARQUES, *et al.* 2011).

A principal função de seu bico de soldagem é direcionar o gás de proteção para a poça de solda da maneira mais eficaz possível. A melhor escolha de bico de soldagem dependerá muito de sua aplicação de soldagem, acesso à junta e processo. Alguns projetos de bicos de soldagem oferecem melhor cobertura de gás; outros oferecem melhor acesso. Alguns limitam a eficiência dos alargadores em aplicações robóticas (SAMMONS, 2000).

Além disso, um conduíte, como consumíveis para o processo de solda MIG, pode medir até 5m de comprimento e, para facilitar a alimentação, deve ser o mais curto e reto possível. Para comprimentos maiores de conduíte, um sistema push-pull intermediário pode ser inserido. O conduíte possui um revestimento interno feito de aço enrolado em espiral para fios rígidos (aço, aço inoxidável, titânio, níquel) ou politetrafluoretileno (PTFE, um tipo de plástico) para fios macios (alumínio, cobre) (VARGA, *et al.* 2009).

#### 2.10.5 DESCONTINUIDADES NO PROCESSO DE SOLDAGEM

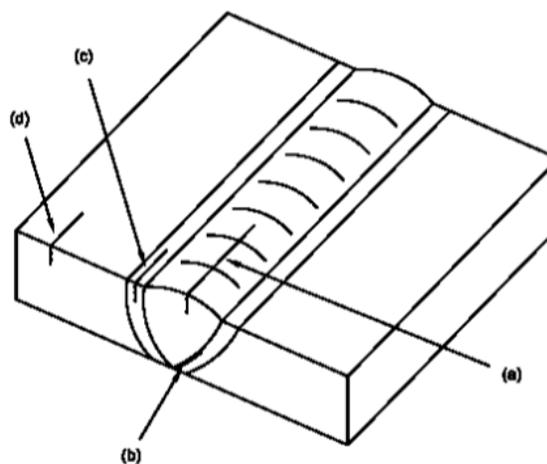
O termo descontinuidade em soldagem denota uma interrupção ou violação estrutural na estrutura típica ou esperada de uma junta soldada. De acordo com as exigências de qualidade

para a junta soldada (baseadas em normas ou em contrato), uma descontinuidade pode ser considerada como prejudicial para a utilização futura da junta, constituindo-se, dessa forma, um defeito e exigindo ações corretivas. Devido ao alto custo dessas ações, a presença de defeitos deve ser sempre evitada (VILLANI, 2017).

De acordo com a ABNT NBR16079-1, as principais descontinuidades estruturais encontradas nas juntas soldadas são: trincas, falta de penetração, falta de fusão, porosidade excessiva e mordeduras.

✓ **TRINCAS:** Trincas são fissuras que podem ocorrer tanto no metal de solda como na zona termicamente afetada durante a solidificação e resfriamento da solda (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993). As trincas aparecem quando há uma combinação de fragilidade metalúrgica e tensões aplicadas. Os tipos de trinca variam de acordo com as diferentes formas de tensão, como segue:

- a. Trinca longitudinal: são ocasionadas pela associação de dois fatores - tensões transversais através da junta e perda de resistência mecânica do metal da solda durante a sua solidificação. As tensões podem ser ocasionadas pelas restrições excessivas dos gabaritos de fixação ou da própria rigidez da estrutura. Já a fragilidade metalúrgica está associada ao uso da liga de adição errada, pela pouca participação do metal de enchimento na solda, pela relação muito pequena entre o metal de solda e a espessura do metal base ou pela baixa velocidade de soldagem (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993).

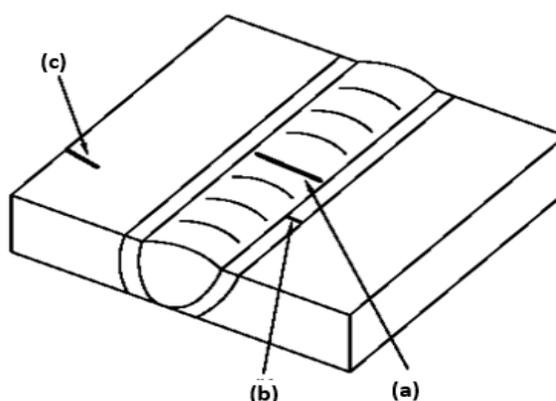


**Figura 8 - Trinca Longitudinal**  
Fonte: ABNT NBR 16079-1

Para evitar o aparecimento desse tipo de trinca, é necessário reduzir as tensões longitudinais ou aumentar a quantidade de preparação das bordas. Isso implica

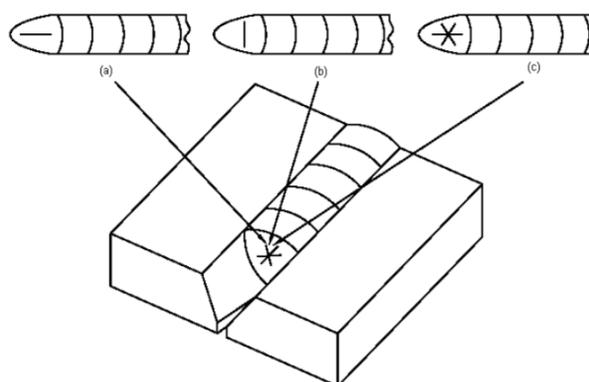
aumentar o ângulo de chanfro e, algumas vezes, fazer os dois. Aumentar a preparação das bordas significa maior utilização de metal de adição na solda, diminuição na diluição do metal base resultando num metal de solda com composição menos suscetível à fissuração a quente (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993).

- b. Trinca transversal: Apesar de as trincas transversais não serem comuns em soldas de alumínio, existe a possibilidade de ocorrer, sendo que as causas e as medidas para evitá-las são as mesmas das trincas longitudinais.



**Figura 9 - Trinca Transversal**  
Fonte: ABNT NBR 16079-1

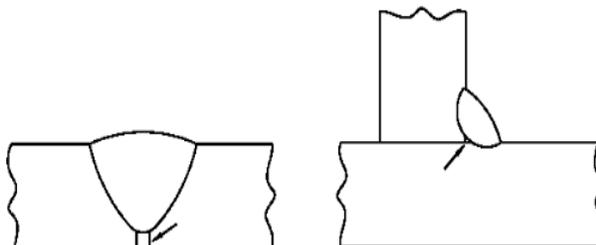
- c. Trinca de cratera: A trinca de cratera é originada pelos mesmos mecanismos que as outras trincas a quente. Podem ser: (a) longitudinal (b) transversal e (c) em estrela



**Figura 10 - Trinca de cratera**  
Fonte: ABNT NBR 16079-1

- ✓ FALTA DE PENETRAÇÃO: A falta de penetração é considerada um defeito crítico por ser um ponto de concentração de tensões que pode originar uma falha maior. A

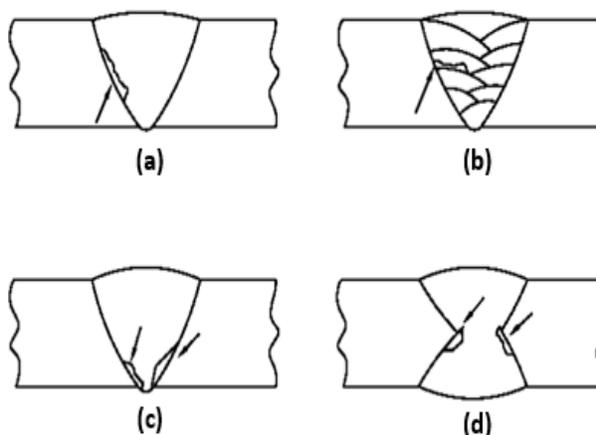
falta de penetração ocorre na raiz de uma junta de soldada. Ocorre onde a solda não penetra toda a espessura do metal base.



**Figura 11 - Falta de Penetração**  
Fonte: ABNT NBR 16079-1

E pode ocorrer, também, quando a soldagem é feita de um lado apenas, ou onde as soldas não se interpenetraram suficientemente quando é realizada uma soldagem dos dois lados da junta. Nas soldas em chanfro, essa descontinuidade ocorre pelo uso de baixas correntes de soldagem, abertura de junta insuficiente, preparação de borda inadequada, ou velocidade de deslocamento excessiva para a corrente empregada (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993).

- ✓ **FALTA DE FUSÃO:** A falta de fusão é observada quando um metal base ou um metal de solda anteriormente depositado não consegue se unir com o metal de solda. A figura 12 evidencia a falta de fusão: (a) na zona de ligação; (b) entre os passes e (c) e (d) na raiz da solda.

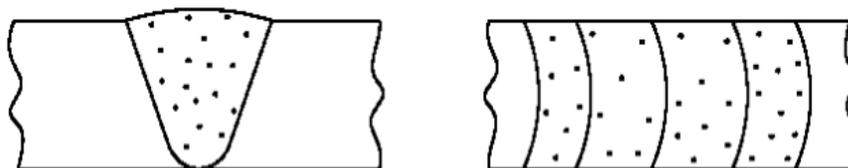


**Figura 12 - Falta de Fusão**  
Fonte: ABNT NBR 16079-1

As principais causas da aparência desse efeito são: comprimento de arco longo,

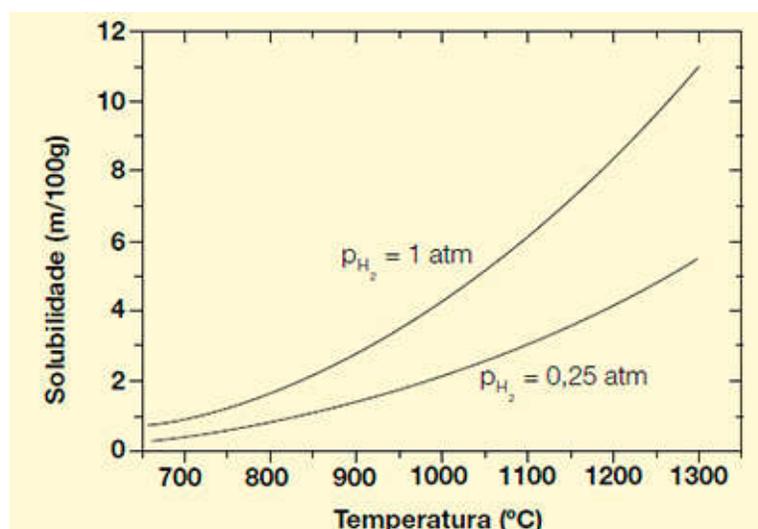
insuficiência na corrente de soldagem, preparação inadequada da borda e/ou metal com película de óxido espessa. Com o escovamento da junta antes da soldagem e entre passes em soldas multipasses, para a remoção do filme de óxido e da fuligem, a última causa pode ser evitada (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993).

- ✓ **POROSIDADE NO CORDÃO DE SOLDA:** Porosidade no metal de solda de ligas de alumínio é um dos defeitos de maior ocorrência na soldagem deste material.



**Figura 13 - Porosidade**  
Fonte: ABNT NBR 16079-1

Essa porosidade tem como origem o aprisionamento de hidrogênio (gases) durante o processo de solidificação. De acordo com Lundin (1984), o hidrogênio é altamente solúvel no alumínio fundido, como pode ser observado na figura 6 abaixo, motivo pelo qual, durante a soldagem das ligas de Al, é consideravelmente elevada a probabilidade da ocorrência de porosidade.

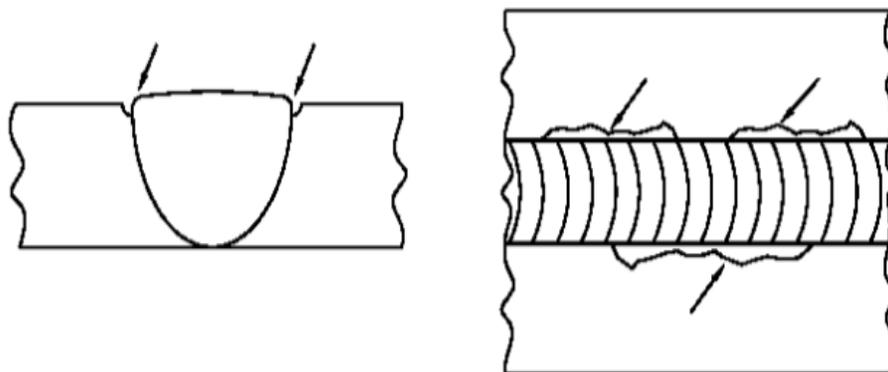


**Figura 14 - Solubilidade x Temperatura**  
Fonte: Lundin (1984)

Este gás (o hidrogênio) pode ser introduzido não intencionalmente durante a

soldagem, através da contaminação da área a ser soldada, como, por exemplo, por hidrocarbonetos ou umidade. Como boas práticas para minimizar a ocorrência de porosidades, recomenda-se:

- a) Remover graxas e óleos da área a ser soldada;
  - b) Remover a camada de óxido por escovamento ou lixamento;
  - c) Verificar possíveis vazamentos no circuito de água do equipamento de soldagem;
  - d) Utilizar gás de soldagem “limpo” e seco;
  - e) Ajustar o volume correto de gás de proteção para soldagem;
  - f) Usar hélio no gás de proteção para chapas espessas;
  - g) Armazenar os consumíveis de soldagem em locais secos e com umidade e temperatura controladas;
  - h) Usar o máximo diâmetro de arame possível;
  - i) Pré-aquecer o material de base ( $65^{\circ}\text{C}$ ), dependendo da sua espessura
  - j) Evitar soldagem em ambientes com elevada umidade (ponto de orvalho);
  - k) Transportar as partes a serem soldadas, inclusos consumíveis, 24 horas antes do início da soldagem (Condensação umidade);
  - l) Certificar-se quanto à utilização de arame com a superfície livre de resíduos (ex: lubrificante em excesso).
- ✓ MORDEDURA: A mordedura ocorre ao longo de cada lado ou dos dois lados do cordão de solda e é a formação de sulcos no metal base.



**Figura 15 - Mordedura**  
Fonte: ABNT NBR 16079-1

Uma área mais extensa que a da solda é fundida devido ao calor do arco, e o metal

extra, por capilaridade ou até mesmo gravidade, escorre para fora do cordão da solda, o que forma os sulcos chamados de mordeduras. A mordedura acentuada reduz a área de secção transversal da junta, atuando como um ponto concentrador de tensões. Entre as causas do aparecimento de mordeduras, estão: uso errado da técnica de soldagem devido à manipulação errada da tocha e corrente muito alta ou muito lenta em relação à espessura do metal (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993).

#### 2.10.6 A GESTÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

As constantes mudanças de mercado em conjunto com o aumento da competitividade e a busca pela melhoria da qualidade e produtividade fizeram com que as organizações se adaptassem a uma nova realidade, utilizando de diversas técnicas existentes com o objetivo de otimizar e melhorar o seu desempenho. Nesse contexto, a gestão por processos permite uma visualização da transformação organizacional por parte dos gestores, além de auxiliar na melhoria contínua, eliminando etapas desnecessárias e erros no processo e, conseqüentemente, reduzindo custos de produção (MORORÓ, 2008). De acordo com Davenport (1994), o termo processo pode ser definido como um conjunto de atividades estruturadas e medidas destinadas a resultar num produto especificado para um determinado cliente ou mercado.

Segundo Graham e Lebaron (1994), todo trabalho realizado dentro da organização faz parte de algum processo. Gonçalves (2000) afirma que sempre que houver um produto ou serviço oferecido haverá um processo empresarial e, da mesma forma, não haveria sentido existir um processo empresarial sem que seja oferecido um produto ou serviço. Dessa forma, é necessário que as organizações adotem meios para gerenciar as relações e as sequências entre esses processos.

Em processos de soldagem, não é diferente. Perda de tempo e perda de produtividade são inimigos em qualquer tipo de operação, principalmente na soldagem. Empreiteiros, empresários, fabricantes e autônomos estão sempre procurando maneiras de reduzir custos, melhorar a qualidade e concluir projetos mais rapidamente, para que possam ser mais competitivos no mercado atual. No entanto, as soluções certas podem exigir uma visão aberta e disposição para aprender novos processos ou procedimentos de soldagem. Fazer essas mudanças pode gerar benefícios e economia para ajudar a empresa a atingir metas estipuladas.

Segundo Villani (2017) e para Brito (2005), há muitos benefícios financeiros e de competitividade que podem ser obtidos pela conversão de técnicas e processos tradicionais de soldagem para soluções mais avançadas. Considera-se estes principais:

a. Maior Produtividade

Os benefícios financeiros de qualquer melhoria de produtividade variam com base na situação específica da empresa, mas, geralmente, são bastante significativos. O retorno sobre o investimento de novas máquinas não é a longo prazo por conta do aumento da produtividade, redução de consumíveis e outros fatores de curto prazo. Além disso, em empresas que passam por dificuldades para encontrar uma equipe de soldagem qualificada, as novas tecnologias permitem atender às demandas utilizando os colaboradores atuais, visto que a mesma equipe conseguirá produzir mais, com melhor qualidade e em menor tempo. As melhorias de produtividade também proporcionam uma redução significativa de custos com colaboradores, principalmente em regiões onde os custos de mão de obra são altos.

b. Redução de Sucatas e Perdas

Esta é uma questão fundamental em alguns mercados, porque muito dinheiro é perdido com sucatas. Se uma empresa estiver usando um processo de soldagem com Eletrodo Revestido, é relativamente fácil calcular a economia potencial relacionada ao melhor aproveitamento do consumível. A solda por eletrodo produz, comumente, a perda de ‘toco’ ou de ‘ponta’, que é a porção do eletrodo que não pode ser depositada na solda. Dependendo do comprimento original do eletrodo, tipicamente de 11 a 18 centímetros são perdidos. É fácil descobrir o “pedaço de sucata planejado” no processo de soldagem - geralmente de 16 a 25% dos eletrodos. Uma mudança de solda por eletrodo para um processo de arame não apenas elimina os custos dessa perda, mas também produz economia de mão-de-obra graças a um processo mais produtivo.

c. Redução de Falhas e Retrabalho

O desempenho consistente do arco e a seleção do metal de enchimento correto são fundamentais para obter taxas mais altas de deposição no primeiro passe e falhas na solda. Os processos e as tecnologias de soldagem que oferecem desempenho de arco mais consistentes podem ajudar a reduzir o tempo e o dinheiro gastos em falhas e retrabalho. A qualidade é,, obviamente, um fator importante no sucesso de uma operação de soldagem. Um alto nível de retrabalho não apenas afeta a qualidade, mas também pode levar a atrasos, pois o retrabalho não planejado interrompe todo o fluxo do processo de produção.

Tenha em mente que mudar os processos de soldagem em uma empresa pode ser difícil e, às vezes, requer um esforço organizado. As empresas que estão dispostas a aceitar algum nível de

risco podem ser recompensadas com trabalhos de maior qualidade, com conclusão mais rápida de seus projetos e reduções de custos.

#### d. A Linha de Produção

O equipamento de soldagem, em muitos casos, evoluiu para fornecer um nível de controle que não era possível no passado. Avanços tecnológicos trouxeram avanços nos processos de soldagem e, provavelmente, continuarão a fazê-lo no futuro. Compreender os potenciais ganhos de produtividade oferecidos pelos processos avançados de soldagem e novas tecnologias e procedimentos pode ajudar uma organização a garantir que os trabalhos sejam concluídos no prazo e dentro do orçamento. Investir em novas técnicas e equipamentos de soldagem pode ajudar as empresas a enfrentar os desafios críticos do setor - desde a falta de soldadores especializados até prazos mais curtos do projeto ou mudança de materiais. Estar aberto a mudanças na operação de soldagem pode resultar em custos reduzidos, maior produtividade e menor tempo de treinamento para soldadores - ajudando a tornar sua empresa mais competitiva.

### 2.11 ÍNDICES E TAXAS USADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM

Nos processos de soldagem, é importante medir as características do processo produtivo, em termos de desempenho. A American Welding Society (AWS) (2002) estabelece medidas gerais de produtividade. Algumas dessas medidas podem ser: Taxa de fusão, Taxa de deposição, Rendimento, Largura, Reforço, Penetração, Diluição, Índice de respingos, Índice de convexidade e Índice de penetração.

A taxa de fusão (TF) ou consumo é a quantidade de eletrodo fundido por unidade de tempo. Já a taxa de deposição (TD) é a quantidade em massa de eletrodo depositado por unidade de tempo. O rendimento ( $n$ ) é representado pela relação entre taxa de deposição e taxa de fusão. Já a diluição ( $D$ ) é a razão entre a área da penetração ( $A_{MB}$ ) em relação ao total da área fundida, que seria a soma da área metal base mais a área do metal de adição ( $A_{MA}$ ), conforme Figura 5 (MARQUES, 2011; WAINER, 1992; AWS, 1987).

As equações para os cálculos dos índices e das taxas podem ser melhor visualizadas no quadro 1.

**Quadro 1 – Equações de Indicadores de Soldagem**  
**Fonte: Adaptado de Marques (2011), Wainer (1992), AWS (1987)**

Variáveis de Resposta	Equações	Unidade
Taxa de Fusão (TF)	$TF = \frac{I_a \times d_a \times 3,6}{t_s}$	kg/h
Taxa de Deposição (TD)	$TD = \frac{(m_f - m_i) \times 3,6}{TF}$	kg/h
Rendimento ( $\eta$ )	$\eta = \frac{100 \times TD}{TF}$	%
Diluição (D)	$D = \frac{100 \times A_2}{(A_1 + A_2)}$	%
Índice de Respingo (IR)	$IR = \frac{TD - TF}{TF}$	%
Índice de Convexidade (IC)	$IC = \frac{R}{W}$	%
Índice de Penetração (IP)	$IP = \frac{P}{t}$	%

Onde:  $I_a$  é o comprimento do arame consumido;  $V_a$  é a velocidade de alimentação do arame [m/min],  $t_s$  é o tempo de soldagem [s];  $d_a$  é a densidade do arame;  $m_i$  é a massa inicial do material antes da soldagem [g];  $m_f$  é a massa final do material depois da soldagem [g];  $A_1$  é a área do material depositado;  $A_2$  é a área penetrada;  $W$  é a largura do cordão [mm];  $R$  é o reforço do cordão [altura máxima em mm];  $P$  é a penetração [mm] e  $t$  é a espessura do material soldado.

### 3. MÉTODO DE PESQUISA

Martins, Mello e Turrioni (2014) classificam a pesquisa científica em Engenharia da Produção conforme a figura 16. Esse estudo se enquadra nos critérios de Natureza, Objetivos, Abordagem e Temporalidade, conforme definições a seguir e destaques nas caixas vermelhas da própria figura citada.

Quanto à natureza, classifica-se como aplicada, pois segue o que é preconizado por Martins, Mello e Turrioni (2014), “suscitada por objetivos comerciais através do desenvolvimento de novos processos ou produtos orientados para as necessidades do mercado.

Em relação aos objetivos, tem caráter exploratório, pois também se apoia na colocação de Martins, Mello e Turrioni (2014) de “proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses. Envolve levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado e análise de exemplos que estimulem a compreensão”.

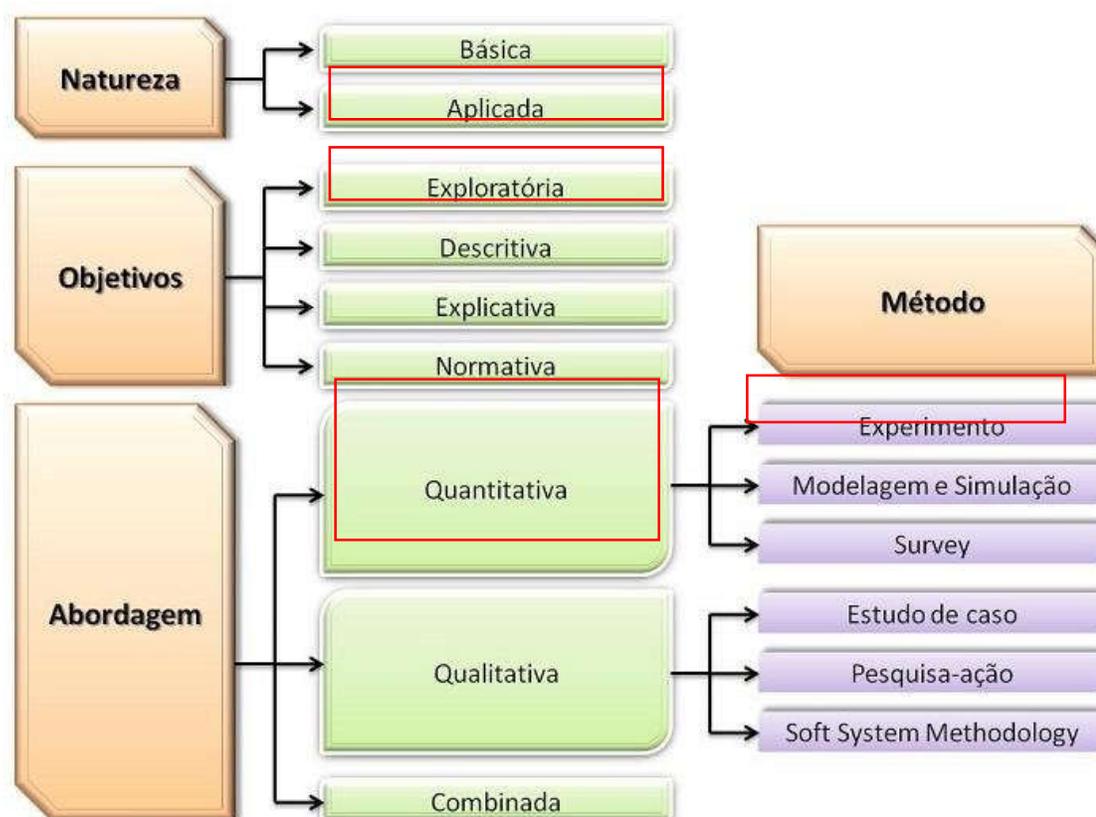


Figura 16 - Classificação da pesquisa científica em Engenharia de Produção

Fonte: Martins, Mello e Turrioni (2014)

Quanto à natureza, classifica-se como aplicada, pois segue o que é preconizado por

Martins, Mello e Turrioni (2014), “suscitada por objetivos comerciais através do desenvolvimento de novos processos ou produtos orientados para as necessidades do mercado.

Em relação aos objetivos, tem caráter exploratório, pois também se apoia na colocação de Martins, Mello e Turrioni (2014) de “proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses. Envolve levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado e análise de exemplos que estimulem a compreensão”.

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), este trabalho apresenta também característica de modelos de pesquisa quantitativa em gerenciamento de operações. O modelo baseado em pesquisa quantitativa é aquele em que existe a relação causal entre as variáveis de controle e o resultado das variáveis independentes são desenvolvidas, analisadas ou testadas. Ainda, modelos quantitativos são baseados em um conjunto de variáveis que varia em um domínio específico, enquanto relações quantitativas e causais são definidas entre estas variáveis.

Os mesmos autores fazem um apanhado sobre a história do modelo baseado em pesquisa quantitativa e observam que a administração científica é considerada a raiz do desenvolvimento da gestão de operações sob a ótica quantitativa. A essência da administração científica foi a análise de circunstâncias da vida prática, como tal, não produziu conhecimento científico genérico nos processos organizacionais reais. A análise dos problemas de gestão operacional idealizados tem gerado valioso conhecimento sobre as soluções. Gradualmente, a complexidade dos problemas formulados aumentou, fazendo uso do progresso em matemática, estatística e ciência da computação, guiando para o desenvolvimento da pesquisa operacional (P.O.) como um braço da matemática e ciência da computação aplicada.

De acordo com o método, esta pesquisa é caracterizada como experimento, pois, segundo Bryman (1989), a pesquisa experimental adquiriu uma considerável importância na pesquisa organizacional devido, principalmente, a dois fatos. O primeiro deles diz respeito à força desse método de investigação em permitir que o pesquisador faça fortes declarações de causalidade. Quanto a esse aspecto, Kidder (2004) acrescenta que os experimentos genuínos são instrumentos altamente especializados e, como qualquer instrumento, são excelentes para alguns trabalhos, mas pouco adequados para outros. Eles se adaptam perfeitamente à análise causal. Nenhum outro método de pesquisa científica permite ao pesquisador dizer com a confiança de um experimentador: “isto causou aquilo”. Ao ler trabalhos científicos baseados em outros métodos (principalmente os qualitativos), é normal encontrar muitas afirmações causais cautelosas, cheias de ressalvas e indiretas, tais como: “X parece ser um fator que determina Y”, ou “a pesquisa sugere que X seja um fator que determina Y”. As conclusões

soam indiretas e as palavras, cuidadosamente escolhidas, porque os autores não podem fazer afirmações causais definitivas. Contudo, Bryman (1989) considera que a capacidade de estabelecer causalidade é importante para muitos pesquisadores organizacionais, não simplesmente em virtude de sua associação com a abordagem científica, mas devido a tal procedimento ser visto como um caminho para o conhecimento prático e relevante.

O segundo fato da importância da pesquisa experimental, conforme Bryman (1989), diz respeito à facilidade que o pesquisador que emprega os projetos (ou delineamentos) experimentais encontra para estabelecer relações de causa e efeito, fazendo com que o experimento seja considerado um modelo de delineamento de pesquisa. Portanto, é importante reafirmar que a principal característica da pesquisa experimental é que o pesquisador tem o controle total sobre os valores que as variáveis independentes irão assumir, ou seja, é o pesquisador quem estabelece e controla os valores que serão experimentados. Trata-se de um método de pesquisa quantitativo, em que o objetivo do pesquisador é demonstrar, usando técnicas de análise estatísticas, as relações causais entre a variável independente (também chamada de variável de controle, fator ou causa) e a variável dependente (também chamada de variável resultante, resposta ou efeito).

Kidder (2004) considera que a principal força dos experimentos genuínos seja sua validade interna. Quanto mais controle o experimentador tiver, maior a validade interna do experimento. Para Bryman (1989), a ideia de controle é essencial ao experimento. Ela implica a eliminação de explicações alternativas da conexão aparente entre uma suposta causa e um particular efeito. Entretanto, a mesma característica que propicia validade interna pode prejudicar a validade externa. Quanto mais controle um experimentador tiver sobre os sujeitos e as muitas variáveis que poderiam influenciar os resultados, menos natural será o estudo. Quanto mais as condições deferirem de situações da vida real, mais difícil será generalizar os resultados para processos sociais que ocorrem naturalmente e, conseqüentemente, menor será a validade externa da pesquisa.

O experimento deste trabalho seguiu as seguintes etapas:

- a) Definir do processo;
- b) Definir quais fatores (parâmetros) influenciam as respostas analisadas;
- c) Estabelecer o design experimental;
- d) Realizar os experimentos fatoriais com pontos centrais e axiais;
- e) Mensurar as repostas definidas anteriormente.

Uma explicação de cada etapa é descrita a seguir:

a) Definir do processo a ser analisado: Processo MIG de soldagem em tubos de alumínio AA 6063.

b) Definir quais fatores (parâmetros) influenciam as respostas analisadas: Após a leitura dos artigos mencionados anteriormente, com parâmetros de referência para soldagem em alumínio, definiram-se quatro parâmetros que, possivelmente, impactam no desempenho da solda em alumínio, sendo estes: a velocidade da solda, a tensão, a velocidade do arame e a distância entre a tocha e a peça soldada. Os níveis de cada um desses fatores foram definidos a partir dos estudos de Valdenebro, Portolés e Oñoro (2016); Valdenebro, Conesa e Portolés (2015); Miguel et al. (2015); e Paiva et al (2010) e podem ser vistos na tabela.

**Tabela 2 - Níveis estabelecidos para os fatores**  
Fonte: Autor 2021

<b>Fator</b>	<b>Abreviação</b>	<b>Nível -1</b>	<b>Nível +1</b>
Velocidade do arame (m/min)	<i>Wf</i>	3.0	3.4
Voltagem (V)	<i>V</i>	20	23
Distância da ponta de contato da tocha até a peça (mm)	<i>Ct</i>	8	16
Frequência (velocidade da solda) (Hz)	<i>Fr</i>	1.8	2.2

c) Estabelecer o design experimental: Inicialmente, foram planejados os experimentos fatoriais (16 experimentos) e centrais (7 experimentos). Tendo em vista a necessidade de otimizar o processo de soldagem, escolheu-se o arranjo composto central de face centrada (CCF) que consiste em pontos fatoriais, centrais e axiais, uma vez que a escolha de outro tipo de arranjo poderia implicar o aumento ou a redução dos valores dos fatores, tornando alguns experimentos inexecutáveis. Seguiram-se as etapas da metodologia de superfície de resposta apresentada em Luz *et al.* (2021).

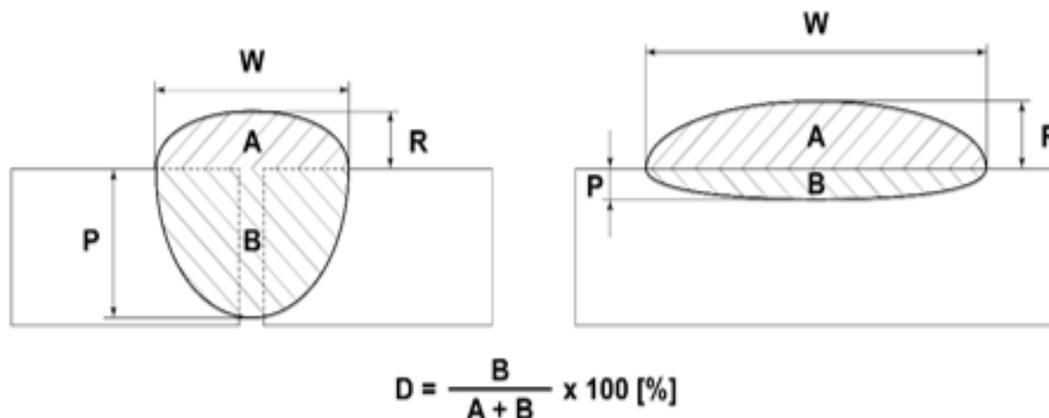
d) Realizar os experimentos fatoriais com pontos centrais e axiais: Inicialmente, os 23 experimentos (16 fatoriais e 7 centrais) foram realizados e os valores para as respostas foram apresentados em forma de tabela. A sequência de realização dos testes foi aleatorizada. Com os dados obtidos, foi possível obter as informações de taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento. Na sequência, foram realizados os experimentos dos pontos axiais, totalizando mais 8 experimentos. A sequência de realização dos testes também foi aleatorizada.

e) Mensurar as respostas definidas anteriormente: A coleta de imagens foi realizada no laboratório da UNIFEI e todo desenvolvimento está detalhado no capítulo 4.

Conforme mencionado anteriormente, para este estudo, foram consideradas quatro variáveis de entrada, a tensão, a velocidade de soldagem, a velocidade do arame e a distância do ponto de contato do eletrodo até a peça.

Foram mensuradas oito características: Rendimento, Diluição, Índice de reforço e Índice de penetração, Taxa de fusão, Taxa de deposição, Penetração, Reforço (altura) do cordão e comprimento do cordão, sendo que as 4 primeiras foram consideradas as variáveis de saída para o presente estudo.

A fim de ilustrar os conceitos anteriormente mencionados, a figura 17 representa a geometria de um cordão de solda, onde P representa a penetração, W é a largura, R é o reforço, A e B são as áreas do reforço e da penetração, respectivamente. Além disso, também é possível observar, na mesma figura, a fórmula para o cálculo da Diluição.



**Figura 17 - Geometria do cordão de solda**  
**Fonte: Adaptado de Miranda et al. (2015)**

Para o cálculo do rendimento real de deposição, foi necessária a pesagem de 1 metro de arame ER4043 (massa linear) utilizado para cálculo da massa total. Antes e após a realização de cada solda, os corpos de prova foram pesados, obtendo-se o valor da massa inicial, massa do corpo de prova antes da soldagem, e da massa final, massa do corpo de prova após a soldagem. Essa pesagem foi realizada depois de uma limpeza para retirada de respingos.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 BREVE CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA E DESCRIÇÃO DO PRODUTO

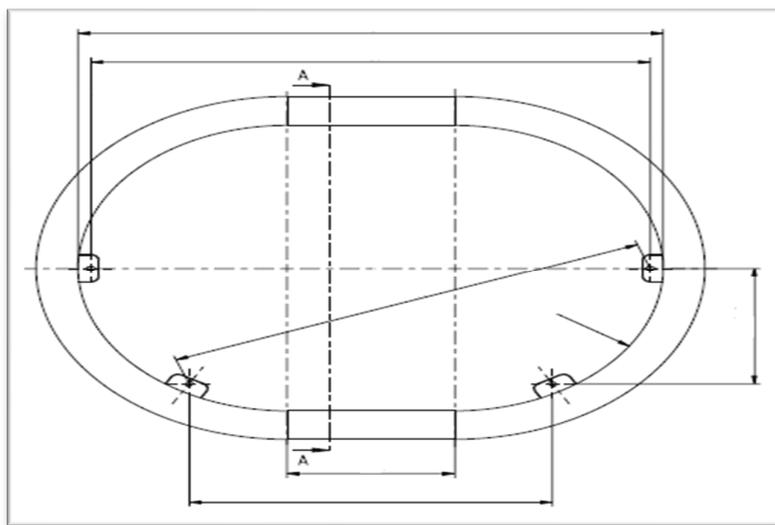
A Empresa Caldeiraria M&S caracteriza-se como uma empresa de pequeno porte, segundo a classificação do Sebrae (2018), com aproximadamente 35 funcionários. É especializada em produzir peças sob desenhos por processos de usinagem, caldeiraria e estamparia, em aço carbono, aço inox, alumínio e cobre.

Da mesma forma, possui uma área de ferramentaria onde são produzidos dispositivos de fabricação e montagem e ferramentas de produção para os próprios processos e também para clientes.

Desde 2012, a empresa está localizada na cidade de Itajubá, MG, a qual está estrategicamente próxima a grandes pólos econômicos do país, como Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte. Itajubá é um centro de tecnologia com muitas empresas nacionais e multinacionais, tais como a HELIBRÁS, GE, MAHLE, IMBEL. Também caracteriza-se por ser uma cidade universitária, sendo a principal delas a Universidade Federal de Itajubá.

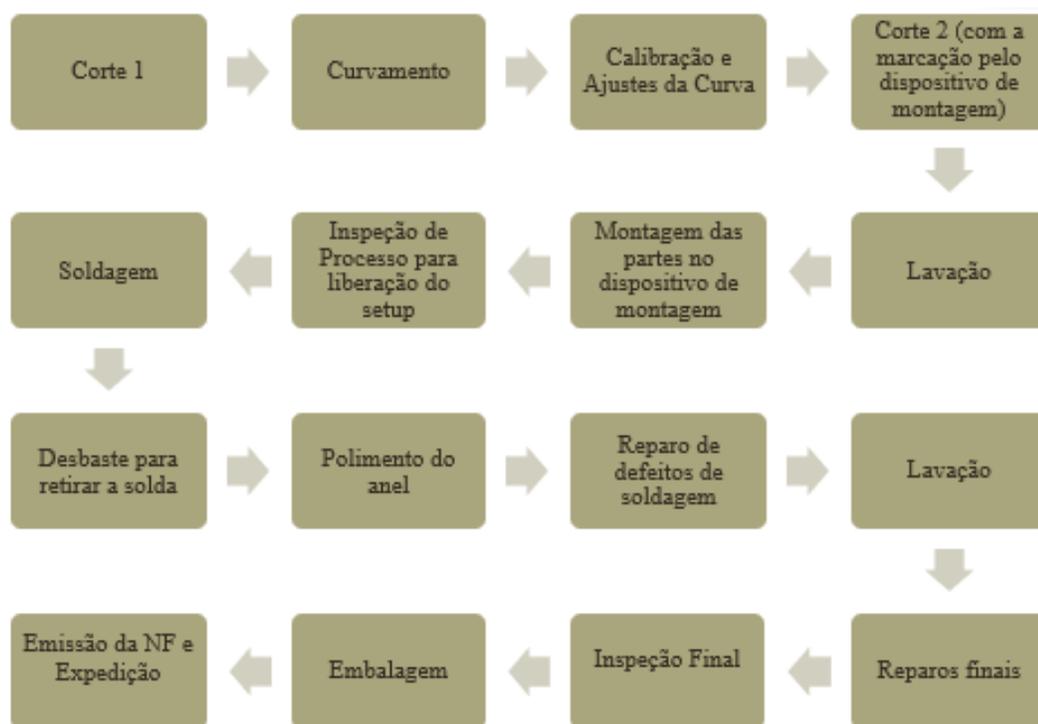
A fabricação de anéis de proteção anti-corona é um dos produtos com maior representatividade financeira no portfólio da empresa. Daí a importância que este estudo representa não só em termos acadêmicos, mas também em caráter prático, evidenciando, assim, a contribuição para melhores processos de fabricação e a possibilidade de alavancar melhores resultados para a indústria.

A figura 18 apresenta um croqui sem as dimensões do anel de corona objetos deste estudo.



**Figura 18 - Croqui do anel de corona objeto deste estudo**  
Fonte: Autor 2021

É importante esclarecer que, neste estudo, usamos o termo “processo produtivo de soldagem MIG em anéis de corona”, porém esse termo se refere apenas a uma etapa de todo o processo produtivo de fabricação do produto anel de corona, com se vê no fluxo abaixo.



O anel é fabricado em quatro partes, sendo duas partes curvadas e duas partes retas. Essas partes, depois de devidamente lavadas a quente com desengraxante e secas, são montadas em um dispositivo, passam pelo processo de ponteamto de solda, inspecionadas e liberadas (depois de aprovadas pela área da qualidade da empresa), para a realização efetiva do processo de soldagem. A soldagem é realizada por processo manual e, em muitos pontos do anel, é necessário soldar na posição sobre cabeça, o que torna o processo ainda mais complexo.

Depois de realizada a solda, todo o reforço do cordão é removido, faz-se uma inspeção visual do cordão para verificação de falhas ou defeitos de soldagem e, após esse *check*, a peça é liberada para polimento, lavação, inspeção final e embalagem para remessa ao cliente final. A figura 19 apresenta o anel de corona finalizado.



**Figura 19 - Anel de Corona pronto para embalagem e expedição**  
**Fonte: Autor 2021**

#### 4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A solda dos corpos de prova foi realizada no ambiente industrial, com máquina de solda Aristo Power 460 – marca ESAB – com alimentador de arame externo, conforme está apresentada na figura 20.

De acordo com o fabricante, esse equipamento é destinado à soldagem pelo processo MIG em curto circuito, spray, pulsado sinérgico e arames tubulares. Neste experimento, foi utilizado o modo curto circuito.

A Aristo Power 460 é uma fonte de energia trifásica multi processo com característica de corrente constante (CC) e tensão constante (CV). Possui sistema automático de acionamento do sistema de refrigeração que opera somente quando necessário. A programação dos parâmetros é feita pelo controle remoto Aristo Pendant U8. As principais características desse equipamento são:

- a. Fonte para soldagem multi processo indicada para indústrias médias e pesadas;
- b. Projetada para utilização com alimentador de arame externo;
- c. Alto ciclo de trabalho: 450A a 100%;
- d. Sistema de refrigeração sob demanda;
- e. Tomada auxiliar de 220Vac permite conexão de ferramentas elétricas.



**Figura 20 - Conjunto de solda Aristo Power 460 - ESAB**  
Fonte: [www.esab.com.br](http://www.esab.com.br) (2021)

Foram utilizados dispositivos de fixação para a tocha e para a peça. A soldagem dos corpos de prova foi feita de forma semiautomática. A tocha ficou presa por um dispositivo e coube ao soldador a tarefa de acionar o gatilho da tocha. A figura 21 ilustra o enunciado.

A condição foi a de um experimento controlado, ou seja, o mais homogêneo possível, utilizando a mesma máquina, mesmos insumos de solda, mesmo soldador, mesmos dispositivos de fixação. Apenas os parâmetros de soldagem (variáveis controladas) sofreram mudanças.

A máquina foi criada para soldar peças que apresentam o mesmo perfil do objeto deste estudo. Para isso, foi usinado um prato de alumínio e nele foi soldado um eixo com o diâmetro interno do tubo de 100mm, para que esse tubo pudesse se manter fixo durante o processo de soldagem. Além disso, um inversor de frequência foi ligado ao motor da máquina, com a finalidade de acionar o motor e controlar a velocidade de soldagem. O giro da peça a ser soldada se deu em função de polias e correias interligadas que faziam o prato girar. Como se vê na figura 21, o braço que sustenta a tocha e uma abraçadeira fixaram a tocha através de parafusos allen. Com essas medidas, foi possível manter os parâmetros de distância e a melhor regulagem possível para a realização dos experimentos.



**Figura 21 - Sistema semiautomático de solda dos corpos de prova**

**Fonte: Autor 2021**

Os corpos de prova foram soldados aleatoriamente de acordo com o CCF. Em seguida, foram cortados, tratados e submetidos à análise metalográfica de imagens nos laboratórios da Universidade Federal de Itajubá, sob supervisão de pessoal especializado.

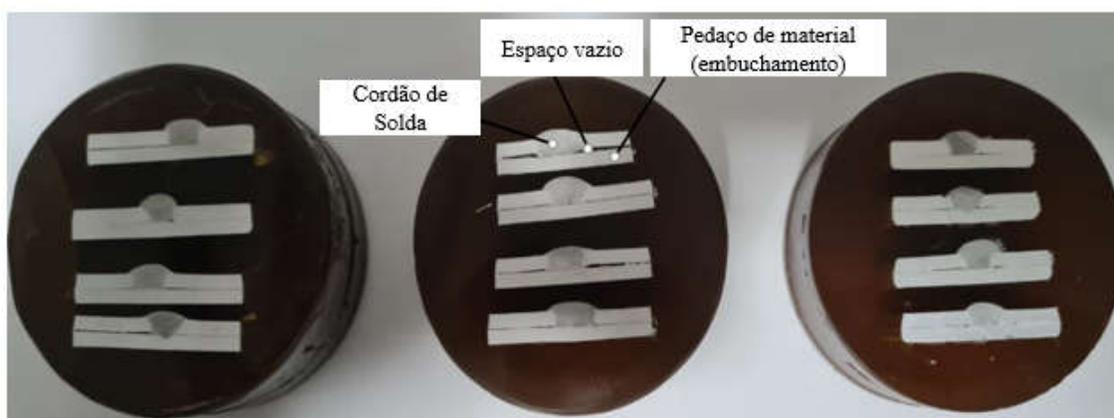
Em relação ao processo de soldagem, as partes superior e inferior do tubo foram colocadas sobre uma pequena peça cilíndrica constituída do mesmo metal base (alumínio) com o objetivo de segurar essas partes do tubo, tornando-as concêntricas, permitindo uma soldagem mais precisa como em um processo de embuchamento. É possível observar a parte interna do tubo nas figuras 21 e 22.

Cada corpo de prova, conforme ilustrado na figura 22, foi cortado em quatro quadrantes que foram, posteriormente, subdivididos em pequenas partes. Um deles, de cada quadrante, foi selecionado para passar pelo processo de montagem no embutimento de resina, resultando em um corpo de prova final montado, composto por quatro peças conforme mostrado na mesma figura.



**Figura 22 - Vista interna do corpo de prova - peça cilíndrica dentro do tubo**  
**Fonte: Autor 2021**

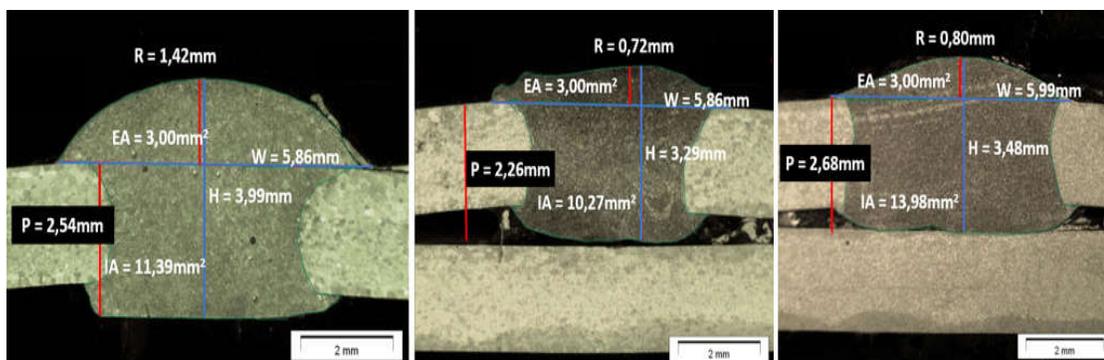
Ainda na figura 22, é possível observar a união do tubo através do cordão de solda (superior), a peça metálica cilíndrica usada para embuchamento (inferior) e um espaço vazio entre o tubo e esta peça. No entanto, vale ressaltar que esse espaço vazio não caracteriza defeito de soldagem, pois não interfere na construção do anel corona.



**Figura 23 - Corpos de prova runs 01, 07 e 20 do CCF**  
**Fonte: Autor 2021**

Os corpos de prova mostrados na figura 23 foram lixados e colocados em uma solução Keller composta por 190 ml H<sub>2</sub>O + 5 ml HNO<sub>3</sub> (65%) + 3 ml HCl (32%) + 2 ml HF (40%), possibilitando a visualização da área onde o metal foi depositado. Na figura 24, é possível

observar algumas imagens do cordão de solda e as medidas de penetração (P), armadura (R), área interna (IA), área externa (EA), largura (W) e altura (H = R + P).

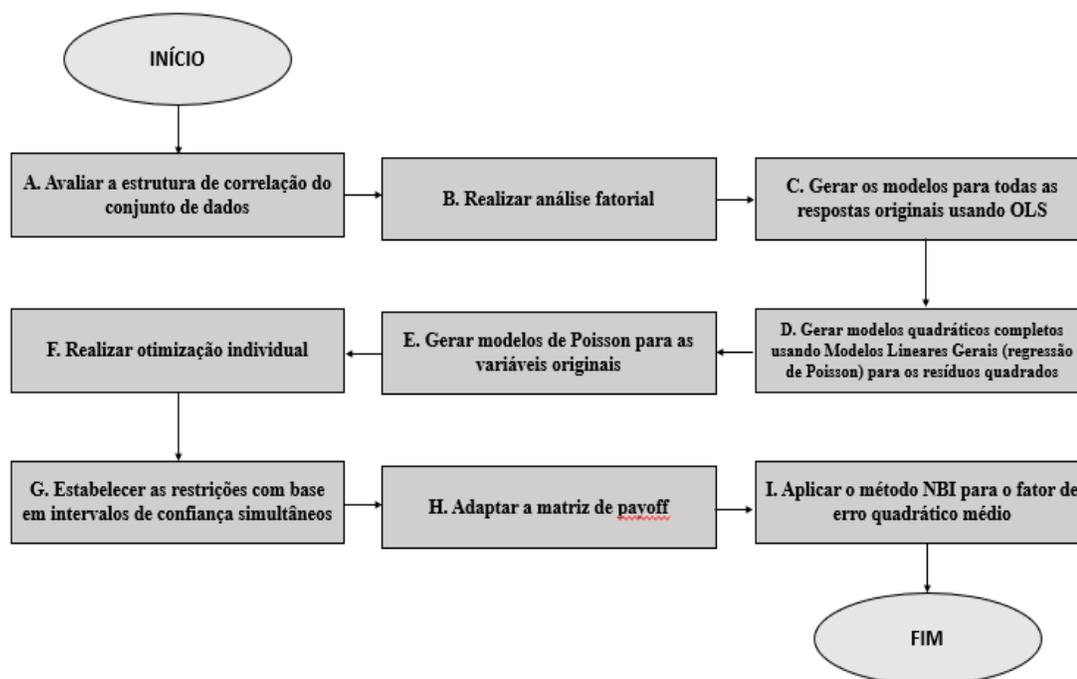


**Figura 24 - Imagens obtidas nos experimentos 3, 9 e 15 do CCF e suas medidas de geometria**  
**Fonte: Autor 2021**

A análise dos resultados seguiu, principalmente, uma metodologia recentemente publicada em Luz *et al.* (2021). Porém, uma melhoria foi feita na etapa G, estabelecendo as restrições com base nos intervalos de confiança simultâneos. A metodologia aplicada neste trabalho é apresentada a seguir em 9 etapas.

- A. Avaliar a estrutura de correlação do conjunto de dados;
- B. Realizar análise fatorial;
- C. Gerar os modelos para todas as respostas originais usando OLS;
- D. Gerar modelos quadráticos completos usando Modelos Lineares Gerais (regressão de Poisson) para os resíduos quadrados;
- E. Gerar modelos de Poisson para as variáveis originais;
- F. Realizar otimização individual;
- G. Estabelecer as restrições com base em intervalos de confiança simultâneos;
- H. Adaptar a matriz de Payoff;
- I. Aplicar o método NBI para o fator de erro quadrático médio.

Após as definições citadas anteriormente, passou-se para a etapa de modelagem e solução do problema. A figura 25 mostra a metodologia completa utilizada neste estudo e uma breve explicação sobre suas etapas pode ser encontrada nesta seção. É importante destacar que esta metodologia só é aplicável quando se trata de dados multivariados, ou seja, dados correlacionados.



**Figura 25 - Esquema sequencial do experimento**  
 Fonte: Adaptado de Luz et al. (2021)

Uma explicação de cada etapa da figura 25 pode ser verificada logo abaixo:

A. Avaliação da correlação: Inicialmente, a estrutura de correlação do conjunto de dados deve ser avaliada. Frequentemente, muitas variáveis correlacionadas são tratadas como não correlacionadas e isso pode levar a conclusões errôneas sobre o problema. Assim, é necessário calcular a correlação entre todos os pares de variáveis, bem como os  $p$ -valores associados. Normalmente, a correlação de Pearson é aplicada.

B. Análise Fatorial: Considerando as variáveis correlacionadas, uma técnica multivariada, como a análise fatorial, pode ser aplicada a fim de substituir as variáveis originais por variáveis não observáveis, ou seja, pontuações rotacionadas por fator. A correlação entre os fatores e as variáveis originais determina os valores de carregamento, que indicam o quanto um fator é capaz de explicar uma determinada variável. No entanto, a correlação entre cada par de fatores é sempre zero.

C. Modelos OLS: As respostas investigadas são modeladas usando algoritmos tradicionais como os mínimos quadrados ordinários (OLS) e os resíduos dos modelos devem ser armazenados.

D. Modelos de Poisson para os resíduos: Em seguida, os resíduos quadrados são modelados por meio de regressão de Poisson. Os valores ajustados para os residuais quadrados também são armazenados.

E. Modelos de Poisson para variáveis originais: O peso é calculado por  $W = 1/\hat{e}_i^2$ , onde  $e_i^2$  representa os resíduos armazenados na fase 4. Os modelos quadráticos completos para as variáveis originais são, agora, obtidos por meio de regressão de Poisson ponderada.

F. Otimização individual: Uma vez que esses modelos são estimados, é possível obter os valores ótimos individuais para as variáveis originais. É importante mencionar que  $DR$ ,  $PI$ , e  $R$  devem ser maximizados, enquanto  $Y$  é a única resposta a ser minimizada. Com os valores gerados pela otimização, a matriz de Payoff é construída.

G. Análise multivariada: Nesta fase, os intervalos simultâneos de Bonferroni são calculados. Os elipsoides de confiança para os dados médios também são calculados. É importante considerá-los porque os dados são correlacionados, o que significa que as variáveis variam juntas e, portanto, um valor para uma determinada variável pode nunca ocorrer simultaneamente com um valor para outra variável correlacionada, embora ambos os valores sejam viáveis.

H. Adaptação da Matriz Payoff: Após a análise multivariada, é necessário adaptar a matriz de Payoff considerando as restrições multivariadas da etapa anterior.

I. Otimização multiobjetivo: A função do erro quadrático médio do fator ( $FMSE_i$ ) é calculada para os fatores  $i$  encontrados na fase B. Finalmente, o método NBI pode ser aplicado a fim de calcular a fronteira de Pareto e avaliar os resultados.

A próxima seção apresenta os resultados obtidos em cada etapa desta metodologia, destacando as equações utilizadas nas fases descritas anteriormente.

### 4.3 APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE DOE, OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E ANÁLISE MULTIVARIADA

Inicialmente, todos os dados obtidos com a execução dos 31 experimentos são

apresentados na Tabela 3 , evidenciando as taxas de fusão e de deposição, em função do tempo de soldagem e das massas inicial e final dos corpos de prova e a Tabela 3, onde as seguintes abreviaturas Y, D, RI e PI representam rendimento, diluição, índice de reforço e índice de penetração respectivamente.

**Tabela 3 - Taxas de fusão e deposição em função do tempo de soldagem e da massa dos corpos de prova**  
**Fonte: Autor 2021**

<b>Run</b>	<b>Velocidade de arame (m/min)</b>	<b>Comprimento de arame consumido (m)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Tempo de soldagem (s)</b>	<b>Taxa de fusão (kg/h)</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa final (g)</b>	<b>Massa final (-) massa inicial (g)</b>	<b>Taxa de deposição (kg/h)</b>
1	3	3,150	1,8	63	0,558	413,2	422,8	9,6	0,548
2	3,4	3,570	1,8	63	0,6324	416,7	427	10,3	0,588
3	3	3,150	1,8	63	0,558	411,8	420,7	8,9	0,5085
4	3,4	3,570	1,8	63	0,6324	416,7	424,2	7,5	0,428
5	3	3,150	1,8	63	0,558	417	426,5	9,5	0,542
6	3,4	3,570	1,8	63	0,6324	417,5	427,5	10	0,571
7	3	3,150	1,8	63	0,558	415,8	425,5	9,7	0,554
8	3,4	3,570	1,8	63	0,6324	416,9	427,4	10,5	0,6
9	3	2,750	2,2	55	0,558	418	425	7	0,458
10	3,4	3,117	2,2	55	0,6324	417	424,9	7,9	0,517
11	3	2,750	2,2	55	0,558	415	423,2	8,2	0,536
12	3,4	3,117	2,2	55	0,6324	415,3	423,7	8,4	0,549
13	3	2,750	2,2	55	0,558	416,4	423,4	7	0,458
14	3,4	3,117	2,2	55	0,6324	416,8	425	8,2	0,536
15	3	2,750	2,2	55	0,558	416,6	424,6	8	0,523
16	3,4	3,117	2,2	55	0,6324	418,1	426,4	8,3	0,543
17	3	2,950	2	59	0,558	312	321	9	0,549
18	3,4	3,343	2	59	0,6324	313	321	8	0,488
19	3,2	3,147	2	59	0,5952	311	318	7	0,427
20	3,2	3,147	2	59	0,5952	313	321	8	0,488
21	3,2	3,147	2	59	0,5952	311	318	7	0,427
22	3,2	3,147	2	59	0,5952	311	319	8	0,488
23	3,2	3,360	1,8	63	0,5952	312	319	7	0,4
24	3,2	2,933	2,2	55	0,5952	315	320	5	0,327
25	3,2	3,147	2	59	0,5952	417,1	425,7	8,6	0,524
26	3,2	3,147	2	59	0,5952	418,1	426,5	8,4	0,512
27	3,2	3,147	2	59	0,5952	417,5	426,7	9,2	0,561
28	3,2	3,147	2	59	0,5952	416,3	425,7	9,4	0,573
29	3,2	3,147	2	59	0,5952	417,2	426	8,8	0,536
30	3,2	3,147	2	59	0,5952	310	318	8	0,488
31	3,2	3,147	2	59	0,5952	310	318	8	0,488

A seguir, na tabela 4, são apresentados os valores para as respostas investigadas dos experimentos realizados:

**Tabela 4 - Experimentos projetados e os valores para as respostas investigadas**  
**Fonte: Autor 2021**

<i>Run</i>	<i>Wf</i> (m/min)	<i>V</i> (V)	<i>Ct</i> (mm)	<i>Fr</i> (Hz)	<i>Y</i> (%)	<i>D</i> (%)	<i>RI</i> (-)	<i>PI</i> (-)
1	3.00	20.00	8.00	1.80	98.31	60.1778	0.5632	1.1363
2	3.40	20.00	8.00	1.80	93.07	61.7276	0.4823	1.2363
3	3.00	23.00	8.00	1.80	91.14	60.7197	0.5648	1.2588
4	3.40	23.00	8.00	1.80	67.77	62.0990	0.5870	1.5913
5	3.00	20.00	16.00	1.80	97.29	57.5209	0.5163	1.2913
6	3.40	20.00	16.00	1.80	90.36	65.1469	0.4958	1.5525
7	3.00	23.00	16.00	1.80	99.33	70.3952	0.4520	1.1963
8	3.40	23.00	16.00	1.80	94.88	64.9567	0.4224	1.0775
9	3.00	20.00	8.00	2.20	82.11	75.3409	0.5201	1.1975
10	3.40	20.00	8.00	2.20	81.77	66.8018	0.5407	1.2563
11	3.00	23.00	8.00	2.20	96.19	70.0545	0.4952	1.0863
12	3.40	23.00	8.00	2.20	86.94	59.2924	0.4715	1.0500
13	3.00	20.00	16.00	2.20	82.11	69.8114	0.5720	1.1825
14	3.40	20.00	16.00	2.20	84.87	67.2177	0.4845	1.1413
15	3.00	23.00	16.00	2.20	93.84	71.7013	0.5562	1.2238
16	3.40	23.00	16.00	2.20	85.91	64.6680	0.4622	0.9988
17	3.00	21.50	12.00	2.00	98.41	61.3725	0.5130	1.2452
18	3.40	21.50	12.00	2.00	77.19	71.2751	0.4594	1.2676
19	3.20	20.00	12.00	2.00	71.76	71.4314	1.0211	1.4963
20	3.20	23.00	12.00	2.00	82.01	69.5993	0.6993	1.3200
21	3.20	21.50	8.00	2.00	71.76	61.9859	0.4433	1.1963
22	3.20	21.50	16.00	2.00	82.01	73.6002	0.6248	1.3425
23	3.20	21.50	12.00	1.80	67.20	58.9240	0.9889	1.2800
24	3.20	21.50	12.00	2.20	54.99	70.9638	0.6815	1.3763
25	3.20	21.50	12.00	2.00	88.16	70.6565	0.5909	1.1825
26	3.20	21.50	12.00	2.00	86.11	69.0965	0.5590	1.1338
27	3.20	21.50	12.00	2.00	94.31	65.8828	0.5841	1.0950
28	3.20	21.50	12.00	2.00	96.36	61.7419	0.5603	0.9525
29	3.20	21.50	12.00	2.00	90.21	65.7591	0.5710	1.1525
30	3.20	21.50	12.00	2.00	82.01	67.8660	0.4264	1.2163
31	3.20	21.50	12.00	2.00	82.01	64.0694	0.4997	1.1913

#### A. Avaliar a estrutura de correlação do conjunto de dados

A estrutura de correlação das variáveis originais consideradas neste trabalho pode ser observada na Tabela 5. Nesta tabela, os valores de correlação são apresentados associados a um *p-value* em itálico. Um valor de *p* inferior a 0,05 indica uma correlação significativa.

**Tabela 5 - Matriz de correlação das variáveis originais**  
**Fonte: Autor 2021**

	<i>Y</i>	<i>D</i>	<i>RI</i>
<i>D</i>	-0.201 <i>0.278</i>		
<i>RI</i>	-0.484 <i>0.006</i>	0.077 <i>0.682</i>	
<i>PI</i>	-0.494 <i>0.005</i>	0.123 <i>0.508</i>	0.417 <i>0.020</i>

#### B. Realizar análise fatorial

A análise fatorial foi realizada e os escores rotacionados dos fatores foram armazenados. É importante ressaltar que a rotação varimax foi utilizada aqui por apresentar resultados satisfatórios como mostrado em Almeida *et al.* (2020). A Tabela 6 mostra os *scores* rotacionados de 3 fatores capazes de explicar 88,2% da variabilidade dos dados (4 variáveis originais estudadas), bem como os fatores do DoE. Essa variabilidade é apresentada na Tabela 7.

**Tabela 6 - Scores de fatores rotacionadas para cada experimento**  
**Fonte: Autor 2021**

<i>Run</i>	<i>Wf</i>	<i>V</i>	<i>CT</i>	<i>Fr</i>	<i>F<sub>1</sub></i>	<i>F<sub>2</sub></i>	<i>F<sub>3</sub></i>
1	3.00	20.00	8.00	1.80	-0.8286	-0.0590	-1.2966
2	3.40	20.00	8.00	1.80	0.1592	-0.7504	-0.9590
3	3.00	23.00	8.00	1.80	0.1672	-0.1648	-1.2167
4	3.40	23.00	8.00	1.80	2.9331	-0.2198	-0.9940
5	3.00	20.00	16.00	1.80	0.3945	-0.7208	-1.9338
6	3.40	20.00	16.00	1.80	2.2376	-1.4006	-0.4800
7	3.00	23.00	16.00	1.80	-0.3512	-1.1151	0.8347
8	3.40	23.00	16.00	1.80	-0.8463	-0.8566	-0.1451
9	3.00	20.00	8.00	2.20	-0.1320	-0.2234	1.9763
10	3.40	20.00	8.00	2.20	0.3633	-0.1339	0.1471
11	3.00	23.00	8.00	2.20	-1.0997	-0.4504	0.8533
12	3.40	23.00	8.00	2.20	-0.8384	-0.1763	-1.2577
13	3.00	20.00	16.00	2.20	-0.2681	0.2309	0.8091
14	3.40	20.00	16.00	2.20	-0.3477	-0.3315	0.3285
15	3.00	23.00	16.00	2.20	-0.3085	-0.3151	1.0733
16	3.40	23.00	16.00	2.20	-1.2200	-0.1377	-0.0859
17	3.00	21.50	12.00	2.00	-0.0007	-0.6969	-1.1056
18	3.40	21.50	12.00	2.00	0.6949	-0.6539	1.1560
19	3.20	20.00	12.00	2.00	0.9165	2.8736	0.7319
20	3.20	23.00	12.00	2.00	0.3239	0.7898	0.5842
21	3.20	21.50	8.00	2.00	0.5736	-0.3561	-0.6602
22	3.20	21.50	16.00	2.00	0.5947	0.1718	1.4411
23	3.20	21.50	12.00	1.80	-0.0929	3.4257	-1.6378

24	3.20	21.50	12.00	2.20	1.4600	1.2374	1.0764
25	3.20	21.50	12.00	2.00	-0.4973	0.1935	0.9194
26	3.20	21.50	12.00	2.00	-0.6555	0.1601	0.6704
27	3.20	21.50	12.00	2.00	-1.1457	0.2431	-0.0551
28	3.20	21.50	12.00	2.00	-2.0142	0.4141	-0.8084
29	3.20	21.50	12.00	2.00	-0.6161	0.1197	-0.0815
30	3.20	21.50	12.00	2.00	0.3661	-0.8557	0.4638
31	3.20	21.50	12.00	2.00	0.0783	-0.2419	-0.3480

**Tabela 7 - Cargas fatoriais rotacionadas ordenadas e comunalidades**  
**Fonte: Autor 2021**

Variável	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Comunalidade
<i>PI</i>	<b>0,943</b>	0,177	0,024	0,922
<i>Y</i>	<b>-0,58</b>	-0,563	-0,201	0,691
<i>RI</i>	0,183	<b>0,944</b>	-0,004	0,925
<i>D</i>	0,067	0,041	<b>0,991</b>	0,989
Variância	1,2615	1,2416	1,0233	3,5265
% Var	0,315	0,31	0,256	<b>0,882</b>

#### C. Gerar modelos para todas as respostas originais usando OLS

As variáveis originais e os escores rotacionados dos fatores foram, inicialmente, modelados por meio do método OLS e tiveram seus resíduos armazenados e elevados ao quadrado para serem usados na etapa D.

#### D. Gerar modelos quadráticos completos usando Modelos Lineares Gerais (regressão de Poisson) para os resíduos quadrados

A regressão de Poisson foi usada na etapa atual para modelar os 4 conjuntos de resíduos quadráticos da etapa C (cada conjunto corresponde aos resíduos obtidos no modelo inicial para cada variável original). O valor ajustado ( $\hat{\epsilon}$ ) foi armazenado, e o peso,  $W = 1/\hat{\epsilon}^2$ , foi calculado.

#### E. Gerar modelos de Poisson para as variáveis originais

Modelos de Poisson para as variáveis originais ponderadas por  $W$  foram obtidos. Algumas variáveis não apresentaram bons valores para  $R^2$ ,  $R^2_{adj}$  e  $R^2_{pred}$  na primeira iteração do método. Assim, os passos C e D tiveram que ser repetidos. Esses modelos são apresentados da Eq. (34) à Eq. (37).

$$\begin{aligned}
Y &= \exp(Y') \\
Y' &= -0.1885 - 0.03875 \times Wf + 0.01604 \times V - 0.00084 \times Ct \\
&\quad - 0.03980 \times Fr \\
&+ 0.1159 \times Wf^2 - 0.0377 \times V^2 - 0.0129 \times Ct^2 + 0.0251 \times Fr^2 \\
&+ 0.00042 \times Wf \times V + 0.00106 \times Wf \times Ct - 0.00577 \times Wf \times Fr \\
&+ 0.0108 \times V \times Ct + 0.0159 \times V \times Fr - 0.0102 \times Ct \times Fr \\
R^2 &= 93.66\% \\
R_{adj}^2 &= 89.59\%
\end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}
D &= \exp(D') \\
D' &= 4.1765 - 0.0301 \times Wf + 0.069 \times Fr \\
&\quad - 0.0415 \times Wf \times Fr \\
R^2 &= 95.77\% \\
R_{adj}^2 &= 81.58\%
\end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned}
RI &= \exp(RI') \\
RI' &= -0.45577 - 0.0437 \times Wf - 0.0319 \times V - 0.0145 \times Ct \\
&\quad + 0.0042 \times Fr \\
&- 0.3150 \times Wf^2 + 0.1186 \times V^2 - 0.0780 \times Ct^2 + 0.0474 \times Fr^2 \\
&- 0.0025 \times Wf \times V - 0.03396 \times Wf \times Ct - 0.0124 \times Wf \times Fr \\
&\quad - 0.0005 \times V \times Ct \\
&+ 0.0092 \times V \times Fr + 0.0390 \times Ct \times Fr \\
R^2 &= 99.93\% \\
R_{adj}^2 &= 99.90\%
\end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned}
PI &= \exp(PI') \\
PI' &= -0.1865 - 0.0017 \times Wf - 0.0178 \times V + 0.01946 \times Ct \\
&\quad - 0.0644 \times Fr \\
&- 0.0310 \times Wf^2 - 0.0292 \times V^2 + 0.0144 \times Ct^2 - 0.0103 \times Fr^2 \\
&+ 0.0113 \times Wf \times V - 0.0216 \times Wf \times Ct - 0.0604 \times Wf \times Fr \\
&- 0.044662 \times V \times Ct - 0.0357 \times V \times Fr + 0.0218 \times Ct \times Fr \\
R^2 &= 99.99\% \\
R_{adj}^2 &= 99.99\%
\end{aligned} \tag{37}$$

#### F. Realizar a otimização individual

Com os modelos obtidos para as variáveis originais, é possível realizar a otimização individual para elas. É importante destacar que Y, D e PI são variáveis a serem maximizadas enquanto que RI deve ser minimizado, uma vez que o reforço é retirado da estrutura final no processo de fabricação do anel de corona, conforme pode ser visto na figura 26.



**Figura 26 - Processo de remoção do reforço**  
**Fonte: Autor 2021**

Diante disso, a matriz de *payoff*, apresentada na Tabela 8, foi construída.

**Tabela 8 - Matriz Payoff considerando a otimização individual**  
**Fonte: Autor 2021**

<b>Resposta</b>	<b>Payoff Matrix</b>			
<i>Y</i>	1.0000	0.9581	0.9052	0.8941
<i>D</i>	61.1235	74.8885	62.6405	61.5592
<i>RI</i>	0.5045	0.5143	0.3864	0.5087
<i>PI</i>	1.2367	1.2274	1.2904	1.5118

G. Estabelecer as restrições com base em intervalos de confiança simultâneos

Neste ponto, é importante realizar algumas análises multivariadas. Inicialmente, os elipsoides para as médias de cada par de variáveis significativamente correlacionadas foram gerados por meio da Eq. (23), já citada anteriormente.

Esses elipsoides das médias e os intervalos de confiança simultâneos de Bonferroni são mostrados nas figuras 27, 28 e 29.

No entanto, diferentemente de Luz *et al.* (2021), onde essa metodologia foi publicada, um intervalo para a variável mais importante foi estabelecido aqui. O PI foi escolhido como a variável mais relevante, pois quanto maior a penetração melhor será a garantia de uma boa fusão da espessura do tubo e da resistência da solda no produto final.

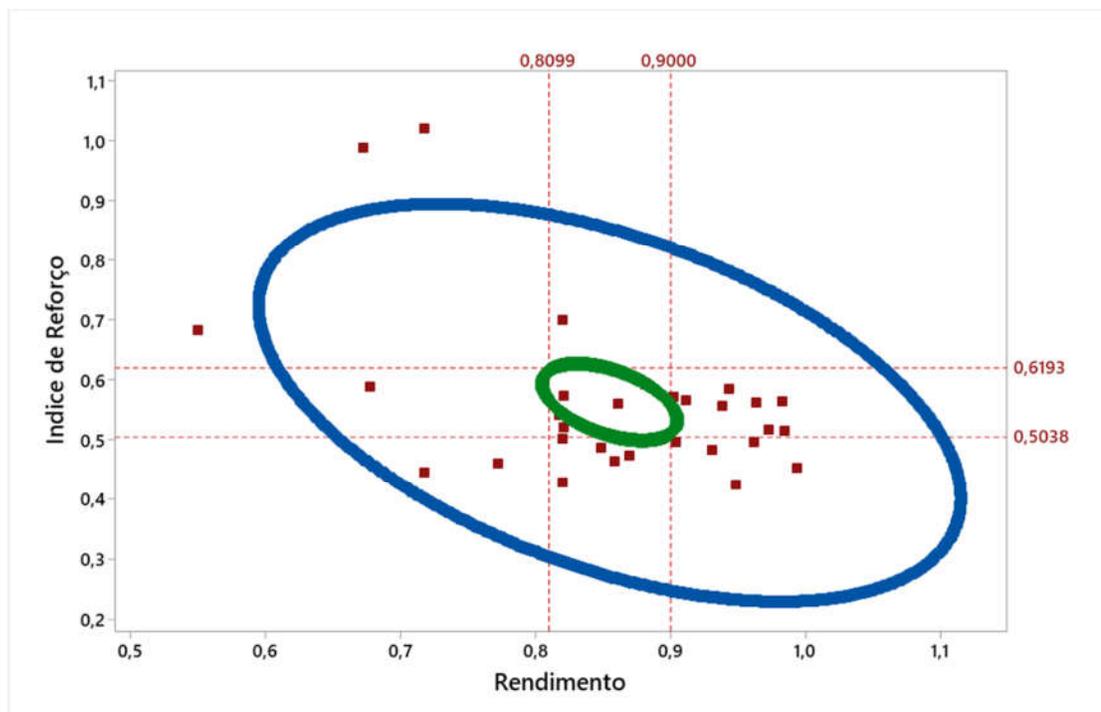


Figura 27 - Elipse das médias Índice de reforço x Rendimento  
Fonte: Autor 2021

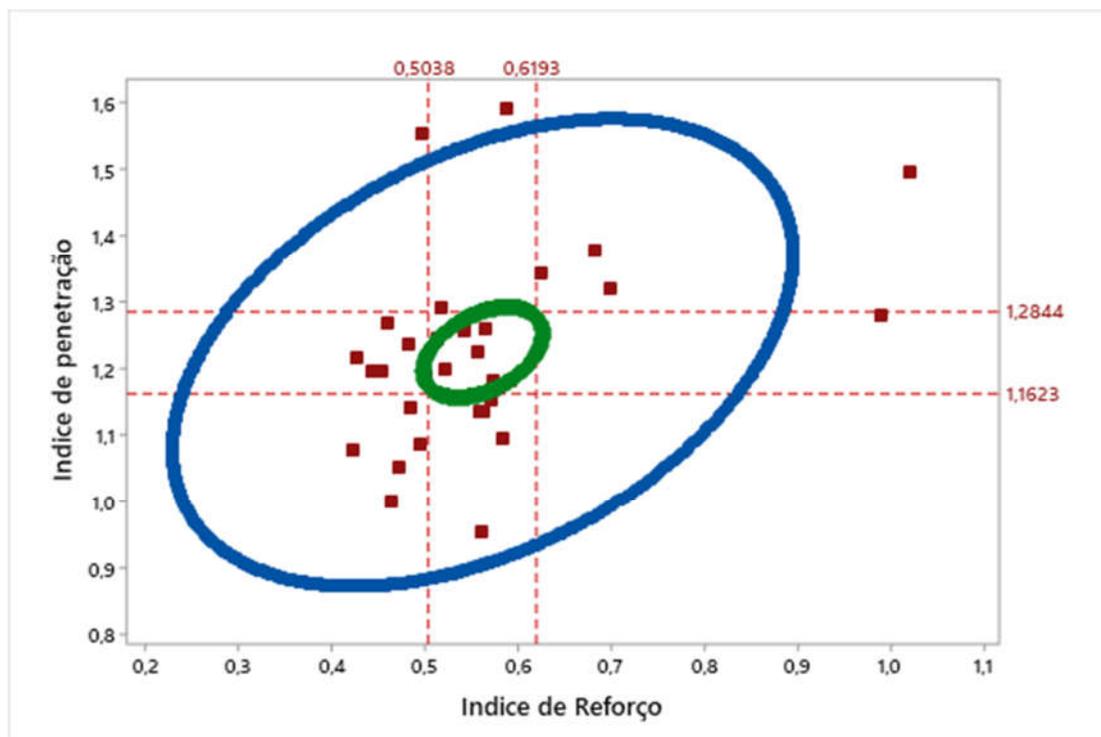


Figura 28 - Elipse das médias Índice de penetração x Índice de reforço  
Fonte: Autor 2021

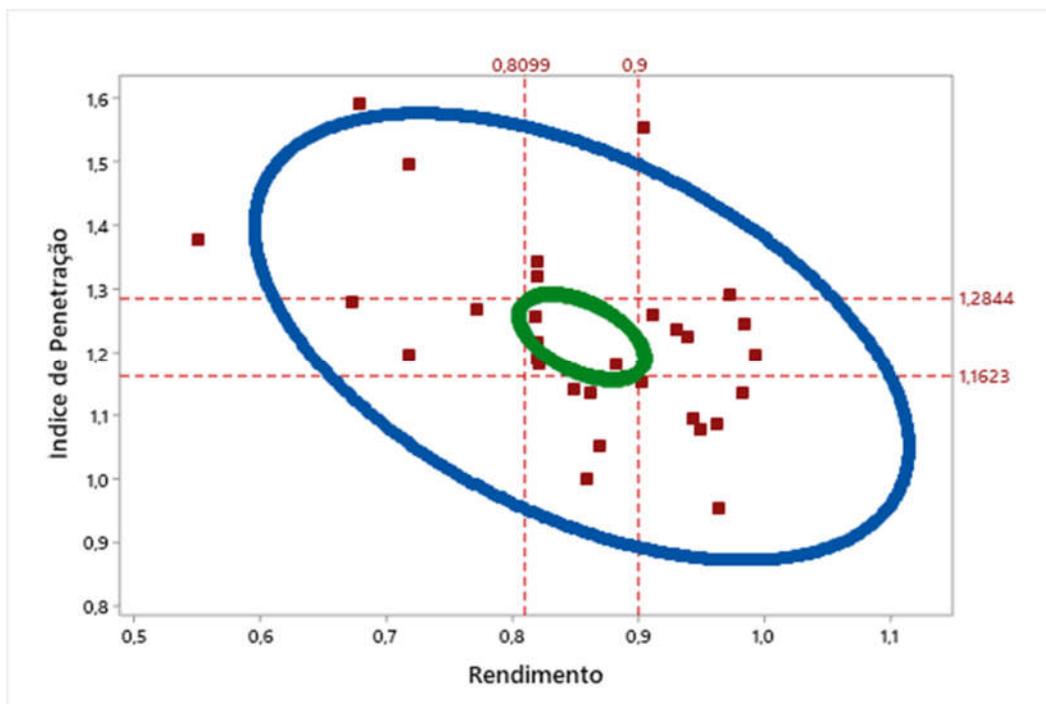


Figura 29 - Elipse das médias Índice de penetração x Rendimento  
Fonte: Autor 2021

Um intervalo de 1,19 a 1,25 foi definido por especialistas e, portanto, todas as outras variáveis tiveram que variar de acordo com este intervalo, uma vez que estão correlacionadas.

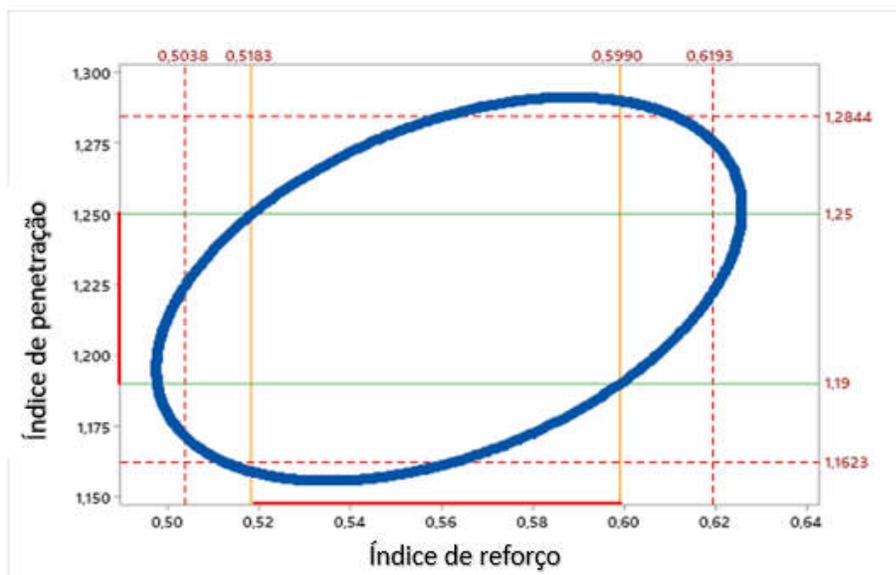


Figura 30 - Região Elíptica para as médias do Índice de penetração (PI) e Índice de reforço (RI) com restrições  
Fonte: Autor 2021

Assim, as restrições à variação das variáveis originais são a variações estabelecidas como

a interseção das linhas verde e amarela na figura 30 e na figura 31, e essas interseções são destacadas na linha contínua vermelha em ambos os eixos.

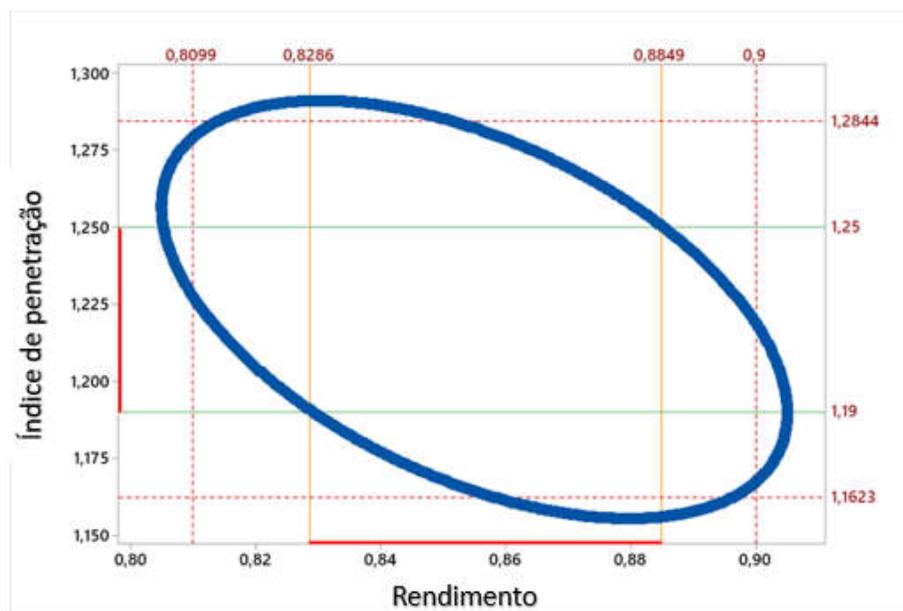


Figura 31 - Região elíptica para as médias do índice de penetração (PI) e do Rendimento (Y) com restrições.

Fonte: Autor 2021

#### H. Adaptação da matriz Payoff

Para adaptar a matriz de Payoff, uma restrição elíptica foi definida de acordo com a Eq. (38) além das restrições estabelecidas na etapa G. A matriz de Payoff adaptada pode ser vista na Tabela 7.

$$(\hat{Y} - M)^T \Sigma^{-1} (\hat{Y} - M) \leq \chi_{1-\alpha,p}^2 \quad (38)$$

Tabela 9 - Matriz Payoff adaptada considerando restrições elípticas e intervalos de restrições de Bonferroni

Fonte: Autor 2021

Resposta	Matriz Payoff			
<i>Y</i>	0.8729	0.8286	0.8464	0.8729
<i>D</i>	62.4427	64.9201	64.3064	62.4427
<i>RI</i>	0.5183	0.5183	0.5183	0.5183
<i>PI</i>	1.2500	1.1900	1.1953	1.2500

#### I. Aplicar método NBI para o erro quadrático médio dos fatores (FMSE)

Finalmente, as metas do fator foram definidas de acordo com a Eq. (33) e, portanto, as funções do FMSE para os três escores rotacionados dos fatores foram modelados. O método

Matrix NBI foi aplicado, uma vez que 3 funções estão sendo consideradas. Um projeto de mistura de rede simplex, com grau de rede 10, foi aplicado para gerar a matriz contendo 70 combinações distintas de pesos variando de 0,00001 a 0,99998 para serem usados no NBI.

Todas as funções objetivo devem ser minimizadas, uma vez que todas são os valores FMSE para os três fatores. Os resultados estão resumidos na Tabela 10 e na Tabela 11.

**Tabela 10 - Resultados do método NBI – Parte I**  
Fonte: Autor 2021

<i>Run</i>	$w_1$	$w_2$	$w_3$	<i>FMSE1</i>	<i>FMSE2</i>	<i>FMSE3</i>	<i>Y</i>	<i>D</i>	<i>RI</i>	<i>PI</i>
1	1.00	0.00	0.00	1.2615	1.4412	1.0308	83.99	63.7328	0.5796	1.2310
2	0.90	0.10	0.00	1.2644	1.4212	1.0346	83.61	63.6256	0.5978	1.2400
3	0.90	0.00	0.10	1.2633	1.4370	1.0300	84.14	63.6504	0.5789	1.2326
4	0.80	0.20	0.00	1.2673	1.4012	1.0384	83.96	63.4573	0.5986	1.2377
5	0.80	0.10	0.10	1.2662	1.4170	1.0338	84.21	63.7872	0.5692	1.2258
6	0.80	0.00	0.20	1.2650	1.4328	1.0293	84.22	63.5451	0.5811	1.2356
7	0.70	0.30	0.00	1.2702	1.3813	1.0422	83.97	63.4347	0.5967	1.2374
8	0.70	0.20	0.10	1.2691	1.3971	1.0376	84.02	63.4172	0.5966	1.2380
9	0.70	0.10	0.20	1.2679	1.4128	1.0331	84.30	63.7469	0.5680	1.2267
10	0.70	0.00	0.30	1.2668	1.4286	1.0285	84.31	63.4791	0.5810	1.2371
11	0.60	0.40	0.00	1.2732	1.3613	1.0460	84.00	63.3966	0.5978	1.2373
12	0.60	0.30	0.10	1.2720	1.3771	1.0414	84.03	63.3887	0.5967	1.2378
13	0.60	0.20	0.20	1.2709	1.3929	1.0369	84.07	63.3738	0.5957	1.2385
14	0.60	0.10	0.30	1.2697	1.4087	1.0323	83.92	63.6857	0.5765	1.2348
15	0.60	0.00	0.40	1.2686	1.4244	1.0278	84.38	63.4108	0.5814	1.2388
16	0.50	0.50	0.00	1.2761	1.3414	1.0498	83.20	63.7125	0.5984	1.2449
17	0.50	0.40	0.10	1.2749	1.3572	1.0452	84.04	63.3579	0.5967	1.2377
18	0.50	0.30	0.20	1.2738	1.3729	1.0407	84.08	63.3406	0.5974	1.2382
19	0.50	0.20	0.30	1.2726	1.3887	1.0361	84.13	63.3276	0.5955	1.2390
20	0.50	0.10	0.40	1.2715	1.4045	1.0316	84.47	63.5844	0.5689	1.2322
21	0.50	0.00	0.50	1.2703	1.4203	1.0270	84.45	63.3349	0.5825	1.2406
22	0.40	0.60	0.00	1.2790	1.3214	1.0536	83.12	63.7241	0.5978	1.2464
23	0.40	0.50	0.10	1.2778	1.3372	1.0491	83.20	63.6974	0.5955	1.2450
24	0.40	0.40	0.20	1.2767	1.3530	1.0445	84.09	63.3181	0.5960	1.2380
25	0.40	0.30	0.30	1.2755	1.3688	1.0399	84.14	63.2945	0.5978	1.2386
26	0.40	0.20	0.40	1.2744	1.3845	1.0354	84.18	63.2883	0.5942	1.2395
27	0.40	0.10	0.50	1.2733	1.4003	1.0308	84.55	63.5246	0.5686	1.2340
28	0.40	0.00	0.60	1.2721	1.4161	1.0263	84.49	63.2472	0.5851	1.2424
29	0.30	0.70	0.00	1.2819	1.3015	1.0574	83.06	63.7348	0.5990	1.2486
30	0.30	0.60	0.10	1.2808	1.3172	1.0529	83.12	63.7080	0.5951	1.2466
31	0.30	0.50	0.20	1.2796	1.3330	1.0483	83.20	63.6811	0.5954	1.2459
32	0.30	0.40	0.30	1.2785	1.3488	1.0438	84.13	63.2779	0.5955	1.2384
33	0.30	0.30	0.40	1.2773	1.3646	1.0392	84.18	63.2520	0.5976	1.2390
34	0.30	0.20	0.50	1.2762	1.3804	1.0346	84.23	63.2340	0.5957	1.2400
35	0.30	0.10	0.60	1.2750	1.3961	1.0301	84.63	63.4625	0.5685	1.2359

Tabela 11 - Resultados do método NBI – Parte II

Fonte: Autor 2021

<i>Run</i>	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$FMSE_1$	$FMSE_2$	$FMSE_3$	$Y$	$D$	$RI$	$PI$
36	0.30	0.00	0.70	1.2739	1.4119	1.0255	84.53	63.1611	0.5879	1.2439
37	0.20	0.80	0.00	1.2848	1.2815	1.0612	82.99	63.7352	0.5947	1.2498
38	0.20	0.70	0.10	1.2837	1.2973	1.0567	83.06	63.7204	0.5990	1.2495
39	0.20	0.60	0.20	1.2825	1.3131	1.0521	83.11	63.6927	0.5961	1.2477
40	0.20	0.50	0.30	1.2814	1.3288	1.0476	83.24	63.6674	0.5907	1.2456
41	0.20	0.40	0.40	1.2802	1.3446	1.0430	84.18	63.2376	0.5952	1.2388
42	0.20	0.30	0.50	1.2791	1.3604	1.0385	84.23	63.2100	0.5973	1.2394
43	0.20	0.20	0.60	1.2779	1.3762	1.0339	84.68	63.6626	0.5569	1.2271
44	0.20	0.10	0.70	1.2768	1.3920	1.0293	84.70	63.3987	0.5686	1.2378
45	0.20	0.00	0.80	1.2756	1.4077	1.0248	84.57	63.0733	0.5911	1.2450
46	0.10	0.90	0.00	1.2877	1.2616	1.0650	84.67	63.4698	0.5472	1.2338
47	0.10	0.80	0.10	1.2866	1.2773	1.0605	82.99	63.7171	0.5916	1.2500
48	0.10	0.70	0.20	1.2854	1.2931	1.0559	83.04	63.7035	0.5975	1.2500
49	0.10	0.60	0.30	1.2843	1.3090	1.0514	84.59	63.4800	0.5581	1.2336
50	0.10	0.50	0.40	1.2831	1.3247	1.0469	84.82	63.8623	0.5401	1.2152
51	0.10	0.40	0.50	1.2820	1.3404	1.0423	84.22	63.1999	0.5945	1.2392
52	0.10	0.30	0.60	1.2808	1.3562	1.0377	84.28	63.1686	0.5970	1.2398
53	0.10	0.20	0.70	1.2797	1.3720	1.0332	84.77	63.6218	0.5558	1.2285
54	0.10	0.10	0.80	1.2786	1.3878	1.0286	84.77	63.3329	0.5688	1.2398
55	0.10	0.00	0.90	1.2774	1.4036	1.0240	84.64	62.9868	0.5934	1.2461
56	0.00	1.00	0.00	1.2906	1.2416	1.0688	84.95	63.3446	0.5347	1.2387
57	0.00	0.90	0.10	1.2895	1.2574	1.0643	84.78	63.4463	0.5440	1.2344
58	0.00	0.80	0.20	1.2883	1.2732	1.0597	83.01	63.6991	0.5877	1.2500
59	0.00	0.70	0.30	1.2872	1.2889	1.0552	83.04	63.6846	0.5939	1.2500
60	0.00	0.60	0.40	1.2861	1.3047	1.0506	83.10	63.6644	0.5988	1.2500
61	0.00	0.50	0.50	1.2849	1.3204	1.0461	84.90	63.8853	0.5369	1.2131
62	0.00	0.40	0.60	1.2838	1.3363	1.0415	84.26	63.1569	0.5949	1.2396
63	0.00	0.30	0.70	1.2826	1.3520	1.0370	84.71	63.3935	0.5639	1.2368
64	0.00	0.20	0.80	1.2815	1.3678	1.0324	84.86	63.5575	0.5555	1.2309
65	0.00	0.10	0.90	1.2803	1.3836	1.0279	84.83	63.2646	0.5694	1.2417
66	0.00	0.00	1.00	1.2792	1.3994	1.0233	85.11	63.3842	0.5590	1.2402
<b>67</b>	<b>0.33</b>	<b>0.33</b>	<b>0.33</b>	1.2771	1.3607	1.0410	84.14	63.2831	0.5954	1.2387
68	0.67	0.17	0.17	1.2693	1.4009	1.0359	84.06	63.4017	0.5949	1.2383
69	0.17	0.67	0.17	1.2839	1.3012	1.0549	83.07	63.7073	0.5990	1.2494
70	0.17	0.17	0.67	1.2781	1.3800	1.0321	84.73	63.5374	0.5610	1.2324

Os valores dos fatores para cada combinação de pesos foram normalizados subtraindo a utopia e dividindo o resultado pela diferença entre o nadir e a utopia. O gráfico dos fatores normalizados e seus respectivos pesos podem ser vistos na figura 32.

### 3D Scatterplot of F1 vs F2 vs F3

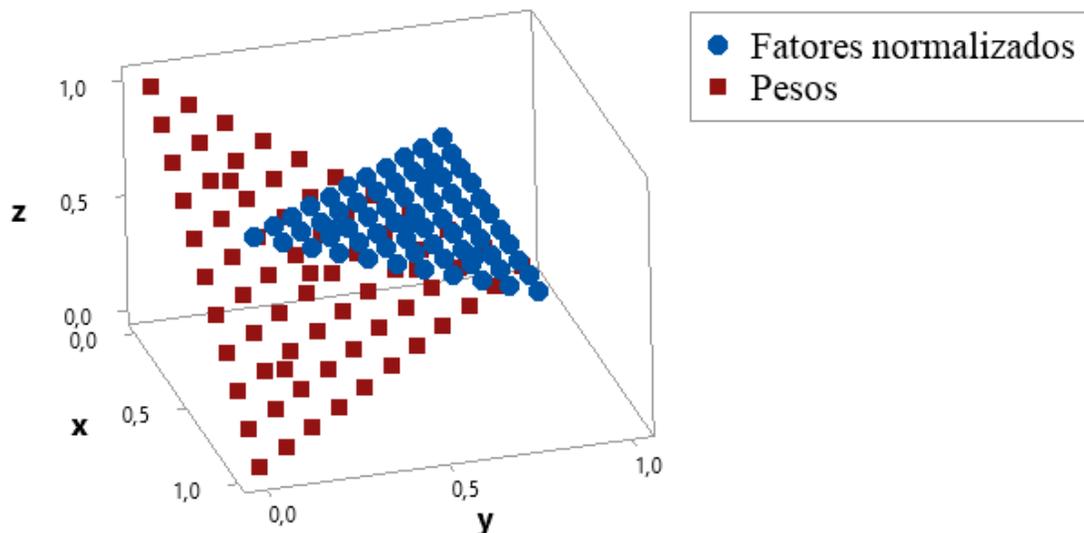


Figura 32 - Scatterplot 3D dos fatores normalizados e dos respectivos pesos  
Fonte: Autor 2021

Para escolher a melhor combinação de pesos, foi aplicada a razão ( $R$ ) entre a entropia ( $E$ ) e a distância de *Mahalanobis* ( $Mh$ ), dado por  $R = \frac{E}{Mh}$ . A distância de *Mahalanobis* foi calculada usando o software Minitab, via PCA, que gerou três componentes principais e armazenou essa distância. O valor de entropia foi calculado de acordo com a Eq. (39), onde  $w_i$  representa o peso.

$$- \sum_{i=1}^n w_i \times \ln(w_i) \quad (39)$$

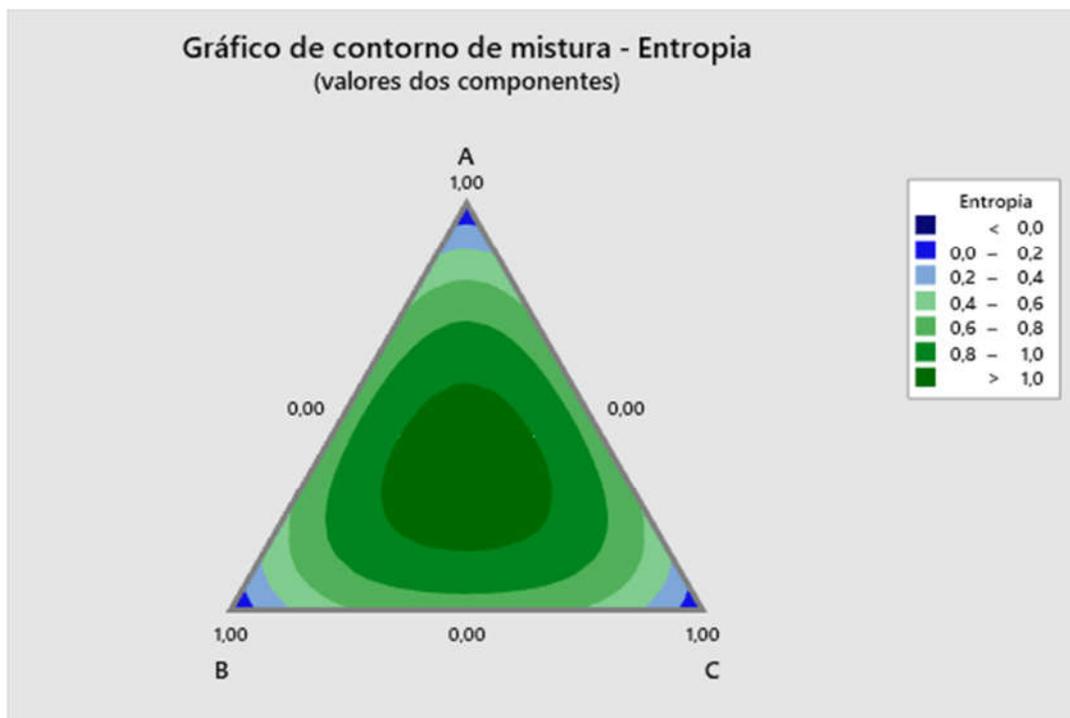
O valor máximo para  $R$  foi escolhido, uma vez que se espera um valor pequeno para  $Mh$  e um valor grande para  $E$ . Finalmente, os valores ótimos para  $w_1$ ,  $w_2$  e  $w_3$  são 0,3333, 0,3333 e 0,3333. A tabela 12 mostra um arranjo de mistura do tipo simplex lattice, com grau 10, que foi aplicado para gerar a matriz contendo 70 combinações distintas de pesos variando de 0,00001 a 0,99998 para serem usados no NBI.

Tabela 12 - Arranjo de mistura do tipo simplex lattice  
 Fonte: Autor 2021

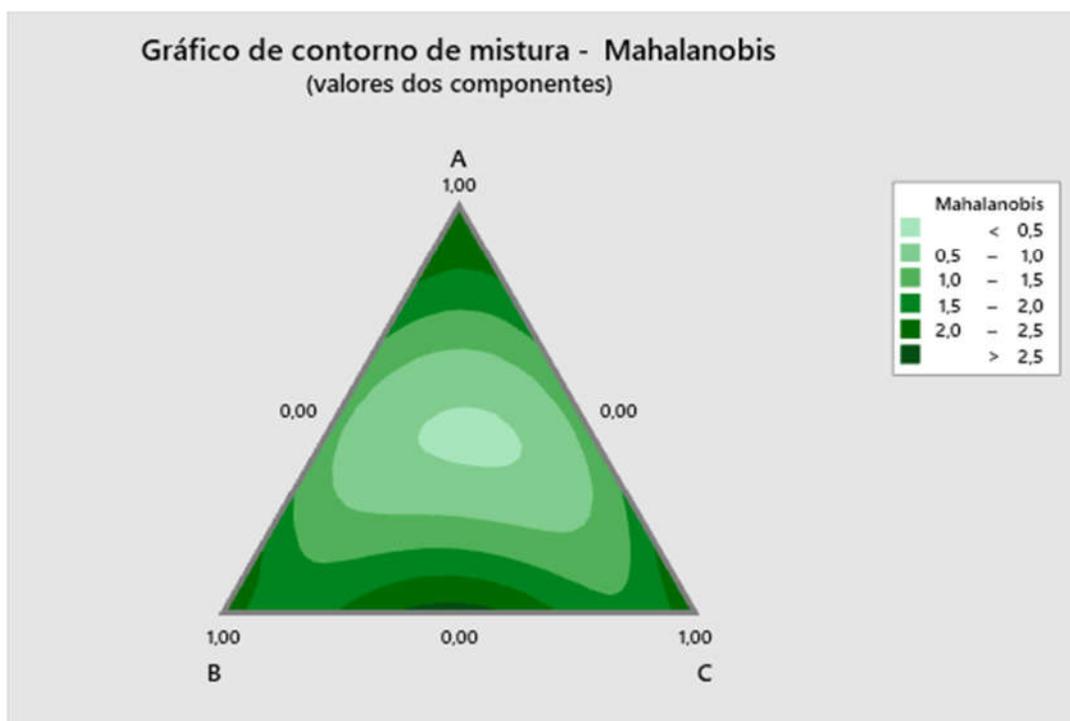
w1	w2	w3	Combinações	Entropia	MH_Fator	Ent/Mh
1,00	0,00	0,00	1	2,9631E-05	2,493594376	1,18829E-05
0,90	0,10	0,00	2	0,32509922	2,130465432	0,152595399
0,90	0,00	0,10	3	0,32509922	2,130464649	0,152595455
0,80	0,20	0,00	4	0,50041757	1,798128293	0,278299147
0,80	0,10	0,10	5	0,63903477	1,745440322	0,366116654
0,80	0,00	0,20	6	0,50041757	1,798023812	0,278315319
0,70	0,30	0,00	7	0,61087885	1,516964998	0,402698049
0,70	0,20	0,10	8	0,80182042	1,38840665	0,577511218
0,70	0,10	0,20	9	0,80182042	1,388260222	0,577572132
0,70	0,00	0,30	10	0,61087885	1,51663715	0,4027851
0,60	0,40	0,00	11	0,67302589	1,320233847	0,509777788
0,60	0,30	0,10	12	0,89794705	1,087413168	0,825764369
0,60	0,20	0,20	13	0,95027142	0,99765192	0,952507983
0,60	0,10	0,30	14	0,89794705	1,086998545	0,826079347
0,60	0,00	0,40	15	0,67302589	1,319309883	0,510134805
0,50	0,50	0,00	16	0,6931613	1,248310492	0,555279562
0,50	0,40	0,10	17	0,94334947	0,900623074	1,047440934
0,50	0,30	0,20	18	1,02965343	0,66099173	1,557740264
0,50	0,20	0,30	19	1,02965343	0,660433153	1,559057759
0,50	0,10	0,40	20	0,94334947	0,899155768	1,049150223
0,50	0,00	0,50	21	0,6931613	1,246742613	0,55597787
0,40	0,60	0,00	22	0,67302589	1,321711476	0,509207874
0,40	0,50	0,10	23	0,94334947	0,901434517	1,046498062
0,40	0,40	0,20	24	1,05492045	0,501756641	2,102454375
0,40	0,30	0,30	25	1,08890003	0,254127915	4,284850145
0,40	0,20	0,40	26	1,05492045	0,500245592	2,108805079
0,40	0,10	0,50	27	0,94334947	0,899620344	1,048608428
0,40	0,00	0,60	28	0,67302589	1,319605266	0,510020616
0,30	0,70	0,00	29	0,61087885	1,519450813	0,402039237
0,30	0,60	0,10	30	0,89794705	1,089976491	0,823822399
0,30	0,50	0,20	31	1,02965343	0,663810244	1,551126154
0,30	0,40	0,30	32	1,08890003	0,257440993	4,229707248
0,30	0,30	0,40	33	1,08890003	0,255905719	4,255082839
0,30	0,20	0,50	34	1,02965343	0,661559132	1,55640423
0,30	0,10	0,60	35	0,89794705	1,087646266	0,825587396
0,30	0,00	0,70	36	0,61087885	1,517041979	0,402677615
0,20	0,80	0,00	37	0,50041757	1,800887608	0,277872738
0,20	0,70	0,10	38	0,80182042	1,391939888	0,576045289

0,20	0,60	0,20	39	0,95027142	1,001455016	0,948890767
0,20	0,50	0,30	40	1,02965343	0,66481409	1,548784009
0,20	0,40	0,40	41	1,05492045	0,503987204	2,093149264
0,20	0,30	0,50	42	1,02965343	0,663040126	1,55292778
0,20	0,20	0,60	43	0,95027142	0,999278413	0,950957617
0,20	0,10	0,70	44	0,80182042	1,389055618	0,577241405
0,20	0,00	0,80	45	0,50041757	1,798601696	0,278225897
0,10	0,90	0,00	46	0,32509922	2,1343654	0,152316572
0,10	0,80	0,10	47	0,63903477	1,749145276	0,365341164
0,10	0,70	0,20	48	0,80182042	1,39228236	0,575903595
0,10	0,60	0,30	49	0,89794705	1,228559373	0,730894304
0,10	0,50	0,40	50	0,94334947	7,064387681	0,133535915
0,10	0,40	0,50	51	0,94334947	0,902728799	1,044997651
0,10	0,30	0,60	52	0,89794705	1,089488281	0,824191563
0,10	0,20	0,70	53	0,80182042	1,390191081	0,576769932
0,10	0,10	0,80	54	0,63903477	1,746396819	0,365916133
0,10	0,00	0,90	55	0,32509922	2,131062493	0,152552646
0,00	1,00	0,00	56	2,9631E-05	2,49726733	1,18654E-05
0,00	0,90	0,10	57	0,32509922	2,134603027	0,152299616
0,00	0,80	0,20	58	0,50041757	1,802210081	0,277668833
0,00	0,70	0,30	59	0,61087885	1,52094934	0,401643125
0,00	0,60	0,40	60	0,67302589	1,323376334	0,508567271
0,00	0,50	0,50	61	0,6931613	4,542561873	0,152592595
0,00	0,40	0,60	62	0,67302589	1,322450093	0,50892347
0,00	0,30	0,70	63	0,61087885	1,572226764	0,388543726
0,00	0,20	0,80	64	0,50041757	1,799536746	0,278081329
0,00	0,10	0,90	65	0,32509922	2,131496366	0,152521593
0,00	0,00	1,00	66	2,9631E-05	2,494215782	1,18799E-05
0,33	0,33	0,33	67	1,09861229	0,058012213	18,93760363
0,67	0,17	0,17	68	0,86756461	1,246807779	0,695828683
0,17	0,67	0,17	69	0,86756461	1,250294701	0,6938881
0,17	0,17	0,67	70	0,86756461	1,247999196	0,695164402

As figuras 33 e 34 apresentam os gráficos de contorno da Entropia e Mahalanobis. As áreas do gráfico, na cor verde mais escura, apresentam grandezas maiores de Entropia e Mahalanobis respectivamente em cada figura.



**Figura 33 - Gráfico de contorno de mistura - Entropia**  
Fonte: Autor 2021



**Figura 34 - Gráfico de contorno de mistura - Mahalanobis**  
Fonte: Autor 2021

Para esses pesos, os valores otimizados para  $W_f$ ,  $V$ ,  $Ct$  e  $Fr$  são 0,215, 0,269, 0,536, - 0,380, respectivamente. Esses são valores codificados. Convertendo estes valores codificados

para valores não codificados, para os mesmos fatores, obtemos as seguintes respostas: 3,243 m/min para  $Wf$ ; 21,904V para  $V$ ; 14,143 mm para  $Ct$  e 1,924 Hz para  $Fr$ , respectivamente. Um resumo dessas informações pode ser visualizado na tabela 13.

**Tabela 13 - Resumo dos parâmetros obtidos na otimização**  
**Fonte: Autor 2021**

<b>PARÂMETRO</b>	<b>CODIFICADO (Adimensional)</b>	<b>DECODIFICADO</b>	<b>UNIDADE</b>
Wf	0,215	3,243	m/min
V	0,269	21,904	V
Ct	0,536	14,143	mm
Fr	-0,380	1,924	Hz

Portanto, as variáveis originais  $Y$ ,  $D$ ,  $RI$  e  $PI$  são, respectivamente, iguais a 84,14%; 63,28%; 0,5953 e 1,2387 de acordo com o modelo de previsão desenvolvido neste trabalho. É um resultado interessante, pois permite rendimentos e valores satisfatórios relacionados à geometria do cordão de solda.

A conversão dos valores codificados em valores decodificados é feita através da Eq. 40, de acordo com Montgomery (2013).

$$Var\ decod = Z(x) * \frac{(Nível\ alto - Nível\ baixo)}{2} + \frac{(Nível\ baixo + Nível\ alto)}{2} \quad (40)$$

## 5. EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO

Para validar se os resultados obtidos na seção anterior são realmente praticáveis, foi realizado um experimento de validação com quatro corpos de prova.

Seguindo as mesmas etapas de execução dos 31 experimentos anteriores, os corpos de prova foram soldados de acordo com os parâmetros definidos pelo método, então foram cortados em 4 quadrantes e submetidos ao ataque químico para revelar o material adicionado e em seguida foi polido. Posteriormente foi levado ao laboratório da UNIFEI para captura de imagens e medição da geometria do cordão. A tabela 14 mostra as dimensões encontradas.

**Tabela 14 - Geometria do cordão de solda - Experimentos de Validação**  
Fonte: Autor 2021

Nº CP	DILUIÇÃO				AREA TOTAL (mm <sup>2</sup> )	DILUIÇÃO		
	W (mm)	H (mm)	EA (mm <sup>2</sup> )	IA (mm <sup>2</sup> )		(%)	RI	PI
1-1	9,24	4,34	6,92	20,51	27,43	74,77	0,470	1,525
1-2	7,96	4,67	5,26	22,18	27,44	80,83	0,587	1,780
1-3	8,26	3,89	9,93	11,28	21,21	53,18	0,471	1,020
1-4	7,32	3,76	7,54	10,09	17,63	57,23	0,514	1,180
2-1	6,98	4,27	9,16	12,17	21,33	57,06	0,612	1,205
2-2	7,16	4,38	<b>5,35</b>	20,90	26,25	79,62	0,612	1,840
2-3	8,08	4,13	9,00	16,54	25,54	64,76	0,511	1,225
2-4	7,43	4,49	<b>5,60</b>	21,14	26,74	79,06	0,604	1,795
3-1	7,38	3,87	6,62	14,16	20,78	68,14	0,524	1,230
3-2	7,24	3,91	7,11	14,64	21,75	67,31	0,540	1,195
3-3	8,10	4,03	6,33	16,84	23,17	72,68	0,498	1,410
3-4	8,44	4,40	8,93	17,33	26,26	65,99	0,521	1,350
4-1	6,79	3,42	4,76	10,94	15,70	69,68	0,504	1,145
4-2	8,08	3,46	7,02	12,95	19,97	64,85	0,428	1,050
4-3	7,52	3,77	7,71	14,43	22,14	65,18	0,501	1,120
4-4	7,75	3,22	5,64	13,24	18,88	70,13	0,415	0,985
<b>Média</b>	<b>7,73</b>	<b>4,00</b>	<b>7,06</b>	<b>15,58</b>	<b>22,64</b>	<b>68,15</b>	<b>0,517</b>	<b>1,316</b>
<b>Desv.Pad.</b>	<b>0,63</b>	<b>0,42</b>	<b>1,57</b>	<b>3,92</b>	<b>3,66</b>	<b>8,10</b>	<b>0,06</b>	<b>0,28</b>
<b>Var.</b>	<b>0,40</b>	<b>0,17</b>	<b>2,46</b>	<b>15,40</b>	<b>13,36</b>	<b>65,66</b>	<b>0,00</b>	<b>0,08</b>
<b>Coef.Var.</b>	<b>8,13</b>	<b>10,37</b>	<b>22,24</b>	<b>25,18</b>	<b>16,15</b>	<b>11,89</b>	<b>11,63</b>	<b>21,22</b>

Onde W é a largura do cordão, H é a altura total dada pela soma da altura do reforço e da penetração, EA é a área da penetração e IA é a área do reforço.

Em se tratando de um processo de soldagem, com parâmetros muito próximos, os coeficientes de variação encontrados, podem ser considerados entre baixo e médio, RI com 11,63% e PI com 21,22%, indicando que os dados são relativamente homogêneos. Além disso, a variância das variáveis RI e PI, as variáveis principais estudadas, são muito pequenas.

Outra análise que pode ser feita é a relação entre a área de reforço e a área de penetração,

que pode ser verificada na tabela 15.

**Tabela 15 - Relação entre as áreas de reforço e de penetração**  
**Fonte: Autor 2021**

Nº CP	EA (mm <sup>2</sup> )	IA (mm <sup>2</sup> )	RELAÇÃO
Média CP 1	7,41	16,02	46%
Média CP 2	7,28	17,69	41%
Média CP 3	7,25	15,74	46%
Média CP 4	6,28	12,89	49%
<b>MÉDIA GERAL</b>	<b>7,06</b>	<b>15,58</b>	<b>45%</b>

Os corpos de provas, apresentam uma relação média entre as áreas EA e IA de 45%, ou seja, a cada 1mm de área de reforço, aproximadamente quase o dobro de área de penetração. Isso faz sentido, já que a variável mais importante do estudo, é justamente o índice de penetração IP, que foi maximizado.

A figura 35, mostra o experimento de validação CP 4 depois de soldado. Ela também apresenta o corte dos quatro quadrantes, bem como mostra uma vista de parte do corpo de prova da parte interna, evidenciando uma penetração bastante uniforme do cordão de solda.



**Figura 35 - Experimento de Validação (CP 4)**  
**Fonte: Autor 2021**

A Tabela 16 mostra os resultados obtidos com as especificações dos parâmetros e a porcentagem de erro associado. Percebe-se que os resultados reais se aproximaram muito em

relação aos valores previstos no modelo.

**Tabela 16 - Tabela comparativa entre o modelo de previsão e os resultados reais para as respostas investigadas**  
Fonte: Autor 2021

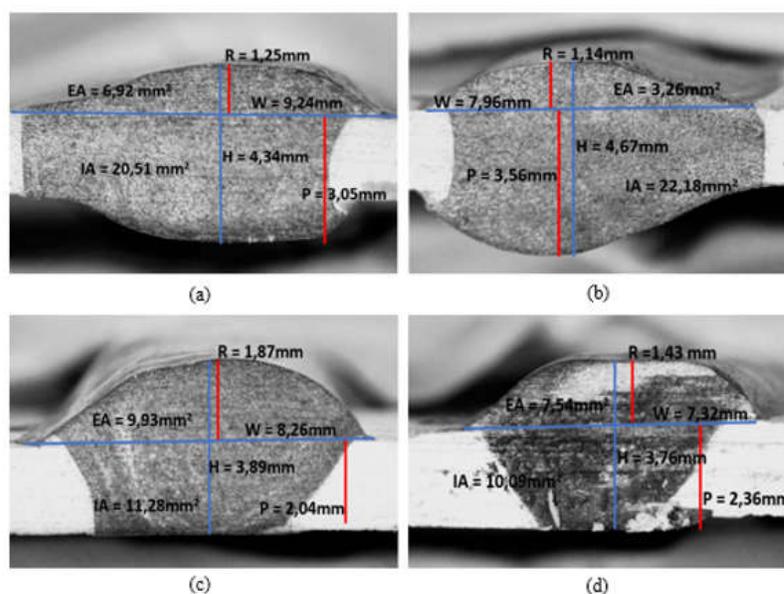
<i>Parâmetros</i>		<i>Respostas previstas</i>		<i>Valores das respostas reais</i>	
<i>Wf</i>	3.243	<i>Y</i>	84.14%	<i>Y</i>	86,24%
<i>V</i>	21.904	<i>D</i>	63.28%	<i>D</i>	68,15%
<i>Ct</i>	14.143	<i>RI</i>	0.5953	<i>RI</i>	0,517
<i>Fr</i>	1.924	<i>PI</i>	1.2387	<i>PI</i>	1,316

Se ainda compararmos as respostas reais do experimento de validação com a matriz *pay off* adaptada com as restrições de Bonferroni, os valores de utopia dessa matriz apontam ainda mais para a confirmação da nova metodologia utilizada. A tabela 17 evidencia essa afirmação.

**Tabela 17 - Comparação da matriz payoff adaptada com as restrições de Bonferroni e as respostas reais**  
Fonte: Autor 2021

Variáveis de resposta	$\phi$	Valores das respostas reais
<i>Y</i>	87,29%	86,24
<i>D</i>	64,92%	68,15
<i>RI</i>	0,5183	0,517
<i>PI</i>	1,2500	1,316

A figura 36 mostra algumas imagens microscópicas do corpo de prova 1 (CP 1) do experimento de validação, cada uma delas representando um quadrante (a), (b), (c) e (d).



**Figura 36 - Experimento de validação (CP 1) a partir das perspectivas de cada quadrante**  
Fonte: Autor 2021

A figura 37, apresenta os corpos de provas do experimento de confirmação em posições

diferentes para evidenciar o cordão de solda com ausência de falhas de soldagem e de defeitos como trincas, mordeduras e porosidade. Também é possível verificar a penetração uniforme nos corpos de prova soldados, assim como nota-se nos mesmos, antes do corte, uma uniformidade no cordão, apresentando reforço mínimo e boa estética da região soldada.



(a)

(b)

**Figura 37 - Imagens do corpos de prova do experimento de confirmação**

**(a) CP's 1, 2 e 3 (b) CP 4 em vários ângulos**

**Fonte: Autor**

## 6. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs a aplicação de uma metodologia baseada em regressão de Poisson, restrições multivariadas para otimizar, através do método de intersecção de contorno normal, um problema multiobjetivo considerando o processo de soldagem de tubos de liga de alumínio (AA) 6063 T4 usados na fabricação de anéis de corona.

Vale a pena ratificar que se trata de um caso real, aplicado dentro de uma indústria que fabrica anéis de corona para diferentes clientes. O projeto do anel de corona a que se refere este estudo, pertence a uma multinacional suíça que, recentemente, teve parte de seus negócios vendidos a uma outra multinacional japonesa.

Durante o processo de homologação do produto, para posterior fornecimento, a M&S passou por todas as exigências de qualidade contidas nas especificações técnicas e conformidades exigidas pelo cliente, tornando-se, assim, após a aprovação do processo de homologação, fornecedor mundial de anéis de corona para esse cliente. Nas especificações do cliente, não estão contidas instruções para ensaios não destrutivos, como líquido penetrante (LP), ultrassom ou raio x, por exemplo; nem são necessários ensaios destrutivos, pois estas ações incidiriam diretamente sobre o custo do produto, tornando o preço final mais elevado. Porém, poderiam ser feitos, pela empresa, alguns controles para medição do processo, como, por exemplo, a identificação de defeituosos e não defeituosos, controles de variação dimensionais, para a criação de séries temporais que estariam sujeitas a análises estatísticas como Cpk e outras que a própria empresa julgar necessária. Essas ações seriam muito úteis para estudos futuros de melhoria da qualidade e até mesmo possibilitar a aplicação da filosofia *lean six sigma*. Seria primoroso um estudo multivariado aplicado à filosofia *lean*.

Apesar das dificuldades de soldagem de ligas de alumínio, o trabalho comprovou que é possível obter resultados satisfatórios por meio de um ajuste preciso dos parâmetros (ou fatores) mais significativos e da identificação de seus intervalos. O desenho de experimentos, por exemplo, permitiu a exploração de cenários distintos, facilitando a interpretação dos efeitos dos parâmetros e sua interação. Foram realizados 31 experimentos estruturados de acordo com um projeto composto de face centrada com 4 fatores, taxa de alimentação do arame, tensão do arco, distância da ponta de contato à peça de trabalho e frequência do motor.

Considera-se que o objetivo geral desta tese foi plenamente alcançado em função de que a proposta de uma nova metodologia de otimização multiobjetivo com técnicas multivariadas e intervalos elípticos de confiança de Bonferroni como solução de parâmetros ótimos de soldagem MIG em tubos de alumínio AA6063, foi realizada com sucesso.

Cada passo em direção à realização dos objetivos específicos contribuiu na construção da

tese, e ao mesmo tempo fez com que estes objetivos também fossem plenamente alcançados.

A regressão de Poisson foi uma técnica importante e adequada para modelar as funções objetivo consideradas, rendimento, diluição, índice de reforço e índice de penetração. Além disso, como essas respostas estavam correlacionadas, não puderam ser consideradas separadamente, e as restrições elípticas e as restrições baseadas em intervalos de confiança simultâneos garantiram que a natureza multivariada do problema fosse considerada.

Além disso, foi possível observar que a utilização de fatores para representar as variáveis originais e dos erros quadráticos médios dos fatores como funções objetivo eram adequados, uma vez que o problema poderia ser resolvido através do NBI.

Outro ponto importante para validar as respostas de todo o trabalho realizado foi a execução do experimento de confirmação. Através dele, pode-se perceber, no corpo de prova, uma solda de ótimo nível estético, ótima fusão e ausência de falhas. Logo, foi possível constatar um cordão de solda satisfatório, com grandes valores de índice de penetração e diluição e pequeno valor de índice de reforço, pré-especificado pelo gerente do processo.

Embora o processo de soldagem do alumínio se destaque pela complexidade, o desenvolvimento desse trabalho com aplicação eminentemente prática na indústria somado ao motivo acadêmico, evidencia a possibilidade de colaborar com a melhoria e otimização de processos, melhoria da qualidade e redução de custos. A técnica de otimização pode ser ampliada para outras áreas de produção das mais diversas indústrias de manufatura, o que, sem sombra de dúvidas, faz com que se tornem mais competitivas e mais racionais no uso de seus recursos.

Além disso, a partir das respostas que foram encontradas e já apresentadas nos capítulos anteriores, é possível fazer mais algumas inferências, como:

- ✓ Todas as variáveis de saída do processo estudado apresentaram  $R^2$ , superiores a 93% e  $R_{adj}^2$  superiores a 83,5%, caracterizando modelos adequados.
- ✓ A utilização do FMSE permitiu trabalhar com os scores de fatores rotacionados não correlacionados em vez das variáveis originais correlacionadas superando os conflitos de direção da otimização.
- ✓ O método NBI e os intervalos simultâneos de confiança de Bonferroni para solucionar o problema de otimização multiobjetivo produzem uma série de soluções na fronteira ou superfície de Pareto que podem ser escolhidas a partir de um intervalo definido pelo gestor do processo.
- ✓ As técnicas e metodologias aplicadas podem produzir soluções que, conjuntamente analisadas, servem de ferramenta gerencial no suporte à tomada de decisão nas

indústrias.

Conclui-se, então, e, ao mesmo tempo, ficam algumas sugestões para trabalhos futuros, que, através dos resultados obtidos neste estudo e de resultados de estudos similares já citados ao longo dos capítulos anteriores, existem evidências claras da confirmação de que os métodos de otimização, quando aplicados de forma adequada, são eficientes e eficazes, ressaltando ainda a possibilidade de inclusão de outras variáveis não estudadas, como porosidade, estudos de tração e ruptura na solda, granulometria e ZTA, bem como custos de energia elétrica e cenários ainda mais dinâmicos.

Uma alternativa para o desenvolvimento de novos estudos seria o de encontrar formas de generalizar o método, já que foi aplicado em um case, e verificar se funcionaria para outras aplicações e quais seriam essas novas aplicações. Poder-se-ia pensar, por exemplo, em problemas típicos realizando estudos sobre séries sintéticas colocando várias outras estruturas de multivariadas, talvez considerações dinâmicas sobre o tempo, por exemplo, ou a substituição da regressão de Poisson por Redes Neurais, para a modelagem. Também num próximo estudo, pode-se fazer análises de comparações entre as áreas de restrições elípticas, propostas nesta tese com áreas de restrições esféricas, em relação a acuracidade. Enfim, são sugestões que requerem o uso de metodologias estocásticas e que podem produzir elementos e informações relevantes para o melhor desempenho gerencial na tomada de decisões nas empresas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTI, E. A.; et al. Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 19, Nº. 02, p.190-198, Abr/Jun 2014.

ABDERRAZZAQ MH, ABU JALGIF AM (2013) Characterizing of corona rings applied to composite insulators. Electr Power Syst Res 95:121–127. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.08.010>

ALCAN Alumínio do Brasil, Manual de Soldagem, 1993 - disponível em: <http://www.mkmouse.com.br/livros/soldaemaluminiomanual-Alcan.pdf>

ALCOA, Perfis extrudados de alumínio – Ligas e temperas de extrusão, catálogo, São Paulo – SP, 2010.

ALMEIDA, F.A.; SANTOS, A.C.O.; PAIVA, A.P.; GOMES, G.F.; GOMES, J.H.F. Multivariate Taguchi loss function optimization based on principal components analysis and normal boundary intersection. *Engineering with Computers*, Springer, 2020.

ALMEIDA FA, STREITENBERGER SC, TORRES AF, PAIVA AP, GOMES JHF. A gage study through the weighting of latent variables under orthogonal rotation. IEEE Access 8:183557–183570. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019031>

ALMEIDA, F.A.; GOMES, G.F.; PAULA, V.R.; CORRÊA, J.E., PAIVA, A.P., GOMES, J.H.F., et al.; TURRIONI, J.B. A weighted mean square error approach to the robust optimization of the surface roughness in an AISI 12L14 free-machining steel-turning process. *Journal of Mechanical Engineering*, Strojniški vestnik, v. 64(3), p. 147-156, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10520 – Informação e documentação. Citação em documentos. Apresentação. Rio de Janeiro, ago 2002a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023 – Informação e documentação. Referências. Elaboração. Rio de Janeiro, ago 2002b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724 – Informação e documentação. Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro, dez 2005.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Process. Handbook, Capítulo 10 - 8ª ed., 1990

AWS - American Welding Society. Welding – Related Expenditures and Productivity Measurement in U.S. Manufacturing, Construction, and Mining Industries. 2002. p. 90

BARTHOLOMEW, D. J. Scaling Binary Data Using a Factor Model. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1984

BELINATO, G.; ALMEIDA, F. A.; PAIVA, A. P.; GOMES, J. H.F.; BALESTRASSI, P. P.; ROSA, P.A.R.C. A multivariate normal boundary intersection PCA-based approach to reduce dimensionality in optimization problems for LBM process. *Engineering with Computers*, Springer, v. 35, p. 1533–1544, 2019.

BENEDYK, J. C. ed. (2010) International temper designation systems for wrought aluminum alloys: Part II – Thermally treated (T temper) aluminum alloys. *Light Metals Age*, aug. 2010.

BERTRAND, J.; FRANSOO, J. Modeling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n.2, p. 241-264, 2002.

BRAGUINE, T.B., DE ALCÂNTARA, D.S., CASTRO, C.A.C., DOS SANTOS, G.H.R. Influence of welding parameters on aluminum tubes AA6063 by the CDFW process | [Influência dos parâmetros de soldagem em tubos de alumínio AA6063 pelo processo CDFW]. *Soldagem e Inspeção* 23(1), pp. 3-16. 2018.

BRITO, T. G.; PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; GOMES, J. H. F.; BALESTRASSI, P. P. A normal boundary intersection approach to multiresponse robust optimization of the surface roughness in end milling process with combined arrays. *Precision Engineering*, v. 38, n. 3, p. 628–638, 2014. Elsevier Inc.

BRITO, J.D.; PARANHOS, R. *Como Determinar os Custos da Soldagem*, Ed. R Paranhos. 2005.

BRYMAN, A. *Research methods and organization studies (contemporary social Research)*. 1st edition, London: Routledge, 1989

CALLISTER, William D. Jr. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

COELLO, C.A.C. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field - *IEEE computational intelligence magazine*, 2006.

CONESA EJM, EGEA JA, MIGUEL V, et al (2017) Optimization of geometric parameters in a welded joint through response surface methodology. *Constr Build Mater* 154:105–114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.163>

COSTA, D. M. D.; BRITO, T. G.; PAIVA, A. P.; LEME, R. C.; BALESTRASSI, P. P. A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel. *Journal of Cleaner Production*, Volume 135. 2016

CRUZ, M. F.; NETO, C. DE M. Friction stir welding –potencial de aplicação na indústria. XI *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, p. 5–9, 2009.

DAS, I.; DENNIS, J.E. Normal boundary intersection: a new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. *SIAM Journal of Optimization*, 8 ), pp. 631-657. 1998.

DAVENPORT, THOMAS H. Reengenharia de Processos: Como Inovar na Empresa Através da Tecnologia da Informação. 5. ed, Rio de Janeiro, Campus, 1994.

DAVIS, J. R. ASM International (Ed.) *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum alloys*. Ohio, 2002. 784 p.

De MOTTA RS, AFONSO SMB, LYRA PRM (2012) A modified NBI and NC method for the solution of N-multiobjective optimization problems. *Struct Multidiscip Optim* 46:239–259. <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0729-5>

DUARTE Costa DM, BRITO TG, PAIVA AP, et al (2016) A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel. *J Clean Prod* 135:1658–1672. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.062>

DUTRA, J. C.; CIRINO, L. M. E SILVA, R. H. G. (2010) AC-GTAW of aluminium – new perspective for evaluation of role of positive polarity time. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.15, n.7, pp.632-637, 2010

ESAB MIG Welding Handbook e EASAB MIG/MAG Welding, Svetsaren (2003) - disponível em [https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/soldagem\\_das\\_ligas\\_aluminio\\_com\\_qualidade.cfm](https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/soldagem_das_ligas_aluminio_com_qualidade.cfm), acessado em 01/08/2019 – 15h21min

FRAZIER, W. E; Metal Additive Manufacturing: A Review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol 23, 2014, 1917-1928 pp.

GAUDÊNCIO, J. H. D.; ALMEIDA, F. A.; TURRIONI, J. B.; QUININO, R.C.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, A. P. A multiobjective optimization model for machining quality in the AISI 12L14 steel turning process using fuzzy multivariate mean square error. *Precision Engineering*, Elsevier, v. 56, p. 303–320, 2019.

GHOSH, P. K.; GUPTA, P. C.; SOMANI, R. (2002) Influence of pulse parameters on bead geometry and HAZ during bead on plate deposition by MIG welding process. Springer (2002).

GONÇALVES, J. E. L. As Empresas São Grandes Coleções de Processos. *RAE - Revista de Administração de Empresas*, v. 40, n.1, p. 6-19, Jan./mar. 2000

GRAHAM, Morris, LEBARON, Melvin. The horizontal revolution. San Francisco: Jossey-Bass, 1994.

HAIR J.F., BLACK W.C., BABIN B.J., ANDERSON R.E., and TATHAM R.L. Multivariate data analysis 6th Edition. Pearson Prentice Hall. New Jersey 2006.

İLHAN S, OZDEMIR A (2007) Effects of corona ring design and its location on electric field intensity and potential distribution along an insulator string. In: International Review of Electrical Engineering. pp 3408–3413

JHAVAR, S., JAIN, N.K., PAUL, C.P. Development of micro- plasma transferred arc ( $\mu$ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. Journal of Materials Processing Technology, p.1102-1110, 2014.

JOHNSON, R.A., WICHERN, D.W. Applied multivariate statistical analysis.6th ed., Prentice Hall. 2007.

HAIR J.F., BLACK W.C., BABIN B.J., ANDERSON R.E., and TATHAM R.L. Multivariate data analysis 6th Edition. Pearson Prentice Hall. New Jersey 2006.

KOLI Y., YUVARAJ N., ARAVINDAN S., Vipin. Multi-response Mathematical Modeling for Prediction of Weld Bead Geometry of AA6061-T6 Using Response Surface Methodology. Trans Indian Inst Met 73:645–666. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01883-2>

KAPLUNOVSKY, A.S. Why using factor analysis? (dedicated to the centenary of factor analysis). [Online] Disponível em: < <http://www.magniel.com/fa/kaplunovsky.pdf> > Acesso em: [23 agosto 2020].

KIDDER, L. H. (org.). Métodos de pesquisa nas relações sociais. Volume 1: delineamentos de pesquisa. 4ª. ed., 3ª. reimpressão, São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda., 2004.

KING, G. How not to lie with statistics [Online] Disponível em < <https://gking.harvard.edu/files/mist.pdf>> : Acesso em: [23 agosto 2020]

KOU, S. Welding Metallurgy. New York: John Wiley & Sons, 2003. Segunda edição

KUMAR, M.; ANTONY, J.; TIWARI, M.K. Six Sigma implementation framework for SMEs – a roadmap to manage and sustain the change. International Journal of Production Research. Vol 49, No. 18, pp.5449-5467. 2011.

LAKSHMINARAYANAN, A. K.; BALASUBRAMANIAN, V. E ELANGOVA, K. (2009) Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminum alloy joints. International Journal Advanced Manufacturing Technology, v.40, n.3-4, pp. 286-296, jan. 2009.

LAUREANI A., ANTONY J. Standards for Lean Six Sigma certification. International Journal

of Productivity and Performance Management.; Vol61(1):110-120. 2012.

LEITE, R.R. Método de interseção normal à fronteira para modelos quadráticos de escores fatoriais rotacionais. Dissertação de Mestrado, Universidade federal de Itajubá. 2019.

LINDERMAN, K. et al. Six Sigma: a goal-theoretic perspective. *Journal of Operations Management*, v. 3, n. 21, p. 193-203, 2003.

LINDERMAN, K., SCHROEDER, R.G. AND CHOO, A.S, “Six sigma: the role of goal in improvement teams”, *Journal of Operations Management*, Vol. 24, pp. 779-90. 2006.

LINDERMAN, K., R. G. SCHROEDER, AND J. SANDERS. A knowledge framework underlying process management. *Decision Sciences* 41, no. 4:689–719. 2010.

LOVELL, K. Production frontiers and productive efficiency. In: *The measurement of productive efficiency: techniques and applications* [editado por H. Fried, K. Lovell e S. Schmidt]. Oxford University Press, 3-67. 1993.

LU, Y.; XU, Z. Recycling non-leaching gold from gold-plated memory cards: Parameters optimization, experimental verification, and mechanism analysis. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 162, p. 1518–1526, 2017.

LUNDIN, C. D. Fundamentals of Weld Discontinuities and Their Significance. Artigo. New York: Welding Research Council, 1984.

LUZ, E.R., ROMÃO, E.L., STREITENBERGER, S.C. *et al.* A new multiobjective optimization with elliptical constraints approach for nonlinear models implemented in a stainless steel cladding process. *Int J Adv Manuf Technol* **113**, 1469–1484 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06581-3>

MACHADO, I. G. Soldagem e técnicas conexas: processos. Porto Alegre: UFRGS, 1996.

MATTIUSSI A., ROSANO M., SIMEONI P. A decision support system for sustainable energy supply combining multi-objective and multi-attribute analysis: An Australian case study. *Decis Support Syst* 57:150–159. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2013.08.013>

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3ª Edição atualizada, Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MARTINS, Roberto Antonio; MELLO, Carlos Henrique Pereira; TURRIONI, João Batista. Guia para elaboração de monografia e TCC em Engenharia de Produção. São Paulo: Atlas, 2014.

MARQUES, Rui Cunha; SILVA, Duarte. Análise da variação da produtividade dos serviços de água portugueses entre 1994 e 2001 usando a abordagem de malmquist. *Pesqui. Oper.*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, p. 145-168, Apr. 2006.

MAST, J.; LOKKERBOL, J. An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. *International Journal of Production Economics*. Vol. 139, Issue 2, pp. 604-614. 2012.

MENDEZ, P.F.; Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Applications to High Productivity Arc Welding. MIT, 1999, pag. 113.

MIGUEL, V. & MARÍN-ORTIZ, F. & MANJABACAS, M. & MARTÍNEZ-CONESA, E. & MARTÍNEZ, A. & COELLO, J. Optimización multiobjetivo del proceso de soldeo GMAW de la aleación AA 6063-T5 basado en la penetración y en la zona afectada térmicamente. *Rev Metal* 2015 51:1–10. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.037>

MIRANDA, Edvan Cordeiro de et al . Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio. *Soldag. insp.*, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 180-190, June 2015.

MONTGOMERY, D. C. Design and Anaylsis of Experiments. 8th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

MOURA, D.; BARCELOS, V.; SAMANAMUD, G. R. L.; FRANÇA, A. B.; LOFRANO, R.; LOURES, C. C. A.; NAVES, L. L. R.; AMARAL, M. S.; NAVES, F. L. Normal boundary intersection applied as multivariate and multiobjective optimization in the treatment of amoxicillin synthetic solution. *Environmental monitoring and assessment*, v. 190, n. 3, p. 140, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6523-8>

MORORÓ, B. O. (2008), Modelagem Sistêmica do Processo de Melhoria Contínua de Processos Industriais Utilizando o Método Seis Sigma e Redes de Petri, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MURAWWI E AI, MOHAMMED A, ALIP Z, EI-HAG A (2013) Optimization of corona ring design for a 400KV non-ceramic insulator. 2013 IEEE Electr Insul Conf EIC 2013 370–373. <https://doi.org/10.1109/EIC.2013.6554269>

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiments. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C.; ANDERSON-COOK, C.M. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 3 ed. New York, NY, USA: Wiley, 2009.

MYERS, R. H., Montgomery, D. C., Vining, G. G., Robinson, T. J., 2010. Generalized Linear Models with Applications in Engineering and the Sciences

NASIRI, R.; ARSALANI, N. Synthesis and application of 3D graphene nanocomposite for the removal of cationic dyes from aqueous solutions: Response surface methodology design. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 190, p. 63–71, 2018.

NAVES, F. L.; PAULA, T. I. de; BALESTRASSI, P. P.; BRAGA, W. L. M.; SAWHNEY, R. S.; PAIVA, A. P. de. Multivariate Normal Boundary Intersection based on rotated factor scores: A multiobjective optimization method for methyl orange treatment. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 143, p. 413–439, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.092>

OKUMURA, T. & TANIGUCHI, C., 1982, “Engenharia de Soldagem e Aplicações”, LTC, Rio de Janeiro, Brasil.

OUJEBBOUR, F., HABBAL, A.; ELLAIA R. Optimization of concurrent criteria in the stamping process, *Proceedings of 2013 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, Rabat, pp. 1-10, 2013.

PAIVA, A.P., PAIVA, E.J., FERREIRA, J.R. *et al.* A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. *Int J Adv Manuf Technol* **43**, 631–643 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1745-5>

PAIVA, A. P.; COSTA, S. C., PAIVA, E. J.; BALESTRASSI, P. P.; FERREIRA, J. R. Multi-objective optimization of pulsed gas metal arc welding process based on weighted principal component scores. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* volume 50, pages 113–125 (2010)

PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. *The six sigma way: how GE, Motorola, and other top companies are honing their performance.* New York: McGraw-Hill, 2000.

PEDROSO, M. C.; CORRÊA, H. L. Sistemas de Programação da Produção com Capacidade Finita: Uma Decisão Estratégica?. *RAE – Revista de Administração de Empresas*, v. 36, n. 4, p. 60-73, 1996.

PEREIRA, J. C. R. *Análise de dados qualitativos: estratégias metodológicas para as ciências da saúde, humanas e sociais.* São Paulo: Edusp, 2001.

Perfil das Micro Empresas e Empresas de Pequeno Porte, Sebrae, 2018. Disponível em <https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/RO/Anexos/Perfil%20das%20ME%20e%20EPP%20-%2004%202018.pdf>, acessado em 18/05/2021.

PIERCY, N.; RICH, N. Lean transformation in the pure service environment: the case of the call service centre, *International Journal of Operations & Production Management*, v. 29, n. 1, p. 54-

76, 2009.

POZA, P.; MÚNEZ, C. J.; GARRIDO-MANEIRO, M. A.; VEZZÙ, S.; RECH, S.; TRENTIN, A. Mechanical properties of Inconel 625 cold-sprayed coatings after laser remelting. Depth sensing indentation analysis. *Surface & Coatings Technology*, v. 243, n. 243, p. 51-57, 2014.

POLMEAR, I.J, *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*. Butterworth Heinemann. 4th ed., 1996.

PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P. K. D. V. Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 164-165, p.1106-1112, 2005.

RAO, S. S. *Engineering optimization: theory and practice*. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

REZAEI, A.; EHSANIFAR, M.; WOOD, D.A. Reducing welding repair requirements in refinery pressure vessel manufacturing: a case study applying six sigma principles. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 13(3), pp. 1089-1102. 2019.

RIBEIRO R, ROMÃO EL, LUZ E, GOMES JH, COSTA S. Optimization of the Resistance Spot Welding Process of 22MnB5-Galvannealed Steel Using Response Surface Methodology and Global Criterion Method Based on Principal Components Analysis. *Metals*. 2020; 10(10):1338. <https://doi.org/10.3390/met10101338>

SALAH, S.; RAHIM, A.; CARRETERO, J.A. The Integration of six sigma and lean management. *International Journal of Lean Six Sigma*, v.1, n.3, p. 249-274, 2010.

SAHEB, N.; IQBAL, Z.; KHALIL, A.; HAKEEM, A.S.; AL-AQEELI, N.; LAOUI, T.; ALQUTUB, A.; KIRCHNER, R. Spark plasma sintering of metals and metalmatrix nanocomposites: a review. *Journal of Nanomaterials*. v.2012, article ID 983470, 13 pages, 2012.

SAKTHIVEL, P.; MANOBBALA, V.; MANIKANDAN T.; SALIK, Z. M. A.; RAJKAMAL G. Investigation on mechanical properties of dissimilar metals using MIG welding. *Materialstoday: Proceedings* In press, 2020.

SAMMONS, M. Inverter-based GTA welding machines improve fabrication. *Welding Journal*, v.79, n.5, may 2000.

SANTIAGO, K. G.; MOTTA, M. F. Exploração de Parâmetros do Processo MIG/MAG Duplo Arame para Aplicação em Revestimento de Ligas de Níquel com Proposta de Custeamento Direto do Processo. *CONSOLDA*. 40. 2014. São Paulo.

SENTHIL, S.M.; PARAMESHWARAN, R.B; RAGU NATHAN, S.C; BHUVANESH KUMAR, M.A; DEEPANDURAI, K.A. A multi-objective optimization of the friction stir welding process using RSM-based-desirability function approach for joining aluminum alloy 6063-T6 pipes. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020.

SCHROEDER, R.G.; LINDERMAN, K.; LIEDTKE, C.; CHOO, A.S. Six sigma: definition and underlying theory. *Journal of Operations Management*, v.26, n.4, p. 536-54, 2008.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; NORRISH J.; LUCAS, W. Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: Contributions to a New IIW Classification. *IIW Doc. XII-1960-09*, 2009.

SHUKLA, P.K.; DEB, K. On finding multiple Pareto-optimal solutions using classical and evolutionary generating methods. *European Journal of Operational Research*, 181, pp. 1630-1652. 2007

SINGH D.; RAO P.V. A surface roughness prediction model for hard turning process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 32, p. 1115-1124, 2007.

SOUZA, D; et al. Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito, *Soldag. insp. São Paulo*, Vol. 16, No. 1, 2011, 022-032 pp.

SPEARMAN, C. (1904). 'General intelligence,' objectively determined and measured. *The American Journal of Psychology*, 15(2), 201–293. 1904. <https://doi.org/10.2307/1412107>

SPECTOR, R., “How constraints management enhances lean and six sigma”, *Supply Chain Management Review*, Vol.10 No.1, pp.42-7. 2006.

THOMAS, W. M.; JOHNSON, K. I.; WIESNER, C. S. Friction stir welding: recent developments in tool and process technologies. *Advanced Engineering Materials*, v. 5, n. 7, p. 485, 489, 2003.

THURSTONE, L.L. *Os vetores da mente: Análise de múltiplos fatores para o isolamento de características primárias*. University of Chicago Press. 1935. <https://doi.org/10.1037/10018-000>

TORRES, A. F.; ROCHA, F. B.; ALMEIDA, F. A., GOMES, J. H. F.; PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P., Multivariate Stochastic Optimization Approach Applied in a Flux-Cored Arc Welding Process, *IEEE Access*, v. 8, p. 61267-61276, 2020.

UY, M.; TELFORD, J. K., "Optimization by Design of Experiment techniques," *2009 IEEE Aerospace conference*, 2009, pp. 1-10, doi: 10.1109/AERO.2009.4839625.

VAHIDINASAB, V.; JADID, S. Multiobjective environmental/techno-economic approach for strategic bidding in energy markets. *Applied Energy*, Volume 86, Issue 4, Pages 496-504. 2009

VALDENEBRO, Jose L. Meseguer; CONESA, Eusebio J. Martinez, SERNA, Jose and PORTOLES Antonio. INFLUENCE OF THE WELDING PARAMETERS ON THE HEAT AFFECTED ZONE FOR ALUMINUM WELDING. *THERMAL SCIENCE*, , Vol. 20, No. 2, pp. 643-653. 2016.

VALDENEBRO, Jose L. Meseguer; PORTOLÉS e OÑORO, J.. Numerical study of TTP curves upon welding of 6063-T5 aluminium alloy and optimization of welding process parameters by Taguchi's method. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 23. 341-348. 2016.

VALDENEBRO, Jose L. Meseguer; PORTOLÉS, Antonio; CONESA, Eusebio. Electrical parameters optimisation on welding geometry in the 6063-T alloy using the Taguchi methods. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 98. 2449–2460. 2018.

VALENTIN, J. L. **Ecologia numérica**: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos. Rio de Janeiro: Interciência, 2000.

VARGA, B.; FAZAKAS, E. E VARGA, L. K. (2009) Dilatometer study of rapidly solidified aluminium-silicon based alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, n.144, 2009. The 13th International Conference on Rapidly Quenched and Metastable Materials.

VILLANI, Paulo Marques; MODENEZI, P J; BRACARENSE, A Q. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. 4ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992

ZELLER, R.A. E CARMINES, E.G. *Measurement in the Social Sciences: The Link between Theory and Data*. Cambridge University Press, Nova York. 1980.

ZHANG, Z.; LIU, Z.; LU, J.; SHEN, X.; WANG, F.; WANG, Y. The sintering mechanism in spark plasma sintering – Proof of the occurrence of spark discharge. *Scripta Materialia*. 81: 56-59, 2014.

ZHANG, R. & WANG, W. Learning linear and nonlinear PCA with linear programming. *Neural Processing Letters*, 33(2), pp.151–170. 2011.

## PRODUÇÕES BIBLIOGRÁFICAS

Luz ER, Romão EL, Streitenberger SC, et al (2021) A new multiobjective optimization with elliptical constraints approach for nonlinear models implemented in a stainless steel cladding process. *Int J Adv Manuf Technol.* <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06581-3>

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2021) 113:1469–1484  
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-06581-3>

---

ORIGINAL ARTICLE 

### A new multiobjective optimization with elliptical constraints approach for nonlinear models implemented in a stainless steel cladding process

Eduardo Rivelino Luz<sup>1</sup> · Estevão Luiz Romão<sup>1</sup> · Simone Carneiro Streitenberger<sup>1</sup> · José Henrique Freitas Gomes<sup>1</sup> · Anderson Paulo de Paiva<sup>1</sup> · Pedro Paulo Balestrassi<sup>1</sup>

Received: 28 September 2020 / Accepted: 28 December 2020 / Published online: 6 February 2021  
 © The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag London Ltd. part of Springer Nature 2021

**Abstract**  
 This paper proposes a new multiobjective optimization with elliptical constraints approach for nonlinear models implemented in a cladding process of ABNT 1020 carbon steel plate using austenitic ABNT 316L stainless steel cored wire. Stainless steel stands out among the cladding materials as it allows obtaining surfaces with determined desirable characteristics from lower cost materials. This kind of process may be controlled by a relatively small number of input variables, i.e., the wire feed rate (*WF*), voltage (*V*), welding speed (*WS*), and the distance from the contact tip to the workpiece (*N*). Besides that, many outputs can be evaluated and simultaneously optimized. In the present paper, dilution (*D*), yield (*Y*), convexity index (*CI*), and penetration index (*PI*) were investigated. In order to consider the problem's multivariate nature, techniques such as factor analysis and Bonferroni's multivariate intervals were applied combined with elliptical constraints. The response variables were mathematically modeled using Poisson regression, and the obtained results were satisfactory since accurate models were achieved. The normal boundary intersection (NBI) method produced a set of viable configurations for the input variables that allows the experimenter to encounter the best system setup regarding the importance level of each response. Feasible and non-dominated solutions were found which means that the best possible scenario considering all the constraints was reached.

**Keywords** Cladding · Design of experiments · Multiobjective constrained optimization · Factor analysis · Simultaneous confidence intervals

Ribeiro R, Romão EL, Costa S, et al (2020) Optimization of the resistance spot welding process of 22MnB5-galvannealed steel using response surface methodology and global criterion method based on principal components analysis. *Metals (Basel)* 10: <https://doi.org/10.3390/met10101338>



*metals*



*Article*

## Optimization of the resistance spot welding process of 22MnB5-galvannealed steel using response surface methodology and global criterion method based on principal components analysis

Robson Ribeiro \*, Estevão Romão, Eduardo Luz, José Gomes and Sebastião Costa

Institute of Industrial Engineering and Management, Federal University of Itajubá, Itajubá 37500-903, Brazil

\* Correspondence: [robsonrcardosoribeiro@gmail.com](mailto:robsonrcardosoribeiro@gmail.com)

Received: date; Accepted: date; Published: date

**Abstract:** The boron steel 22MnB5-galvannealed is extensively used in the hot stamping process to produce car anti-collision structure parts. Furthermore, in the automotive industry, the resistance spot welding (RSW) is an important process in automotive body construction, and the 22MnB5-galvannealed steels are a big challenge to the joining methods because their microstructure and mechanical properties are different from those of the conventional steels. In view of this, the present paper aims to optimize the parameters of the RSW process of the 22MnB5-galvannealed steel. Initially, the goal was to remove the galvannealed coating and in the next stage, the following responses were maximized: the nugget width, the nugget cross-sectional area, the penetration, the strength, the joint efficiency and the energy absorption whereas the indentation, heat affected zone and separation were used as constraints. The process parameters selected were the effective welding time, the effective welding current, the quenching time and the upslope time. Response surface methodology (RSM) was applied jointly with the global criterion method based on principal components. The results of the multiobjective optimization are close to the individual targets for each response, showing the importance of considering the correlation structure when dealing with correlated responses.

Luz ER, Romão EL, Streitenberger SC, Ribeiro RRC (2020). Um estudo do processo de soldagem MIG em alumínio liga 6063 (AA6063) e as características de gerenciamento dos insumos envolvidos no processo. Revista Científica da FAI, Santa Rita do Sapucaí, MG, v. 20, n.1, p. 141-152, 2020.

Engenharia

**UM ESTUDO DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG EM ALUMÍNIO LIGA 6063  
(AA6063) EAS CARACTERÍSTICAS DE GERENCIAMENTO DOS INSUMOS  
ENVOLVIDOS NO PROCESSO**

Eduardo Rivelino da Luz<sup>8</sup>  
Estevão Luiz Romão<sup>9</sup>  
Simone Carneiro Streitenberger<sup>3</sup>  
Robson Raimundo Cardoso Ribeiro<sup>4</sup>

**RESUMO**

O presente trabalho tem como método de pesquisa um estudo bibliográfico sobre as características da liga de alumínio 6063 (AA6063) e o gerenciamento produtivo do processo de soldagem MIG aplicado a esta liga. Os objetivos desta pesquisa buscam apresentar conceitos do processo de soldagem no processo MIG, destacar a importância da qualificação da mão de obra do soldador, bem como apresentar as especificações de procedimentos de soldagem e a sua importância. Este trabalho também apresenta a utilização, gestão e armazenamento dos consumíveis utilizados. Por fim, a conclusão deste estudo propõe estudos práticos envolvendo o processo de soldagem em AA 6063 através de experimentos mais robustos.

**Palavras-chave:** Soldagem. Gerenciamento. Alumínio Liga 6063 (AA6063).

**ABSTRACT**

This paper is a bibliographic study about the characteristics of aluminum alloy 6063 (AA6063) and the productive management of the MIG welding process applied to this alloy. The objectives of this research are to present concepts of the welding process in the MIG process, to highlight the importance of the qualification of the welder's workforce, as well as to present the specifications of welding procedures and their importance. This work also presents the use, management and storage of the consumables used. Finally, the conclusion of this study proposes practical studies involving the welding process in AA 6063, through more robust experiments.

**Keywords:** Welding. Management. Aluminum Alloy 6063 (AA6063).

<sup>8</sup> Professor Me. do curso de Engenharia da Produção na FAI e Doutorando em Engenharia da Produção na Universidade Federal de Itajubá

<sup>9</sup> Doutorando em Engenharia da Produção na Universidade Federal de Itajubá

<sup>3</sup> Doutoranda em Engenharia da Produção na Universidade Federal de Itajubá

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia da Produção na Universidade Federal de Itajubá

XXXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
 "Os desafios da engenharia de produção para uma gestão inovadora da Logística e Operações"  
 Santos, São Paulo, Brasil, 15 a 18 de outubro de 2019.

## MINIMIZAÇÃO DAS PERDAS DE CORTE NO PROCESSO DE MONTAGEM DE UMA ESTRUTURA METÁLICA

**Simone Carneiro Streitenberger** (Instituto de Engenharia de  
Produção e Gestão)

simone.p4@gmail.com

**Estevão Luiz Romão** (Instituto de Engenharia de Produção e  
Gestão)

estevaoromao@unifei.edu.br

**Andreza de Aguiar Hugo** (Instituto de Engenharia de Produção e  
Gestão)

andreza\_hugo@yahoo.com.br

**Kelly Carla Dias Lobato** (Instituto de Engenharia de Produção e  
Gestão)

kcarladl@gmail.com

**EDUARDO RIVELINO DA LUZ** (Instituto de Engenharia de  
Produção e Gestão)

eduardoluz@mescaldeiraria.com.br



*Considerando a necessidade de minimizar as perdas no processo de corte de uma organização, o presente trabalho tem como objetivo a otimização desta atividade em uma empresa situada no Sul de Minas Gerais. Para tanto, foi aplicada a Programação Linear na formulação de um problema de corte de barras de aço utilizadas na fabricação de estruturas metálicas. Assim, foi possível constatar que caso a empresa tivesse adotado os conceitos de otimização para minimização de perdas, teria sido possível reduzir os gastos financeiros em 87%.*

*Palavras-chave: Programação Linear, Problema de Corte, Otimização*



## **MODELAGEM DO PROCESSO DE GERENCIAMENTO DA SOLDAGEM UTILIZANDO O BPMN**

**JOAO VICTOR RIBEIRO SANTOS** - joaovictorribeirosan@gmail.com  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

**EDUARDO RIVELINO DA LUZ** - eluz7777@gmail.com  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

**YAGO TOLEDO LIMA** - yagotoledolima@gmail.com  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

**RODRIGO DE PAULA FONSECA** - rodrigopfdigo@gmail.com  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

**FABIANO LEAL** - fleal@unifei.edu.br  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

*Área:* 1 - GESTÃO DA PRODUÇÃO

*Sub-Área:* 1.7 - GESTÃO DE PROCESSOS PRODUTIVOS

*Resumo:* DEVIDO À IMPORTÂNCIA DO GERENCIAMENTO POR PROCESSOS, BEM COMO A ESCASSA LITERATURA SOBRE GERENCIAMENTO DA SOLDAGEM, O PRESENTE TRABALHO OBJETIVA APRESENTAR UM MODELO DO PROCESSO DE