

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

Fabício Alves de Almeida

**Análise Multivariada do Sistema de Medição de
um Processo de Solda a Ponto por Resistência
Elétrica utilizando Componentes Principais
Ponderados**

Itajubá, Fevereiro de 2017

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

Fabício Alves de Almeida

**Análise Multivariada do Sistema de Medição de
um Processo de Solda a Ponto por Resistência
Elétrica utilizando Componentes Principais
Ponderados**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de Concentração: Engenharia de Produção

Orientador: Prof. José Henrique de Freitas Gomes, Dr.

Itajubá, Fevereiro de 2017

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

Fabício Alves de Almeida

**Análise Multivariada do Sistema de Medição de
um Processo de Solda a Ponto por Resistência
Elétrica utilizando Componentes Principais
Ponderados**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 10 de fevereiro de 2017, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi (UFPB)

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa (UNIFEI)

Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes (Orientador)

Itajubá, Fevereiro de 2017

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Aloísio e Helena, pelo exemplo de vida, dedicação e trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças a cada dia e pelo dom da vida.

À minha família, meus pais, Aloísio Donizete de Almeida e Helena Maria Mendonça de Almeida, que sempre acreditaram e incentivaram em meu crescimento espiritual e intelectual, à minha irmã Fabianne e à Mel.

Ao meu orientador e amigo, José Henrique de Freitas Gomes, pela amizade, contribuições, ensinamentos e por confiar na minha capacidade para realização deste trabalho.

Ao incentivo e apoio de Antonio Suerlilton Barbosa da Silva e José Magno da Silva, no qual me motivaram para esta jornada.

Aos professores Anderson Paulo de Paiva, Pedro Paulo Balestrassi, Carlos Henrique Pereira Mello e José Arnaldo Barra Montevechi pelos ensinamentos, orientações e contribuições para meu crescimento acadêmico.

Ao professor Sebastião Carlos da Costa pelo apoio, incentivo e esclarecimentos no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos da pós-graduação, em especial Guilherme Ferreira Gomes, Vinícius Renó de Paula, Bruno Monti Nardini, Gabriela Belinato, Taynara Incerti de Paula, Rachel Campos Sabioni, Mariana Bernardes, João Paulo Barbieri, Wesley Gabriel de Mendonça Pinto, Leandro Framil Amorim e Nathália Fernandes Barros, pela amizade, convivência e apoio.

Aos técnicos do laboratório de metrologia dimensional, ensaios destrutivos e não destrutivos e de materiais e metalurgia, em especial a Wlamir, Ângelo, Claudemiro e Marcos, pelo apoio e contribuição para realização deste trabalho.

Aos demais professores do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da UNIFEI, pela formação e conhecimento adquirido.

A todos meus amigos que, direta ou indiretamente, contribuem para minha formação pessoal e profissional.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

EPÍGRAFE

“There's no knowledge that is not power”

Ralph Waldo Emerson

RESUMO

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (*RSW*) apresenta ampla aplicabilidade na indústria, principalmente no setor automotivo, devido à sua rápida execução, não utilização de consumíveis e adequação a operações automáticas. Sendo um processo de grande destaque, a busca pela melhoria da qualidade do produto é incessante e em um processo já capaz, não deve haver erro de medição. O *RSW* apresenta diversas características da qualidade e a análise de múltiplas grandezas correlacionadas pode ser melhor abordada utilizando-se técnicas multivariadas. Assim, esta dissertação busca aplicar o estudo de repetitividade e reprodutibilidade de caráter multivariado (*GR&R_m*) com o objetivo de analisar o sistema de medição de um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica fazendo uso de uma estratégia por componentes principais ponderados, que se caracteriza por um método que trabalha com o escores dos componentes principais, ponderando-os pelo seus autovalores, a partir de grandezas correlacionadas. Para o estudo fora selecionado sete características da qualidade, duas respostas para ensaios mecânicos destrutivos e cinco para caracterização geométrica do ponto soldado. Para complementar as análises, realizou-se a comparação com os instrumentos convencionais de metrologia para duas características da qualidade distintas. No que diz respeito aos resultados, os ensaios destrutivos identificaram uma falta de repetitividade nas medições de uma das máquinas, favorecendo à realização de possíveis melhorias neste sistema. Para a caracterização geométrica do ponto soldado, o *ndc_m* apresentou-se como aceitável, porém o estudo *GR&R_m* se classificou como marginal, podendo variar para um valor até 6,94, mostrando que este SM tem capacidade de apresentar melhorias e ter classificação aceitável, diante ao intervalo de confiança estabelecido. Na análise comparativa com instrumentos convencionais de metrologia, verificou-se que a coerência das medições através do analisador de imagens se apresentou superior em ambos os casos avaliados.

Palavras-Chaves: Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica; Análise do Sistema de Medição; Repetitividade e Reprodutibilidade; Componentes Principais Ponderados.

ABSTRACT

The process of resistance spot welding (RSW) has wide application in the industry especially in the automotive industry due to its fast execution, non-use of consumables and adaptation to automatic operations. Being a process of great prominence the quest for improving the quality of the product is incessant and in an already capable process there should be no measurement error. The RSW has several quality characteristics and the analysis of multiple correlated greatness can be better approached using multivariate techniques. In this way, this dissertation seeks to explore the application of a multivariate repeatability and reproducibility study (GR&R_m) with the objective of analyzing the measurement system of an resistance spot welding process using a weighted principal components strategy, which is characterized by a method that works with the scores of the main components, weighting them by their eigenvalues, from correlated greatness. For the study, seven quality characteristics were selected: two responses to destructive mechanical tests and five for geometric characterization of the welded point. For to complement analyzes, a comparison was made with conventional metrology instruments for two different quality characteristics. Regarding the results, the destructive tests identified a lack of consistency in the measurements of one of the machines, enabling improvements in this system. For geometric characterization of the welded point, ndc_m was acceptable, but the GR&R_m study was classified as marginal and can be varied up to 6.94, showing that this measuring system has the capacity to present improvements and to have an acceptable classification in relation to the established confidence interval. In the comparative analysis with conventional instrument, it was verified that the coherence of the measurements through the image analyzer was superior in both cases evaluated.

Keywords: Resistance Spot Welding; Measurement System Analysis; Repeatability and Reproducibility; Weighted Principal Component.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de processo de soldagem por resistência elétrica.....	8
Figura 2.2 - Princípios e resistividades da soldagem a ponto.....	9
Figura 2.3 - Ciclo de Soldagem	11
Figura 2.4 – Equipamento de soldagem do tipo estacionário.....	12
Figura 2.5 – Geometria da solda a ponto.....	13
Figura 2.6 – Penetração da solda.	14
Figura 2.7 – Teste por cisalhamento.....	15
Figura 2.8– Teste por tensão cisalhante da junta soldada.....	16
Figura 2.9 - Teste de arrancamento.	16
Figura 2.10 - Teste de tração axial.	17
Figura 2.11 – Variabilidade do Sistema de Medição.....	19
Figura 2.12 – <i>Bias</i> e linearidade de um processo.	21
Figura 2.13 – Representação gráfica de repetitividade e reprodutibilidade	22
Figura 2.14 – Componentes de variação da variância combinada de um sistema de medição.	22
Figura 2.15 – Relação entre <i>Bias</i> e Repetitividade.....	23
Figura 2.16 – Interpretação geométrica dos PC's.....	33
Figura 2.17 – Fluxograma do método dos componentes principais ponderados (WPC).	35
Figura 3.1 – Fluxograma detalhado das etapas da pesquisa	40

Figura 3.2 – Dimensionalidade dos corpos de prova.....	43
Figura 3.3 – Máquina estacionária de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizada.....	45
Figura 3.4 – Eletrodo de cobre cromo zircônio.....	45
Figura 3.5 – Etapas do ensaio metalográfico.....	46
Figura 3.6 – Máquina de corte utilizada.....	46
Figura 3.7 – Ilustrações do processo de embutimento.....	47
Figura 3.8 – Máquina de lixamento semiautomática utilizada.....	47
Figura 3.9 – Equipamento para análise visual.....	48
Figura 3.10 – Imagens macroscópicas das soldas a ponto para o estudo GR&R multivariado.....	49
Figura 3.11 – Equipamentos utilizados para o teste de cisalhamento.....	50
Figura 3.12 – Exemplo de medições realizadas para o teste de cisalhamento.....	51
Figura 4.1 – Dendograma dos componentes pelas respostas no ensaio destrutivo.....	55
Figura 4.2 – Gráficos do estudo GR&R por WPC para ensaios destrutivos.....	57
Figura 4.3 - <i>Gage Run Chart</i> para ensaios destrutivos.....	58
Figura 4.4 – Dendograma dos componentes pelas respostas da caracterização geométrica.....	61
Figura 4.5 – Gráficos do estudo GR&R por WPC para características geométricas.....	63
Figura 4.6 - <i>Gage Run Chart</i> para caracterização geométrica do ponto.....	64
Figura 4.7 – Relógio apalpador <i>Mitutoyo</i>	65
Figura 4.8 – <i>Boxplot</i> para profundidade de indentação.....	67
Figura 4.9 - Paquímetro Universal <i>Digimess</i>	69

Figura 4.10 – Medições do ponto de solda.....	69
Figura 4.11– <i>Boxplot</i> para diâmetro do ponto	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Artigos que realizam MSA para RSW	4
Tabela 2.1 - Classificação de trabalhos que utilizam RSW.....	18
Tabela 2.2 – Rede de efeitos de desempenho do sistema de medição.....	20
Tabela 2.3 – Critérios de aceitação para o Sistema de Medição	24
Tabela 2.4 – Estudos que utilizam métodos univariados para GR&R	26
Tabela 2.5 – Componentes de variação para o GR&R.....	28
Tabela 2.6 – Estudos que utilizam métodos multiivariados para GR&R.....	29
Tabela 2.7 – Matrizes de Variância-Covariância	30
Tabela 2.8 – Matrizes de Médias Quadráticas.....	32
Tabela 3.1 – Limite dos parâmetros de regulação para um processo de soldagem	41
Tabela 3.2 – Arranjo Fatorial Completo.....	42
Tabela 3.3 – Matriz Experimental	43
Tabela 3.4 – Composição química do aço	43
Tabela 3.5 – Especificações da dimensionalidade dos corpos de prova	44
Tabela 4.1 – Análise da correlação para as respostas RC e $DF_{Máx}$	53
Tabela 4.2 – Análise de componentes principais para RC e $DF_{Máx}$	54
Tabela 4.3 – Análise de variância para os escores WPC para ensaio destrutivo.....	55
Tabela 4.4 – Classificação do sistema de medição para ensaios destrutivos utilizando WPC.	56

Tabela 4.5 – Análise da correlação para as respostas <i>LI, PI, P, DP e AF</i>	59
Tabela 4.6 – Análise de componentes principais para <i>LI, PI, P, DP e AF</i>	60
Tabela 4.7 – Análise de variância para os escores <i>WPC</i> para caracterização geométrica	61
Tabela 4.8 – Classificação do <i>SM</i> para caracterização geométrica utilizando <i>WPC</i>	62
Tabela 4.9 – Testes pareados para profundidade de indentação.....	66
Tabela 4.10 - GR&R para profundidade de indentação	68
Tabela 4.11 – Testes pareados para diâmetro do ponto.....	70
Tabela 4.12 - GR&R para diâmetro do ponto	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
ANOVA	Método Análise de Variância
AWS	Sociedade americana de soldagem (<i>American Welding Society</i>)
CGLab	Laboratório de Metrologia Dimensional
CTQ	Característica Crítica para a Qualidade (<i>critical-to-quality</i>)
DF	Grau de liberdade (<i>Degree of Freedom</i>)
ESQ	Erro da soma dos quadrados (<i>error sum of squares</i>)
FW	Soldagem por centalhamento (<i>Flash Welding</i>).
GR&R	Estudo de Repetitividade e Reprodutividade do Instrumento de Medição (<i>Gage Repeatability and Reproducibility</i>)
GUM	Manual para Expressão de Incerteza de Medição (<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>)
HFIW	Soldagem por alta frequência (<i>High Frequency Induction Welding</i>)
ISO	Organização Internacional de Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
LEN	Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos
LMM	Laboratório de Metalurgia e Materiais
LSO	Laboratório de Soldagem
MANOVA	Método Análise Multivariada de Variância
MQE	Matriz de média quadrática para o termo de erro
MQO	Matriz de média quadrática para o fator operador

MQP	Matriz de média quadrática para o fator peça
MQPO	Matriz de média quadrática para o termo de interação peça*operador
MS	Média quadrática (<i>Mean Square</i>)
MSA	Análise do sistema de medição (<i>Measurement System Analysis</i>)
<i>ndc</i>	Número de categorias distintas (<i>Number of Distinct Categories</i>)
PC	Componente principal (<i>Principal Component</i>)
PCA	Método Análise de componentes principais (<i>Principal Component Analysis</i>)
PW	Soldagem por projeção (<i>Projection Welding</i>)
R&R	Repetitividade e Reprodutividade (<i>Repeatability and Reproducibility</i>)
RSEW	Soldagem por costura (<i>Resistance Seam Welding</i>)
RSW	Soldagem a ponto por resistência elétrica (<i>Resistance Spot Welding</i>)
SM	Sistema de medição
SNR	Relação sinal-ruído (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
SS	Soma de quadrados (<i>Sum of Squares</i>)
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UP	Soldagem de topo (<i>Upset Welding</i>)
WPC	Componentes Principais Ponderados (<i>Weighted Principal Components</i>)
ZTA	Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

%Al	Porcentagem de Alumínio
%C	Porcentagem de Carbono
%Mn	Porcentagem de Manganês
%P	Porcentagem de Fósforo
%S	Porcentagem de Enxofre
%Zn	Porcentagem de Zinco
$\hat{\Sigma}_P$	Matriz variância-covariância para processo
$\hat{\Sigma}_{SM}$	Matriz variância-covariância para sistema de medição
$\hat{\Sigma}_T$	Matriz variância-covariância para variação total
$\hat{\Sigma}_{repetitividade}$	Matriz variância-covariância para repetitividade
$\hat{\Sigma}_{reprodutibilidade}$	Matriz variância-covariância para reprodutibilidade
$\hat{\sigma}$	Estimativa de desvio padrão
u_c	Erro padrão combinado
σ_{SM}^2	Variabilidade devido ao sistema de medição
σ_T^2	Varição total
σ_p^2	Variabilidade devido ao próprio produto/processo
μ	Média dos valores medidos
A	Ampère
AF	Área da zona de Fusão

<i>bias</i>	Diferença entre o valor verdadeiro (valor de referência) e a média observada das medições de uma mesma característica em uma mesma peça
$DF_{Máx}$	Deformação na força máxima de ruptura
DP	Diâmetro do Ponto
E	Matriz de autovetores
F	Teste F (Fisher)
I_w	Intensidade da corrente elétrica
I_{preaq}	Corrente de Pré-Aquecimento
I_{solda}	Corrente de soldagem
k	Fator de cobertura
kgf	Quilograma-força
kN	Quilonewton
ℓ	Combinação linear
L	Matriz de autovalores
LI	Largura da Indentação
m	Multivariado
mm	Milímetros
N	Tamanho da amostra
o	Operadores
P	Penetração
p	Peças
PI	Profundidade de Indentação
Q	Energia térmica gerada

R	Resistência elétrica
r	Réplicas
RC	Resistência ao cisalhamento
s	Desvio padrão
t	Tempo
th	Espessura
T_{preaq}	Tempo de Pré-Aquecimento
T_{solda}	Tempo de soldagem
U	Incerteza expandida
V	Volts
Z	Matriz de dados padronizados
λ	Autovalor
Σ	Matriz de covariância

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto da pesquisa	1
1.2 Problemática	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo geral	2
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Justificativa do trabalho	3
1.5 Metodologia	4
1.6 Delimitações do trabalho	5
1.7 Estrutura do trabalho	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 Soldagem por Resistência Elétrica.....	7
2.1.1 Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica	7
2.1.2 Equipamentos e parâmetros de regulação	10
2.1.3 Qualidade da solda a ponto.....	12
2.1.3.1 Ensaio não destrutivo	14
2.1.3.2 Ensaio destrutivo	14
2.1.4 Classificação de trabalhos que utilizam solda a ponto por resistência elétrica ..	17

2.2	Análise do sistema de medição	17
2.3	GR&R	24
2.3.1	Métodos univariados	25
2.3.1.1	Método de análise de variância (ANOVA)	25
2.3.2	Métodos multivariados	27
2.3.2.1	Método de análise multivariada de variância (MANOVA)	29
2.3.2.2	Método de análise dos componentes principais (PCA).....	31
2.3.2.3	Método dos componentes principais ponderados (WPC)	34
2.4	Considerações finais	39
3.	MÉTODO DE PESQUISA	40
3.1	Aplicação do método de pesquisa.....	40
3.1.1	Planejamento do experimento	40
3.1.1	Execução dos experimentos	44
3.2	Preparação dos corpos de prova.....	46
3.3	Realização das medições	48
3.3.1	Ensaio destrutivo	48
3.3.2	Caracterização geométrica do ponto soldado	52
3.4	Considerações finais	52
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
4.1	GR&R-WPC para ensaios destrutivos	53

4.1.1	Considerações do estudo para ensaios destrutivos	57
4.2	GR&R-WPC para características geométricas do ponto	58
4.2.1	Considerações do estudo para caracterização geométrica do ponto.....	64
4.3	Comparação do SM por análise de imagens com equipamentos convencionais de metrologia.....	64
4.3.1	Medições para a profundidade de indentação.....	65
4.3.2	Medições para o diâmetro do ponto	68
4.3.3	Considerações sobre a análise dos instrumentos de medição.....	72
4.4	Considerações finais	72
5.	CONCLUSÃO.....	74
5.1	Contribuições do trabalho	76
5.2	Sugestões para estudos futuros	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	ANEXO A – Tabela de dados do ensaio destrutivo.....	91
	ANEXO B – Tabela de dados da caracterização geométrica	92
	ANEXO C – Tabela de dados dos instrumentos mecânicos de medição	95
	ANEXO D – Gráficos	97

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto da pesquisa

A solda a ponto por resistência elétrica (*RSW – Resistance Spot Welding*) é um método promissor para junção de estruturas finas, caracterizando-se por uma alta velocidade de operação e podendo ser adequado para operações automáticas (ZHANGA *et al.* 2016; BI *et al.* 2016; POURANVARI *et al.* 2013; LI *et al.* 2013; LI *et al.* 2011). Apresenta fácil manuseio, múltiplas aplicações, configuração de *setup* simples e baixo custo, que favorecem a utilização da solda a ponto por resistência elétrica em processos industriais para produtos de alta qualidade (PEREIRA *et al.* 2009).

Marques *et al.* (2009) afirmam que os equipamentos utilizados neste processo (RSW) são cada vez mais aperfeiçoados a partir de novas metodologias para ajuste de parâmetros, melhorando assim o controle e capabilidade do processo.

A busca das indústrias por produtos sem defeitos e com baixo custo incentiva o aumento da eficiência dos processos, evitando perdas em diversos segmentos, onde o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é amplamente estudado, principalmente em setores industriais. Porém, atribuir melhorias apenas visando a produção pode não favorecer de maneira significativa o processo, uma vez que a variabilidade pode estar atribuída ao sistema de medição. Portanto, deve-se analisar a variabilidade atribuída tanto ao processo, quanto ao sistema de medição (PERUCHI, 2011).

Todo processo que envolve medição apresenta certa variabilidade e esta variação pode ser do processo de fabricação e/ou do sistema de medição (PEREIRA *et al.* 2016; PERUCHI *et al.* 2013; WOODALL e BORROR, 2008; LI e AL-REFAIE, 2008; COSTA *et al.* 2005; SENOL, 2004), caracterizando o erro de medição como um princípio de variação a ser evitado, que se encontra em processos de natureza experimental. Esses princípios de variação são mensurados para verificar se a variação apresentada no sistema de medição é menor que a variação verdadeira deste processo de fabricação (PEREIRA *et al.* 2016; PERUCHI *et al.* 2014; PERUCHI *et al.* 2013; WANG e CHIEN, 2010; AL-REFAIE e BATA, 2010; SHIAU, 2001).

Peruchi *et al.* (2014), afirmam que a técnica mais adequada na avaliação da variabilidade de um sistema de medição, considerando um instrumento calibrado a priori, é o Estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade (*GR&R – Gage Repeatability and Reproducibility*) que se

caracteriza como um estudo particular da Análise do Sistema de Medição (*MSA – Measurement System Analysis*) onde se quantifica a variabilidade através da análise de variância (ANOVA). Entretanto, quando se deseja avaliar um processo que apresenta múltiplas respostas, deve-se priorizar uma técnica multivariada, uma vez que analisar respostas correlacionadas separadamente, pode fornecer resultados pouco satisfatórios.

Entre os métodos multivariados para análise do sistema de medição, alguns trabalhos trazem abordagens utilizando a Análise Multivariada de Variância (*MANOVA – Multivariate Analysis of Variance*). Porém, outras abordagens têm sido utilizadas para avaliar sistemas de medições que apresentam múltiplas respostas. Peruchi *et al.* (2013) analisa as características de qualidade correlacionadas para um estudo de repetitividade e reprodutibilidade (GR&R), fazendo uso da análise de componentes principais (*PCA – Principal Components Analysis*) que por sua vez são ponderadas pelos seus respectivos autovalores, denominado, assim, como o método de componentes principais ponderados (*WPC – Weighted Principal Components*).

1.2 Problemática

Segundo Paiva (2006), a quantidade de características de qualidade exigidas é proporcional ao nível de complexidade das necessidades do cliente final, atribuindo aos processos um aspecto multivariado. E o mesmo se refere ao processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Assim, tem-se os seguintes questionamentos, perante a medição deste processo:

- É possível afirmar que o sistema de medição (SM) de um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é confiável?
- Como a natureza multivariada do processo pode afetar o sistema de medição?

1.3 Objetivos

Diante a problemática apresentada na seção 1.2, tem-se o objetivo geral desta dissertação, seguido dos seus objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho se contempla em avaliar o estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade (GR&R) de caráter multivariado para avaliação do Sistema de Medição de um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.

1.3.2 Objetivos específicos

Com o intuito de cumprir com o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos também devem ser alcançados:

- Realizar uma avaliação do SM para respostas de medições realizadas através de ensaios destrutivos, comparando dois tipos de equipamentos;
- Realizar uma avaliação do SM para respostas de medições realizadas através das características geométricas do ponto soldado;
- Comparar os resultados das medições de algumas características de qualidade obtidas pelos mesmos operadores, porém utilizando procedimentos e instrumentos distintos.

1.4 Justificativa do trabalho

Em aplicações industriais, usualmente não se realiza medições durante a execução do processo, onde no setor automotivo se faz uso apenas de testes destrutivos. De maneira prática, as empresas utilizam métodos quantitativos para averiguar produtos e qualidades do processo. Mas antes de obter dados, segundo Majeske (2008), deve-se avaliar o dispositivo de medição a fim de garantir sua validação.

É possível encontrar na literatura diversos estudos que visam analisar processos voltados à manufatura que apresentam múltiplas características de qualidade, como: Wang (2012), Boone e Chakraborti (2012), Psarakis (2011), Chen e Chen (2008), Machado e Costa (2008), Pan e Jarrett (2007), Pan (2007), Chen *et al.* (2006), Yang and Rahim (2005), Chen *et al.* (2005) e Villalobos *et al.* (2005).

Entretanto, Wang e Chien (2010), afirmam que, estudos e pesquisas que abordam a análise de medição que apresentam múltiplas características, são pouco explorados.

A fim de analisar como a temática da análise do sistema de medição para o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é abordado na literatura, realizou-se uma busca nas bases de dados dos periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Os termos “*resistance spot welding*” e “*measurement system analysis*” foram definidos como expressões conjuntas para pesquisa. Do levantamento, alguns artigos foram encontrados e tem-se os principais contidos na Tabela 1.1.

A partir da Tabela 1.1 é possível verificar que, dentre os artigos analisados, o aço galvanizado é o mais utilizado, visto sua grande aplicação na indústria, principalmente no que

se refere ao setor automotivo. Pode-se inferir também que nenhum dos trabalhos que abordam a análise do sistema de medição para o processo de soldagem a ponto utilizam uma abordagem multivariada, evidenciando a existência de potenciais aplicações desta natureza.

Tabela 1.1 - Artigos que realizam MSA para RSW

Autor	Material	Tipo de ensaio	Tipo de abordagem
Degidi <i>et al.</i> (2016)	Titânio	Não destrutivo	Univariada
Wang <i>et al.</i> (2016)	Aço de baixo carbono	Destrutivo	Univariada
Xia <i>et al.</i> (2016)	Alumínio	Não destrutivo	Univariada
Podržaj e Simončič (2014)	Aço duplex	Não destrutivo	Univariada
Al-Jader <i>et al.</i> (2011)	Aço galvanizado	Destrutivo	Univariada
Lei <i>et al.</i> (2010)	DP600 e aço macio	Destrutivo	Univariada
Lai <i>et al.</i> (2009)	Aço galvanizado	Não destrutivo	Univariada
Klopčič <i>et al.</i> (2008)	Aço galvanizado	Destrutivo	Univariada
Hao <i>et al.</i> (1996)	Alumínio	Destrutivo	Univariada

Diante a ampla utilização da RSW, principalmente no setor automotivo, e perante a proposta alternativa, porém consolidada, para análise do sistema de medição de caráter multivariado (WPC). Deste modo, nesta dissertação será aplicado o método WPC para um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, realizando coletas para análise de diversas características da qualidade, abordando ensaios destrutivos e as características geométricas do ponto. Neste contexto, atribuir a análise hierárquica de *cluster* para averiguar o nível de similaridade das características de qualidade com seus respectivos componentes. E finalizando, a comparação de alguns instrumentos convencionais de metrologia usualmente utilizados para este processo.

1.5 Metodologia

Esta dissertação se classifica como de natureza aplicada, pois o estudo é aplicado em problemas reais. Classifica seu objetivo como descritiva, visto que se busca descrever a

analogia das variáveis no objeto de estudo avaliado. Possui uma abordagem quantitativa, uma vez que traduz, classifica e analisa números através de técnicas estatísticas.

Por fim, esta dissertação caracteriza-se por um procedimento experimental, permitindo analogias de causalidade, identificar interações entre as variáveis (independentes e dependentes) de um processo, entre outras características (BRYMAN, 1989).

1.6 Delimitações do trabalho

A pesquisa propõe-se em realizar um estudo de caráter multivariado, fazendo uso do método de Componentes Principais Ponderados (WPC), proposto por Peruchi *et al.* (2013), em um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Durante a realização deste estudo, foram encontradas algumas delimitações do trabalho, como:

- Quantidade delimitada, porém significativa, de soldas realizadas (8 conjuntos de parâmetros distintos com 3 réplicas cada);
- Realização de testes destrutivos com apenas dois operadores (máquinas), sendo esse o número de equipamentos disponíveis para o mesmo;
- Escala métrica dos instrumentos, nos quais apresentam até dois décimos de precisão de leitura (0,01).

1.7 Estrutura do trabalho

Visando relatar de forma clara e coesiva o planejamento e desenvolvimento desta dissertação, a mesma fora dividida em 5 capítulos.

No primeiro, fora abordado a introdução e contextualização da pesquisa, seguido da problemática identificada, objetivos gerais e específicos, justificativa e metodologia do estudo, bem como as delimitações encontradas.

O segundo capítulo, refere-se à fundamentação teórica, onde fora abordado uma revisão da literatura sobre todos os temas e conceitos necessários para realização desta pesquisa, sendo eles: O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, equipamentos e parâmetros de regulagem, qualidade da solda a ponto, testes destrutivos e não destrutivos, análise do sistema de medição, estudo de repetitividade e reprodutibilidade (GR&R), métodos univariados como ANOVA, métodos multivariados como MANOVA e PCA, além de um tópico específico para a técnica multivariada WPC, que é escopo desta pesquisa.

No capítulo 3, tem-se a descrição do método de pesquisa utilizado, que é a análise do sistema de medição de um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica a partir de um GR&R multivariado, sendo ele o método WPC. Além de relatar passo a passo as etapas realizadas nesta pesquisa.

O quarto capítulo refere-se à análise e discussão dos resultados, onde é realizado, apresentado e discutido os resultados em cada etapa do método aplicado, de modo a cumprir com os objetivos propostos que são indagados na seção 1.3 desta dissertação.

Finalizando, o capítulo 5 encerra o trabalho trazendo as conclusões obtidas, bem como suas respectivas contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Capítulo 2 se propõe a apresentar os conceitos para o embasamento deste trabalho, abordando a soldagem por resistência elétrica, análise do sistema de medição e GR&R, onde é detalhado o método no qual será utilizado para a análise do sistema de medição, sendo os componentes principais ponderados.

2.1 Soldagem por Resistência Elétrica

Dentre os diversos processos de soldagem, a solda por resistência elétrica se destaca pela sua ampla aplicação na indústria, principalmente no setor automobilístico, que possui um alto grau de concorrência e de impacto na economia, buscando oferecer produtos de eficiência, com qualidade e de custos reduzidos (GANGUE *et. al.* 2004).

Este tipo de processo apresenta vantagens como fácil operação e manuseio, alta taxa de produção, flexibilidade, facilidade e baixo custo de manutenção, soldagem de chapas de pequenas espessuras, além de não necessitar a adição de materiais consumíveis (COLOMBARI, 2004; CHEN e FARZON, 2006; ROGEON *et al.* 2007; ASLANLAR *et al.* 2008; YI *et al.* 2008; MARTIN *et al.* 2008; GOODARZI *et al.* 2009; MACIEL, 2011).

Perante a soldagem por resistência elétrica, tem-se diversos tipos de processos, como ilustrado na Figura 2.1, onde o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (*RSW – Resistance Spot Welding*), será escopo desta pesquisa.

2.1.1 Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica

Caracterizada por ser utilizada em grande escala na manufatura, o processo de soldagem a ponto se dá pela junção de duas peças de metal através da fusão do metal, sobrepostas por dois eletrodos que geram uma força e calor suficiente no ponto de solda, perante a passagem de uma corrente elétrica (SOUZA *et al.* 2013). A energia térmica gerada pode ser calculada pelo quadrado da corrente do processo, perante sua resistência e o tempo em que é aplicado, sendo assim, a Lei de Joule (MARTÍN *et al.*, 2016; ASLANLAR, 2006; FURLANETTO, 2005):

$$Q = \int_0^t R(t) I_w^2(t) dt \quad (2.1)$$

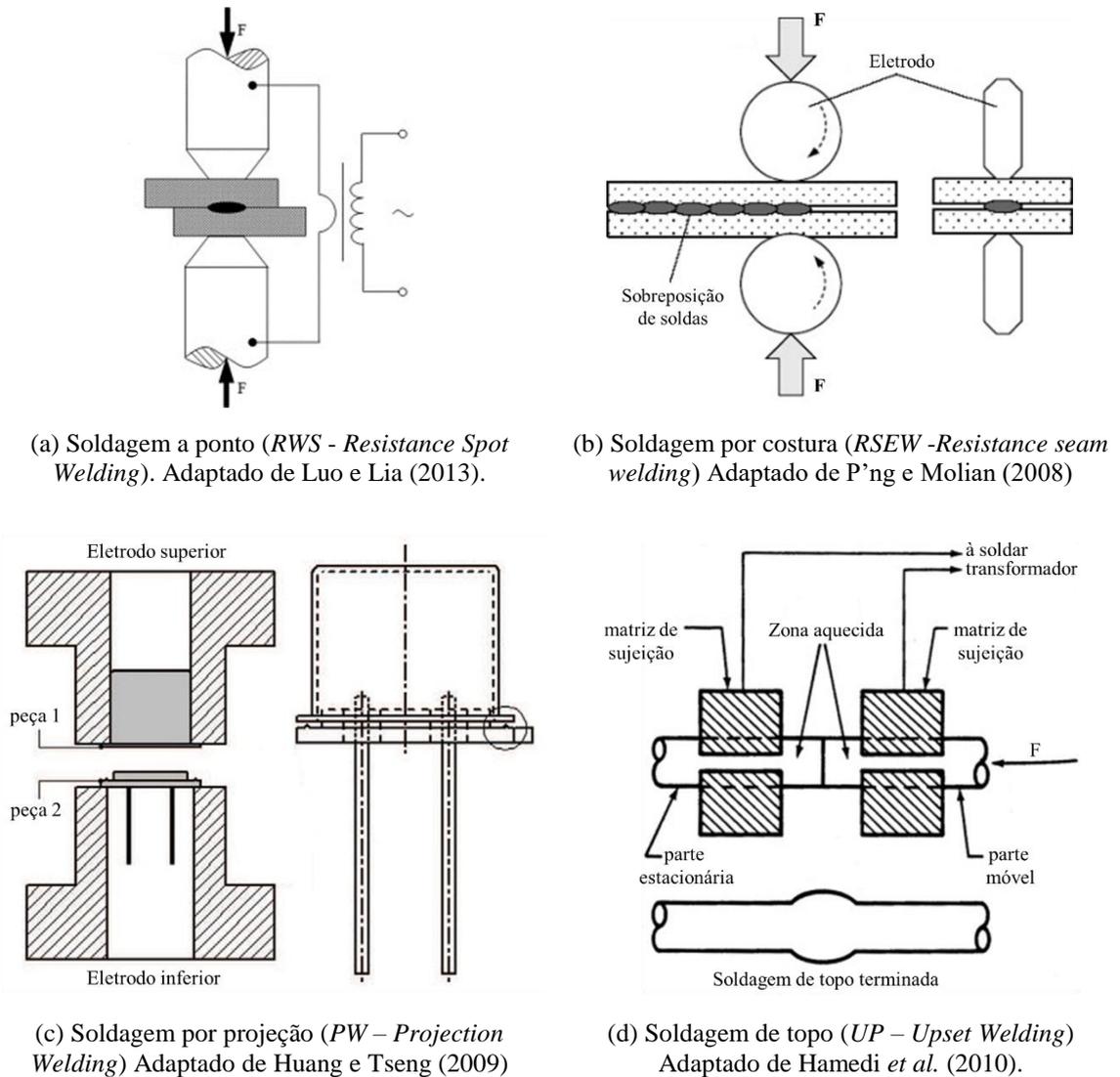


Figura 2.1 – Tipos de processo de soldagem por resistência elétrica

Onde:

I_w - Intensidade da corrente elétrica, dada em ampères [A];

R - Resistência elétrica, dada em Ohms [Ω];

t - Tempo, em segundos, da passagem da corrente elétrica no processo;

Q - Energia térmica gerada, dada em Joules.

A representação do princípio do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica pode ser ilustrado na Figura 2.2, onde F se dá pela pressão mecânica exercida pelo eletrodo durante o processo e sendo I_w a intensidade da corrente de soldagem que passa pelo sistema.

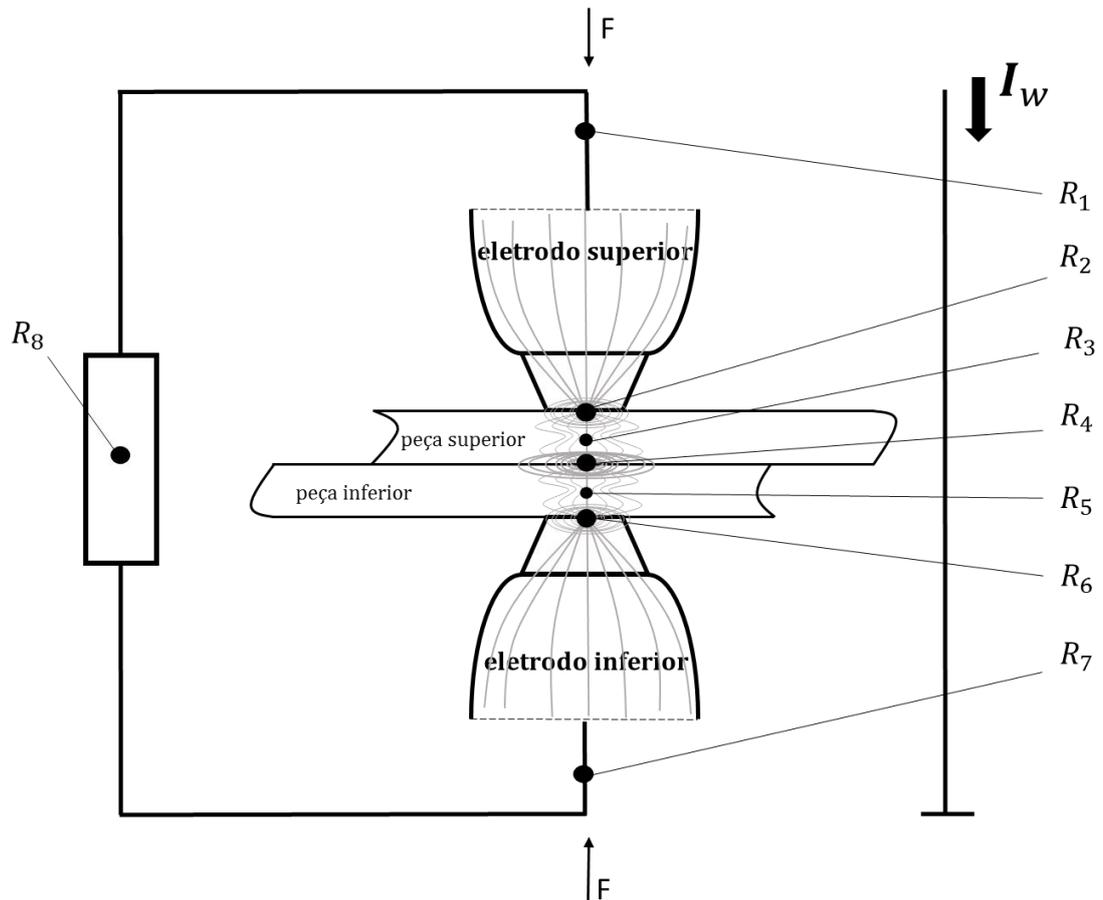


Figura 2.2 - Princípios e resistividades da soldagem a ponto

Na Figura 2.2, pode-se ainda verificar os pontos de resistência do sistema, $\mu\Omega$ (micro ohm), onde tem-se (SAMPAIO, 2010; PODRZAJ *et al.*, 2008):

- R_1 e R_7 – Representam a resistência dos eletrodos;
- R_2 e R_6 – Representam a resistência de contato eletrodo-peça;
- R_3 e R_5 – Representam a resistência das peças;
- R_4 – Representa a resistência de contato entre as peças;
- R_8 – Representa a resistência do transformador de soldagem.

A resistividade nos pontos de contato (eletrodo-peça e peça-peça) apresentam aumento de temperatura devido à fusão dos materiais, obtendo maior geração de calor comparada às resistências das peças (SAMPAIO, 2010; FURLANETTO, 2014). Analisando todo o sistema, o ponto que apresenta o maior nível de resistência está indicado em R_4 , conseqüentemente sendo o ponto que apresenta maior geração térmica.

Desta forma, tem-se que o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica passa por uma série de passos, que seguem a seguinte sequência (BRANCO, 2004):

- *Passo 1:* os eletrodos interceptam as peças a serem soldadas fornecendo uma determinada força (F) sobre as mesmas garantindo um bom assentamento;
- *Passo 2:* ainda sob pressão, a corrente elétrica (I_w) passa pelo sistema iniciando a formação do ponto de solda;
- *Passo 3:* após o ponto ser formado, a corrente elétrica é interrompida, mas mantém-se a pressão mecânica dos eletrodos sobre as peças até que o ponto se solidifique;
- *Passo 4:* a força F exercida se cessa;
- *Passo 5:* os eletrodos deixam de interceptar as peças.

A sequência do processo de soldagem pode ser verificada na Figura 2.3:

2.1.2 Equipamentos e parâmetros de regulagem

Por ser um processo de grande utilização na indústria, a soldagem a ponto por resistência elétrica apresenta alguns equipamentos com características diversas, podendo se classificar, segundo Furlanetto (2005), quanto:

- Tipo de operação – estacionária ou móvel;
- Tipo de acionamento mecânico – hidráulico ou pneumático;
- Tipo de corrente elétrica – corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA).

O equipamento de soldagem do tipo estacionário, exemplificado na Figura 2.4 (CHEN *et al.*, 2016), se caracteriza por se manter fixo à linha de montagem (ou determinado local de operação) e as peças são movimentadas até ela para realização do processo de soldagem (FURLANETTO, 2014). Neste estudo fora utilizado a TWPRV50 da Presol Transweld®.

Diante ao equipamento utilizado, deve-se configurar os parâmetros para a realização do processo de soldagem, no qual resultarão no ponto de solda. Segundo Penteado (2011), a configuração adequada desses parâmetros resulta em uma solda de boa ou má qualidade.

Um processo de soldagem apresenta três conjuntos de parâmetros principais de regulagem, no qual influenciam na qualidade final do ponto de solda, sendo eles (ASLANLAR, 2006; DENNISON *et al.* 1997):

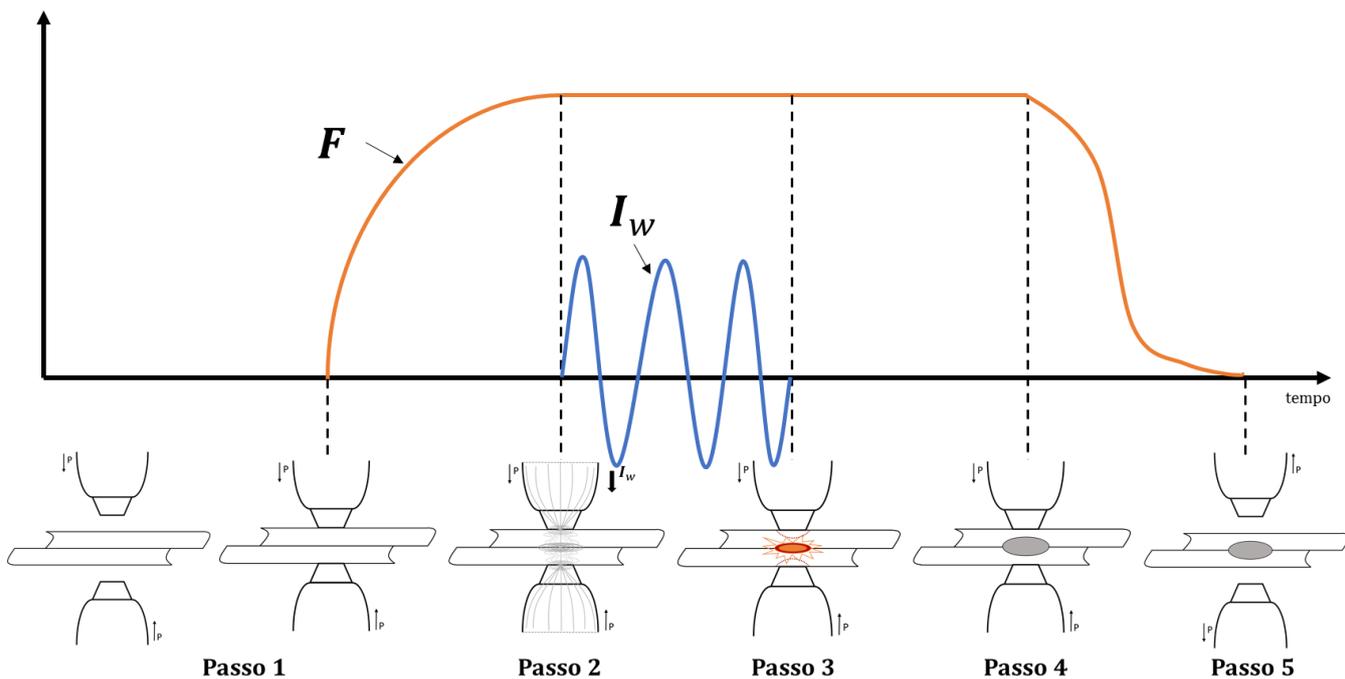


Figura 2.3 - Ciclo de Soldagem

- *Corrente de soldagem*: corrente elétrica responsável por elevar, até uma temperatura de fusão, o ponto de contato a ser soldado, onde a densidade e pressão devem ser adequadas para garantir a qualidade do ponto de solda (ASLANLAR *et al.*, 2008; SANTOS, 2006). Para aços com revestimento, como aço galvanizado que apresenta uma camada de zinco, tem-se a corrente de pré-aquecimento, que visa liquefazer e remover o revestimento metálico das peças, a fim de posicionar de maneira adequada os eletrodos antes da realização da solda. Após a solda, tem-se a corrente de pós-aquecimento que busca abrandar o aquecimento, diminuindo a possibilidade de danos na região aquecida (SANTOS, 2006).
- *Força do eletrodo*: é a força exercida para unificar as peças a serem soldadas, mantendo-se antes, durante e após a passagem da corrente elétrica, forjando os metais quando os mesmos se apresentam em um estado maleável (VARGAS, 2006). A força de “pré-pressão” garante que as peças apresentem assentamento adequado. A força de “pressão durante” se dá no momento em que se passa a corrente elétrica e a força de “pós-pressão” mantém as peças fixas até que o ponto soldado se solidifique (BALDIM, 2014).
- *Tempo de soldagem*: se dá pelo período de início e término da passagem da corrente elétrica, sendo subdividido entre tempo de: compressão, soldagem, resfriamento e

espera, respectivamente. Mensurar tal duração varia de acordo com o tratamento e tipo de material submetido ao processo de soldagem (SANTOS, 2006; ASLANLAR, 2006; MACHADO, 1996).



Figura 2.4 – Equipamento de soldagem do tipo estacionário

Fonte: Chen *et al.* (2016)

2.1.3 Qualidade da solda a ponto

O processo de soldagem a ponto se dá pela influência de fatores controláveis, como abordado na seção 2.1.2, e fatores incontroláveis como desgaste e desalinhamento dos eletrodos, posicionamento das peças a serem soldadas, impurezas como óxidos, óleos entre outros fatores que podem ser presentes em processos industriais. Conhecer tais fatores e seus

respectivos efeitos favorecem a garantia de uma boa solda a ponto, uma vez que esses fatores impactam na sua geometria e qualidade final (ZHOU *et al.*, 2003).

Durante o processo é possível atribuir algumas geometrias que servem de caracterização da qualidade da solda a ponto, como (ZHOU *et al.*, 2003):

- Largura da indentação;
- Profundidade de indentação;
- Penetração;
- Diâmetro do ponto;
- Zona de fusão.

Tais características podem ser verificadas conforme a Figura 2.5.

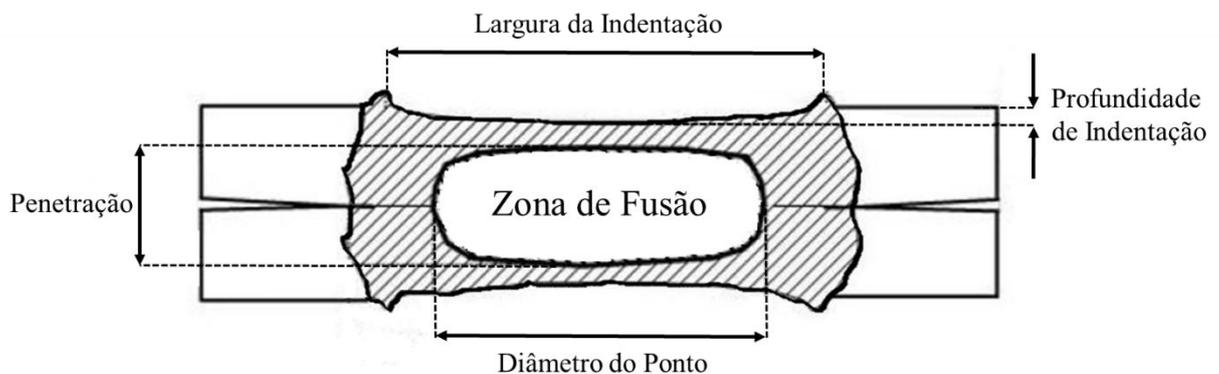


Figura 2.5 – Geometria da solda a ponto.
Adaptado de Zhou *et al.* (2003)

Segundo Zhang *et al.* (2017), o *nugget*, ou ponto de solda, deve apresentar como condições principais para avaliação da qualidade, aparência e força adequada, ou seja, é importante que o ponto soldado tenha um tamanho adequado, principalmente ao que se refere ao eixo vertical x (Figura 2.6). Segundo Zhang e Senkara (2006), os requisitos sobre tamanhos de solda são possivelmente os critérios mais comumente usados em relação à qualidade da solda, onde o tamanho do *nugget* pode ser significativamente distinto para diferentes aplicações. O nível da penetração da solda deve estar entre $3\sqrt{th}$ e $6\sqrt{th}$, onde th é a espessura da peça, estando a maioria dos requisitos localizados entre de $4\sqrt{th}$ e $5\sqrt{th}$ e muitos tamanhos nominais de solda são ajustados nesta faixa (ZHANG e SENKARA, 2006).

Portanto, é necessário avaliar, através de ensaios específicos, determinadas características de qualidade deste processo através de ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos (DARWISH e AL-DEKHAL, 1999; VARGAS, 2006).

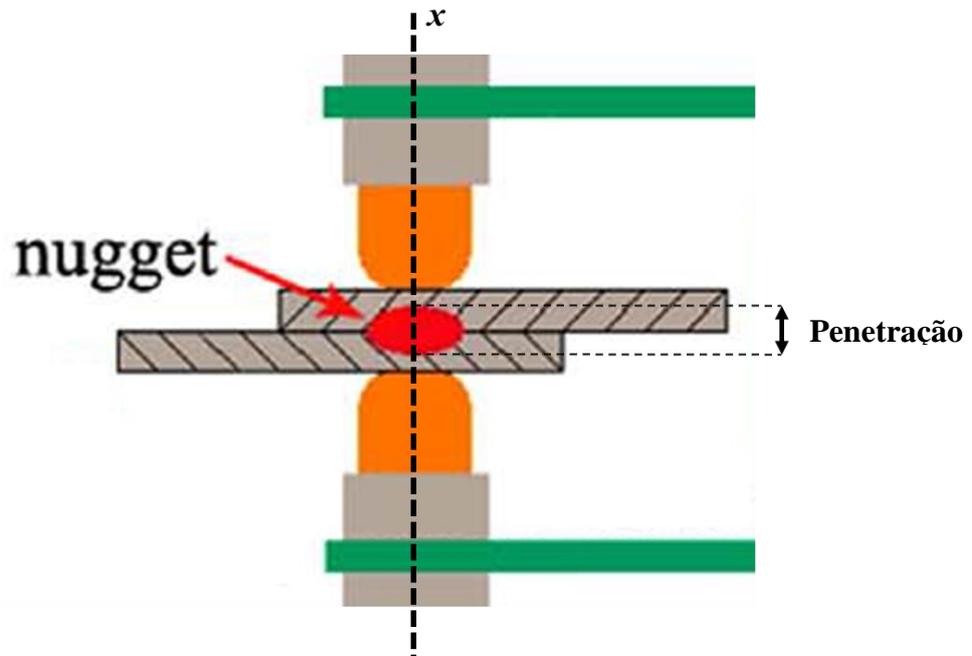


Figura 2.6 – Penetração da solda.
Adaptado de Zhang *et al.* (2017)

2.1.3.1 Ensaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos buscam realizar a análise do ponto soldado sem que o corpo de prova seja destruído. Tais métodos de avaliação têm recebido atenções consideráveis pois obtêm-se informações de qualidade de soldagem de maneira eficaz e econômica (ZHANG *et al.*, 2017).

Dentre os ensaios não destrutivos, tem-se por instrumentos convencionais de metrologia, teste ultrassônico, termografia infravermelha, entre outros.

2.1.3.2 Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos tendem a analisar o desempenho e qualidade da solda a ponto através de testes que deterioram sua condição atual, por isso tal teste é usualmente realizado por amostragem. Tais métodos são descritos na AWS (2002) a fim de garantir e monitorar a qualidade do ponto de solda, como ilustrado na Figura 2.7.

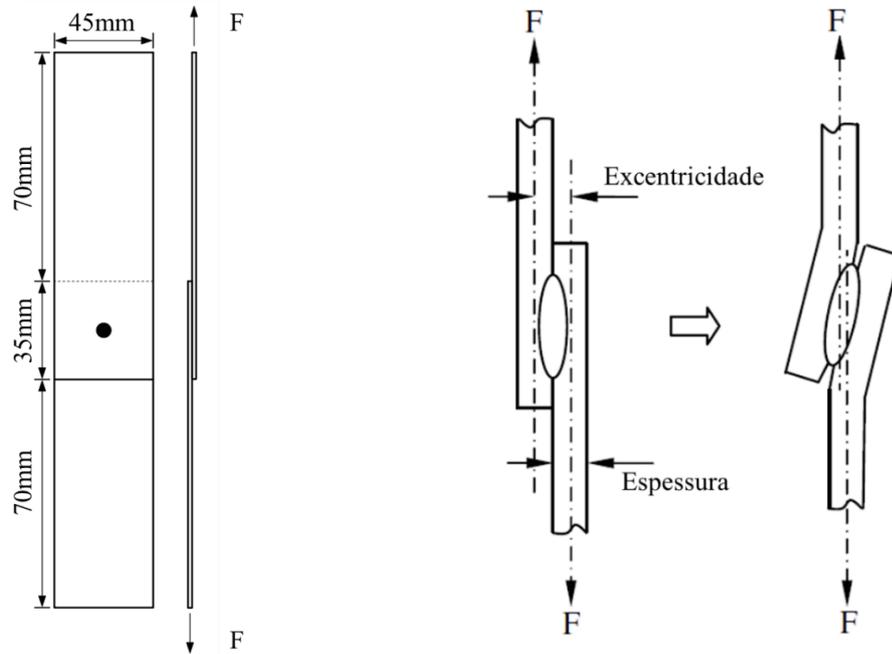
(a) Adaptado de Wan *et al.* (2016)(b) Adaptado de Luo *et al.* (2009)

Figura 2.7 – Teste por cisalhamento

Para este tipo de ensaio, tem-se o Teste de Cisalhamento (Figura 2.8), onde os corpos de prova são fixados em equipamentos específicos para ensaios de tração, no quais são aplicadas forças opostas, conforme o esquema apresentado na Figura 2.7, até sua ruptura. Além deste, tem-se testes como de arrancamento (Figura 2.9) e tração axial (Figura 2.10). No teste ilustrado na Figura 2.8, tem-se as respostas de Resistência ao Cisalhamento (RC) e Deformação na Força Máxima de Ruptura ($DF_{Máx}$), o qual pode dar um indicativo da energia absorvida (tenacidade) pelo corpo de prova.

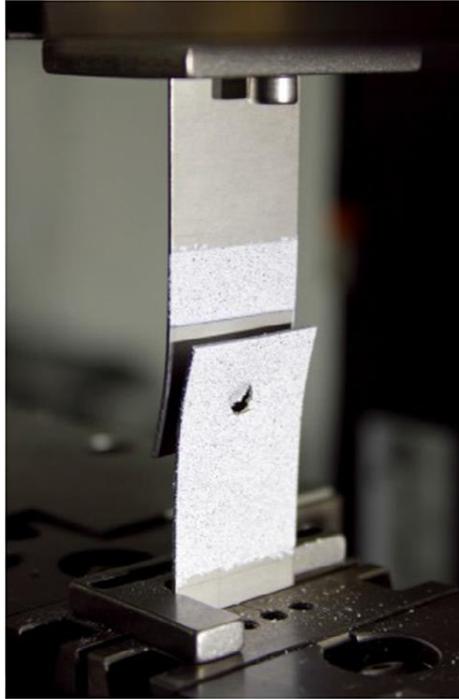


Figura 2.8– Teste por tensão cisalhante da junta soldada

Fonte: Liu *et al* (2017).



Figura 2.9 - Teste de arrancamento.

Fonte: Al-Jader *et al.* (2011)

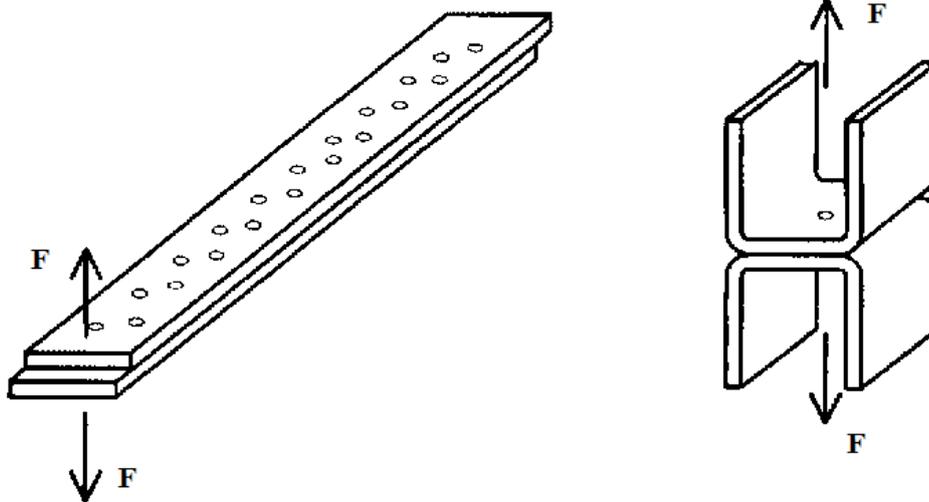


Figura 2.10 - Teste de tração axial.
Adaptado de Hao *et al.*(1996)

2.1.4 Classificação de trabalhos que utilizam solda a ponto por resistência elétrica

A Tabela 2.1 apresenta um levantamento de artigos que fazem uso do processo soldagem a ponto por resistência elétrica, contemplando os últimos cinco anos. Observa-se que dentre os principais parâmetros de regulação estudados (como apresentado na seção 2.1.2), no que se refere a “corrente de soldagem”, tem-se ocorrência em todos artigos avaliados, seguindo de uma quantidade significativamente alta dos demais parâmetros, “tempo de soldagem” e “força do eletrodo”. Quanto a espessura do material utilizado, verifica-se que 91,43% dos trabalhos analisados abordam tal característica e no que se refere a área de contato do eletrodo, um pouco mais da metade dos trabalhos apresentam tal característica.

2.2 Análise do sistema de medição

A busca de melhoria na qualidade, segundo Peruchi (2011), usualmente é direcionada ao processo, procurando diminuir sua variabilidade. Entretanto, ações de melhoria podem não resultar em uma melhor capacidade do processo, uma vez que o erro de medição pode afetar, de maneira significativa, na variabilidade do mesmo.

Tabela 2.1 - Classificação de trabalhos que utilizam RSW

Referência	Variáveis estudadas				
	Corrente de soldagem	Tempo de soldagem	Força do eletrodo	Espessura das chapas	Área de contato do eletrodo
Wan <i>et al.</i> (2017)	*	*	*	*	*
Zhang <i>et al.</i> (2017)	*	*	*	*	
Chen <i>et al.</i> (2017)	*	*		*	
Wan <i>et al.</i> (2017)	*	*	*	*	
Pouranvari (2017)	*	*	*	*	*
Lacki e Niemiro (2017)	*	*	*	*	
Ighodaro <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	*
Fan <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	
Liu <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	
Chen <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	
Feng <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	*
Sun <i>et al.</i> (2016)	*			*	
Zhang <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	
Guo <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	*
Bi <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	
Mazur <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	*
Martín <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	*
Luo <i>et al.</i> (2016)	*	*	*	*	*
Li <i>et al.</i> (2015)	*	*	*	*	
Spitz <i>et al.</i> (2015)	*	*		*	*
Sun <i>et al.</i> (2015)	*	*	*	*	*
Shafee <i>et al.</i> (2015)	*	*	*	*	
Moos e Vezzetti (2015)	*	*	*	*	*
Wang <i>et al.</i> (2015)	*	*	*	*	*
Mei <i>et al.</i> (2015)	*	*	*	*	
Yao <i>et al.</i> (2014)	*	*	*	*	*
Kianersi <i>et al.</i> (2014)	*	*		*	*
Prashanthkumar <i>et al.</i> (2014)	*	*			
Alizadeh-Sh <i>et al.</i> (2014)	*	*	*		*
Yi <i>et al.</i> (2013)	*	*	*	*	*
Florea <i>et al.</i> (2013)	*	*	*	*	
Makhanlall <i>et al.</i> (2012)	*	*	*	*	
Mori <i>et al.</i> (2012)	*		*	*	*
Thornton <i>et al.</i> (2012)	*		*	*	*
Khodabakhshi <i>et al.</i> (2012)	*	*	*		*
TOTAL	100%	91,43%	85,71%	91,43%	54,29%

Em processos de manufatura, segundo Veiga *et al.* (1997), os componentes mecânicos apresentam características de tolerâncias geométricas, como a forma, dimensão e posição, que garantem a qualidade do produto. Tais especificações são verificadas perante a utilização de processos de sistema de medição.

Processos de medição, segundo ISO/TS 16949 (2002), integram atividades, recursos e influências que fornecem uma medição, quando correlacionadas. O processo é caracterizado por elementos como: *operador*, capacitado através de treinamentos; *ambiente*, local do processo de medição; *sistema de medição*, coletânea de dispositivos e demais equipamentos com finalidade de imputar, de modo numérico, uma característica de medição; *procedimento de medição*, operações específicas utilizadas, perante o método, na realização da medição e;

mensurando, sendo a grandeza medida, como ilustrado na Figura 2.11 (NBR ISO 9000, 2000; INMETRO-VIM, 1995; QS 9000-MSA, 2002).

Sua análise se dá por avaliar a conformidade de um sistema de medição, levando em consideração a variação entre as peças e a variação do próprio sistema de medição. Tais aplicações apresentam a variação derivada do produto (σ_p^2) e do erro recorrente da medição ou variação do SM (σ_{SM}^2) (PERUCHI, 2011; AIAG, 2010; AL-REFAIE e BATA, 2010; COSTA *et al.*, 2005; LI e AL-REFAIE, 2008; MAJESKE, 2008; SENOL, 2004; WANG e CHIEN, 2010; WANG e YANG, 2007; WOODALL e BORROR, 2008).

O termo incerteza de medição se caracteriza em relatar a qualidade de uma medição, utilizada tanto para padrões de alta precisão, quanto para sua consistência diante a capacidade do mesmo, sendo atribuído de modo que o valor alcançado resulte em uma medição real, diante um intervalo de confiança definido e quantificada pela expressão (PERUCHI, 2011, 2014):

$$\text{Medição Real} = \text{Medição Analisada} \pm U \quad (2.2)$$

Onde U é apresentado como “incerteza expandida” do mensurando e do resultado medido, sendo caracterizado como o produto do erro padrão combinado, u_c (sistemático e aleatório), que abrange todos componentes de variação significantes, pelo fator de cobertura k , representando a área de uma distribuição normal, diante um intervalo de confiança, normalmente de 95%, onde $k = 2$ (PERUCHI, 2011, 2014; GUM, 1995).

$$U = u_c k \quad (2.3)$$

A AIAG (2010) descreve o componente de erro de maior significância como $\sigma_{\text{desempenho}}^2$, somados a outros parâmetros de erro significantes. Perante a medição, tem-se a seguinte expressão (PERUCHI, 2011):

$$u_c^2 = \sigma_{\text{desempenho}}^2 + \sigma_{\text{outros}}^2 \quad (2.4)$$

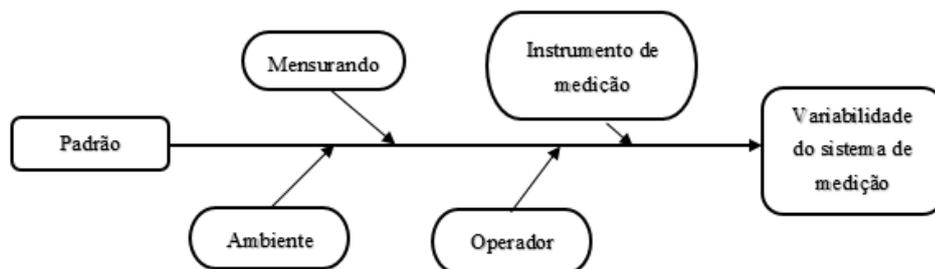


Figura 2.11 – Variabilidade do Sistema de Medição.

Adaptado de AIAG (2010)

AIAG (2010) estima, em muitas ocasiões, que a incerteza de medição deve fazer uso de métodos de Análise do Sistema de Medição (*MSA – Measurement System Analysis*) e do Estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade do Instrumento de Medição (*GR&R – Gage Repeatability and Reproducibility*) com a finalidade de identificar, de modo numérico, os erros padrão de maior significância.

Desta forma, tem-se, segundo Peruchi (2011, 2014):

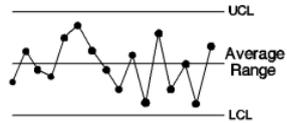
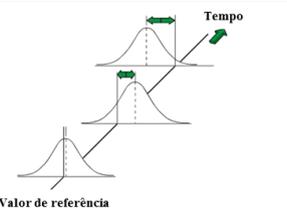
- *MSA* – apresenta distinção através da incerteza, visto que ela busca compreender o processo de medição, verificando os erros e avaliando o quanto um sistema de medição se adapta diante o controle, proporcionando assim, melhor discernimento e redução da variação;
- *Incerteza* – se caracteriza pela amplitude das medições vinculado ao resultado que, diante ao intervalo de confiança definido, deve proporcionar os verdadeiros valores medidos;

Assim, tem-se que a variação combinada é fornecida pelos demais componentes de variação.

O desempenho do sistema de medição ocorre pelos erros para certos escopos, amplitudes e medições. Sendo a variância do desempenho, a soma das demais variâncias de consistência, estabilidade e capacidade, como mostra a Tabela 2.2 (PERUCHI, 2011, 2014).

$$\sigma_{\text{desempenho}}^2 = \sigma_{\text{consistência}}^2 + \sigma_{\text{estabilidade}}^2 + \sigma_{\text{capabilidade}}^2 \quad (2.5)$$

Tabela 2.2 – Rede de efeitos de desempenho do sistema de medição

Consistência	Mudança da repetitividade ao longo tempo	um processo consistente deve apresentar variação sob controle	
Estabilidade	Mudança no desvio (bias) ao longo do tempo	um processo estável deve apresentar seus desvios sob controle	
Capabilidade	Estimativa da variação combinada de erros de medição em curto prazo	Erro esperado para determinadas condições, escopo e amplitude do SM	$\sigma_{\text{capabilidade}}^2 = \sigma_{\text{bias}(linearidade)}^2 + \sigma_{\text{GR\&R}}^2$

Segundo Peruchi (2011) tem-se, para finalidade de aplicação e de melhor entendimento, que a capacidade se destaca em dois quesitos, sendo eles:

- A estimativa da capacidade se relaciona ao escopo de medição, citado na Tabela 2.2;
- A consistência e uniformidade (erros de repetitividade) durante a amplitude das medições, no curto prazo;

Assim, a capacidade se caracteriza pelos termos de erros, sendo a somatória das *bias* e *linearidade* com a repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição, podendo ser expressa:

$$\sigma_{capacidade}^2 = \sigma_{bias(linearidade)}^2 + \sigma_{GR\&R}^2 \quad (2.6)$$

Caracterizada como erro sistemático do SM, *bias* é também citado como exatidão, sendo ela a distância entre o valor verdadeiro e a média observada, Figura 2.12(a). A distinção destas *bias* perante todas as amplitudes esperadas das medições é caracterizada como linearidade, Figura 2.12(b), (ATTIVISSIMO, 2011; PERUCHI, 2011).

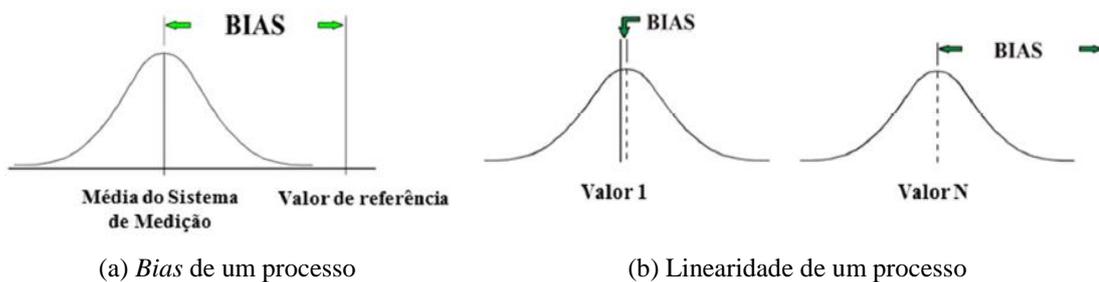


Figura 2.12 – *Bias* e linearidade de um processo.

Fonte: AIAG (2010)

A repetitividade se dá pela “variação dentro do sistema” perante condições fixas e já definidas de medições (peça, ambiente, operador, instrumento entre outras). Usualmente difundida como a variação adquirida em um equipamento de medição utilizado várias vezes por um operador, medindo uma única característica em uma única peça ou, também, a variação do instrumento de medição (PERUCHI, 2011; AIAG, 2010; AL-REFAIE e BATA, 2010; AWAD *et al.*, 2009; BURDICK, BORROR e MONTGOMERY, 2003; MAJESKE, 2008; WU, PEARN e KOTZ, 2009).

A reprodutibilidade pode ser definida pela “variação média entre sistemas” medidos, sendo a variação encontrada na média de operadores distintos, utilizando um mesmo equipamento para realizar a medição de uma única característica em uma única peça

(PERUCHI, 2011; AIAG, 2010; ERDMANN, DOES e BISGAARD, 2010; KNOWLES, VICKERS e ANTONY, 2003; POLINI e TURCHETTA, 2004; SENOL, 2004; VAN DEN HEUVEL e TRIP, 2002; WANG e CHIEN, 2010).

A Figura 2.13 representa graficamente a repetitividade e reprodutibilidade do sistema.

Com finalidade de se evitar um erro conceitual, é importante ressaltar que *bias* e repetitividade são fontes de erro independentes uma da outra. Logo, controlar uma delas não garante o controle da outra. Portanto, é importante identificar e quantificar as fontes de variação significantes (PERUCHI, 2011). A Figura 2.14 ilustra tais fontes de variação

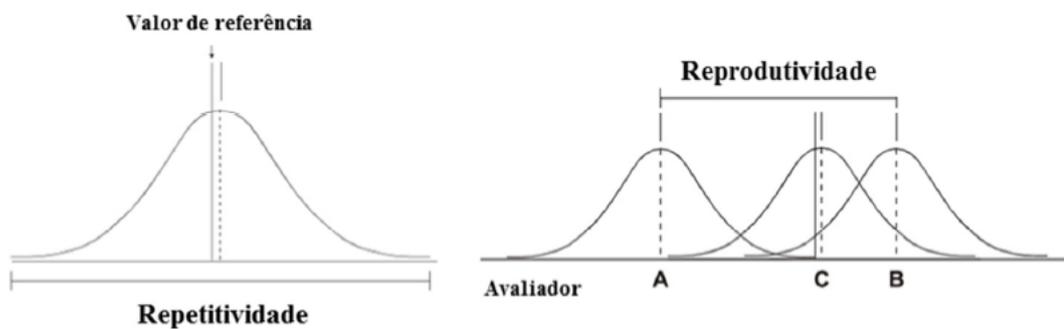


Figura 2.13 – Representação gráfica de repetitividade e reprodutibilidade

Diante de tais caracterizações, tem-se, de maneira generalizada, que a variância combinada, composta pelos termos de variação apresentados anteriormente, pode ser ilustrada conforme a Figura 2.15.

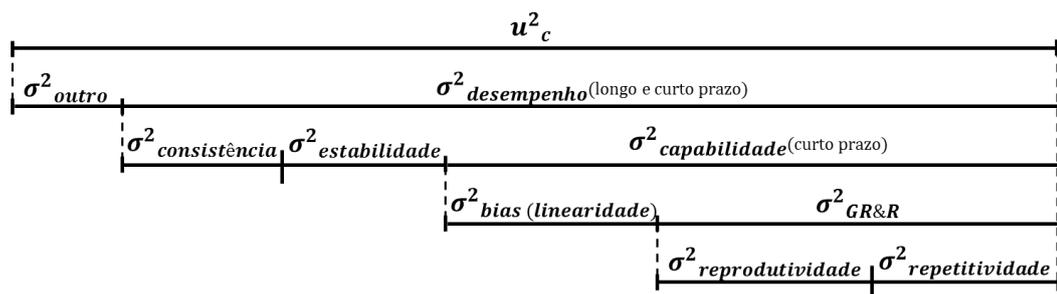


Figura 2.14 – Componentes de variação da variância combinada de um sistema de medição.

Adaptado de AIAG (2010)

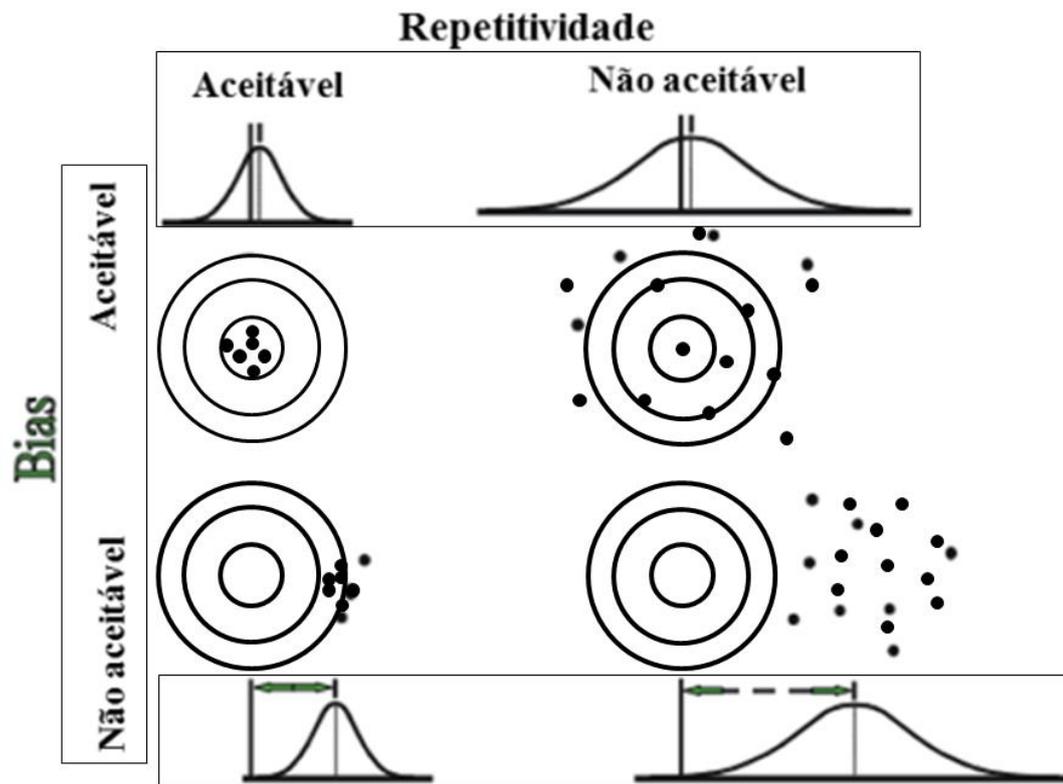


Figura 2.15 – Relação entre Biais e Repetitividade.
Adaptado de AIAG (2010)

Dentro da metodologia Seis Sigma¹ tem-se a etapa “medir”, que analisa a capacidade do instrumento de medição em mensurar as características que devem ser otimizadas, determinando se a variação do SM é menor que a variação do processo observado (PERUCHI, 2011; AL-MISHARI e SULIMAN, 2008; DE KONING e DE MAST, 2006; DE MAST *et al.*, 2000; KWAK e ANBARI, 2006; HOERL, 2001; MONTGOMERY *et al.*, 2005; MONTGOMERY e WOODALL, 2008; RAISINGHANI *et al.*, 2005; SATOLO *et al.*, 2009; SAHOO, TIWARI e MILEHAM, 2008; SU, CHIANG e CHIAO, 2005; TANG *et al.*, 2007).

Fazem uso de estudos de repetitividade e reprodutibilidade do instrumento de medição (GR&R) em projetos seis sigma exemplos como: Peruchi (2014), Kaija *et al.* (2010), Li e Al-Refaie (2008), Johnson *et al.* (2006) e Dejaegher *et al.* (2006).

¹ Caracterizado, segundo Linderman *et al.* (2003), por uma metodologia utilizada para melhoria de processos, produtos e serviços com base em métodos estatísticos e científicos a fim de reduzir, significativamente, as taxas de defeitos.

2.3 GR&R

O estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade (*GR&R – Gage Repeatability and Reproducibility*) busca mensurar os elementos de variação de um sistema de medição, determinando se essa variabilidade é menos significativa que a apresentada no processo (AL-REFAIE e BATA, 2010; PERUCHI, 2014; SHIAU, 2000; WANG e CHIEN, 2010).

Pode-se considerar dois casos de controle para o SM, o de produto e o de processo:

- *Produto*: associado a decisões binárias, para produtos aprovados e não aprovados, perante inspeções por amostragem ou inspeções 100%, onde o GR&R visa estimar a tolerância do produto, não verificando o processo;
- *Processo*: associado a decisões direcionadas à adequação do SM para controlar o processo, visando o próprio. Busca a estabilidade e entendimento da variabilidade natural do processo.

O processo pode ser dividido em uma determinada quantidade de categorias que pode ser representada a partir de uma estatística de variabilidade do SM chamada de número de categorias distintas (*ndc – Number of Distinct Categories*) (AIAG, 2010; AL-REFAIE e BATA, 2010; LI e AL-REFAIE, 2008; MAJESKE, 2008; MONTGOMERY, 2005; PERUCHI, 2011, 2014; WANG e CHIEN, 2010; WHITE e BORROR, 2011; WOODALL e BORROR, 2008).

A Tabela 2.3 apresenta as diretrizes de aceitação do SM (AIAG, 2010; AL-REFAIE e BATA, 2010; DE MAST e WIERINGEN, 2004; DEJAEGHER *et al.*, 2006; HE, WANG e COOK, 2011; LI e AL-REFAIE, 2008; MAJESKE, 2008; MONTGOMERY, 2005; PERUCHI *et al.* 2013; WANG e CHIEN, 2010; WHITE e BORROR, 2011; WOODALL e BORROR, 2008).

Tabela 2.3 – Critérios de aceitação para o Sistema de Medição

Critérios	Decisão
$R\&R < 0,1$	<i>Aceitável</i>
$0,1 < R\&R < 0,3$	<i>Marginal</i>
$R\&R > 0,3$	<i>Inaceitável</i>
$ndc > 5$	<i>Aceitável</i>

Fonte: Adaptado de Peruchi (2013), AIAG (2010)

Uma avaliação “*Inaceitável*” infere que há um problema na adequação do sistema de medição e o mesmo deve ser melhorado. Uma indicação “*Marginal*” pode ou não ser aceitável, dependendo de fatores como custo do instrumento de medição, retrabalho etc, onde o cliente deve estabelecer a tolerância.

Tais critérios, da Tabela 2.3, serão também parâmetros para os demais indicadores de avaliação do SM apresentados neste trabalho.

2.3.1 Métodos univariados

Em estudos GR&R onde se avalia uma única característica da qualidade, analisa-se uma única variável de resposta a fim de verificar a mesma diante a capacidade do sistema de medição. Diante aos métodos usualmente utilizados, Wang e Chien (2010) enfatizam, para abordagens univariadas, o método de Análise de Variância (ANOVA) e o método de Média e Amplitude (M&A). O método ANOVA se destaca, perante o M&A, pois estima com maior precisão as variâncias, além de proporcionar um maior número de informações, uma vez que fornece dados de interação entre operador e peça (AIAG, 2010). Desde modo, na seção 2.3.1.1, tal método será enfatizado.

A Tabela 2.4 apresenta um levantamento de trabalhos em análises do sistema de medição fazendo uso do estudo de repetitividade e reprodutibilidade para métodos univariados, onde é possível verificar uma quantidade significativa de pesquisas utilizando o método de análise de variância (ANOVA) sendo aplicada em diversos segmentos.

2.3.1.1 Método de análise de variância (ANOVA)

A variabilidade em medições de casos univariados, que envolvem uma única característica da qualidade, pode originar do erro do operador, variabilidade do instrumento de medição ou mesmo erro do próprio produto. Assim, para um estudo GR&R completo, tem-se o seguinte modelo (AL-REFAIE e BATA, 2010; AWAD *et al.*, 2009; BURDICK, BORROR e MONTGOMERY, 2003; DELDOSSI e ZAPPA, 2011; ERDMANN, DOES e BISGAARD, 2010; GONG, BURDICK e QUIROZ, 2005; PERUCHI *et al.* 2013):

$$y = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (2.7)$$

Onde, y refere-se à variável de resposta, μ a média dos valores, $\alpha_i \sim N(0, \sigma_\alpha)$ é a variável aleatória para peça, $\beta_j \sim N(0, \sigma_\beta)$ a variável aleatória para operador, $\alpha\beta_{ij} \sim N(0, \sigma_{\alpha\beta})$ refere-se à interação e $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_E)$ o termo de erro estimado. Tem-se para p o número de peças, o número de operadores e r a quantidade de réplicas.

A Tabela 2.5 apresenta outros componentes de variação que podem ser estimados (DEJAEGHER *et al.*, 2006; KAIJA *et al.*, 2010; LI e AL-REFAIE, 2008; PERUCHI 2014; SENOL, 2004; WHITE e BORROR, 2011; WOODAL e BORROR, 2008).

Tabela 2.4 – Estudos que utilizam métodos univariados para GR&R

Autor	GR&R	Método	Aplicação
Joubert e Meintjes (2015)	Univariado	Xbar-R	Transporte
Shi, Chen e Lu (2014)	Univariado	ANOVA e mínimos quadrados	Medição de mola
Deshpande <i>et al.</i> (2014)	Univariado	ANOVA	Farmacêutica
Zhu <i>et al.</i> (2014)	Univariado	ANOVA	Ótica
Hajipoura <i>et al.</i> (2013)	Univariado	Fuzzy Expert system	Automotivo
Yeh e Sun (2013)	Univariado	Xbar-R e simulação de Monte Carlo	Automotivo
García e del Río (2013)	Univariado	ANOVA	Dados da literatura
Kuo e Huang (2013)	Univariado	Xbar-R	Ótica
Kaija <i>et al.</i> (2010)	Univariado	ANOVA	Eletrônica
Al-Refaie e Bata (2010)	Univariado	ANOVA	Dados da literatura
Erdmann <i>et al.</i> (2010)	Univariado	ANOVA	Saúde
Awad <i>et al.</i> (2009)	Univariado	ANOVA	Automotivo
Li e Al-Refaie (2008)	Univariado	Xbar-R	Indústria madeireira
Lyu e Chen (2008)	Univariado	ANOVA	Dados da literatura
Woodall e Borrór (2008)	Univariado	ANOVA	Dados da literatura
Johnson <i>et al.</i> (2006)	Univariado	ANOVA	Didática
Dejaegher <i>et al.</i> (2006)	Univariado	ANOVA	Farmacêutica
Costa <i>et al.</i> (2005)	Univariado	ANOVA	Indústria de papel
Senol (2004)	Univariado	ANOVA	Automotivo
Polini e Turchetta (2004)	Univariado	ANOVA	Maquinário de granito
Burdick <i>et al.</i> (2003)	Univariado	ANOVA	Dados da literatura
Van den Heuvel e Trip (2002)	Univariado	ANOVA	Semicondutor
Shiau (2000)	Univariado	ANOVA	Dados simulados

Sendo MQP a Média Quadrática para a Peça, MQO a Média Quadrática para o Operador, $MQPO$ é a Média Quadrática para a Interação (*Peça x Operador*) e MQE a Média Quadrática para o Erro.

Desta forma para um modelo completo reduzido, onde a interação não é significativa, tem-se:

$$y = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.8)$$

Assim, tem-se a representação dos componentes de variação para um GR&R com interação não significativa na Tabela 2.5.

Como citado na seção 2.3 (*GR&R*), tem-se dois índices comumente utilizados para mensurar e avaliar o SM, sendo eles (AIAG, 2010; AL-REFAIE e BATA, 2010; DE MAST e WIERINGEN, 2004; DEJAEGHER *et al.*, 2006; LI e AL-REFAIE, 2008; MONTGOMERY, 2005; WHITE e BORROR, 2011; WOODALL e BORROR, 2008):

- $\%R\&R$: a estatística de porcentagem de Repetitividade & Reprodutibilidade (R&R), que dimensiona o desvio padrão do SM perante o desvio padrão total. Equação (2.9).
- ndc : também conhecida como índice Sinal-Ruído (*SNR*), o ndc dimensiona a variabilidade do SM. Equação (2.10).

$$\%R\&R = \left(\frac{\sigma_{SM}}{\sigma_T} \right) 100\% \quad (2.9)$$

$$ndc = \sqrt{\frac{2\sigma_P^2}{\sigma_{SM}^2}} = 1,41 \frac{\sigma_P}{\sigma_{SM}} \quad (2.10)$$

2.3.2. Métodos multivariados

Diferindo dos trabalhos citados na Tabela 2.4 que faziam análise para avaliar o sistema de medição de maneira univariada, nesta seção serão abordados métodos que medem múltiplas variáveis, onde, geralmente, tem-se variáveis correlacionadas e exigem uma análise através de métodos multivariados.

Tabela 2.5 – Componentes de variação para o GR&R

		Com interação	Sem interação
Processo	$\hat{\sigma}_P^2$	$\hat{\sigma}_\alpha^2 = \frac{MQP - MQPO}{or}$	$\hat{\sigma}_\alpha^2 = \frac{MQP - MQE}{or}$
Repetitividade	$\hat{\sigma}_{repetitividade}^2$	$\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = MQE$	$\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = MQE$
Reprodutividade	$\hat{\sigma}_{reprodutibilidade}^2$	$\hat{\sigma}_\beta^2 + \hat{\sigma}_{\alpha\beta}^2 = \frac{MQO - MQPO}{pr} + \frac{MQPO - MQE}{r}$	$\hat{\sigma}_\beta^2 = \frac{MQO - MQE}{pr}$
Sistema de Medição	$\hat{\sigma}_{SM}^2$	$\hat{\sigma}_{repetitividade}^2 + \hat{\sigma}_{reprodutibilidade}^2$	$\hat{\sigma}_{repetitividade}^2 + \hat{\sigma}_{reprodutibilidade}^2$
Varição total	$\hat{\sigma}_T^2$	$\hat{\sigma}_P^2 + \hat{\sigma}_{SM}^2$	$\hat{\sigma}_P^2 + \hat{\sigma}_{SM}^2$

A Tabela 2.6 mostra o levantamento de pesquisas que utilizando o estudo de repetitividade e reprodutibilidade para o sistema de medição, fazendo uso de métodos multivariados, como PCA e MANOVA, aplicados principalmente para setores da indústria automotiva e mecânica. É possível inferir que há uma quantidade sutil de trabalhos na literatura que abordam métodos multivariados e nenhuma que aborda o método WPC aplicado ao processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.

2.3.2.1 Método de análise multivariada de variância (MANOVA)

Para um estudo que avalia dois fatores que apresentam interações para diversas características de qualidade, q características (HE, WANG e COOK, 2011; MAJESKE, 2008; PERUCHI, 2011, 2014; WANG e CHIEN, 2010), tem-se a Equação (2.11).

Tabela 2.6 – Estudos que utilizam métodos multiivariados para GR&R

Autor	GR&R	Método	Aplicação
Peruchi <i>et al.</i> (2014)	Multivariado	MANOVA	Usinagem do aço AISI 12L14
Scagliarini (2014)	Multivariado	MANOVA	Dados da literatura
Peruchi <i>et al.</i> (2013)	Multivariado	ANOVA e PCA	Usinagem do aço AISI 12L14
He, Wang e Cook (2011)	Multivariado	PCA	Monitoramento online
Wang e Chien (2010)	Multivariado	ANOVA e PCA ANOVA	Semicondutor
Flyn <i>et al.</i> (2009)	Multivariado	MANOVA e PCA	Militar
Majeske (2008)	Multivarido	MANOVA	Automotivo
Wang e Yang (2007)	Multivariado	PCA	<i>Soldering</i>

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1q} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nq} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\alpha}_i + \boldsymbol{\beta}_j + (\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta})_{ij} + \boldsymbol{\varepsilon}_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (2.11)$$

Assim, tem-se $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_q)$ e $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_q)$ como vetores constantes; $\boldsymbol{\alpha}_i \sim N(0, \Sigma_\alpha)$, $\boldsymbol{\beta}_j \sim N(0, \Sigma_\beta)$, $\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}_{ij} \sim N(0, \Sigma_{\alpha\beta})$ e $\boldsymbol{\varepsilon}_{ijk} \sim N(0, \Sigma_\varepsilon)$ os vetores aleatórios e estatisticamente independentes entre si. No modelo (2.11), seus componentes podem ser encontrados fazendo uso do método MANOVA, porém, o modelo de variância-covariância, deve-se estimar as matrizes de médias quadráticas para os fatores peça, operador, interação e o de erro (MQP , MQO , $MQPO$ e MQE , respectivamente) (PERUCHI, 2014).

Com as matrizes de médias quadráticas, pode-se estimar as matrizes de variância-covariância tanto para o processo, quanto para repetitividade, reprodutibilidade, sistema de medição e variação total. A Tabela 2.7 apresenta as matrizes de variância-covariância com efeito significativo de interação.

Tabela 2.7 – Matrizes de Variância-Covariância

		Com interação	Sem interação
Processo	$\hat{\Sigma}_P$	$\hat{\Sigma}_\alpha = \frac{MQP - MQPO}{or}$	$\frac{MQP - MQE}{or}$
Repetitividade	$\hat{\Sigma}_{repetitividade}$	$\hat{\Sigma}_\varepsilon = MQE$	$\hat{\Sigma}_\varepsilon = MQE$
Reprodutibilidade	$\hat{\Sigma}_{reprodutibilidade}$	$\hat{\Sigma}_\beta + \hat{\Sigma}_{\alpha\beta} = \frac{MQP - MQPO}{pr} + \frac{MQPO - MQE}{r}$	$\hat{\Sigma}_\beta = \frac{MQO - MQE}{pr}$
Sistema de Medição	$\hat{\Sigma}_{SM}$	$\hat{\Sigma}_{repetitividade} + \hat{\Sigma}_{reprodutibilidade}$	$\hat{\Sigma}_{repetitividade} + \hat{\Sigma}_{reprodutibilidade}$
Varição total	$\hat{\Sigma}_T$	$\hat{\Sigma}_P + \hat{\Sigma}_{SM}$	$\hat{\Sigma}_P + \hat{\Sigma}_{SM}$

Para as matrizes de médias quadráticas com interação, tem-se a Tabela 2.8.

Quando o modelo de interação não é significativo, o modelo 2.11 se dá por:

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\alpha}_i + \boldsymbol{\beta}_j + \boldsymbol{\varepsilon}_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (2.12)$$

Assim, tanto as matrizes de médias quadráticas quanto as matrizes de variância-covariância para termos de efeito de interação não significativos são ilustradas na Tabela 2.7 e 2.8, respectivamente.

Para o MANOVA, os indicadores de $\%R\&R_m$ e ndc_m de validação para o SM se dão pelas Equações (2.13) e (2.14). Os critérios de validação para o SM são os mesmos citados na seção 2.3.

$$\%R\&R_m = \left(\prod_{i=1}^q \sqrt{\frac{\lambda_{SM_i}}{\lambda_{T_i}}} \right)^{1/n} 100\% \quad (2.13)$$

$$ndc_m = \sqrt{2} \left(\prod_{i=1}^q \sqrt{\frac{\lambda_{P_i}}{\lambda_{G_i}}} \right)^{1/n} \quad (2.14)$$

2.3.2.2 Método de análise dos componentes principais (PCA)

Além do método MANOVA citado na seção 2.3.2.1, proposto por Majeske (2008), a Análise de Componentes Principais (*PCA – Principal Component Analysis*) é uma técnica estatística multivariada que pode ser utilizada como alternativa para se mensurar características de qualidade correlacionadas perante um estudo de GR&R (WANG e CHIEN, 2010; PERUCHI, 2011).

Segundo Paiva (2006), Paiva, Ferreira e Balestrassi (2007), a PCA pode reduzir a dimensionalidade dos dados, absorvendo os elementos significativos no primeiro eixo de seus componentes, enquanto mantém a variação do erro tanto experimental, quanto de arredondamento e de medição, nos eixos dos componentes finais.

Sendo a PCA a combinação de um conjunto linear ℓ para q variáveis aleatórias Y_1, Y_2, \dots, Y_q , pode-se inferir que, de maneira geométrica, o sistema de coordenadas, representados pela combinação linear indicada algebricamente, representam um novo conjunto de coordenadas perante sua rotação original, onde os novos eixos detêm a maior variabilidade dos dados (JOHNSON e WICHERN, 2007; MUKHERJEE e RAY, 2008; PAIVA *et al.*, 2008; PERUCHI 2011). Na Figura 2.16 pode-se verificar a interpretação geométrica dos eixos:

Tabela 2.8 – Matrizes de Médias Quadráticas

	Com interação	Sem interação
Peça $MQP_{ab} =$	$\frac{pr}{p-1} \sum_{i=1}^p (\bar{m}_{a_{i..}} - \bar{m}_{a...}) (\bar{m}_{b_{i..}} - \bar{m}_{b...})$	$\frac{pr}{p-1} \sum_{i=1}^p (\bar{m}_{a_{i..}} - \bar{m}_{a...}) (\bar{m}_{b_{i..}} - \bar{m}_{b...})$
Operador $MQO_{ab} =$	$\frac{pr}{o-1} \sum_{j=1}^o (\bar{m}_{a_{.j.}} - \bar{m}_{a...}) (\bar{m}_{b_{.j.}} - \bar{m}_{b...})$	$\frac{pr}{o-1} \sum_{j=1}^o (\bar{m}_{a_{.j.}} - \bar{m}_{a...}) (\bar{m}_{b_{.j.}} - \bar{m}_{b...})$
Interação $MQPO_{ab} =$	$\frac{r}{(p-1)(o-1)} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o (\bar{m}_{a_{ij.}} - \bar{m}_{a_{i..}} - \bar{m}_{a_{.j.}} + \bar{m}_{a...}) \times (\bar{m}_{b_{ij.}} - \bar{m}_{b_{i..}} - \bar{m}_{b_{.j.}} + \bar{m}_{b...})$	
Erro $MQE_{ab} =$	$\frac{1}{po(r-1)} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^r (\bar{m}_{a_{ijk}} - \bar{m}_{a_{i..}}) \times (\bar{m}_{b_{ijk}} - \bar{m}_{b_{i..}})$	$\frac{1}{por - p - o + 1} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^r (\bar{m}_{a_{ijk}} - \bar{m}_{a_{i..}} - \bar{m}_{a_{.j.}} + \bar{m}_{a...}) \times (\bar{m}_{b_{ijk}} - \bar{m}_{b_{i..}} - \bar{m}_{b_{.j.}} + \bar{m}_{b...})$

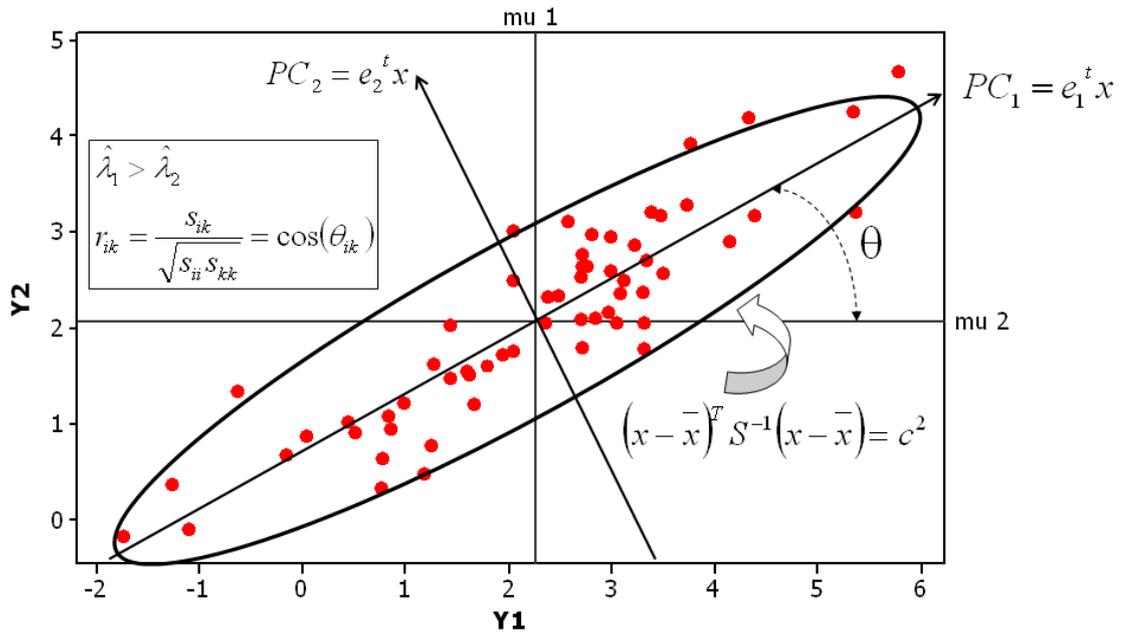


Figura 2.16 – Interpretação geométrica dos PC's.

LOPES (2011)

Os PC's não apresentam correlação, dependendo apenas da matriz de covariância e das variáveis Y_1, Y_2, \dots, Y_q . Os pares de autovetores-autovalores das matrizes $(\lambda_1, e_1), (\lambda_2, e_2), \dots, (\lambda_q, e_q)$, onde tem-se que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots, \geq \lambda_q \geq 0$ em que o i -ésimo componente principal pode ser verificado por (PERUCHI, 2011):

$$PC_i = e_i^T Y = e_{1i} Y_1 + e_{2i} Y_2 + \dots + e_{qi} Y_q \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (2.15)$$

Sendo a Equação (2.15), obtida através da formulação descrita na Equação (2.16):

$$\begin{aligned} \text{Max } & \text{Var} [e_i^T Y] \\ \text{s.a: } & e_i^T e_i = 1 \\ & \text{Cov} [e_i^T Y, e_k^T Y] = 0 \\ & k < i \end{aligned} \quad (2.16)$$

Portanto, as variáveis originais podem ser substituídas por um conjunto linear não correlacionado, ou seja, os escores dos componentes principais. Segundo Johnson e Wichern (2007), tendo a matriz de dados padronizados \mathbf{Z} e a matriz de autovetores \mathbf{E} , de um conjunto multivariado, pode-se obter os escores dos componentes principais pela Equação (2.17):

$$PC_{score} = \mathbf{Z}^T \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \left(\frac{y_{11} - \bar{y}_1}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left(\frac{y_{12} - \bar{y}_2}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left(\frac{y_{1q} - \bar{y}_q}{\sqrt{s_{qq}}} \right) \\ \left(\frac{y_{21} - \bar{y}_1}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left(\frac{y_{22} - \bar{y}_2}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left(\frac{y_{2q} - \bar{y}_q}{\sqrt{s_{qq}}} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{y_{n1} - \bar{y}_1}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left(\frac{y_{n2} - \bar{y}_2}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left(\frac{y_{nq} - \bar{y}_q}{\sqrt{s_{qq}}} \right) \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1q} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{q1} & e_{q2} & \dots & e_{qq} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Para um modelo completo, com interações, para uma análise do GR&R com múltiplas características correlacionadas, Peruchi (2011) considera um modelo próximo do modelo univariado, ponderando q características da qualidade, p peças, o operadores e r réplicas que serão analisadas por PCA, substituindo as respostas pelos escores de um PC. Deste modo, tem-se a Equação (2.18):

$$PC_q = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (2.18)$$

Para tal equacionamento, considera-se PC_q como resposta do modelo, μ sendo uma constante e as seguintes variáveis aleatórias que são estatisticamente independentes para: peça, $\alpha_i \sim N(0, \sigma_\alpha)$ operador, $\beta_j \sim N(0, \sigma_\beta)$ interação, $\alpha\beta_{ij} \sim N(0, \sigma_{\alpha\beta})$ e erro associado $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_\varepsilon)$.

Peruchi (2011) afirma que os indicadores utilizados para mensurar tanto os componentes de variação GR&R, quanto para validação dos índices multivariados de aceitação para o PCA, são aplicados do mesmo modo do modelo univariado, ANOVA, apresentado na seção 2.3.1, diferenciando apenas por avaliar as q características da qualidade como um todo, no estudo.

Os critérios de aceitação para validar o SM são os mesmos informados na seção 2.3.

2.3.2.3 Método dos componentes principais ponderados (WPC)

Em sua análise de sistema de medição, Wang e Chien (2010) comparam o método PCA com outros dois métodos, porém, para cada componente principal, a análise é realizada separadamente, o que pode ser inadequado, visto que interpretações de maneiras diferentes podem ocorrer. Quando o primeiro componente apresenta alta correlação das respostas, tem-se

que o mesmo consegue explicar, de maneira consistente, a variabilidade do sistema de medição, mas quando essas correlações não apresentam uma porcentagem elevada, é necessário analisar mais que um componente principal (Peruchi *et al.* 2013).

Desta forma, tem-se o estudo GR&R multivariado utilizando Componentes Principais Ponderados (WPC – *weighted principal components*), proposto por Peruchi *et al.* (2013), onde a resposta do modelo se dá pela ponderação dos componentes principais perante seus respectivos autovalores. Tal estratégia fora baseada no estudo de Paiva *et al.* (2010), onde ponderou-se os componentes principais em uma técnica multiobjetivo.

O método WPC será detalhado na Figura 2.17.

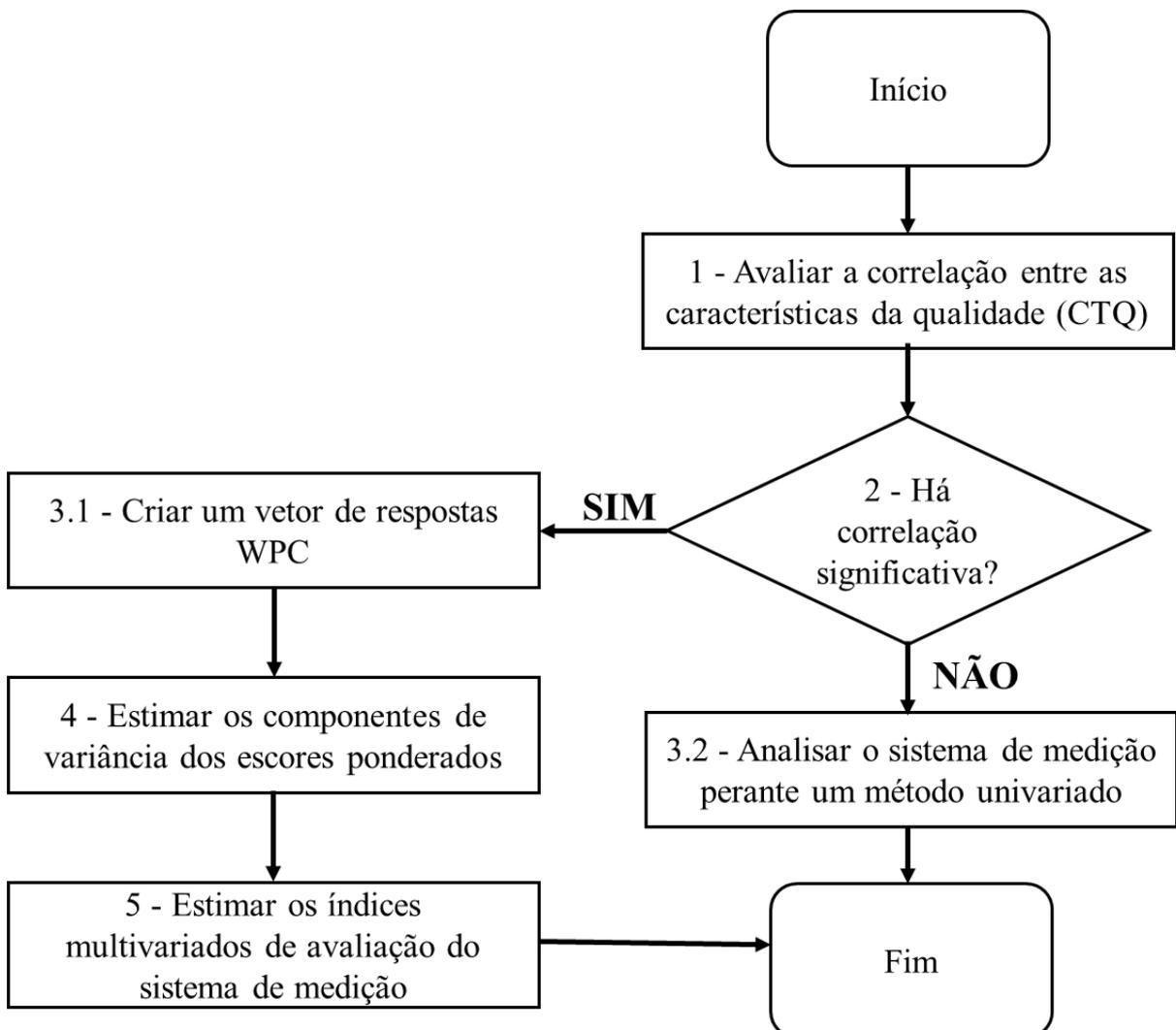


Figura 2.17 – Fluxograma do método dos componentes principais ponderados (WPC).

Adaptado de Peruchi *et al.* (2013)

Passo 1: Avaliar a correlação entre as características críticas da qualidade (CTQ):

Primeiro, avalia-se a correlação entre as características da qualidade pela Equação (2.19):

$$Cor_{CTQ_i, CTQ_j} = \frac{CoVar_{CTQ_i, CTQ_j}}{\sqrt{Var_{CTQ_i} Var_{CTQ_j}}} \quad \forall i = 1, 2, \dots, q; \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (2.19)$$

Onde:

Var_{CTQ_i} e Var_{CTQ_j} são i -ésima e j -ésima variância;

$CoVar_{CTQ_i, CTQ_j}$ representa a covariância entre as características da qualidade.

Passo 2: Verificar se há correlação significativa

Verifica-se o grau de correlação das CTQs. Caso exista correlação significativa entre as características da qualidade, segue-se para o *Passo 3.1*, que trata de um estudo GR&R multivariado, avaliando o processo de sistema de medição por WPC.

Caso não exista correlação significativa, direciona-se para o *Passo 3.2*, onde tratará por um estudo GR&R univariado, verificado na seção 2.3.1.

Passo 3.1: Criar um vetor de respostas WPC

A partir das Equações (2.15) e (2.16) obtém-se o i -ésimo componente principal, armazenando seus escores. A solução lexicográfica do problema multiobjetivo da Equação (2.15) fornece pares de autovalores-autovetores $(\lambda_1, e_1), (\lambda_2, e_2), \dots, (\lambda_q, e_q)$, onde tem-se que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots, \geq \lambda_q \geq 0$ com finalidade de obter o percentual de explicação para cada componente, além dos escores destes componentes.

Na Equação (2.20), tem-se o resultado dos componentes principais ponderados, perante a matriz de dados padronizados (\mathbf{Z}), matrizes de autovalores (\mathbf{L}) e autovetores (\mathbf{E}):

$$\mathbf{WPC} = \mathbf{Z}^T \mathbf{E} \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \left(\frac{CTQ_{11} - \overline{CTQ_1}}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left(\frac{CTQ_{12} - \overline{CTQ_2}}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left(\frac{CTQ_{1q} - \overline{CTQ_q}}{\sqrt{s_{qq}}} \right) \\ \left(\frac{CTQ_{21} - \overline{CTQ_1}}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left(\frac{CTQ_{22} - \overline{CTQ_2}}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left(\frac{CTQ_{2q} - \overline{CTQ_q}}{\sqrt{s_{qq}}} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{CTQ_{n1} - \overline{CTQ_1}}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left(\frac{CTQ_{n2} - \overline{CTQ_2}}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left(\frac{CTQ_{nq} - \overline{CTQ_q}}{\sqrt{s_{qq}}} \right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1q} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{q1} & e_{q2} & \dots & e_{qq} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_q \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

E segue-se para o *Passo 4*.

Passo 3.2: Analisar o sistema de medição perante um método univariado

Caso as características da qualidade não apresentem correlação significativa, deve-se analisar o sistema de medição perante o método univariado apresentado na seção 2.3.1 (ANOVA).

Passo 4: Estimar os componentes de variância dos escores ponderados

O modelo WPC para avaliar o sistema de medição se dá pela Equação (2.21):

$$\mathbf{WPC} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (2.21)$$

Assim, tal resposta é o resultado da ponderação dos componentes principais pelos seus respectivos autovalores, dados pela Equação (2.22).

$$\mathbf{WPC} = \sum_{i=1}^q [\lambda_i (PC_i)] = \lambda_1 PC_1 + \lambda_2 PC_2 + \dots + \lambda_q PC_q \quad (2.22)$$

A variável μ é constante e α_i , β_j , $\alpha\beta_{ij}$ e $\varepsilon_{ijk} \dots$ são variáveis aleatórias independentes com média zero e variância σ_α^2 , σ_β^2 , $\sigma_{\alpha\beta}^2$ e σ_ε^2 respectivamente.

A métrica WPC pode ser gerada pela explicação de cada componente principal, sendo assim:

$$\mathbf{WPC} = \sum_{i=1}^q \left[\frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} (PC_i) \right] \quad (2.23)$$

Os componentes de variância da Equação (2.21), perante a transformação do conjunto de dados originais em WPC, são estimados em notação para o GR&R pelas Equações (2.24-2.28)

$$\hat{\sigma}_p^2 = \hat{\sigma}_\alpha^2 = \frac{MQP - MQPO}{or} \quad (2.24)$$

$$\hat{\sigma}_{reprodutibilidade}^2 = \hat{\sigma}_\beta^2 + \hat{\sigma}_{\alpha\beta}^2 = \frac{MQO - MQPO}{pr} + \frac{MQPO - MQE}{r} \quad (2.25)$$

$$\hat{\sigma}_{repetitividade}^2 = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 = MQE \quad (2.26)$$

$$\hat{\sigma}_{SM}^2 = \hat{\sigma}_{repetitividade}^2 + \hat{\sigma}_{reprodutibilidade}^2 \quad (2.27)$$

$$\hat{\sigma}_T^2 = \hat{\sigma}_P^2 + \hat{\sigma}_{SM}^2 \quad (2.28)$$

Onde:

MQP – Média quadrática para o fator peça;

MQO – Média quadrática para o fator operador;

MQPO – Média quadrática para o termo de interação;

MQE – Média quadrática para o termo de erro.

Caso o efeito de interação não seja significativo, tem-se o modelo resumido, dado pela Equação (2.29):

$$\mathbf{WPC} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.29)$$

Assim, os componentes de variação para as peças (processo) e reprodutibilidade (operadores) para o modelo reduzido, são estimados pelas seguintes Equações (2.30), (2.31) e (2.26-2.28):

$$\hat{\sigma}_P^2 = \hat{\sigma}_\alpha^2 = \frac{MQP - MQE}{or} \quad (2.30)$$

$$\hat{\sigma}_{reprodutibilidade}^2 = \hat{\sigma}_\beta^2 = \frac{MQO - MQE}{pr} \quad (2.31)$$

Passo 5: Estimar os índices multivariados de avaliação do sistema de medição

Para o último passo, deve-se estimar os índices multivariados do estudo GR&R, sendo a porcentagem R&R, $\%R\&R_m$, dada pela Equação (2.32) e o número de categorias distintas, ndc_m , dada pela Equação (2.33). Os critérios de aceitação são os mesmos indicados na seção 2.3.

$$\%R\&R_m = \left(\frac{\sigma_{SM}}{\sigma_T} \right) 100\% \quad (2.32)$$

$$ndc_m = \sqrt{\frac{2\sigma_P^2}{\sigma_{SM}^2}} = 1,41 \frac{\sigma_P}{\sigma_{SM}} \quad (2.33)$$

2.4 Considerações finais

O presente capítulo buscou apresentar, de modo claro e objetivo, toda base teórica que se necessita para o desenvolvimento deste estudo. Fora abordado conceitos sobre o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, bem como suas características e ensaios de qualidade. Em seguida abordou-se a análise do sistema de medição, dando ênfase ao estudo de repetitividade e reprodutibilidade (GR&R), além de tratar dos métodos univariados como ANOVA e multivariados como MANOVA, PCA e o WPC, no qual o último é escopo deste estudo.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Como abordado na seção 1.5, este trabalho caracteriza-se por um procedimento experimental, desta forma, este capítulo visa detalhar todo procedimento realizado, bem como a preparação e realização das medições, onde os dados foram coletados. Os materiais utilizados no experimento e na preparação dos corpos de prova serão detalhados durante o esclarecimento das etapas.

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma de todo procedimento.

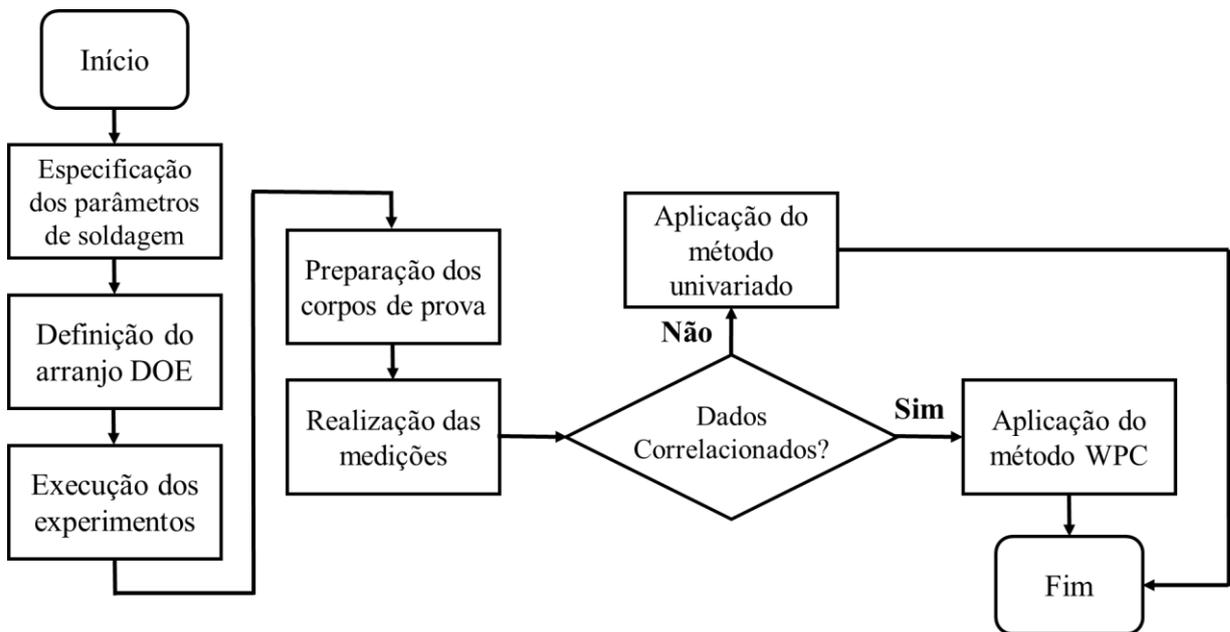


Figura 3.1 – Fluxograma detalhado das etapas da pesquisa

3.1 Aplicação do método de pesquisa

Com o intuito de abordar uma análise de caráter multivariado do sistema de medição de um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, nos tópicos seguintes será delineado todo andamento deste procedimento.

3.1.1 Planejamento do experimento

Considerando o foco deste trabalho, que é realizar a análise de medição, sendo este um estudo de repetitividade e reprodutibilidade, alguns pontos devem ser acatados, como:

- Distinção dos parâmetros do processo, uma vez que cada um dos pontos de solda analisados deve apresentar mensurações distintas nas suas características de qualidade, com exceção de suas respectivas réplicas;
- Quantidade de peças com parâmetros distintos;
- Número total de soldas, considerando o estudo como um todo, tanto para ensaios destrutivos (com suas respectivas réplicas), quanto para a caracterização geométrica.

Atendendo aos requisitos abordados acima e considerando os principais parâmetros de entrada para a RSW, fora realizada a fixação dos níveis trabalhados a partir de testes preliminares, onde se verificou o comportamento do processo em condições extremas de cada variável:

- Tempo de pré-aquecimento ($T_{preaq} - \text{ciclos}$)
- Corrente de pré-aquecimento ($I_{preaq} - \%kA$)
- Tempo de soldagem ($T_{solda} - \text{ciclos}$)
- Corrente de soldagem ($I_{solda} - \%kA$)

A Tabela 3.1 apresenta os limites dos parâmetros especificados, onde o parâmetro “*Força do eletrodo*” foi fixado em *2bar* (aproximadamente *29,01psi*) para um acionamento pneumático. A Tabela 3.2 apresenta 16 conjuntos de parâmetros distintos, gerados a partir da realização de um Arranjo Fatorial² Completo em dois níveis para 4 fatores.

Tabela 3.1 – Limite dos parâmetros de regulagem para um processo de soldagem

Parâmetros	Unidade	Níveis trabalhados	
		-1	+1
T_{preaq}	<i>Ciclos</i>	5	11
I_{preaq}	<i>%KA</i>	66	74
T_{solda}	<i>Ciclos</i>	7	17
I_{solda}	<i>%KA</i>	75	83

² Tipo de arranjo de experimento planejado que admite analisar os efeitos de diversos fatores de uma resposta. O Arranjo Fatorial Completo permite que sejam medidas respostas em todas as combinações dos níveis de fatores e o Arranjo Fatorial Fracionado faz uso somente de um subconjunto de um fatorial completo. Este tipo de experimento (fatorial fracionado) é uma boa alternativa quando os recursos são limitados, pois fazem uso de menos testes do que os experimentos fatoriais completos.

Considerando à quantidade de réplicas e medições a serem feitas, optou-se na redução dos números de peças a fim de tornar viável o número de medições a serem realizadas, visto que alterar o planejamento da amostragem se dá por necessário para diminuir o tamanho do estudo, não afetando a qualidade dos cálculos. Assim, fora considerado 8 conjuntos de parâmetros distintos, escolhidos aleatoriamente, no qual apresentam-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.2 – Arranjo Fatorial Completo

Teste	Parâmetros			
	T_{preaq}	I_{preaq}	T_{solda}	I_{solda}
	(ciclos)	(%kA)	(ciclos)	(%kA)
1	5	66	17	75
2	5	74	7	83
3	5	74	17	83
4	5	66	17	83
5	11	74	7	75
6	5	66	7	75
7	11	66	17	83
8	5	66	7	83
9	5	74	7	75
10	11	74	17	83
11	11	74	7	83
12	11	66	17	75
13	11	66	7	83
14	11	74	17	75
15	5	74	17	75
16	11	66	7	75

Para este estudo, os corpos de prova empregados foram chapas de aço carbono AISI 1012 galvanizadas por imersão a quente, apresentando espessura de 0,8mm. Sua composição química é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Matriz Experimental

Teste	Parâmetros			
	T_{preaq}	I_{preaq}	T_{solda}	I_{solda}
	(ciclos)	(%kA)	(ciclos)	(%kA)
1	11	74	7	83
2	11	66	17	83
3	5	74	7	83
4	11	74	7	75
5	5	66	17	83
6	11	66	17	75
7	5	74	17	83
8	11	74	17	83

Tabela 3.4 – Composição química do aço

Material	C	Mn	Al	P	S	Zn
	%	%	%	%	%	g/m ²
Aço Carbono SAE 1012	0,10-0,15	0,3-0,6	0,005	≤ 0,03	≤ 0,05	40-50

A Sociedade Americana de Soldagem (*AWS - American Welding Society*) proporciona as especificações de dimensionalidade dos corpos de prova para aplicações e análises utilizando a solda a ponto por resistência elétrica. Para melhor visualização destas especificações, segundo AWS (2002), tem-se na Figura 3.2 a dimensionalidade das chapas e na Tabela 3.5 as especificações das mesmas utilizadas neste estudo.

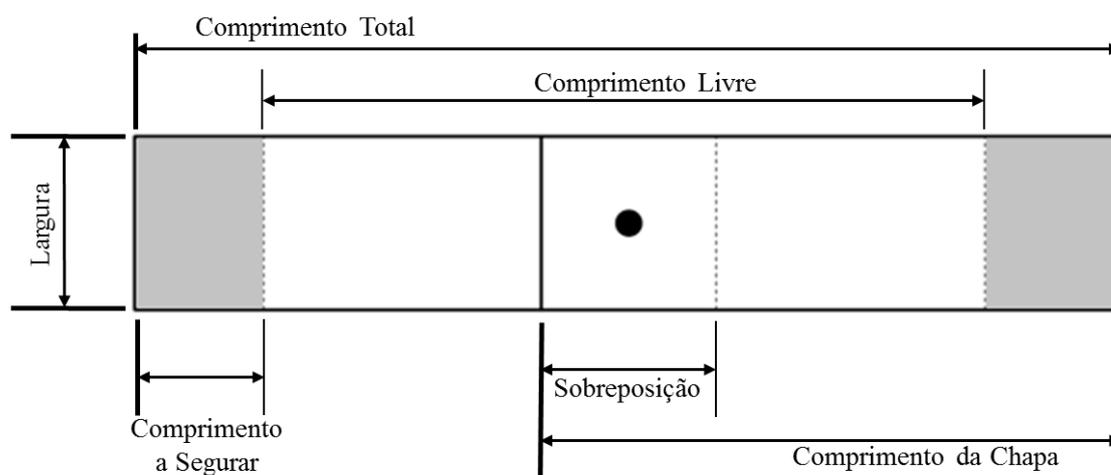


Figura 3.2 – Dimensionalidade dos corpos de prova

Tabela 3.5 – Especificações da dimensionalidade dos corpos de prova

Espessura da chapa (<i>mm</i>)	Comprimento da Chapa (<i>mm</i>)	Largura (<i>mm</i>)	Sobreposição (<i>mm</i>)	Comprimento Total (<i>mm</i>)	Comprimento Livre (<i>mm</i>)	Comprimento a Segurar (<i>mm</i>)
0,60-1,29	105	45	35	175	95	40

Fonte: Adaptado de AWS (2002)

Consolidado todo planejamento de experimentos, pode-se seguir para a execução do mesmo, no qual será abordado na seção seguinte.

3.1.1 Execução dos experimentos

Após definido todo planejamento do experimento, segue-se para a etapa de execução, que se dá pela realização das soldas.

As soldas foram realizadas no Laboratório de Soldagem (LSO) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em uma máquina de solda do tipo estacionária, sendo ela a TWPRV50 da Presol Transweld®, ilustrada na Figura 3.3, que apresenta potência nominal de 50 kVA, CA e corrente máxima de 6 kA.

O eletrodo utilizado para a realização das soldas se classifica como um eletrodo de cobre cromo zircônio, Grupo A, classe 2, apresentando formato de cone truncado a 15°, 70mm de comprimento e diâmetro da ponta de 5mm, ilustrado na Figura 3.4.

Para realização do estudo, considerando os testes destrutivos e a caracterização geométrica do ponto, foram realizados um total de 56 soldas, em grupos de 8 e consequentemente 7 réplicas idênticas, sendo elas:

- 8 soldas (1 grupo de réplicas) para metalografia, destinadas à análise macroscópica;
- 48 soldas (6 grupos de réplicas) para os ensaios destrutivos.

O preparo dos corpos de prova que antecedem a realização das medições serão abordados na seção 3.2.



Figura 3.3 – Máquina estacionária de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizada

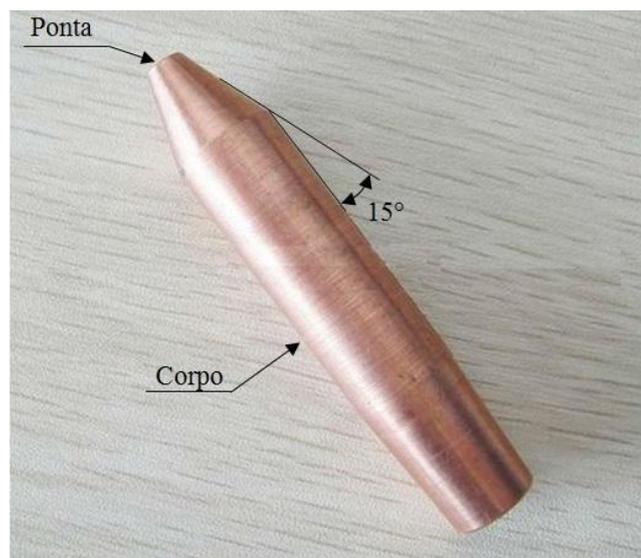


Figura 3.4 – Eletrodo de cobre cromo zircônio.

Fonte: Baldim (2014)

3.2 Preparação dos corpos de prova

Após a realização das soldas, os corpos de prova soldados devem ser preparados para a realização das medições. Para os ensaios destrutivos, os corpos de prova seguiram as especificações de dimensionalidade das peças, segundo AWS (2002), contidas na Tabela 3.5.

Na preparação para análise por imagem, através do software analisador de imagens, é preciso realizar um ensaio metalográfico, sendo o mesmo realizado no Laboratório de Metalurgia e Materiais (LMM) da UNIFEI. Esta preparação se caracteriza para uma análise de macrografia e consiste em diversas etapas, ilustrada na Figura 3.5.

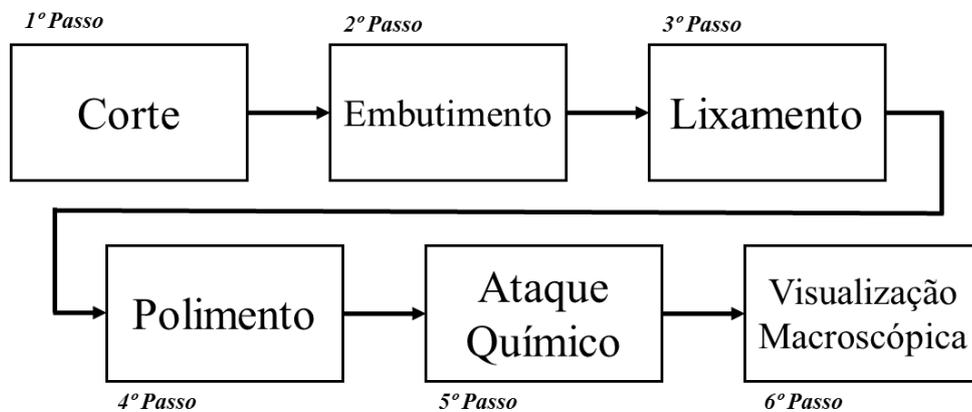


Figura 3.5 – Etapas do ensaio metalográfico

1º Passo – Para realização deste estudo em soldas, é necessário particionar os corpos de prova. Para isso foi realizado corte com disco abrasivo e com refrigeração, Figura 3.6.



Figura 3.6 – Máquina de corte utilizada

2º Passo – Realiza-se o embutimento a quente das amostras em materiais termoplásticos, a fim de facilitar o manuseio das peças, visto o seu tamanho reduzido. Usa-se o aquecimento e pressão para realizar a polimerização, Figura 3.7. Neste processo fora utilizado o baquelite em pó preto tipo MP 39.



(a) Prensa hidráulica para embutimento a quente



(b) Peças embutidas

Figura 3.7 – Ilustrações do processo de embutimento

3º Passo – É realizado o lixamento das peças em folha de material abrasivo, variando a granulagem da mesma, aprimorando sua rugosidade superficial. Para isto, fora utilizado a máquina de lixamento semiautomática (Figura 3.8) e lixas de granulometria 100, 200, 400 e 1200 respectivamente.



Figura 3.8 – Máquina de lixamento semiautomática utilizada

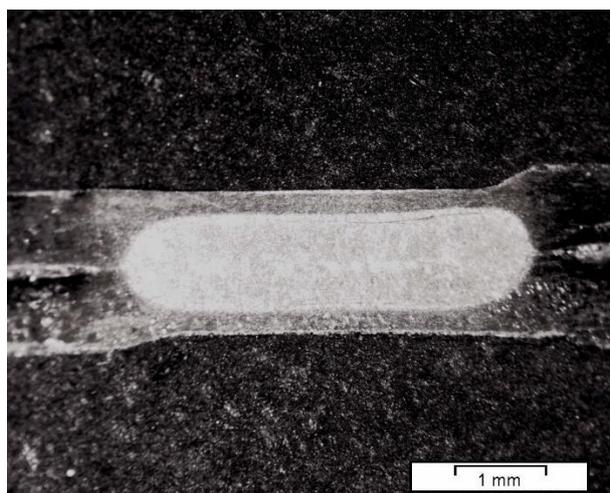
4º Passo – Após um acabamento superficial livre de marcas, é realizado o polimento mecânico, através de uma Politriz. Como agente polidor, fora utilizado a Alumina Líquida 1001 0,3 μ .

5º Passo – Ao finalizar o polimento, é realizado o ataque químico, no qual permite a identificação e visualização das características geométricas do produto soldado. Neste estudo fora utilizado Reativo de Iodo durante 15 segundos.

6º Passo – Para visualização e análise fora utilizado um estereoscópio modelo SZ61 da marca OLYMPUS®, com aumento de 20 vezes e verificado no software *Analysis Doc*®, Figura 3.9.



(a) Estereoscópio SZ61



(b) Imagem pelo software *Analysis Doc*®

Figura 3.9 – Equipamento para análise visual

As imagens dos 8 pontos soldados e preparados para análise se encontram na Figura 3.10.

3.3 Realização das medições

Peruchi (2011) afirma que a coleta dos dados para um estudo GR&R deve ser organizado e conduzido de maneira adequada, considerando a quantidade de peças, operadores e quantidade de vezes que um operador deve medir cada peça, além de que deve representar a amplitude do processo. Assim, a realização das medições será distinta para cada tipo de ensaio, destrutivos e não destrutivos.

3.3.1 Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos, bem como a realização das medições, foram realizados no Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos (LEN) da UNIFEI, onde foi feito o teste de cisalhamento que mensura duas respostas de qualidade:

- Resistência ao Cisalhamento (RC);
- Deformação na Força Máxima de Ruptura ($DF_{Máx}$).

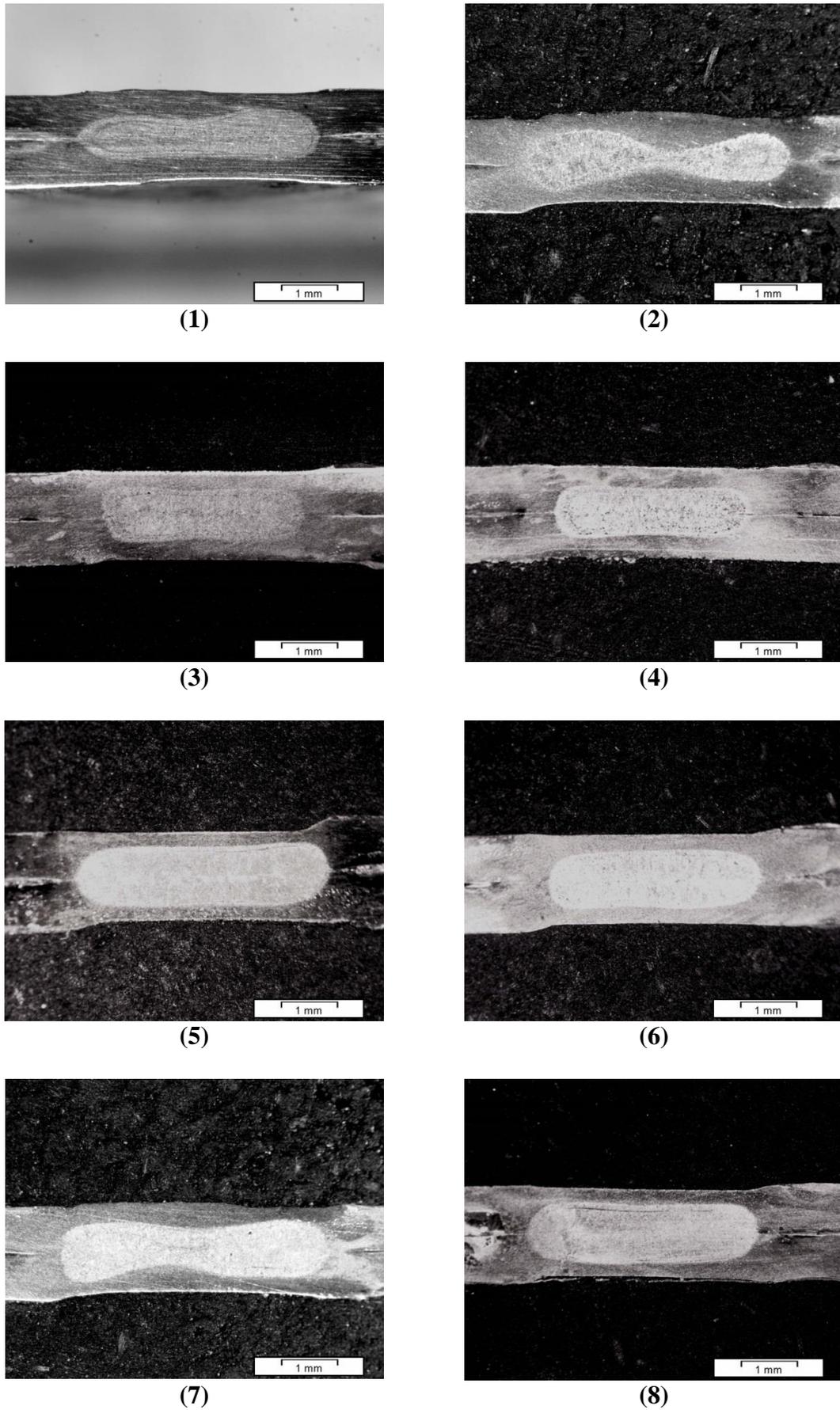


Figura 3.10 – Imagens macroscópicas das soldas a ponto para o estudo GR&R multivariado

Para o desenvolvimento de um estudo de GR&R fora considerado 2 operadores, neste contexto sendo duas máquinas de tração:

- *Máquina 1*: Servo-hidráulica modelo 8801 da marca *Instron*®, que fornece capacidade de força axial de até 100 kN (10.000 kgf);
- *Máquina 2*: Universal de ensaios eletromecânicos DL2000 da marca *EMIC*® com capacidade de força axial de até 30 kN (3.000 kgf);

Na Figura 3.11 pode-se verificar as duas máquinas utilizadas neste ensaio.

No que se refere à quantidade às peças, foram utilizados neste ensaio um total de 48 corpos de prova, sendo 6 réplicas para 8 conjunto de parâmetros distintos. Destas 6 réplicas, 3 foram utilizadas para a *Máquina 1* e 3 utilizadas para a *Máquina 2*. Logo, a estrutura para o estudo GR&R foi:

- 8 corpos de prova (peças);
- 2 máquinas (operadores);
- 3 réplicas.



(a) Máquina *Instron*®

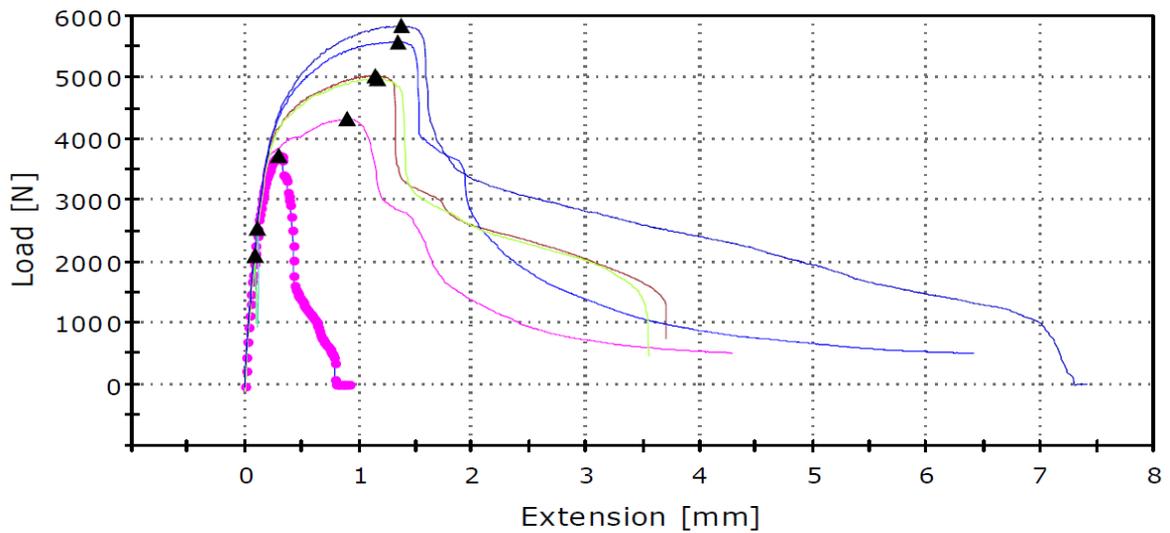


(b) Máquina *EMIC*®

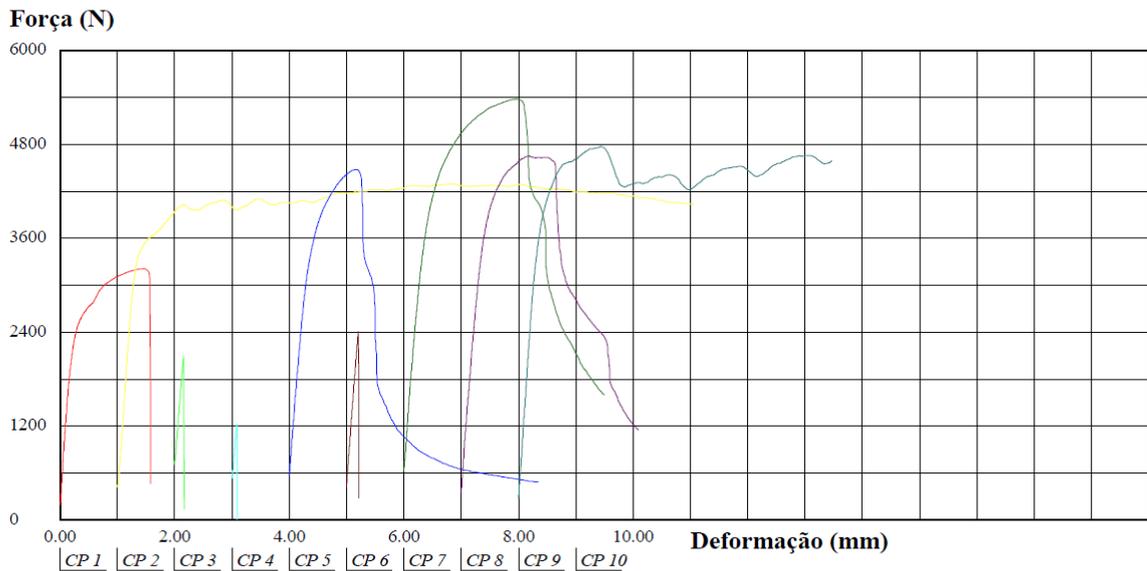
Figura 3.11 – Equipamentos utilizados para o teste de cisalhamento

Com o auxílio do software *Minitab*® 17, gerou-se, de maneira aleatória, a tabela para estudo GR&R para os ensaios destrutivos, a fim de realizar os testes e conseqüentemente a realização das medições.

A Figura 3.12 ilustra as medições realizadas pelas duas máquinas. Os demais dados referentes a este teste encontram-se na Tabela A.1 do Anexo A e as demais figuras de todos os testes disponíveis no Anexo D.



(a) Leitura pela máquina *Instron*®



(b) Leitura pela máquina *EMIC*®

Figura 3.12 – Exemplo de medições realizadas para o teste de cisalhamento

3.3.2 Caracterização geométrica do ponto soldado

Para a realização das medições deste grupo de ensaios, as medições foram realizadas por 4 operadores distintos, sendo eles providos de diferentes níveis de instrução e experiência, sendo um especialista em metrologia, um com experiência fabril em soldagem a ponto por resistência elétrica e dois com experiência laboratorial intermediária.

Todos os ensaios de medições foram realizados de modo aleatorizado com 8 medições cada para 3 réplicas, totalizando assim um total de 96 dados para cada ensaio.

A realização das medições por imagem, que foi possível após toda preparação metalográfica descrita na seção 3.2, consiste em 5 características distintas da qualidade a serem mensuradas, sendo elas:

- Largura da indentação;
- Profundidade de indentação;
- Penetração;
- Diâmetro do ponto;
- Área da zona de fusão.

Tais características podem ser verificadas conforme a Figura 2.5.

As medições foram realizadas pelo software *Analysis Doc*® em escala de milímetros (mm) no Laboratório de Metalurgia e Materiais (LMM) da UNIFEI. Os dados foram coletados, aleatoriamente, e estão disponíveis na Tabela B.1 do Anexo B.

3.4 Considerações finais

O presente capítulo apresentou todo procedimento do método de pesquisa aplicado, detalhando todas as etapas desde as escolhas dos parâmetros até a realização das medições para o estudo GR&R, além de apresentar os materiais e equipamentos utilizados durante o processo.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O Capítulo 4 aborda a aplicação e análise dos resultados dos dados de medições do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica coletados para o estudo de GR&R por componentes principais ponderados, como detalhado no Capítulo 3. Na seção 4.1 foi realizada a análise do estudo para os testes destrutivos, bem como suas considerações sobre a mesma. Os dados e análise dos testes para as características geométricas serão abordados na seção 4.2, onde considerou-se as medições realizadas pelo software de imagem. A seção 4.3 apresenta uma análise dos instrumentos convencionais de metrologia, comparando os resultados das características de qualidade de profundidade de indentação e diâmetro do ponto, respectivamente, com as mesmas características dos dados de medições das imagens. Finalmente, na seção 4.4 tem-se as considerações finais sobre as aplicações e análises abordadas neste capítulo.

4.1 GR&R-WPC para ensaios destrutivos

Para este estudo GR&R foram considerados os dados coletados, de maneira aleatória, do teste de cisalhamento, sendo a Resistência ao Cisalhamento (RC) e a Deformação na Força Máxima de Ruptura ($DF_{Máx}$), considerando 8 peças, 2 operadores e 3 réplicas. A Tabela A.1, do Anexo A, contém os dados coletados deste estudo.

Seguindo o modelo proposto por Peruchi *et al.* (2013), após a realização das medições é necessário verificar a correlação dos dados, que busca medir o grau que as variáveis mudam juntas. Para este estudo, os dados mostram que há uma correlação mediana, mas significativa, Tabela 4.1, permitindo trabalhar os dados por uma análise multivariada.

Tabela 4.1 – Análise da correlação para as respostas RC e $DF_{Máx}$

	RC
$DF_{Máx}$	0,644*
	0,000**

* Correlação de *Pearson*

** *p-value*

Em seguida foi realizada uma análise dos componentes principais das respostas de resistência ao cisalhamento (RC) e deformação na força máxima de ruptura ($DF_{Máx}$) usando a matriz de correlação dos dados, onde seus autovalores e autovetores estão armazenados na

Tabela 4.2. A partir da Equação (2.17), foi possível extrair os escores dos componentes principais, nos quais encontram-se na Tabela A.1.

Tabela 4.2 – Análise de componentes principais para RC e $DF_{Máx}$

	Componentes Principais	
	PC_1	PC_2
Autovalores	1,6441	0,3559
Proporção	0,822	0,178
Cumulativo	0,822	1
Respostas	Autovetores	
RC	0,707	0,707
$DF_{Máx}$	0,707	-0,707

Para melhor visualização e verificação do nível de similaridade dos componentes diante as respostas originais, fora realizado um dendograma das respostas originais diante seus componentes principais, Figura 4.1, mostrando a forma como os agrupamentos foram formados.

A análise hierárquica de *Cluster* utilizando os escores de componentes principais tem objetivo de agrupar respostas com modelos matemáticos similares, onde o método de ligação *Ward* busca minimizar a perda de informação na conexão de dois grupos, considerando tal perda como um aumento do critério do erro da soma dos quadrados: $ESQ = \sum_{j=1}^{m_i} (\phi_{ij} - \bar{\phi}_i)(\phi_{ij} - \bar{\phi}_i)$; tendo $\bar{\phi}_i$ como média dos itens e ϕ_{ij} como medida multivariada. Um diagrama bidimensional (dendograma) pode ser gerado para ilustrar os agrupamentos e distinções em níveis, onde os valores do ESQ determinam as conexões ilustradas no eixo vertical (MIRANDA FILHO *et al.* 2016; JOHNSON e WICHERN, 2007).

Através desta análise hierárquica de *Cluster* fundamentada nos coeficientes de correlação e utilizando o método de ligação *Ward* (RENCHE E CHRISTENSEN, 2012), pode-se verificar a formação de dois grupos distintos, sendo o primeiro detendo o maior nível de similaridade com as duas respostas da qualidade.

Assim, para chegar ao modelo da Equação (2.21) ponderando os componentes principais pelos seus autovalores, fora utilizado a Equação (2.22) e armazenado na Tabela A.1.

$$\mathbf{WPC} = \sum_{i=1}^q [\lambda_i(\mathbf{PC}_i)] = 1,6441 \mathbf{PC}_1 + 0,3559 \mathbf{PC}_2 \quad (4.1)$$

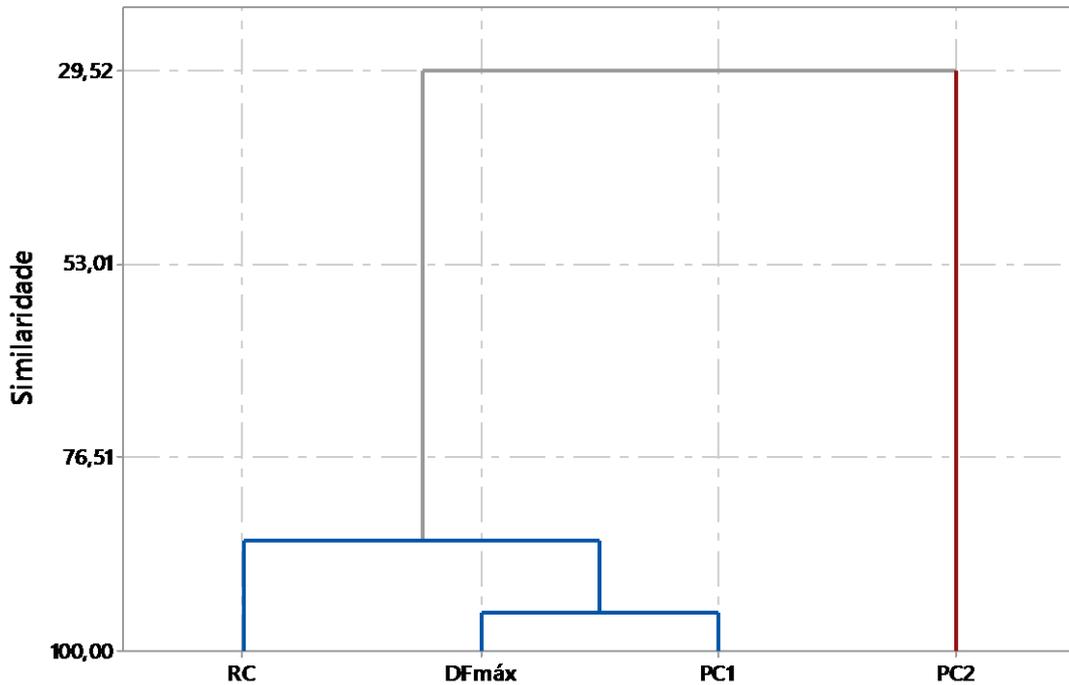


Figura 4.1 – Dendrograma dos componentes pelas respostas no ensaio destrutivo

Tratando-se do estudo com ensaios destrutivos, o vetor WPC, que detêm o conjunto de respostas originais do teste de cisalhamento, não apresenta termo de interação, assim seu equacionamento se dá pela Equação (2.29). A análise de variância para os escores ponderados dos componentes principais encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Análise de variância para os escores WPC para ensaio destrutivo

Fonte	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F	p-value
Operadores	1	0,0190	0,0194	0,0015	0,9700
Peças (Operadores)	14	184,1200	13,1514	15,6813	0,0000
Repetitividade	32	26,8370	0,8387		
Total	47	210,9760			

Com isto, tanto as raízes quadradas das variâncias, quanto os indicadores $\%R\&R_m$ e ndc_m , Equações (2.32) e (2.33), respectivamente, foram mensuradas e armazenadas na Tabela 4.4.

A partir da mensuração destes resultados, tem-se que o $\%R\&R_m$ apresentou valor de 41,19%, sendo considerado inaceitável perante as condições estabelecidas pela Tabela 2.3. Seu número de categorias distintas apresenta valor de $ndc_m = 3$, não podendo ser considerado aceitável, segundo AIAG (2010).

Tabela 4.4 – Classificação do sistema de medição para ensaios destrutivos utilizando WPC

Fonte	WPC	
	$\hat{\sigma}$	% Var
GR&R Total	0,9158	41,19%
Repetitividade	0,9158	41,19%
Reprodutibilidade	0,0000	0%
Peça-a-peça	2,0259	91,12%
Varição Total	2,2233	100%
<i>ndc</i>	3	

A Figura 4.2 criada com o auxílio do software *Minitab*® 17 ilustra os gráficos deste estudo, onde na Figura 4.2(a) é possível verificar uma visão geral do sistema de medição e do processo, discriminando a contribuição da repetitividade, variação dentro do sistema, para a variação do processo que apresenta valor de 0,4119.

A Figura 4.2(b) mostra que a média das peças são bem distintas, podendo frisar que são peças diferentes. É possível verificar que há variação em algumas medições, principalmente das que se refere à *Máquina 2*, onde existem pontos de variação na leitura da peça 7.

Os gráficos 4.2(c) e (e) ilustram o desempenho das duas Máquinas (operadores) utilizando cartas de controle *R* e *Xbar*, respectivamente. Na Figura 4.2(c) tem-se a amplitude das medições, onde é possível verificar que a *Máquina 2* apresenta um ponto fora de controle, sendo este da peça 7, podendo inferir que não houve uma repetitividade considerável para medição desta peça na *Máquina 2*.

Analisando o fator operador, neste estudo sendo as *Máquina 1* e *Máquina 2*, tem-se que, na Figura 4.2(d), há uma grande diferença entre os operadores, como verificado também na análise de variância da Tabela 4.3, pois a variação das medições da *Máquina 2* é maior que a da *Máquina 1*, mostrando que pode haver um problema na realização das medições da mesma.

Na carta de controle *Xbar*, espera-se que pelo menos 50% dos pontos plotados apresentem-se fora de controle, o que é possível verificar na Figura 4.2(e), que mostra que as peças escolhidas para análise são distintas, representando adequadamente a amplitude do processo, reforçando a constatação pelo gráfico da Figura 4.2(b).

A partir do gráfico *Gage Run Chart*, Figura 4.3, é possível verificar dentre as medições, quais delas apresentaram uma maior variabilidade, onde a segunda réplica da peça 7 para a

Máquina 2 obteve uma leitura com grande distinção compara a primeira e terceira réplica desta peça.

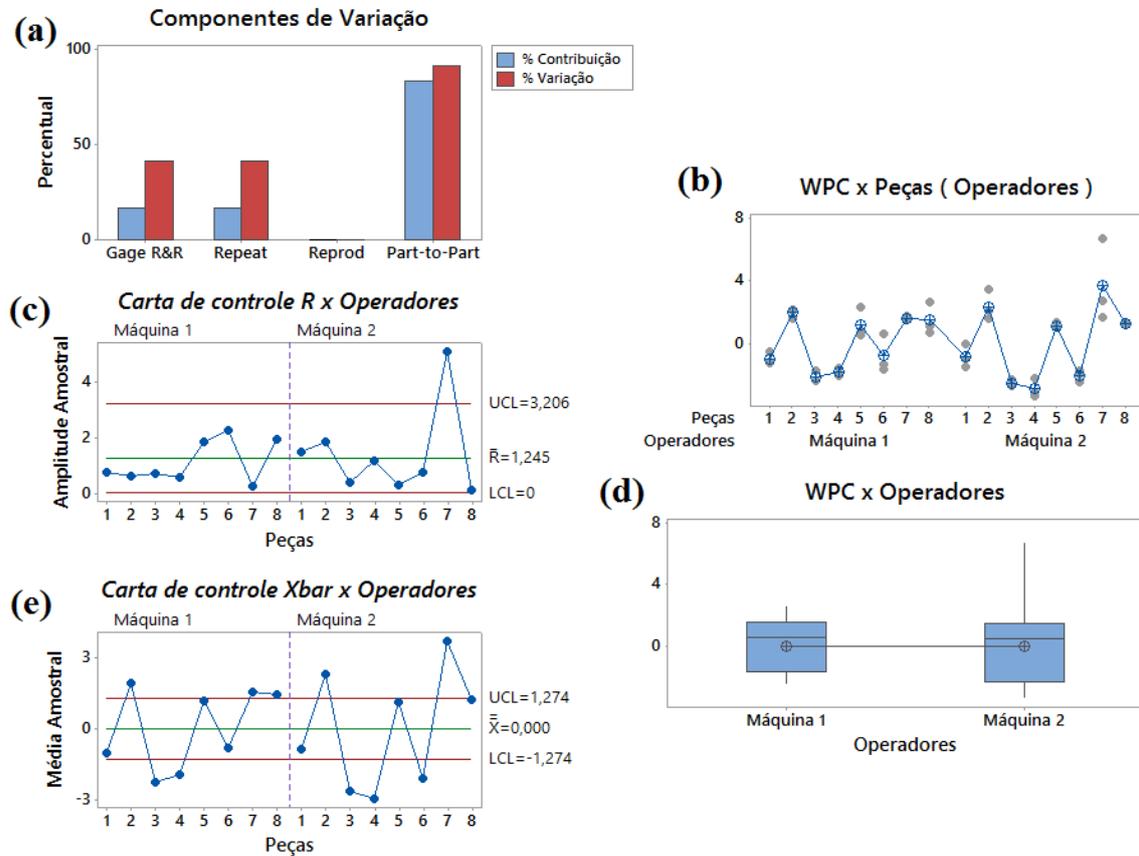


Figura 4.2 – Gráficos do estudo GR&R por WPC para ensaios destrutivos

4.1.1 Considerações do estudo para ensaios destrutivos

Na seção 4.1 foi possível verificar a aplicação e a análise do estudo GR&R por componentes principais ponderados em um ensaio destrutivo. Para este estudo, pode-se verificar que a *Máquina 2* apresentou maior nível variação, apresentando menor repetitividade nas medições, além de um ponto fora de controle para a peça 7, caracterizado pela segunda leitura da mesma. Tal resultado pode ser explicado uma vez que a *Máquina 2* durante os testes não se apresentou totalmente adequada, ocasionando em deslizos do corpo de prova durante os ensaios, não realizando uma leitura fiel das características da qualidade avaliadas, mesmo com os devidos preparos usualmente realizados para este procedimento. Pode-se inferir, a partir desta análise, que esta máquina necessita de ajustes e melhorias, principalmente ao que diz respeito ao encaixe do corpo de prova na máquina, visto que seu acoplamento apresentou deslizos durante o teste para este metal, que apresenta camada de zinco (aço galvanizado). Tal

melhoria, poderia manter fixo o acoplamento da peça durante o teste cisalhante, a fim de não comprometer diagnósticos futuros em ensaios realizados por ela.

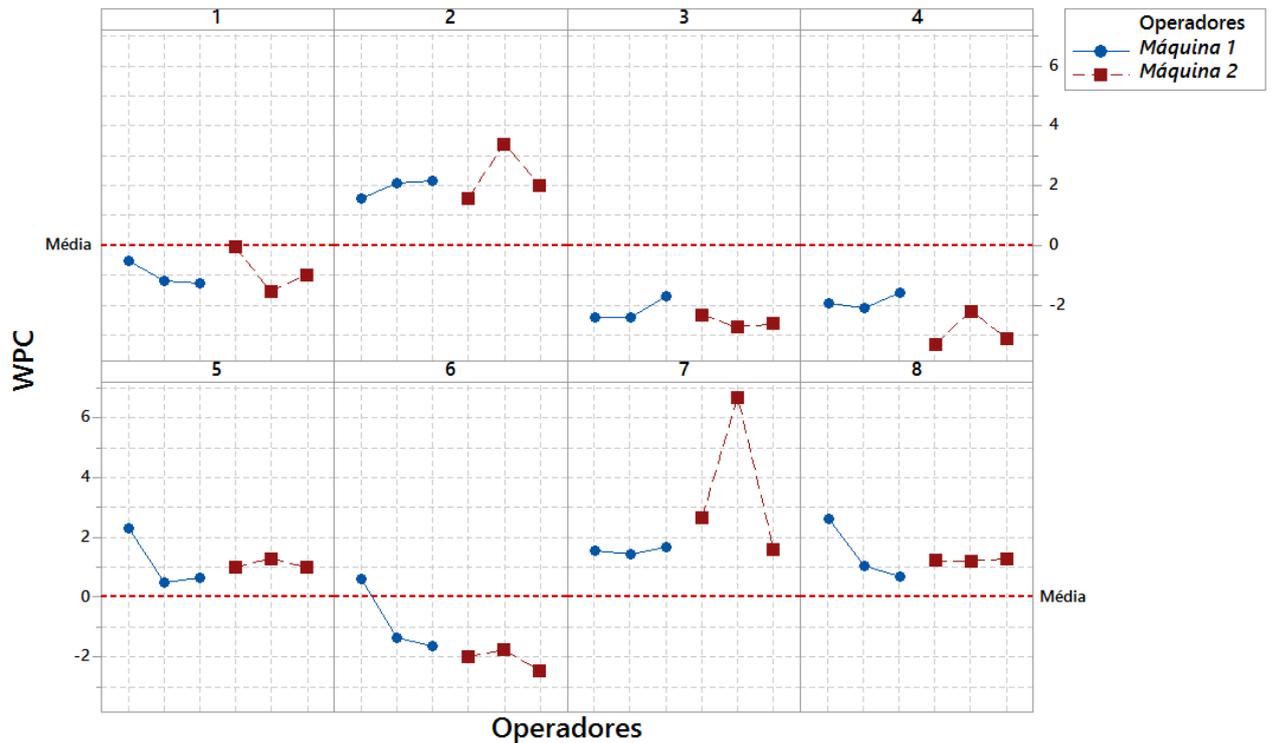


Figura 4.3 - Gage Run Chart para ensaios destrutivos

4.2 GR&R-WPC para características geométricas do ponto

Para realização de um estudo GR&R multivariado para caracterização geométrica do ponto soldado deste processo RSW, fora escolhido a análise por imagem, que permite mensurar as características do ponto de maneira geométrica, após a preparação metalográfica detalhada na seção 3.2. Foram avaliadas cinco características geométricas, sendo elas:

- Largura da indentação (LI);
- Profundidade de indentação (PI);
- Penetração (P);
- Diâmetro do ponto (DP);
- Área da zona de fusão (AF).

Assim como delineado no Capítulo 3, para este estudo foram considerados: 4 operadores (o) com distintos níveis de experiência e conhecimento técnico, no qual receberam o devido treinamento antes das medições; 8 peças (p) distintas (Figura 3.10) e realizado 3 réplicas (r)

cada. Tais características geométricas foram medidas, de maneira aleatorizada, através do software analisador de imagens *Analisis Doc*® e os dados estão disponíveis na Tabela B.1, do Anexo B.

Seguindo o método de Peruchi *et al.* (2013), após a coleta, foi verificado se há correlação dos dados. A partir da Tabela 4.5 é possível verificar que os dados apresentam correlação. A característica *DP* (Diâmetro do ponto) não apresenta correlação significativa com a *LI* (Largura da indentação), mas apresenta correlação com as demais características geométricas. A maior correlação está entre a penetração e a área de fusão, com valor de *Pearson* de 0,847.

Tabela 4.5 – Análise da correlação para as respostas *LI*, *PI*, *P*, *DP* e *AF*

	<i>LI</i>	<i>PI</i>	<i>P</i>	<i>DP</i>
<i>PI</i>	0,391*			
	0,000**			
<i>P</i>	0,715*	0,537*		
	0,000**	0,000**		
<i>DP</i>	0,107*	0,677*	0,553*	
	0,298**	0,000**	0,000**	
<i>AF</i>	0,537*	0,533*	0,847*	0,561*
	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**

* Correlação de *Pearson*

** *p-value*

Para trabalhar os dados de maneira multivariada, após verificar a correlação das respostas, foi realizada a análise dos componentes principais pela matriz de correlação. Na Tabela 4.6 é possível verificar os respectivos autovalores e autovetores dos componentes. Os escores dos componentes foram extraídos a partir da Equação (2.17) e encontram-se armazenados na Tabela B.2.

Desta forma, tem-se, a partir da Equação (2.22), o seguinte equacionamento para a ponderação destes componentes principais:

$$\mathbf{WPC} = \sum_{i=1}^q [\lambda_i(\mathbf{PC}_i)] = 3,2226 \mathbf{PC}_1 + 1,00046 \mathbf{PC}_2 + 0,47423 \mathbf{PC}_3 + 0,21384 \mathbf{PC}_4 + 0,08887 \mathbf{PC}_5 \quad (4.2)$$

Tabela 4.6 – Análise de componentes principais para *LI, PI, P, DP e AF*

	Componentes Principais				
	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5
Autovalores	3,2226	1,00046	0,47423	0,21384	0,08887
Proporção	0,645	0,200	0,095	0,043	0,018
Cumulativo	0,645	0,845	0,939	0,982	1,000
Respostas	Autovetores				
LI	0,380	0,651	-0,394	-0,321	-0,417
PI	0,432	-0,360	-0,701	0,395	0,192
P	0,514	0,226	0,272	-0,234	0,745
DP	0,402	-0,623	0,161	-0,565	-0,324
AF	0,493	0,086	0,503	0,606	-0,360

Através da soma das proporções da quantidade de informação para cada componente, é possível verificar que o terceiro componente (PC_3) já detêm 93,9% das informações. A partir do Dendograma, Figura 4.4, gerado diante uma análise hierárquica de *Cluster* e agrupamentos mensurados através do método de ligação *Ward*, tem-se que os coeficientes de correlação para *PI, DP, P* e *AF* detêm maior nível de similaridade com o componente PC_1 , enquanto a característica *LI* está para o componente PC_2 . Os três últimos componentes (PC_3, PC_4 e PC_5), apresentam o mesmo nível de similaridade, portanto, para evitar que o excesso de dados inflacione o resultado, fora considerado apenas três componentes, onde se tem um novo vetor *WPC* a partir da Equação (4.3), armazenado na Tabela B.3.

$$\mathbf{WPC} = \sum_{i=1}^q [\lambda_i(\mathbf{PC}_i)] = 3,2226 \mathbf{PC}_1 + 1,00046 \mathbf{PC}_2 + 0,47423 \mathbf{PC}_3 \quad (4.3)$$

Os resultados da Equação (4.3) foram ajustados de modo a realizar uma análise de variância, Tabela 4.7, onde pode-se verificar que o termo de interação não é significativo, *p-value* = 0,201. Desta forma o modelo pode ser ajustado para uma análise sem o termo de interação, a partir da Equação (2.29). Considerando um nível de significância de 0,05 pode se inferir que rejeita-se as hipóteses nulas dos operadores replicarem a mesma mensuração para a uma mesma peça, bem como das peças serem iguais, tendo ambas um *p-value* = 0,000. As variâncias do processo, reprodutibilidade, repetitividade, sistema de medição e a totalidade de variância, foram calculadas a partir das Equações (2.30), (2.31), (2.26), (2.27) e (2.28), respectivamente.

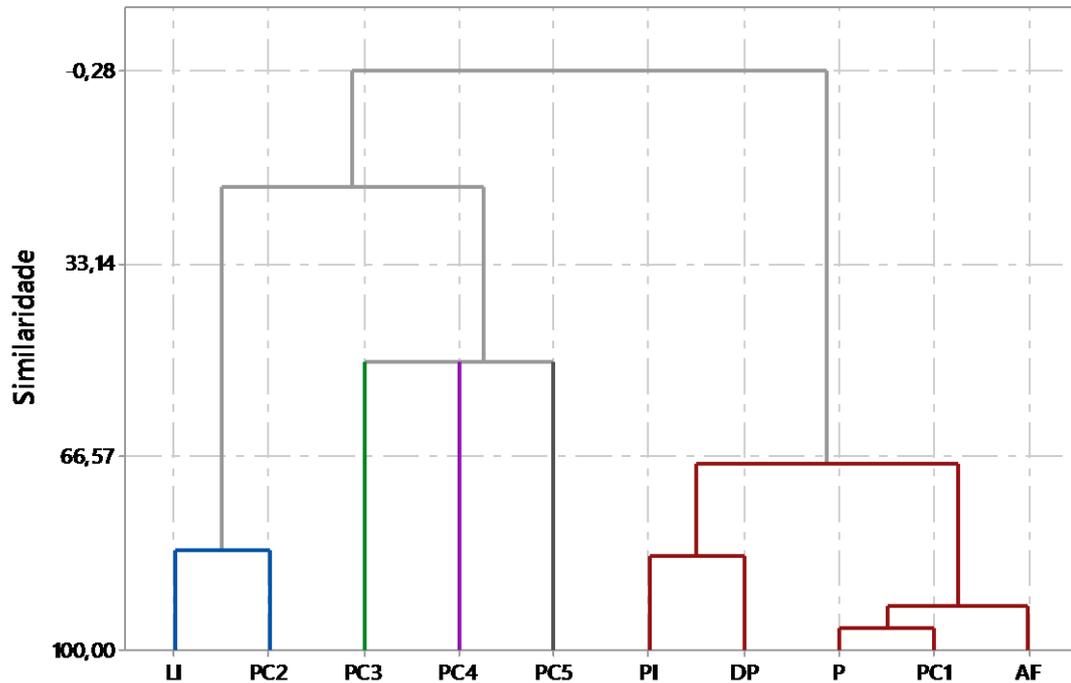


Figura 4.4 – Dendrograma dos componentes pelas respostas da caracterização geométrica

Tabela 4.7 – Análise de variância para os escores *WPC* para caracterização geométrica

ANOVA com interação					
	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F	P
Peças	7	3218,96	459,852	872,696	0,000
Operadores	3	28,92	9,639	18,293	0,000
Peças x Operad.	21	11,07	0,527	1,313	0,201
Repetitividade	64	25,69	0,401		
Total	95	3284,64			
ANOVA sem interação					
	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F	P
Peças	7	3218,96	459,852	1063,45	0,000
Operadores	3	28,92	9,639	22,29	0,000
Repetitividade	85	36,76	0,432		
Total	95	3284,64			

$\alpha = 0,05$ para remover o termo de interação

Perante às Equações (2.32) e (2.33), estão armazenados na Tabela 4.8 os índices $\%R\&R_m$ e ndc_m , além das raízes quadradas das variâncias.

Tabela 4.8 – Classificação do SM para caracterização geométrica utilizando WPC

Fonte	WPC	
	$\hat{\sigma}$	% Var
GR&R Total	0,9033	14,45%
Repetitividade	0,6576	10,52%
Reprodutibilidade	0,6194	9,90%
Operadores	0,6194	9,90%
Peça-a-peça	6,1875	98,95%
Varição Total	6,2531	100%
<i>ndc</i>	9	

O indicador $\%R\&R_m$ apresenta, de acordo com a Tabela 2.3, que o SM se classifica como marginal, podendo ou não ser aceitável perante a critérios estabelecidos. Entretanto, diante ao *ndc*, que indica o número de categorias distintas identificadas pelo sistema de medição, para este estudo apresentou $ndc_m = 9$, sendo considerado, segundo AIAG (2010) como aceitável.

Verificando o intervalo de confiança (IC) de 95%, tem-se que o índice $\%R\&R_m$ pode variar para um valor até 6,94, mostrando que este SM tem capacidade de apresentar melhorias e ter classificação aceitável.

Utilizando o software *Minitab*® 17 foi possível gerar os gráficos, contidos na Figura 4.5, que ilustram este sistema de medição. Na Figura 4.5(a) pode-se verificar, de maneira geral, o sistema de medição, mostrando que o mesmo é adequado uma vez que o maior componente de variação se dá pela Peça-a-Peça (*Part-to-Part*) de 0,9895, com variação de Repetitividade e Reprodutibilidade de 0,1052 e 0,0999 respectivamente, como ilustrado na Tabela 4.8.

Diante a Figura 4.5(b), verifica-se que, além das médias das peças serem diferentes, caracterizando que este sistema representa uma amplitude real do processo, a Peça 5 apresentou uma variação de medição muito baixa, caracterizando uma boa repetitividade nas medições.

Para a amplitude das medições, tem-se o gráfico da Figura 4.5(c), que apresenta uma carta de controle *R*, onde é possível analisar que o *Operador A* apresenta um ponto fora de controle, no que diz respeito à *Peça 1*, mostrando que não houve uma boa repetitividade deste operador para medição desta peça específica.

No que diz respeito ao gráfico da Figura 4.5(d), é possível verificar que os operadores apresentam médias distintas, podendo verificar, através da análise de variância disponível na

Tabela 4.7, que a diferença entre os operadores é significativa, confirmando o que fora proposto, uma vez que se considerou operadores de níveis distintos de experiência.

A Figura 4.5(e) apresenta uma carta de controle \bar{X} , onde é possível verificar que mais de 50% dos pontos apresentam-se fora de controle, como desejável. Além de confirmar que as peças escolhidas, com diferentes parâmetros, representam adequadamente a amplitude do processo, sendo umas distintas das outras, como evidenciado na Figura 4.5(b).

A carta de interação, contida na Figura 4.5(f), ilustra o comportamento das medições médias realizadas por cada operador em cada uma das peças, onde é possível verificar que as linhas seguem o mesmo padrão, caracterizando o que fora verificado através da análise de variância, que não há interação entre peça e operador.

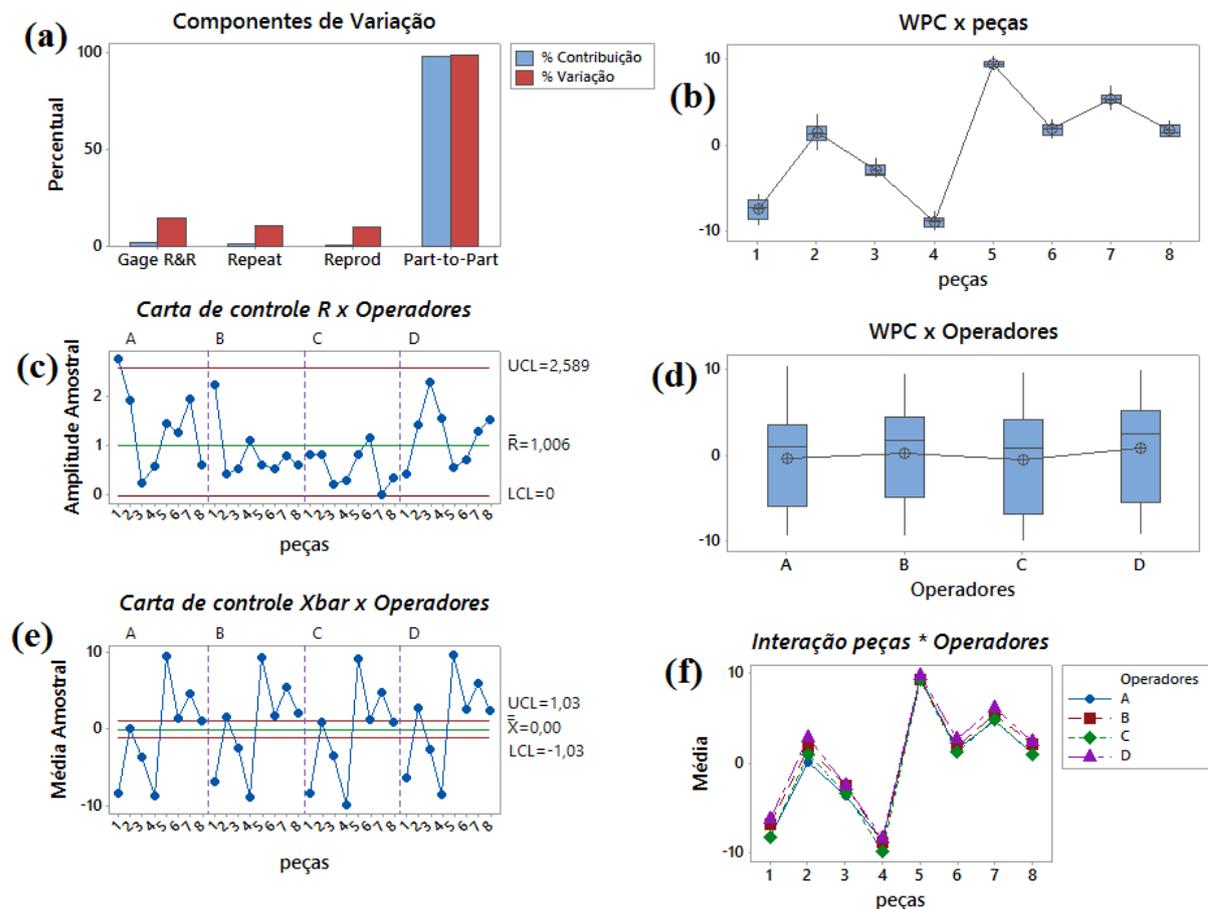


Figura 4.5 – Gráficos do estudo GR&R por WPC para características geométricas

O gráfico *Gage Run Chart*, Figura 4.6, ilustra a variação das repetitividade e reprodutibilidade de cada operador, para cada medições das 8 peças, onde é possível inferir que a segunda medição da Peça 1 do Operador A que caracterizou o ponto fora de controle do gráfico 4.5(c).

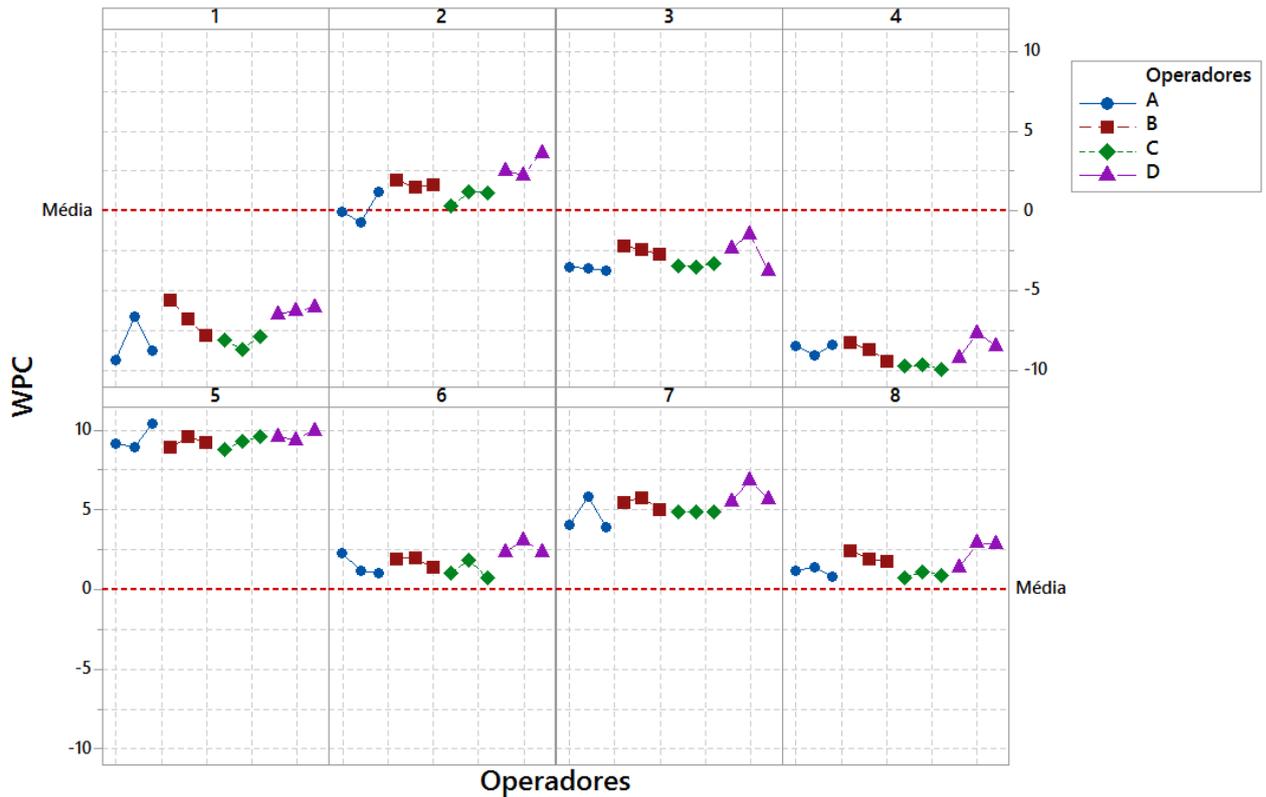


Figura 4.6 - Gage Run Chart para caracterização geométrica do ponto

4.2.1 Considerações do estudo para caracterização geométrica do ponto

Foi abordado na seção 4.2 uma aplicação e avaliação do estudo GR&R por componentes principais ponderados para características geométricas, mensurando através de um software de imagens. Neste estudo foi possível verificar que três dos cinco componentes apresentavam o mesmo nível de similaridade, onde a análise hierárquica de *cluster* favoreceu para visualização da similaridade dos componentes, levando o estudo a trabalhar com apenas 3 componentes. Chegou-se a métrica de um GR&R classificado como marginal, porém, podendo ser considerado aceitável perante seu intervalo de confiança, além de apresentar um $ndc = 9$, caracterizando-se como aceitável, segundo AIAG (2010).

4.3 Comparação do SM por análise de imagens com equipamentos convencionais de metrologia

Com finalidade de complementar os estudos para o sistema de medição deste processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, fora avaliado também um comparativo entre as medições realizadas pelo software de imagem e pelos instrumentos mecânicos do laboratório de metrologia, sendo eles o relógio apalpador e o paquímetro. Para isto, foram avaliados dois

tipos de características de qualidade, sendo a profundidade de indentação (*PI*) e o diâmetro do ponto (*DP*), buscando evidenciar amostras das medições para ambos instrumentos. A análise do comparativo será abordada nas seções seguintes.

4.3.1 Medições para a profundidade de indentação

Para realizar este estudo, utilizou-se dos dados de medição do parâmetro “profundidade de indentação” do software de imagens *Analisis Doc*®, contidos no ANEXO C, Tabela C.1.

Para comparativo desta métrica, foi utilizado um relógio apalpador da marca *Mitutoyo*, Figura 4.7, que apresenta resolução de 0,01 milímetros. Como mencionado anteriormente na seção 3.3.2, foi utilizado 4 operadores, para 8 medições distintas com 3 réplicas cada, totalizando 96 dados de medições, coletados aleatoriamente e armazenados na Tabela C.1.



Figura 4.7 – Relógio apalpador *Mitutoyo*

Inicialmente foram realizados testes pareados, que visam calcular a diferença entre os pares de medições, sendo o teste *t* pareado e o não-paramétrico teste *Wilcoxon*, para determinar a média e mediana das suas variações e verificando se a média e mediana das diferenças, respectivamente, são significativas. A Tabela 4.9 apresenta os testes pareados para a profundidade de indentação considerando os dois instrumentos de medição.

Diante aos testes pareados, é possível verificar que tanto as médias das diferenças quanto a mediana das diferenças são estatisticamente iguais, apresentando um *t-value* = 0,07, com probabilidade de 94,10% desta hipótese ser verdadeira para média das diferenças e apresentando a estatística *Wilcoxon* igual a 222.

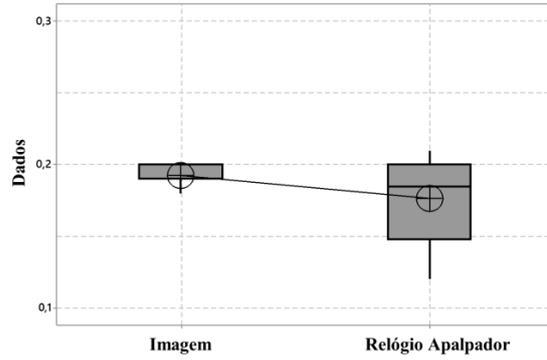
Tabela 4.9 – Testes pareados para profundidade de indentação

Instrumento	N	Média	Desvio Padrão	Erro Quadrático da Média
Relógio Apalpador	32	0,1696	0,0620	0,0110
Imagem	32	0,1686	0,0565	0,0100
Diferença	32	0,0009	0,0716	0,0127
Teste T da diferença das médias = 0 (vs ≠ 0)				
<i>T-value</i>			0,07	
<i>P-value</i>			0,941	
Teste Wilcoxon da diferença das medianas = 0 (vs ≠ 0)				
	N	Estatística Wilcoxon	P-value	Mediana Estimada
Diferença	32	222	0,617	-0,0075

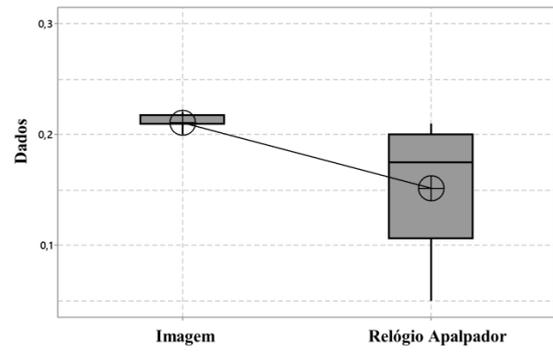
Com finalidade de avaliar e comparar a distribuição das medições para cada um dos instrumentos, foi gerado um gráfico do tipo “*Boxplot*” que visa exibir a forma, tendência central e variabilidade da amostra analisada. Para tal, tem-se o comparativo para cada uma das 8 peças, ilustradas na Figura 4.8.

Perante os gráficos plotados na Figura 4.8, é possível verificar claramente que, em todas as peças, houve uma repetitividade maior nas medições realizadas através do software de imagem e que a variabilidade das medições se mostrou maior na medição através do relógio apalpador, evidenciando até mesmo um *outlier* na *Peça 7*, caracterizando uma alta variabilidade durante a medição. Portanto, pode-se inferir que para os mesmos operadores e nas mesmas condições para instrumentos de medição diferentes, o relógio apalpador se mostrou menos eficaz quando comparado à medição realizada através do software analisador de imagem.

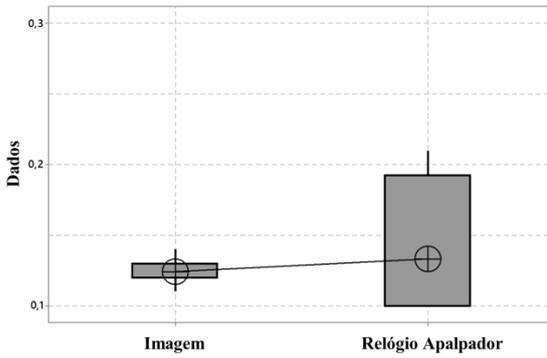
Realizando um estudo de repetitividade e reprodutibilidade de caráter univariado a partir do método de análise de variância (ANOVA), é possível verificar os indicadores de avaliação GR&R na Tabela 4.10, onde é possível que a %R&R se classificou como inaceitável para o relógio apalpador, enquanto o estudo das medições pelo software de imagem fora classificado como marginal, para a %R&R, e aceitável para o *ndc*.



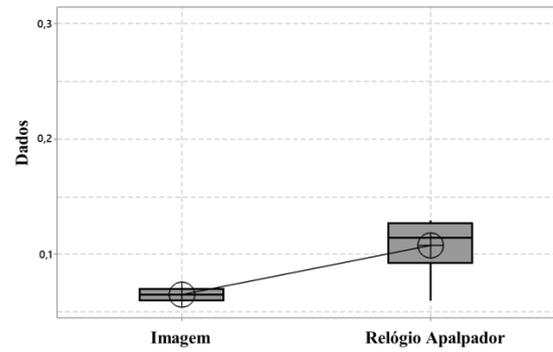
(1)



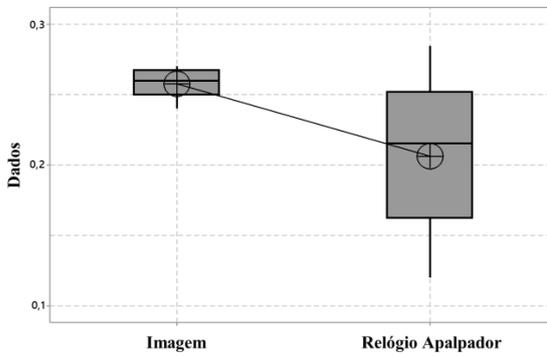
(2)



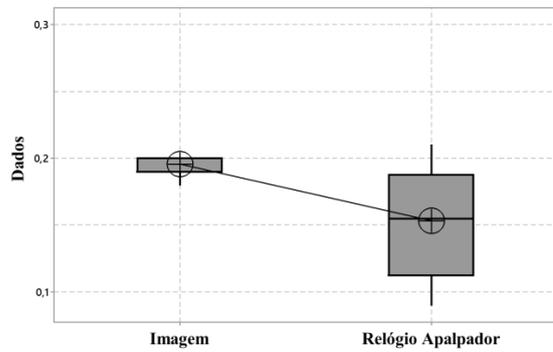
(3)



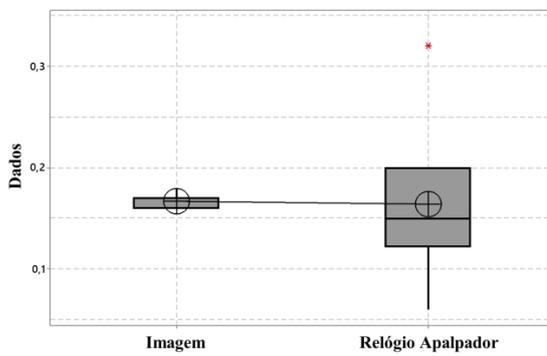
(4)



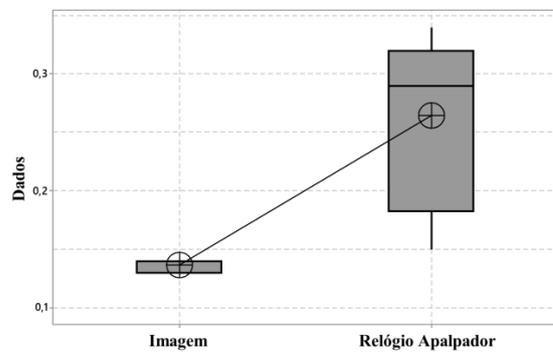
(5)



(6)



(7)



(8)

Figura 4.8 – *Boxplot* para profundidade de indentação

Tabela 4.10 - GR&R para profundidade de indentação

Fonte	Relógio Apalpador		Analysis Doc	
	$\hat{\sigma}$	% Var	$\hat{\sigma}$	% Var
GR&R Total	0,0535	75,22%	0,0069	11,61%
Repetitividade	0,0366	51,56%	0,0069	11,61%
Reprodutibilidade	0,0389	54,77%	0,0000	0%
Operadores	0,0389	54,77%	0,0000	0%
Peça-a-peça	0,0468	65,90%	0,0594	99,32%
peças	0,0468	65,90%	0,0594	99,32%
Varição Total	0,0711	100%	0,0598	100%
ndc		1		12

4.3.2 Medições para o diâmetro do ponto

O segundo estudo realizado foi para comparar os resultados da medição do diâmetro do ponto de solda, após realizar todas as medições pelo relógio apalpador, todos os corpos de provas foram submetidos ao teste de cisalhamento, com intuito de realizar a ruptura e consequentemente expor o ponto soldado para que o mesmo fosse medido.

A partir de um paquímetro universal *Digimess* com graduação 0,05mm/1/128", Figura 4.9, e através do software analisador de imagens *Analysis Doc*® fora realizado as medições, seguindo as mesmas características de coleta das demais apresentada da seção 4.3.1 e seguindo a caracterização da Figura 4.10, obtendo, assim, 96 dados de medições, coletadas aleatoriamente e disponíveis na Tabela C.1.

Seguindo o mesmo procedimento da seção 4.3.1, foi realizado os testes pareados para tal característica da qualidade comparando os dois instrumentos de medição. De acordo com a análise do teste da Tabela 4.11, é possível verificar que a média das diferenças não são estatisticamente iguais para um nível de significância de 5%, bem como a mediana das diferenças, apresentando $P\text{-value} = 0,000$ e $P\text{-value} = 0,001$ respectivamente.

Com o intuito de avaliar e comparar a variabilidade das medições do diâmetro do ponto tanto pelo analisador de imagens, quanto pelo paquímetro, foi gerado com o auxílio do software *Minitab*® 17 os gráficos do tipo "*Bloxplot*" para cada uma das peças de parâmetros distintos, ilustrados na Figura 4.11.



Figura 4.9 - Paquímetro Universal *Digimess*

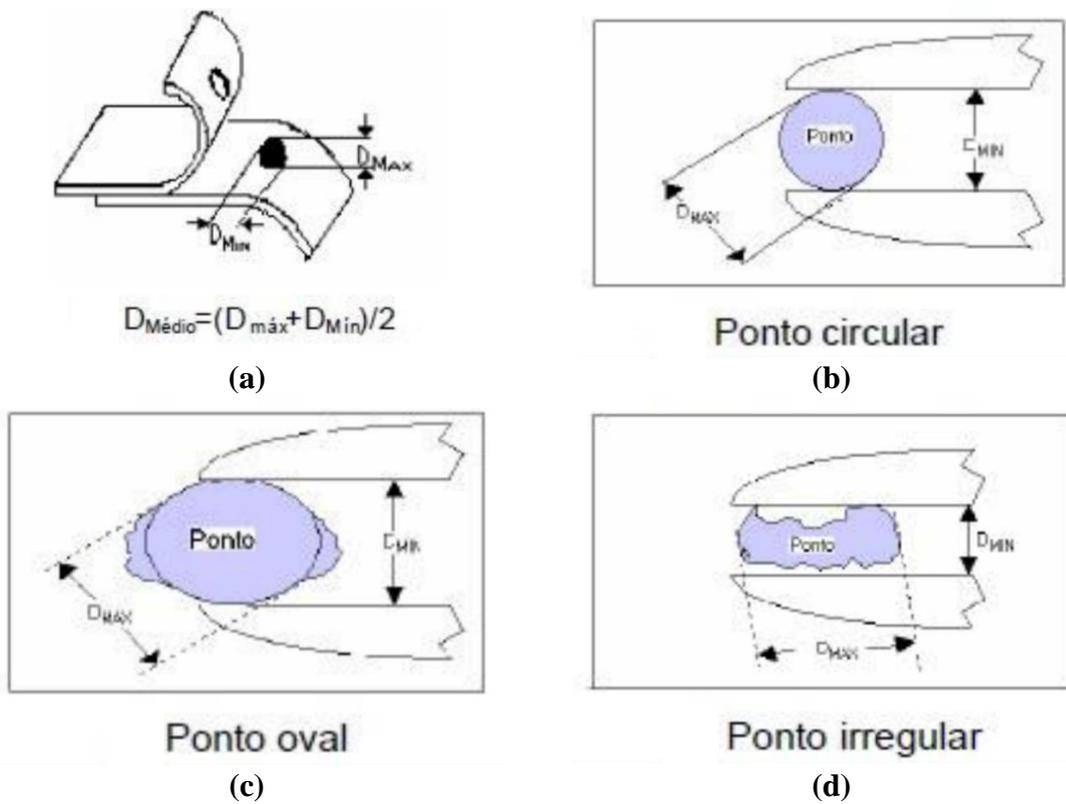


Figura 4.10 – Medições do ponto de solda
Fonte: Adaptado de Branco (2004)

É possível verificar na Figura 4.11 que há uma grande diferença na repetitividade das medições pelo software de imagem e o paquímetro, uma vez que a variabilidade das medições pelo paquímetro é maior que pelo *Analysis Doc*®, além da diferença entre as médias das mesmas, confirmando o que foi verificado através dos testes pareados, da Tabela 4.11. Na *peça 7* é possível verificar a presença de dois *outliers*, tanto para a análise pela imagem quanto pelo paquímetro, caracterizando um possível erro sistemático no processo de medição.

Tabela 4.11 – Testes pareados para diâmetro do ponto

Instrumento	N	Média	Desvio Padrão	Erro Quadrático da Média
Paquímetro	32	4,7542	0,4753	0,0840
Imagem	32	4,1992	0,4752	0,0840
Diferença	32	0,555	0,701	0,1240
Teste T da diferença das médias = 0 (vs ≠ 0)				
<i>T-value</i>			4,48	
<i>P-value</i>			0,000	
Teste Wilcoxon da diferença das medianas = 0 (vs ≠ 0)				
	N	Estatística Wilcoxon	P-value	Mediana Estimada
Diferença	32	448,0	0,001	0,5333

A partir dos indicadores de avaliação GR&R na Tabela 4.12, verifica-se que a %R&R para o paquímetro se classificou como inaceitável, apresentando uma alta porcentagem de variação das leituras para este instrumento. Entretanto, o analisador de imagens se classificou como aceitável para os dois índices (%R&R = 8,04 e *ndc* = 17).

Tabela 4.12 - GR&R para diâmetro do ponto

Fonte	Paquímetro		Analysis Doc	
	$\hat{\sigma}$	% Var	$\hat{\sigma}$	% Var
GR&R Total	0,3404	67,89%	0,0403	8,04%
Repetitividade	0,3255	64,92%	0,0338	6,75%
Reprodutibilidade	0,0996	19,86%	0,0219	4,37%
Operadores	0,0996	19,86%	0,0219	4,37%
Peça-a-peça	0,3680	73,42%	0,4992	99,68%
peças	0,3680	73,42%	0,4992	99,68%
Varição Total	0,5013	100%	0,5008	100%
ndc		1		17

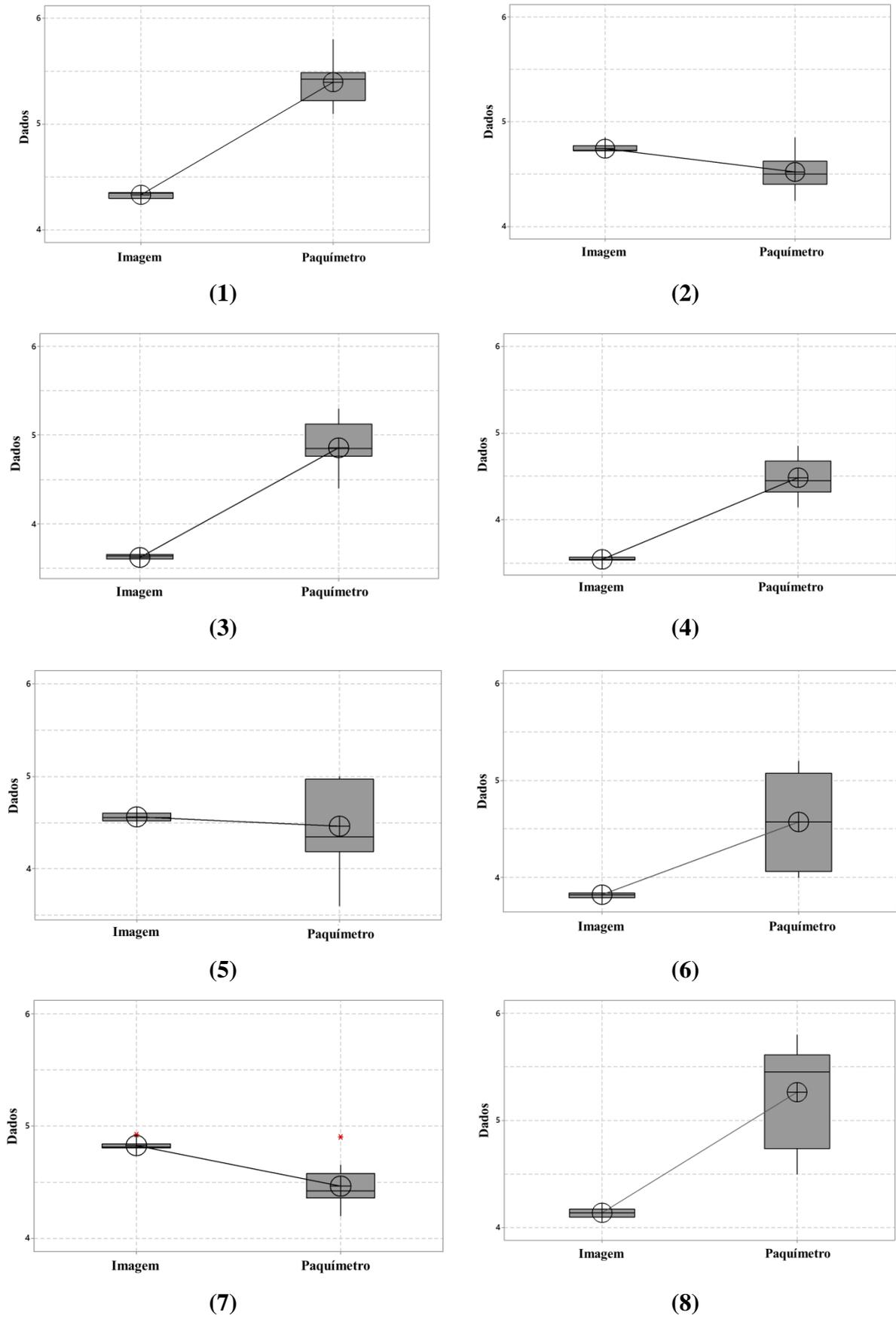


Figura 4.11– Boxplot para diâmetro do ponto

4.3.3 Considerações sobre a análise dos instrumentos de medição

Na seção 4.3 foi realizado uma análise dos instrumentos de medições para duas características da qualidade, sendo elas a profundidade de indentação (*PI*) e o diâmetro do ponto (*DP*), medidas pelo analisador de imagens, relógio apalpador e paquímetro. Para profundidade de indentação verificou-se que tanto a média das diferenças, quanto a mediana das diferenças, são iguais, porém é possível verificar através da Figura 4.8 uma diferença na repetitividade das medições, onde as medições pelo relógio apalpador mostraram uma maior variabilidade, confirmado através do estudo GR&R. Para a característica diâmetro do ponto, os testes pareados mostraram que a média das diferenças e a mediana das diferenças para os dois instrumentos não são iguais e que a variabilidade das medições pelo paquímetro se mostrou muito maior comparando-as com os da imagem, uma vez que o mesmo se classificou como inaceitável, enquanto o *Analysis Doc*® apresentou índice aceitável. Desta forma é possível inferir que, para ambas comparações, a análise de medição através do analisador de imagens se mostrou superior, visto que a variabilidade associada a este instrumento de metrologia é menor comparada aos demais avaliados. Tais causas dessa variabilidade podem ser originadas por erros de histerese, associado ao relógio apalpador, e por um difícil posicionamento para a medição do diâmetro do ponto, na utilização do paquímetro.

Ambas as medições, pelo relógio apalpador e pelo paquímetro, foram realizadas no Laboratório de Metrologia Dimensional (CGLab) da UNIFEI.

4.4 Considerações finais

O presente capítulo buscou tratar da aplicação e análise dos resultados da análise de medição do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica a partir de um estudo GR&R através da ponderação de componentes principais, proposto por Peruchi *et al.* (2013), avaliando as medições para ensaios destrutivos e para a caracterização geométrica do ponto soldado, além de realizar uma análise comparativa entre as medições realizadas através da análise de imagens e os instrumentos convencionais de metrologia. Na seção 4.1, realizou o estudo GR&R-WPC para ensaios destrutivos, pelo teste de cisalhamento, onde se verificou que a *Máquina 2* fora responsável pela maior contribuição da variabilidade deste sistema, apresentando medições fora do controle, além de uma menor repetitividade comparando-a com a *Máquina 1*. Uma solução viável para tal ensaio seria uma melhoria no acoplamento do corpo de prova, a fim de evitar futuros deslizes de peças com revestimentos e favorecendo para a realização de leituras

confiáveis. No estudo GR&R-WPC para caracterização geométrica do ponto soldado, contidos seção 4.2, foi considerado apenas três componentes principais para realização do vetor WPC, visto que a partir do dendograma, diante a análise hierárquica de *cluster*, pode-se verificar que três dos cinco componentes apresentavam o mesmo nível de similaridade, além do terceiro componente já apresentar 93,9% das informações. Para este estudo o sistema de medição se classificou como marginal, podendo se classificar como aceitável a partir da delimitação imposta perante o número reduzido de casas decimais do instrumento de medição (*Analysis Doc*®) e do intervalo de confiança de 95%. O número de categorias distintas para este estudo se classificou como aceitável ($ndc > 5$), segundo AIAG (2010). Finalmente, na seção 4.3, realizou-se uma análise comparativa dos instrumentos convencionais de metrologia: relógio apalpador e paquímetro; comparando-os com a análise pelo software analisador de imagens para as características: profundidade de indentação e diâmetro do ponto, respectivamente. Neste estudo pode inferir que os instrumentos mecânicos de medição, relógio apalpador e paquímetro, mostraram-se com um alto grau de variabilidade nas medições, classificando o estudo GR&R como inaceitável, onde as causas podem ser originárias de erros de histerese e pela difícil identificação do ponto, dependendo do estado do ponto de solda. Diferindo das medições realizadas pelo software analisador de imagens, no qual apresentaram maior coerência, além de classificarem a %R&R como marginal e aceitável para a profundidade de indentação e diâmetro do ponto, respectivamente, mostrando que a utilização apenas destes dois instrumentos mecânicos pode não apresentar resultados satisfatórios em um primeiro momento.

5. CONCLUSÃO

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é um método promissor para junção de estruturas finas, apresentando aplicabilidade em diversos setores industriais e sendo constantemente aperfeiçoado, a fim de garantir um produto com qualidade e confiabilidade. Com intuito de verificar múltiplas características de qualidade de uma maneira única, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se avaliar um sistema de medição com grandezas correlacionadas para este processo. O levantamento de trabalhos voltados ao tema, destacou o método escolhido, de componentes principais ponderados, onde ficou evidente a existência de potenciais aplicações tratando-se de características significativamente correlacionadas. Dentre os ensaios, fora selecionado sete características de qualidade distintas para aplicação do método: duas para ensaios destrutivos (Resistência ao cisalhamento e deformação na força máxima de ruptura); cinco para caracterização geométrica do ponto soldado, realizados pelo software analisador de imagem (largura da indentação, profundidade de indentação, penetração, diâmetro do ponto e área de fusão). Aplicou-se, separadamente, o método proposto para este estudo. Complementando as análises, foi realizado a comparação de outros dois instrumentos de medição (relógio apalpador e paquímetro) para cada uma de suas respectivas leituras de qualidade (profundidade de indentação e diâmetro do ponto) verificando a média e a mediana das diferenças, classificação dos índices do sistema de medição, além da variabilidade em relação aos dados coletados pelo software de imagem.

Dessa forma, considerando o objetivo geral desta dissertação, que foi o de realizar uma análise multivariada do sistema de medição, aplicando o estudo de repetitividade e reprodutibilidade por componentes principais ponderados para um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, inferiu-se as seguintes considerações:

- Para o primeiro estudo, tem-se a realização de um GR&R-WPC para ensaios destrutivos, onde a *Máquina 2* apresentou a maior variabilidade, visto que a mesma não se mostrava totalmente adequada, ocasionando em deslizos do corpo de prova durante os ensaios, evidenciando, a partir desta análise, que há uma necessidade de realizar tais ajustes e melhorias na fixação para não comprometer diagnósticos futuros em ensaios realizados por este equipamento;
- O estudo referente a caracterização geométrica do ponto soldado classificou o sistema de medição como marginal ($\%R\&R_m = 14,45\%$), podendo considera-lo aceitável

diante ao intervalo de confiança de 95% ($\%R\&R_m$ até 6,94%). Além de que, partindo de uma das delimitações do trabalho, a escala métrica dos instrumentos apresenta apenas dois décimos de precisão de leitura (0,01), onde uma maior quantidade de informações poderia trazer o estudo para uma classificação aceitável, bem como indica seu número de categorias distintas identificadas pelo sistema de medição ($ndc_m = 9$);

- A análise hierárquica de *cluster*, pelo método *Ward*, mensura o grau de similaridade dos componentes com as respostas de qualidade originais, proporcionando, em conjunto a outras métricas, identificar a quantidade de componentes, favorecendo a redução quando necessária, como verificou-se no estudo para as características geométricas.
- Para análise dos instrumentos de medição, no que se refere a característica da qualidade profundidade de indentação, comparando o relógio apalpador com a medição realizada no *Analysis Doc*®, verificou-se através de testes pareados que tanto a média das diferenças quanto a mediana das diferenças são estatisticamente iguais para os dados coletados dos dois instrumentos, entretanto, verifica-se que há uma coerência maior nas medições realizadas pelo software de imagem, onde as medições do relógio apalpador apresentam uma grande variabilidade, *outlier* na *peça 7* além de classificar seu estudo GR&R como inaceitável;
- O outro comparativo dos instrumentos de medição se dá entre o paquímetro e as medições realizadas no software para característica diâmetro do ponto. Neste caso verificou que a média das diferenças e a mediana das diferenças não são estatisticamente iguais para os dois instrumentos de medição, além de ser evidente a alta variabilidade dos dados coletados pelo paquímetro (GR&R inaceitável), diferente do que se encontra das medições feitas pelo software analisador de imagem, que classificou seu R&R e *ndc* como aceitáveis (8,04 e 17, respectivamente);
- A *peça 7* apresentou maior variabilidade nas medições para o ensaio destrutivo (*Máquina 2*) e para o comparativo dos instrumentos convencionais de metrologia, apresentando *outliers* na leitura de profundidade de indentação (para o relógio apalpador) e para característica diâmetro do ponto (tanto para a análise por imagem, quanto para as medições realizadas pelo paquímetro), caracterizando-se um erro para as medições desta peça.

5.1 Contribuições do trabalho

A presente pesquisa apresenta como contribuição principal a realização de uma análise do sistema de medição do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizando o método proposto por Peruchi *et al.* (2013), *GR&R* por componentes principais ponderados. Assim, tal análise contribuiu para os seguintes pontos:

- Aplicação do método para ensaios destrutivos que apresentam respostas de qualidade correlacionadas;
- Aplicação do método para características geométricas do ponto que apresentam respostas de qualidade correlacionadas;
- Utilização da análise hierárquica de *cluster*, ou agrupamento, empregando a métrica de ligação *Ward*, com finalidade de averiguar o nível de similaridade das respostas de qualidade originais com seus respectivos componentes, favorecendo a identificação e redução, quando necessário, do número de componentes principais para ponderação.
- Quantificar o erro sistemático de medição para uma das máquinas do ensaio destrutivo, onde os acoplamentos de alguns corpos de prova desanexaram da máquina, caracterizando-se em uma leitura inadequada para este SM. Tal melhoria, quanto a fixação para os ensaios não prejudicaria futuras análises, favorecendo a diagnósticos reais, por ela realizadas;
- Constatar que os instrumentos mecânicos de medição, como paquímetro e relógio apalpador, podem apresentar uma maior variabilidade nas medições, não sendo, em um primeiro momento, a melhor escolha para avaliar a qualidade da solda a ponto.

5.2 Sugestões para estudos futuros

A partir da realização desta pesquisa, futuros estudos facultam vislumbrar a aplicação do método *WPC* para um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, seguindo os seguintes tópicos:

- Realizar o estudo adicionando outras características de qualidade da solda a ponto (largura da *ZTA*, análise microscópica etc);
- Realizar a ponderação das características de qualidade atribuindo pesos para diferentes graus de importância;
- Realizar o estudo para dados discretos (atributo);

- Estender a aplicação do método *WPC* extraindo os componentes pela matriz de variância-covariância;
- Verificar a ponderação dos autovalores utilizando a estratégia de polinômios canônicos de mistura;
- Estender a aplicação do método *WPC* para análise fatorial, fazendo uso dos escores fatoriais rotacionados (*Equimax*, *Quartimax*, *Orthomax* e *Varimax*);
- Correlacionar características do teste de cisalhamento com as características geométricas do ponto para prever resultados como RC e $DF_{Máx}$ sem a realização do cisalhamento em um teste “*Tear Down*”, amplamente utilizado na indústria automotiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIZADEH-SH, M. MARASHI, S.P.H. POURANVARI, M. Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties. **Materials and Design**. v56, p258–263, 2014.

AL-JADER, M. A. CULLEN, J. D. SHAW, A. AL-SHAMMA'A, A. I. Theoretical and Practical Investigation into Sustainable Metal Joining Process for the Automotive Industry. **Journal of Physics: Conference Series** 307, 2011.

AL-MISHARI, S.T.; SULIMAN, S. Integrating Six-Sigma with other reliability improvement methods in equipment reliability and maintenance applications. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.14, pp. 59-70, 2008.

AL-REFAIE, A. BATA, N. Evaluating Measurement and Process Capabilities by GR&R with Four Quality Measures. **Measurement**. v43, p842–851, 2010.

ASLANLAR, S. The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. **Materials and Design**, v. 27, p.125-131, 2006.

ASLANLAR, S., OGUR, A., OZSARAC, U., ILHAN, E. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. **Materials and Design**, v.29, p.1427–1431, 2008.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **AIAG: Measurement systems analysis – Reference Manual**. 4 ed. Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force, 2010.

AWAD, M.; ERDMANN, T.P.; SHANSHAL, Y.; BARTH, B. A measurement system analysis approach for hard-to-repeat events. **Quality Engineering**, v.21, p. 300-305, 2009.

AWS/SAE D8.9M. Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials. Florida: **American Welding Society**, 2002.

BALDIM, A. C. **Análise do Efeito da Eliminação da Camada de Zinco na Qualidade da Solda a Ponto em Chapas de Aços Galvanizados**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2014.

BI, J. SONG, J.L. WEI, Q. ZHANG, Y. LI, Y. LUO, Z. Characteristics Of Shunting In Resistance Spot Welding For Dissimilar Unequal-Thickness Aluminum Alloys Under Large Thickness Ratio, **Materials & Design**. v101, p226–235, 2016.

BOONE, J.M., CHAKRABORTI, S. Two simple Shewhart-type multivariate nonparametric control charts. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 28, 130–140, 2012.

BRANCO, H. L. O. **Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem de Chapas Galvanizadas na Indústria Automobilística**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, 116p, 2004.

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

BURDICK, R.K.; BORROR, C.M.; MONTGOMERY, D.C. A review of methods for measurement systems capability analysis. *Journal of Quality Technology*, v.35, p.342-354, 2003.

CHEN, J.Z. & FARSON, D.F. Analytical modeling of heat conduction for small scale resistance spot welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, v.178, pp.251–258, 2006.

CHEN, K.S., CHEN, T.W.. Multi-process capability plot and fuzzy inference evaluation. *International Journal of Production Economics* 111, 70–79, 2008.

CHEN, K.S., YU, K.T., SHEU, S.H. Process capability monitoring chart with an application in the silicon-filler manufacturing process. *International Journal of Production Economics* 103, 565–571, 2006.

CHEN, S. SUN, T. JIANG, X. QI, J. ZENG, R. Online monitoring and evaluation of the weld quality of resistance spot welded titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, v.23, pp.183– 191, 2016.

CHEN, S.K., MANGIAMELI, P., ROETHLEIN, C.J. Predicting the output of a tube bending process: a case study. *International Journal of Production Economics* 95, 307–316, 2005.

CHEN, N. WANG, H. CARLSON, B. E. SIGLER, D. R. WANG, M. Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in lap shear test. *Journal of Materials Processing Technology*. v243, p347–354, 2017.

COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda a projeção**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2004.

COSTA, R. ANGÉLICO, D. REIS, M.S. ATAÍDE, J. M. SARAIVA, P. M. Paper Superficial Waviness: Conception And Implementation Of An Industrial Statistical Measurement System. *Analytica Chimica Acta*, v544, p135–142, 2005.

DARWISH, S. M.; AL-DEKHAL, S. D. Micro-hardness of spot welded (B. S. 1050) commercial aluminum as correlated with welding variables and strength attributes. *Journal of Materials Processing Technology*, v.91, p.43-51, 1999.

- DE KONING, H.; DE MAST, J. A rational reconstruction of six-sigma's breakthrough cookbook. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v.23, p.766-787, 2006.
- DE MAST, J.; VAN WIERINGEN, W. Measurement System Analysis for Bounded Ordinal Data. **Quality and Reliability Engineering International**, v.20, p.383-395, 2004.
- DE MAST, J.; SCHIPPERS, W.A.J.; DOES, R.J.M.M.; VAN DEN HEUVEL, E.R. Steps and strategies in process improvement. **Quality and Reliability Engineering International**, v.16, p.301-311, 2000.
- DEGIDI, M. CALIGIANA, G. FRANCIA, D. LIVERANI, A. OLMI, G. TORNABENE, F. Strain gauge analysis of implantsupported, screw-retained metal frameworks: Comparison between different manufacturing technologies. **Journal of Engineering in Medicine**. v230, p840-846, 2016.
- DEJAEGHER, B.; JIMIDAR, M.; DE SMET, M.; COCKAERTS, P.; SMEYERSVERBEKE, J.; VANDER HEYDEN, Y. Improving method capability of a drug substance HPLC assay. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v.42, p.155-170, 2006.
- DELDOSSI, L.; ZAPPA, D. Measurement Uncertainty with Nested Mixed Effect Models. **Quality and Reliability Engineering International**, v.27, p.373-379, 2011.
- DENNISON, A. V.; TONCICH; MASOOD, S. Control and Process-Based Optimization of Spot-Welding in Manufacturing Systems. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 13, p.256-263, 1997.
- DESHPANDE, A. A. RAMYA, A. VISHWESHWAR, V. DESHPANDE, G. R. ROY, A. K. Applications of Gage Reproducibility & Repeatability (GRR): Understanding and Quantifying the Effect of Variations from Different Sources on a Robust Process Development. **Organic Process Research & Development**. P.1634-1644, 2015.
- ERDMANN, T.P.; DOES, R.J.M.M.; BISGAARD, S. Quality quandaries: a gage R&R study in a hospital. **Quality Engineering**, v.22, p.46-53, 2010.
- FAN, Q. XU, G. GU, X. Expulsion characterization of stainless steel resistance spot welding based on dynamic resistance signal. **Journal of Materials Processing Technology**, v236, p235-240, 2016.
- FENG, Y. LI, Y. LUO, Z. LING, Z. WANG, Z. Resistance spot welding of Mg to electro-galvanized steel with hot-dip galvanized steel interlayer. **Journal of Materials Processing Technology**. v236, p114-122, 2016.
- FLOREA, R. S. BAMMANN, D. J. YELDELL, A. SOLANKI, K.N. HAMMI, Y. Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy. **Materials and Design**. v45, p456-465, 2013.

FLYNN, M.J.; SARKANI, S.; MAZZUCHI, T.A. Regression Analysis of Automatic Measurement Systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.58, p.3373-3379, 2009.

FURLANETTO, V. **Proposta e Validação Experimental de um Modelo para Máquina de Solda a Ponto CA**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 88p., 2005.

FURLANETTO, V. **Desenvolvimento e Instrumentação de um Cabeçote de Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica para Aplicação em Condições Industriais**. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2014.

GANGUE, F.J.R., GODEFROID, L.B., SILVA, E. Análise atual do setor automobilístico nacional. **Revista Científica Symposium**. v.2, n.1, p.6-11. Lavras: Instituto Adventista de Ensino de Minas Gerais, 2004.

GARCÍA, A. C. DEL RÍO, A. G. Number Of Distinct Data Categories And Gage Repeatability And Reproducibility. A Double (But Single) Requirement. **Measurement**. V.46, p.2514–2518, 2013.

GONG, L.; BURDICK, R.K.; QUIROZ, J. Confidence Intervals for Unbalanced Two-factor Gauge R&R Studies. **Quality and Reliability Engineering International**, v.21, p.727-741, 2005.

GUO, S.F. CHAN, K.C. ZHU, Z.Q. WU, Z.R. CHEN, W. SONG, M. Microstructure and tensile behavior of small scale resistance spot welded sandwich bulk metallic glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v447, p300–306, 2016.

HAJIPOURA, V. KAZEMIB, A. MOUSAVIB, S. M. A Fuzzy Expert System To Increase Accuracy And Precision In Measurement System Analysis. **Measurement**. v.46, p.2770–2780, 2013.

HAMEDI, M. EISAZADEH, H. ESMAILZADEH, M. Numerical simulation of tensile strength of upset welded joints with experimental verification. **Materials & Design**. v.31, p2296–2304, 2010.

HAO, M. OSMAN, K. A. BOOMER, D. R. NEWTON, C. J. Developments in Characterization of Resistance Spot Welding of Aluminum. **Welding Research Supplement to the Welding Journal**, 1996.

HE, S.G.; WANG, G.A.; COOK, D.F. Multivariate measurement system analysis in multisite testing: An online technique using principal component analysis. **Expert Systems with Applications**, v.38, p.14602-14608, 2011.

HOERL R.W. Six Sigma Black Belts: What Do They Need to Know?. **Journal of Quality Technology**, v.33, p.391-406, 2001.

HUANG, H. TSENG, K. Resistance projection welding for TO-Can style package. *Acta Metallurgica Sinica (Engl. Lett.)*. v.22, p255-262, 2009.

IGHODARO, O.L. BIRO, E. ZHOU, Y.N. Comparative effects of Al-Si and galvanized coatings on the properties of resistance spot welded hot stamping steel joints. ***Journal of Materials Processing Technology***. v.236, p64–72, 2016.

INMETRO - VIM. **VIM – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**. INMETRO/DIMCI, p.52, 1995.

ISO/TS 16949. **Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations**, v.2, p.34, 2002.

JOHNSON, J.A.; WIDENER, S.; GITLOW, H.; POPOVICH, E. A “Six Sigma” Black Belt Case Study: G.E.P. Box’s Paper Helicopter Experiment Part A. ***Quality Engineering***, v.18, p.413-430, 2006.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 6th ed. **PrenticeHall**, New Jersey, 2007.

JOU, M. Real Time Monitoring Weld Quality of Resistance Spot Welding for the Fabrication of Sheet Metal Assemblies. ***Journal of Materials Processing Technology***, v. 132, no. 1-3, 10, pp.102-113, 2003.

JOUBERT W. J. MEINTJES, S. Repeatability & Reproducibility: Implications Of Using GPS Data For Freight Activity Chains. ***Transportation Research Part B: Methodological***. v.76, p.81–92, 2015.

KAARS, J. MAYR, P. KOPPE, K. Generalized dynamic transition resistance in spot welding of aluminized 22MnB5. ***Materials and Design***. v.106, p.139–145, 2016.

KAIJA, K.; PEKKANEN, V.; MÄNTYSALO, M.; KOSKINEN, S.; NIITYNEN, J.; HALONEN, E.; MANSIKKAMÄKI, P. Inkjetting dielectric layer for electronic applications, ***Microelectronic Engineering***, v.87, p.1984–1991, 2010.

KHODABAKHSHI, F. KAZEMINEZHAD, M. KOKABI, A.H. Resistance spot welding of ultra-fine grained steel sheets produced by constrained groove pressing: Optimization and characterization. ***Materials Characterization***. v69, p71–83, 2012.

KIANERSI, D. MOSTAFAEI, A. AMADEH, A. A. Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations. ***Materials and Design***. v61, p251–263, 2014.

KLOPCIC, B. DOLINAR, D. STUMBERGER, G. Analysis of an inverter-supplied multi-winding transformer with a full-wave rectifier at the output. ***Journal of Magnetism and Magnetic Materials***. v320, p929–934, 2008.

KNOWLES, G.; VICKERS, G.; ANTHONY, J. Implementing Evaluation of the Measurement Process in an Automotive Manufacturer: a Case Study. **Quality and Reliability Engineering International**, v.19, p.397-410, 2003.

KUO, C.-C. HUANG, P.-J. Repeatability And Reproducibility Study Of Thin Film Optical Measurement System. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**. v.124, p.3489–3493, 2013.

KWAK, Y.H.; ANBARI, F.T. Benefits, obstacles, and future of six sigma approach. **Technovation**, v.26, p.708-715, 2006.

LAI, X. M. LUO, A. H. ZHANG, Y. S. CHEN, G. L. Optimal design of electrode cooling system for resistance spot welding with the response surface method. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.41, p226–233, 2009.

LACKI, P. NIEMIRO, J. Strength evaluation of the beam made of the titanium sheets Grade 2 and Grade 5 welded by Resistance Spot Welding. **Composite Structures**, v.159, p.538-547, 2017.

LEI, Z. KANG, H. REYES, G. Full Field Strain Measurement of Resistant Spot Welds Using 3D Image Correlation Systems. **Experimental Mechanics**. v.50, p111–116, 2010.

LI, M.C. AL-REFAIE, A. Improving Wooden Parts' Quality By Adopting DMAIC Procedure. **Quality and Reliability Engineering International**. v24, p351–360, 2008.

LI, Y. B. LI, Y. T. SHEN, Q. LIN, Z. Q. Magnetically Assisted Resistance Spot Welding Of Dualphase Steel. **Welding Research**. v92, p124–132, 2013.

LI, Y.B. SHEN, Q. LIN, Z.Q. HU, S.J. Quality Improvement In Resistance Spot Weld Of Advanced High Strength Steel Using External Magnetic Field, **Science and Technology of Welding and Joining**. v16, p465–469, 2011.

LI, Y. ZHANG, Y. BI, J. LUO, Z. Impact of electromagnetic stirring upon weld quality of Al/Ti dissimilar materials resistance spot welding. **Materials & Design**. v.83, p577–586, 2015.

LINDERMAN, K.; SCHROEDER, R.; ZAHEER, S.; CHOO, A. Six sigma: a goal theoretic perspective. **Journal of Operations Management**, v.21, p.193–203, 2003.

LIU, C. ZHENG, X. HE, H. WANG, W. WEI, X. Effect of work hardening on mechanical behavior of resistance spot welding joint during tension shear test. **Materials and Design**. v100, p188–197, 2016.

LOPES, L. G. D. **Uma Contribuição Para Análise De Componentes Principais Em Otimização De Múltiplas Respostas Sob Condição De Incerteza**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2011.

LUO, Y. LIA, J. WU, W. Characterization of nugget nucleation quality based on the structure-borne acoustic emission signals detected during resistance spot welding process. **Measurement**. v.46 p1053–1060, 2013.

LUO, Y.; LIU J.; XU, H.; XIONG, C.; LIU, L. Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet. **Materials and Design**. No. 30, pp. 2547-2555, 2009.

LUO, Y. WAN, R. YANG, Z. XIE, X. Study on the thermo-effect of nugget growing in single-phase AC resistance spot welding based on the calculation of dynamic resistance. **Measurement**. v78, p18–28, 2016.

LYU, J.; CHEN, M.N. Gauge Capability Studies For Attribute Data. **Quality and Reliability Engineering International**, v.24, p.71-82, 2008.

MACIEL, H. J. **Uso Do Planejamento E Análise De Experimentos No Desenvolvimento De Um Processo De Solda Por Resistência Elétrica De Pequena Escala**. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, 2011.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas**. Porto Alegre, p.477, 1996.

MACHADO, A.G.M., COSTA, A.F.B. The double sampling and the EWMA charts based on the sample variances. **International Journal of Production Economics**, 134–148, 2008.

MAJESKE, K.D. Approval criteria for multivariate measurement systems. **Journal of Quality Technology**, v.40, p.140-154, 2008.

MAKHANLALL, D. WANG, G. HUANG, Y. J. LIU, D. F. SHEN, J. Joining of Ti-based bulk metallic glasses using resistance spot welding technology. **Journal of Materials Processing Technology**. v212, p1790–1795, 2012.

MARQUES P. V.; MODENESI P. J.; BRACARENSE A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**, Ed. UFMG, pp.293-306, 2009.

MARTÍN, O. VIRGINIA, A. SANTOS, J. I. TIEDRA, P. GALAN, J. M. Quality Assessment Of Resistance Spot Welding Joints Of Aisi 304 Stainless Steel Based On Elastic Nets. **Materials Science & Engineering A**. v.676, pp.173–181, 2016.

MARTIN, O., LOPEZ, M., TIEDRA, P., JUAN, M. S., Prediction of magnetic interference from resistance spot welding processes on implantable cardioverter-defibrillators. **Journal of Materials Processing Technology**, v.206, p.256-262, 2008.

MAZUR, W. KYRIAKOPOULOS, A. BOTT, N. WEST, D. Use of modified electrode caps for surface quality welds in resistance spot welding. **Journal of Manufacturing Processes**. v22, p60–73, 2016.

MEI, L. YAN, D. CHEN, G. XIE, D. ZHANG, M. GE, X. Comparative study on CO₂ laser overlap welding and resistance spot welding for automotive body in White. **Materials and Design**. v78, p107–117, 2015.

MIRANDA FILHO, J. CARVALHO FILHO, J. M. PAIVA, A. P. SOUZA, P. V. G. TOMASIN, S. A PCA-based approach for substation clustering for voltage sag studies in the Brazilian new energy context. **Electric Power Systems Research**. v136, p31–42, 2016.

MONTGOMERY, D.C.; BURDICK, R.K.; LAWSON, C.A.; MOLNAU, W.E.; ZENZEN, F.; JENNINGS, C.L.; SHAH, H.K.; SEBERT, D.M.; BOWSER, M.D.; HOLCOMB, D.R. A university-based six sigma program. **Quality and Reliability Engineering International**, v.21, p.243–248, 2005.

MONTGOMERY, D.C.; WOODALL, W.H. An Overview of Six Sigma. **International Statistical Review**, v. 76, pp. 329-346, 2008.

MOOS, S. VEZZETTI, E. Resistance spot welding process simulation for variational analysis on compliant assemblies. **Journal of Manufacturing Systems**. v37, p44–71, 2015.

MORI, K. ABE, Y. KATO, T. Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminium alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting. **Journal of Materials Processing Technology**. v212, p1900–1905, 2012.

MSA - QS 9000. **MSA - Análise dos sistemas de medição: manual de referência**. Ed. Americana, v.3, 2002.

MUKHERJEE, I.; RAY, P.K. A systematic solution methodology for inferential multivariate modeling of industrial grinding process. **Journal of Materials Processing Technology**, v.196, p.379-392, 2008.

NBR ISO 9000:2000. **Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e vocabulário**. ABNT, Rio de Janeiro, p.26, 2000.

PAIVA, A. P. **Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em otimização de processo de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas**. 2006. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2006.

PAIVA, A.P.; COSTA, S.C.; PAIVA, E.J.; BALESTRASSI, P.P.; FERREIRA, J.R. Multiobjective optimization of pulsed gas metal arc welding process based on weighted principal component scores, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.50, p.113-125, 2010.

PAIVA, A.P.; FERREIRA, J.R.; BALESTRASSI, P.P. A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. **Journal of Materials Processing Technology**, v.189, p.35-26, 2007.

PAIVA, A.P.; PAIVA, E.J.; FERREIRA, J.R.; BALESTRASSI, P.P.; COSTA, S.C. A multivariate mean square error optimization of AISI hardened steel turning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.43, p.631-643, 2008.

PAN, J.N. A study of multivariate pre-control charts. **International Journal of Production Economics** 105, 160–170, 2007.

PAN, X., JARRETT, J. Using vector autoregressive residuals to monitor multivariate processes in the presence of serial correlation. **International Journal of Production Economics** 106, 204–216, 2007.

PENTEADO, K. M. **Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 2011.

PEREIRA, M. A.; FERREIRA, M. J.; LOUREIRO, A.; COSTA, M. D. J.; BÁRTOLO, J. P. Effect of Process Parameters on the Strength of Resistance Spot Welds in 6082-T6 Aluminium Alloy. **Materials and Design**, 2009.

PEREIRA, R. B. D. PERUCHI, R. S. PAIVA, A. P. COSTA, S. C. FERREIRA, J. R. Combining Scott-Knott and GR&R Methods To Identify Special Causes Of Variation. **Measurement**. v82, p135–144, 2016.

PERUCHI, R.S. **Método dos componentes principais ponderados aplicado em avaliação de sistemas de medição com grandezas correlacionadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, UNIFEI, Itajubá. 2011.

PERUCHI, R.S. **MDMAIC: Um Roadmap Seis Sigma Multivariado**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, UNIFEI, Itajubá. 2014.

PERUCHI, R.S. BALESTRASSI, P.P. PAIVA, A.P. FERREIRA, J. R. CARMELOSSI, M. S. A New Multivariate Gage R&R Method For Correlated Characteristics, **International Journal of Production Economics**. v. 144, p.301-315, 2013.

PERUCHI, R. S. PAIVA, A. P. BALESTRASSI, P. P. FERREIRA, J. R. SAWHNEY, R. Weighted Approach For Multivariate Analysis Of Variance In Measurement System Analysis. **Precision Engineering**. v38, p651–658, 2014.

P'NG, D. MOLIAN, P. Q-switch Nd:YAG laser welding of AISI 304 stainless steel foils. **Materials Science and Engineering: A**. v.486, p680–685, 2008.

PODRZAJ, P.; POLAJNAR, I.; DIACI, J.; KARIZ, Z. Overview of Resistance Spot Welding Control. **Science and Technology of Welding and Joining**, v.13, no. 3, pp. 215-224, 2008.

PODRŽAJ, P. SIMONČIČ, S. A machine vision-based electrode displacement measurement. **Weld World**. v.58, p93–99, 2014.

POLINI, W.; TURCHETTA, S. Test protocol for micro-geometric wear of sintered diamond tools. **Wear**, v.257, p.246-256, 2004.

POURANVARI, M. Fracture toughness of martensitic stainless steel resistance spot welds. **Materials Science & Engineering A**. v680, p97–107, 2017.

POURANVARI, M. MARASHI, S.P.H. Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties, **Science and Technology of Welding and Joining**. v18, p361–403, 2013.

PRASHANTHKUMAR, V. K. VENKATARAM, N. MAHESH, N. S. KUMARSWAMI. Process Parameter Selection for Resistance Spot Welding through Thermal Analysis of 2 mm CRCA Sheets. **Procedia Materials Science**. v5, p369-378, 2014.

PSARAKIS, S. The use of neural networks in statistical process control charts. **Quality and Reliability Engineering International** 27, 641–650, 2011.

RAISINGHANI, M.; ETTE, H.; PIERCE, R.; CANNON, G.; DARIPALY, P. Six sigma: concepts, tools, and applications. **Industrial Management and Data Systems**, v.105, p.491-505, 2005.

RENCHER, A. C. CHRISTENSEN, W. F. **Methods of Multivariate Analysis**, 3rd Edition, 2012.

ROGEON, P., CARRE, P., COSTA, J., SIBILIA, G., SAINDRENAN, G. Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies. **Journal of Materials Processing Technology**, n.195, p.117-124, 2008.

SAMPAIO, D. J. B. S. **Automação do Monitoramento da Qualidade do Processo de Solda a Ponto Resistiva**, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2010.

SANTOS, F. B. **Estudo da eficiência do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica utilizado na indústria automobilística**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) – Gestão de Negócios e Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2006.

SATOLO, E.G.; JOÃO MARCOS ANDRIETTA, J.M.; CAUCHICK MIGUEL, P.A.; CALARGE, F.A. Análise da utilização de técnicas e ferramentas no programa Seis Sigma a partir de um levantamento tipo survey. **Produção**, v.19, p. 400-416, 2009.

SAHOO, A.K.; TIWARI, M.K.; MILEHAM, A.R. Six Sigma based approach to optimize radial forging operation variables. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 202, pp. 125-136, 2008.

SCAGLIARINI, M. A Method for Improving Multivariate Measurement Systems Assessment. **Quality and Reliability Engineering International**. v.31, p.977–988, 2015.

SENOL, S. Measurement system analysis using designed experiments with minimum $\alpha - \beta$ Risks and n. **Measurement**, v.36, p.131-141, 2004.

SHAFEE, S. NAIK, B. B. SAMMAIAH, K. Resistance Spot Weld Quality Characteristics Improvement By Taguchi Method. **Materials Today: Proceedings**. v2, p2595 – 2604, 2015.

SHI, L. CHEN, W. LU, L. F. An Approach for Simple Linear Profile Gauge R&R Studies. **Discrete Dynamics in Nature and Society**. v.2014, 2014.

SHIAU, Y. Decision support for off-line gage evaluation and improving on-line gage usage. **Journal of Manufacturing Systems**. v19, p318-331, 2000.

SOUZA, M. T. S. FERNANDES, M. M. MIRANDA, R. C. Otimização dos Parâmetros de Soldagem a Ponto por Resistência em uma Indústria Automotiva por meio da Análise de Experimentos e Metodologia de Superfície de Resposta. **Ciência & Engenharia**, v. 22, n. 2, p. 131 – 140. 2013.

SPITZ, M. FLEISCHANDERL, M. SIERLINGER, R. REISCHAUER, M. PERNDORFER, F. FAFILEK, G. Surface lubrication influence on electrode degradation during resistance spot welding of hot dip galvanized steel sheets. **Journal of Materials Processing Technology**. v216, p339–347, 2015.

SU, C.T.; CHIANG, T.L.; CHIAO, K. Optimizing the IC Delamination Quality via Six-Sigma Approach. **IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing**, v. 28, 2005.

SUN, M. NIKNEJAD, S.T. GAO, H. WU, L. ZHOU, Y. Mechanical properties of dissimilar resistance spot welds of aluminum to magnesium with Sn-coated steel interlayer. **Materials and Design**. v91, p331–339, 2016.

SUN, M. NIKNEJAD, S.T. ZHANG, G. LEE, M.K. WU, L. ZHOU, Y. Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded AZ31/AA5754 using a nickel interlayer. **Materials and Design**. v87, p905–913, 2015.

TANG, L.C.; GOH, T.N.; LAM, S.W.; ZHANG, C.W. Fortification of Six Sigma: Expanding the DMAIC Toolset. **Quality and Reliability Engineering International**, v.23, pp. 3-18, 2007.

THORNTON, M. HAN, L. SHERGOLD, M. Progress in NDT of resistance spot welding of aluminium using ultrasonic C-scan. **NDT&E International**. v48, p30–38, 2012.

VARGAS, J. E. **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistências: Uma Abordagem Estatística**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.

VAN DEN HEUVEL, E.; TRIP, A. Evaluation of measurement systems with a small number of observers. **Quality Engineering**, v.15, p. 323-331, 2002.

VEIGA, C.L.N.; *et al.*. É Difícil Calibrar CMMs? **Controle da Qualidade**, Editora Banas, São Paulo-SP, p.48-54, 1997.

VILLALOBOS, J.R., MUÑOZ, L., GUTIERREZ, M.A. Using fixed and adaptive multivariate SPC charts for online SMD assembly monitoring. **International Journal of Production Economics** 95, 109–121, 2005.

XIA, Y. ZHANG, Z. XIA, Z. ZHU, S. ZHANG, R. A precision analogue integrator system for heavy current measurement in MFDC resistance spot welding. **Measurement Science and Technology**. v27, 2016.

WAN, X. WANG, Y. ZHAO, D. HUANG, Y. YIN, Z. Weld quality monitoring research in small scale resistance spot welding by dynamic resistance and neural network, **Measurement**, 2016.

WANG, W. A simulation-based multivariate Bayesian control chart for real time condition-based maintenance of complex systems. **European Journal of Operational Research** 218, 726–734, 2012.

WANG, F. CHIEN, T. Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study. **Computers & Industrial Engineering**. v58, p143–150, 2010.

WANG, F. YANG, C. Applying principal component analysis to a GR&R study. **Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineering**, v.24, p.182-1889, 2007.

WANG, L. HOU, Y. ZHANG, H. ZHAO, J. XI, T. QI, X. LI, Y. A new measurement method for the dynamic resistance signal during the resistance spot welding process. **Measurement Science and Technology**. v.27, 2016.

WANG, J. WANG, H. LU, F. CARLSON, B. E. SIGLER, D. R. Analysis of Al-steel resistance spot welding process by developing a fully coupled multi-physics simulation model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v89, p1061–1072, 2015.

WAN, Z. WANG, H. CHEN, N. WANG, M. CARLSON, B. E. Characterization of intermetallic compound at the interfaces of Al-steel resistance spot welds. **Journal of Materials Processing Technology**. v242, p12–23, 2017.

WHITE, T.K.; BORROR, C.M. Two-dimensional Guidelines for Measurement System Indices. **Quality and Reliability Engineering International**, v.27, p.479-487, 2011.

WOODALL, W.H. BORROR, C.M. Some Relationships Between Gage R&R Criteria. **Quality and Reliability Engineering International**. v24, p99–106, 2008.

WU, C.W.; PEARN, W.L.; KOTZ, S. An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. **International Journal of Production Economics**, v.117, p.338-359, 2009.

YANG, S.F., RAHIM, M.A. Economic statistical process control for multivariate quality characteristics under Weibull shock model. **International Journal of Production Economics** 98, 215–226, 2005.

YAO, Q. LUO, Z. LI, Y. YAN, F.Y. DUAN, R. Effect of electromagnetic stirring on the microstructures and mechanical properties of magnesium alloy resistance spot weld. **Materials and Design**. v63, p200–207, 2014.

YEH, T.-M. SUN, J.-J. Using the Monte Carlo Simulation Methods in Gauge Repeatability and Reproducibility of Measurement System Analysis. **Journal of Applied Research and Technology**. v.11, p.780–796, 2013.

YI, L. JINGLONG, L. WEI, W. Characterization of nugget nucleation quality based on the structure-borne acoustic emission signals detected during resistance spot welding process. **Measurement**. v46, p1053–1060, 2013.

YI, L., JINHE, L., HUIBIN, X., CHENGZHI, X., LIN, L. Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet. **Materials and Design**. n. 30, p. 2547-2555, 2009.

ZHANG, Y. LI, Y. LUO, Z. YUAN, T. BI, J. WANG, Z. M. WANG, Z. P. CHAO, Y. J. Feasibility study of dissimilar joining of aluminum alloy 5052 to pure copper via thermo-compensated resistance spot welding. **Materials and Design**. v106, p235–246, 2016.

ZHANG, H. SENKARA, J. **Resistance Welding: Fundamentals and Applications**. Taylor & Francis. 2006.

ZHANG, Y. SHAN, H. LI, Y. GUO, J. LUO, Z. MA, C. Y. Joining aluminum alloy 5052 sheets via novel hybrid resistance spot clinching process. **Materials and Design**. v118, p36–43, 2017.

ZHANGA, H. HOUB, Y. ZHAOB, J. WANGB, L. XIA, T. LIA, Y. Automatic welding quality classification for the spot welding based on the Hopfield associative memory neural network and Chernoff face description of the electrode displacement signal features. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v85, p1035–1043, 2017.

ZHANGA, Y. LIA, Y. LUOA, Z. YUANA, T. BIA, J. WANGA, Z. M. WANGD, Z. P. CHAOA, Y. J. Feasibility Study Of Dissimilar Joining Of Aluminum Alloy 5052 To Pure Copper Via Thermo-Compensated Resistance Spot Welding. **Materials & Design**. v.106, p235–246, 2016.

ZHOU, M.; ZHANG, H.; HU, S. J. Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds. **Welding Journal**, v.82, p.72s-77s, 2003.

ZHUA, X. ZHAOA, Z. WANGA, L. ZHANGA, L. A New Method To Measure Fat Content In Coconut Milk Based On Y-Type Optic Fiber System. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics** v.125, p.6172–6178, 2014.

ANEXO A – Tabela de dados do ensaio destrutivo

Tabela A.1 – Dados para o estudo GR&R-WPC para ensaios destrutivos.

<i>i</i>	<i>k</i>	Máquina 1					Máquina 2				
		<i>RC</i>	<i>DF_{máx}</i>	<i>PC₁</i>	<i>PC₂</i>	<i>WPC</i>	<i>RC</i>	<i>DF_{máx}</i>	<i>PC₁</i>	<i>PC₂</i>	<i>WPC</i>
1	1	3737,14	0,30	-0,4071	0,3822	-0,5333	3217,58	1,47	0,1102	-0,6822	-0,0616
1	2	3139,77	0,22	-0,7736	0,1197	-1,2293	2783,24	0,28	-0,9218	-0,1075	-1,5538
1	3	3105,44	0,20	-0,8072	0,1171	-1,2854	3247,12	0,35	-0,6303	0,0894	-1,0044
2	1	5030,16	1,14	0,8406	0,4959	1,5585	4779,46	1,45	0,9190	0,1536	1,5656
2	2	5458,82	1,21	1,1125	0,6754	2,0695	5498,73	2,67	2,1213	-0,2913	3,3838
2	3	5450,11	1,31	1,1809	0,5978	2,1543	5326,73	1,29	1,0991	0,5497	2,0027
3	1	2100,57	0,09	-1,4113	-0,3368	-2,4402	2096,99	0,17	-1,3573	-0,3946	-2,3720
3	2	2098,47	0,09	-1,4109	-0,3395	-2,4404	1747,78	0,14	-1,5614	-0,5582	-2,7658
3	3	2720,33	0,14	-1,0492	-0,0464	-1,7414	1848,55	0,15	-1,5016	-0,5119	-2,6510
4	1	2539,37	0,11	-1,1617	-0,1244	-1,9542	1228,31	0,09	-1,8687	-0,7979	-3,3562
4	2	2379,70	0,11	-1,2522	-0,2020	-2,1306	2199,49	0,22	-1,2696	-0,3744	-2,2206
4	3	2864,78	0,14	-0,9739	0,0304	-1,5903	1388,15	0,15	-1,7440	-0,7543	-3,1358
5	1	5580,03	1,35	1,2706	0,6449	2,3185	4484,11	1,16	0,5677	0,1938	1,0024
5	2	4275,08	0,81	0,2218	0,3197	0,4784	4395,51	1,60	0,8181	-0,1498	1,2917
5	3	4364,20	0,91	0,3391	0,2962	0,6630	4482,38	1,15	0,5601	0,1997	0,9919
6	1	4329,65	0,90	0,3092	0,2898	0,6114	2413,19	0,22	-1,1571	-0,2619	-1,9956
6	2	3067,30	0,15	-0,8610	0,1307	-1,3690	2593,87	0,27	-1,0282	-0,2005	-1,7618
6	3	2813,81	0,13	-1,0062	0,0090	-1,6510	2011,86	0,14	-1,4224	-0,4191	-2,4877
7	1	4983,90	1,16	0,8342	0,4537	1,5329	5385,80	1,97	1,5893	0,1218	2,6562
7	2	4931,34	1,13	0,7831	0,4494	1,4474	5378,85	6,63	4,7315	-3,0278	6,7011
7	3	5145,93	1,15	0,9093	0,5491	1,6904	4935,82	1,31	0,9068	0,3304	1,6085
8	1	5838,03	1,37	1,4243	0,7629	2,6131	4656,11	1,20	0,6853	0,2574	1,2183
8	2	4692,68	0,95	0,5357	0,4455	1,0392	4607,46	1,22	0,6732	0,2183	1,1845
8	3	4453,84	0,82	0,3194	0,4103	0,6712	4711,71	1,20	0,7146	0,2867	1,2768

ANEXO B – Tabela de dados da caracterização geométrica

Tabela B.1 – Dados para o estudo GR&R a partir de *LI, PI, P, DP e AF*.

i	j	k = 1					k = 2					k = 3				
		<i>LI</i>	<i>PI</i>	<i>P</i>	<i>DP</i>	<i>AF</i>	<i>LI</i>	<i>PI</i>	<i>P</i>	<i>DP</i>	<i>AF</i>	<i>LI</i>	<i>PI</i>	<i>P</i>	<i>DP</i>	<i>AF</i>
1	A	3,62	0,19	0,89	4,29	3,04	3,62	0,2	0,97	4,27	3,26	3,63	0,19	0,9	4,35	3,11
1	B	3,62	0,2	1	4,32	3,32	3,64	0,18	0,97	4,32	3,23	3,61	0,2	0,92	4,29	3,25
1	C	3,61	0,2	0,94	4,34	3	3,63	0,19	0,91	4,35	3,05	3,62	0,19	0,94	4,35	3,09
1	D	3,68	0,19	0,96	4,38	3,3	3,62	0,19	0,98	4,35	3,28	3,59	0,19	0,98	4,38	3,37
2	A	4,68	0,21	1,09	4,65	3,14	4,69	0,21	1,05	4,72	3,19	4,68	0,21	1,12	4,78	3,24
2	B	4,7	0,2	1,13	4,74	3,43	4,68	0,21	1,13	4,72	3,29	4,69	0,22	1,12	4,75	3,34
2	C	4,68	0,21	1,11	4,73	3,09	4,7	0,22	1,11	4,72	3,29	4,7	0,22	1,1	4,73	3,35
2	D	4,67	0,21	1,16	4,72	3,4	4,72	0,2	1,13	4,84	3,46	4,65	0,21	1,17	4,85	3,62
3	A	5,04	0,13	1,02	3,53	3,11	5,05	0,12	1,01	3,66	3,12	5,04	0,12	1,01	3,64	3,09
3	B	5,05	0,14	1,05	3,6	3,22	5,02	0,12	1,05	3,61	3,25	5,02	0,12	1,04	3,56	3,25
3	C	5,05	0,12	1,01	3,64	3,19	5,1	0,12	1,01	3,63	3,12	5,05	0,13	1,01	3,64	3,19
3	D	5,02	0,11	1,04	3,67	3,34	5,09	0,13	1,06	3,67	3,33	5,1	0,13	0,98	3,65	3,22
4	A	4,05	0,06	1	3,54	2,96	4,04	0,07	0,98	3,54	2,9	4,03	0,06	1	3,56	2,97
4	B	4,05	0,07	0,99	3,57	3,03	4	0,06	0,99	3,54	3,01	4,05	0,07	0,95	3,53	3
4	C	4	0,06	0,96	3,53	2,91	4,05	0,06	0,96	3,56	2,87	4,05	0,07	0,95	3,51	2,84
4	D	4,05	0,06	0,96	3,52	3,03	4,09	0,07	1,01	3,57	3,04	4,02	0,07	0,99	3,57	2,99
5	A	5,24	0,25	1,18	4,58	4,63	5,24	0,25	1,19	4,51	4,52	5,24	0,26	1,22	4,52	4,7
5	B	5,23	0,26	1,17	4,55	4,63	5,24	0,25	1,2	4,54	4,63	5,22	0,27	1,17	4,56	4,69
5	C	5,22	0,26	1,18	4,61	4,48	5,23	0,25	1,19	4,64	4,58	5,25	0,26	1,2	4,58	4,57
5	D	5,24	0,27	1,19	4,53	4,64	5,24	0,27	1,19	4,52	4,59	5,22	0,24	1,2	4,62	4,77
6	A	5,19	0,2	1,12	3,8	3,62	5,18	0,19	1,09	3,78	3,55	5,19	0,2	1,08	3,79	3,53
6	B	5,2	0,18	1,11	3,79	3,65	5,23	0,19	1,1	3,8	3,66	5,19	0,2	1,08	3,82	3,63
6	C	5,2	0,2	1,08	3,84	3,5	5,19	0,2	1,1	3,83	3,61	5,16	0,2	1,06	3,83	3,58
6	D	5,23	0,2	1,1	3,84	3,72	5,17	0,2	1,13	3,87	3,76	5,25	0,19	1,1	3,87	3,73
7	A	4,89	0,16	1,11	4,79	4,18	4,89	0,17	1,16	4,86	4,27	4,87	0,17	1,1	4,79	4,17
7	B	4,87	0,18	1,14	4,82	4,3	4,86	0,16	1,17	4,8	4,28	4,9	0,16	1,13	4,81	4,29
7	C	4,88	0,16	1,14	4,83	4,19	4,89	0,17	1,13	4,81	4,22	4,86	0,17	1,13	4,82	4,24
7	D	4,8	0,17	1,16	4,81	4,3	5	0,16	1,16	4,92	4,49	4,9	0,17	1,15	4,84	4,29
8	A	4,46	0,13	1,13	4,07	4,01	4,47	0,13	1,13	4,16	4,04	4,49	0,14	1,1	4,08	4,05
8	B	4,45	0,14	1,15	4,14	4,18	4,43	0,14	1,14	4,12	4,14	4,49	0,14	1,13	4,13	4,11
8	C	4,48	0,14	1,1	4,18	4	4,46	0,14	1,11	4,16	4,06	4,5	0,13	1,11	4,09	4,03
8	D	4,45	0,13	1,12	4,12	4,14	4,44	0,14	1,16	4,19	4,25	4,51	0,14	1,15	4,18	4,25

Tabela B.2 – Escores dos componentes principais a partir de *LI, PI, P, DP e AF*.

i	j	k = 1					k = 2					k = 3				
		<i>PC</i> ₁	<i>PC</i> ₂	<i>PC</i> ₃	<i>PC</i> ₄	<i>PC</i> ₅	<i>PC</i> ₁	<i>PC</i> ₂	<i>PC</i> ₃	<i>PC</i> ₄	<i>PC</i> ₅	<i>PC</i> ₁	<i>PC</i> ₂	<i>PC</i> ₃	<i>PC</i> ₄	<i>PC</i> ₅
1	A	-2,17	-2,10	-0,65	0,52	-0,48	-1,43	-1,88	-0,32	0,62	0,14	-1,99	-2,12	-0,54	0,49	-0,49
1	B	-1,15	-1,86	-0,15	0,54	0,34	-1,55	-1,80	-0,10	0,38	0,04	-1,74	-2,06	-0,48	0,73	-0,30
1	C	-1,79	-2,11	-0,62	0,35	0,00	-1,98	-2,11	-0,56	0,39	-0,36	-1,77	-2,03	-0,42	0,36	-0,11
1	D	-1,40	-1,91	-0,20	0,45	-0,13	-1,36	-1,89	-0,12	0,45	0,13	-1,28	-1,96	-0,01	0,52	0,07
2	A	0,35	-0,87	-0,80	-0,86	0,25	0,21	-1,05	-0,87	-0,78	-0,20	0,73	-0,94	-0,57	-0,99	0,36
2	B	0,86	-0,75	-0,28	-0,85	0,31	0,79	-0,83	-0,52	-0,89	0,46	0,88	-0,94	-0,63	-0,78	0,34
2	C	0,50	-0,93	-0,75	-1,06	0,40	0,75	-0,92	-0,72	-0,78	0,30	0,75	-0,95	-0,70	-0,70	0,17
2	D	1,06	-0,74	-0,31	-0,86	0,67	0,99	-0,85	-0,23	-0,95	0,21	1,41	-0,88	-0,03	-0,79	0,54
3	A	-1,42	1,36	-0,71	-0,12	-0,14	-1,44	1,24	-0,57	-0,32	-0,37	-1,49	1,25	-0,59	-0,32	-0,33
3	B	-1,00	1,32	-0,62	-0,11	0,04	-1,14	1,40	-0,32	-0,21	-0,03	-1,25	1,44	-0,37	-0,13	-0,09
3	C	-1,39	1,28	-0,51	-0,22	-0,40	-1,43	1,34	-0,61	-0,31	-0,38	-1,32	1,21	-0,64	-0,15	-0,36
3	D	-1,15	1,37	-0,13	-0,23	-0,25	-0,83	1,38	-0,37	-0,20	-0,05	-1,43	1,18	-0,74	-0,08	-0,69
4	A	-2,90	0,53	0,69	-0,14	0,29	-3,00	0,39	0,46	-0,08	0,19	-2,89	0,48	0,72	-0,15	0,29
4	B	-2,80	0,41	0,61	-0,01	0,17	-2,95	0,45	0,74	-0,03	0,21	-3,11	0,35	0,44	0,12	-0,14
4	C	-3,23	0,37	0,55	-0,04	0,01	-3,21	0,38	0,49	-0,15	-0,02	-3,26	0,35	0,29	-0,03	-0,02
4	D	-3,10	0,46	0,62	0,07	-0,09	-2,64	0,51	0,65	-0,08	0,31	-2,85	0,37	0,60	-0,03	0,22
5	A	2,83	0,11	-0,13	0,50	-0,13	2,74	0,21	-0,22	0,44	0,07	3,16	0,24	-0,08	0,61	0,25
5	B	2,81	0,05	-0,29	0,64	-0,16	2,92	0,22	-0,08	0,49	0,07	2,94	-0,03	-0,35	0,77	-0,16
5	C	2,79	-0,04	-0,36	0,39	-0,01	2,89	0,04	-0,11	0,36	-0,05	2,98	0,10	-0,25	0,45	0,11
5	D	3,01	0,08	-0,35	0,69	0,05	2,96	0,08	-0,40	0,64	0,09	3,02	0,17	0,21	0,49	-0,09
6	A	0,50	1,09	-0,82	0,21	0,37	0,16	1,07	-0,85	0,18	0,13	0,17	0,98	-1,03	0,24	0,08
6	B	0,31	1,22	-0,59	0,14	0,19	0,37	1,15	-0,75	0,22	0,10	0,28	0,95	-0,93	0,31	-0,01
6	C	0,20	0,92	-1,05	0,15	0,05	0,40	0,99	-0,88	0,22	0,18	0,10	0,84	-1,02	0,32	-0,14
6	D	0,53	1,04	-0,81	0,30	0,07	0,73	1,02	-0,63	0,26	0,34	0,50	1,09	-0,68	0,20	-0,01
7	A	1,25	-0,27	0,69	-0,45	-0,66	1,78	-0,28	0,84	-0,51	-0,28	1,25	-0,39	0,54	-0,35	-0,69
7	B	1,71	-0,36	0,67	-0,29	-0,40	1,70	-0,14	1,00	-0,51	-0,17	1,50	-0,21	0,86	-0,42	-0,57
7	C	1,47	-0,25	0,82	-0,57	-0,42	1,50	-0,30	0,68	-0,42	-0,48	1,51	-0,35	0,72	-0,39	-0,48
7	D	1,70	-0,32	0,91	-0,37	-0,20	2,02	-0,13	1,09	-0,49	-0,58	1,72	-0,26	0,81	-0,45	-0,38
8	A	0,08	0,39	1,05	0,22	0,35	0,19	0,28	1,10	0,13	0,26	0,04	0,27	0,85	0,38	0,06
8	B	0,48	0,30	1,17	0,33	0,42	0,36	0,27	1,11	0,35	0,38	0,32	0,29	1,01	0,30	0,26
8	C	0,07	0,12	0,84	0,22	0,03	0,16	0,16	0,94	0,29	0,11	0,02	0,36	0,98	0,25	0,12
8	D	0,17	0,30	1,16	0,33	0,15	0,64	0,26	1,29	0,33	0,44	0,62	0,33	1,20	0,32	0,30

Tabela B.3 – Ponderação dos componentes principais para *LI, PI, P, DP e AF*.

WPC	k = 1				k = 2				k = 3			
	j = A	j = B	j = C	j = D	j = A	j = B	j = C	j = D	j = A	j = B	j = C	j = D
1	-9,40	-5,64	-8,16	-6,51	-6,64	-6,85	-8,76	-6,33	-8,80	-7,88	-7,93	-6,08
2	-0,12	1,90	0,32	2,52	-0,77	1,46	1,16	2,22	1,15	1,59	1,14	3,64
3	-3,56	-2,20	-3,45	-2,40	-3,65	-2,43	-3,55	-1,48	-3,82	-2,75	-3,33	-3,78
4	-8,48	-8,32	-9,79	-9,25	-9,07	-8,71	-9,72	-7,68	-8,48	-9,45	-10,02	-8,55
5	9,17	8,97	8,77	9,61	8,93	9,58	9,30	9,43	10,39	9,28	9,60	9,99
6	2,32	1,95	1,05	2,36	1,18	1,98	1,86	3,08	1,04	1,42	0,70	2,38
7	4,10	5,46	4,89	5,58	5,84	5,80	4,87	6,89	3,88	5,01	4,86	5,67
8	1,15	2,41	0,76	1,39	1,43	1,94	1,11	2,93	0,80	1,80	0,89	2,89

ANEXO C – Tabela de dados dos instrumentos mecânicos de medição

Tabela C.1 – Dados de medição do Relógio Apalpador e Paquímetro.

P o	r = 1		r = 2		r = 3	
	Relógio Apalpador	Paquímetro	Relógio Apalpador	Paquímetro	Relógio Apalpador	Paquímetro
1 A	0,14	5,40	0,12	5,30	0,17	5,30
1 B	0,20	5,10	0,20	5,10	0,20	5,20
1 C	0,18	5,45	0,18	5,45	0,13	5,45
1 D	0,20	5,50	0,19	5,70	0,21	5,80
2 A	0,13	4,40	0,05	4,45	0,11	4,40
2 B	0,11	4,25	0,21	4,35	0,20	4,40
2 C	0,20	4,55	0,18	4,55	0,08	4,55
2 D	0,18	4,85	0,17	4,80	0,20	4,65
3 A	0,10	5,20	0,10	5,20	0,10	5,30
3 B	0,21	4,90	0,21	4,75	0,21	4,85
3 C	0,10	4,80	0,10	4,85	0,10	4,85
3 D	0,13	4,40	0,14	4,40	0,10	4,80
4 A	0,09	4,75	0,07	4,85	0,06	4,70
4 B	0,13	4,20	0,13	4,30	0,11	4,45
4 C	0,11	4,45	0,12	4,55	0,10	4,45
4 D	0,13	4,40	0,12	4,15	0,12	4,60
5 A	0,17	4,30	0,21	4,40	0,16	4,30
5 B	0,23	4,05	0,28	4,15	0,29	3,60
5 C	0,19	4,90	0,12	5,00	0,13	5,00
5 D	0,22	5,00	0,22	4,60	0,26	4,30
6 A	0,10	4,10	0,15	4,05	0,11	4,05
6 B	0,20	4,00	0,15	4,15	0,19	4,20
6 C	0,18	5,00	0,18	5,10	0,09	5,10
6 D	0,21	5,00	0,16	5,20	0,12	4,95
7 A	0,15	4,40	0,06	4,45	0,10	4,40
7 B	0,32	4,20	0,20	4,35	0,20	4,40
7 C	0,12	4,50	0,14	4,60	0,13	4,45
7 D	0,20	4,65	0,15	4,90	0,20	4,30
8 A	0,19	5,50	0,27	5,45	0,26	5,45
8 B	0,32	5,65	0,33	5,75	0,31	5,80
8 C	0,18	4,55	0,18	4,60	0,15	4,50
8 D	0,34	5,35	0,32	5,15	0,32	5,45

Tabela C.2 – Média dos dados das medições mecânicas para os testes pareados.

Peças	Operadores	Relógio Apalpador	Paquímetro
1	A	0,14	5,33
1	B	0,20	5,13
1	C	0,16	5,45
1	D	0,20	5,67
2	A	0,10	4,42
2	B	0,17	4,33
2	C	0,15	4,55
2	D	0,18	4,77
3	A	0,10	5,23
3	B	0,21	4,83
3	C	0,10	4,83
3	D	0,12	4,53
4	A	0,07	4,77
4	B	0,12	4,32
4	C	0,11	4,48
4	D	0,12	4,38
5	A	0,18	4,33
5	B	0,27	3,93
5	C	0,15	4,97
5	D	0,23	4,63
6	A	0,12	4,07
6	B	0,18	4,12
6	C	0,15	5,07
6	D	0,16	5,05
7	A	0,10	4,42
7	B	0,24	4,32
7	C	0,13	4,52
7	D	0,18	4,62
8	A	0,24	5,47
8	B	0,32	5,73
8	C	0,17	4,55
8	D	0,33	5,32

ANEXO D – Gráficos

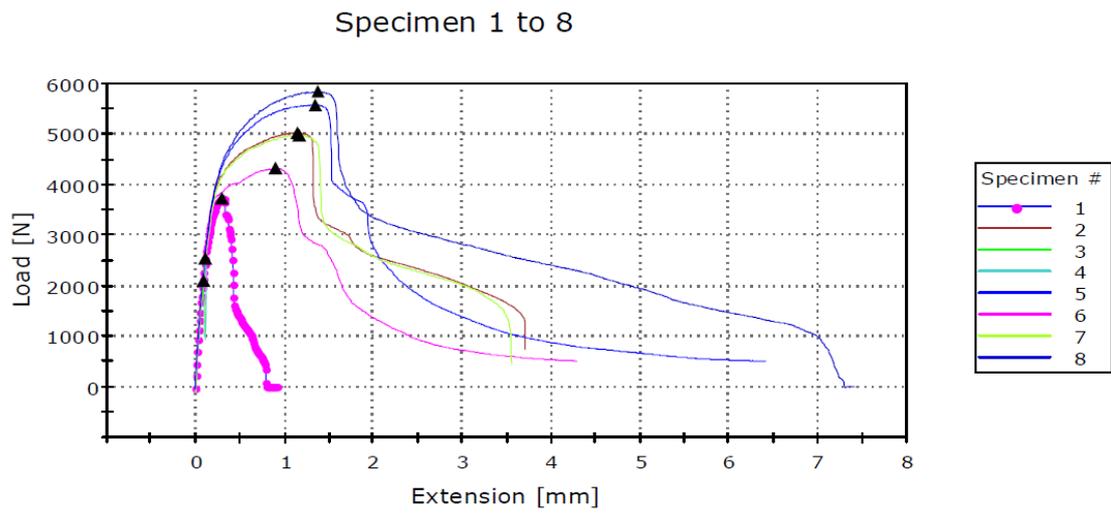


Figura D.1 – Gráfico para teste de cisalhamento, Máquina 1 – Réplica 1

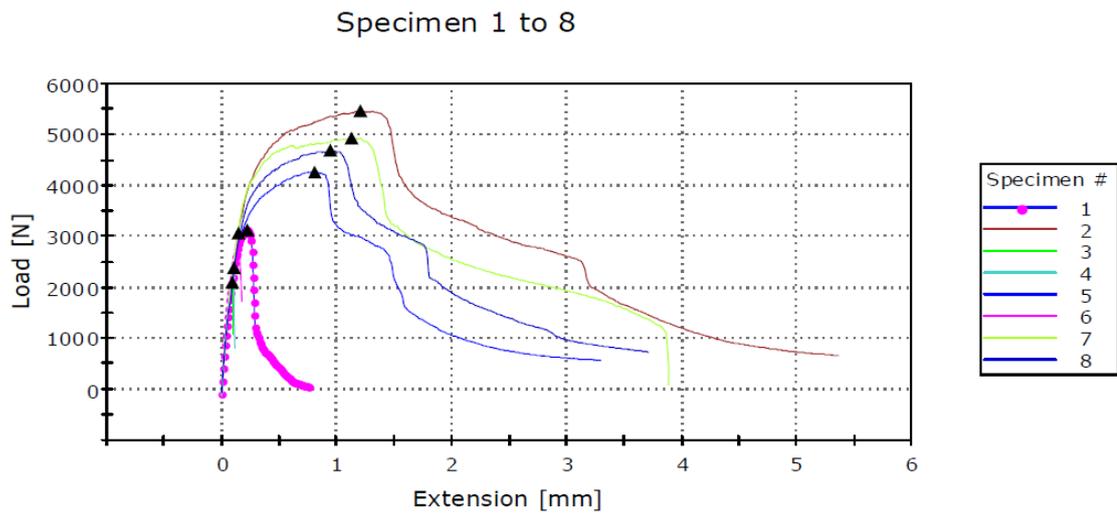


Figura D.2 – Gráfico para teste de cisalhamento, Máquina 1 – Réplica 2

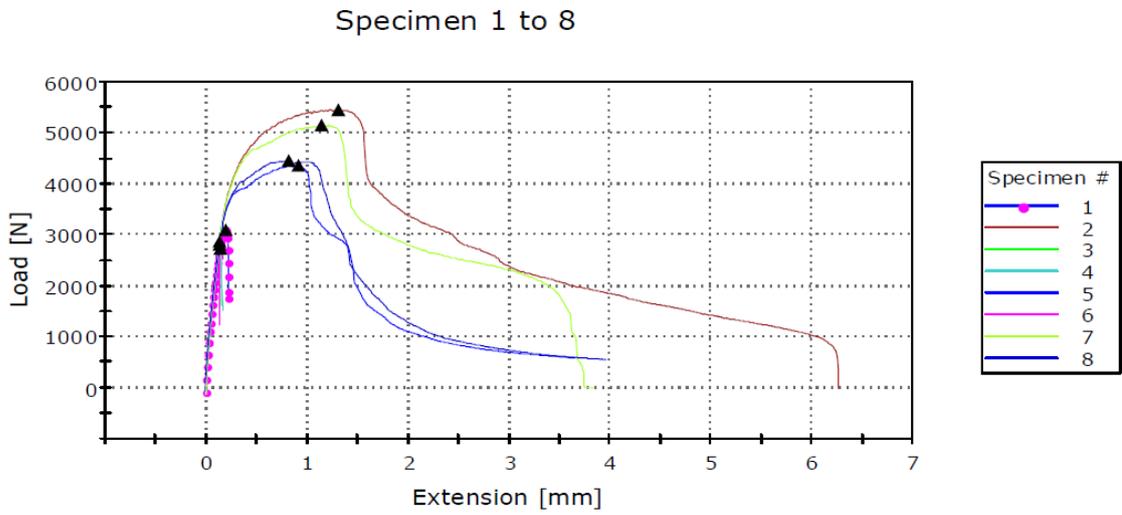


Figura D.3 – Gráfico para teste de cisalhamento, Máquina 1 – Réplica 3

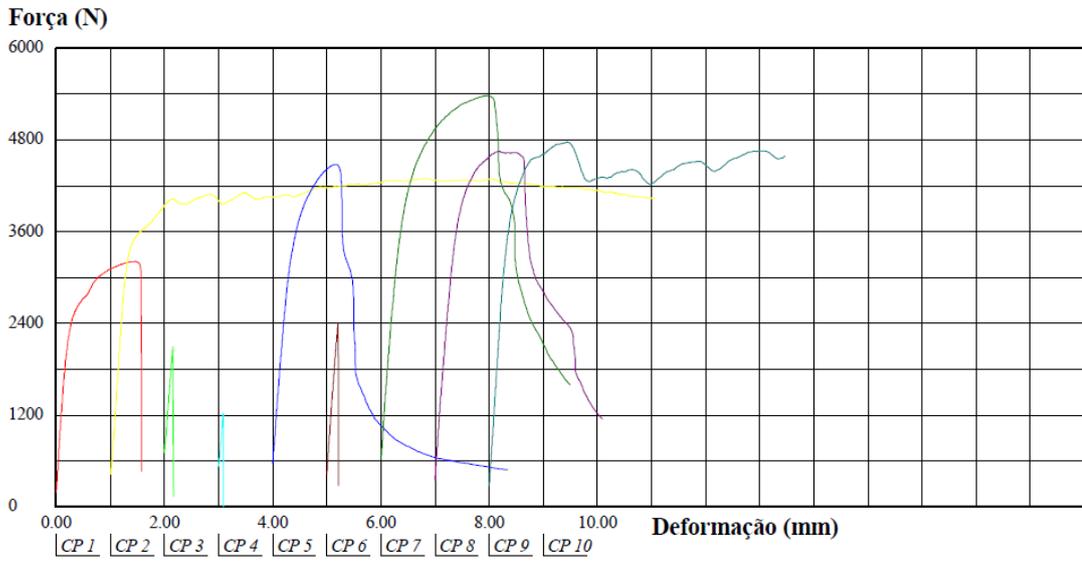


Figura D.4 – Gráfico para teste de cisalhamento, Máquina 2 – Réplica 1

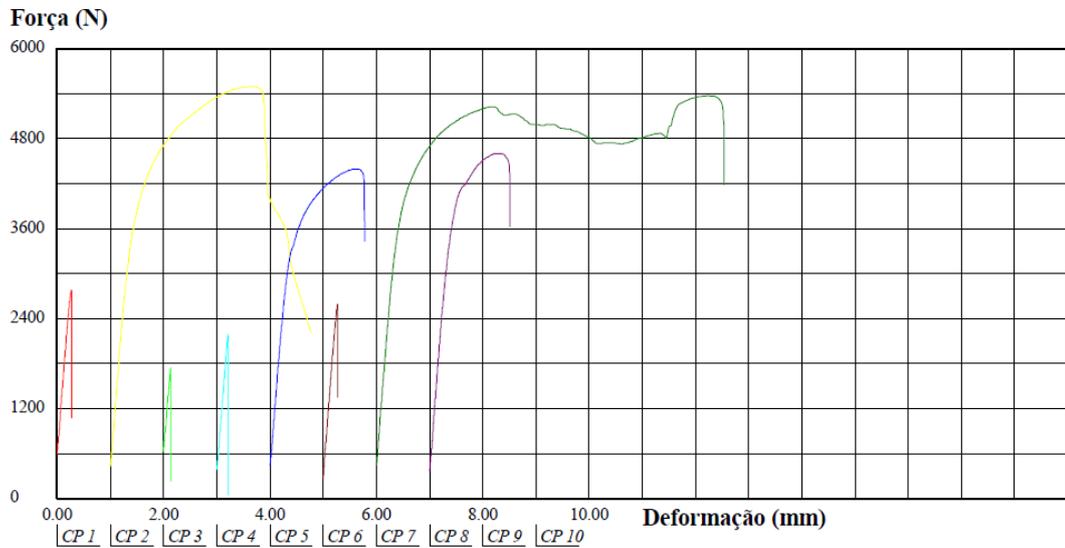


Figura D.5 – Gráfico para teste de cisalhamento, Máquina 2 – Réplica 2

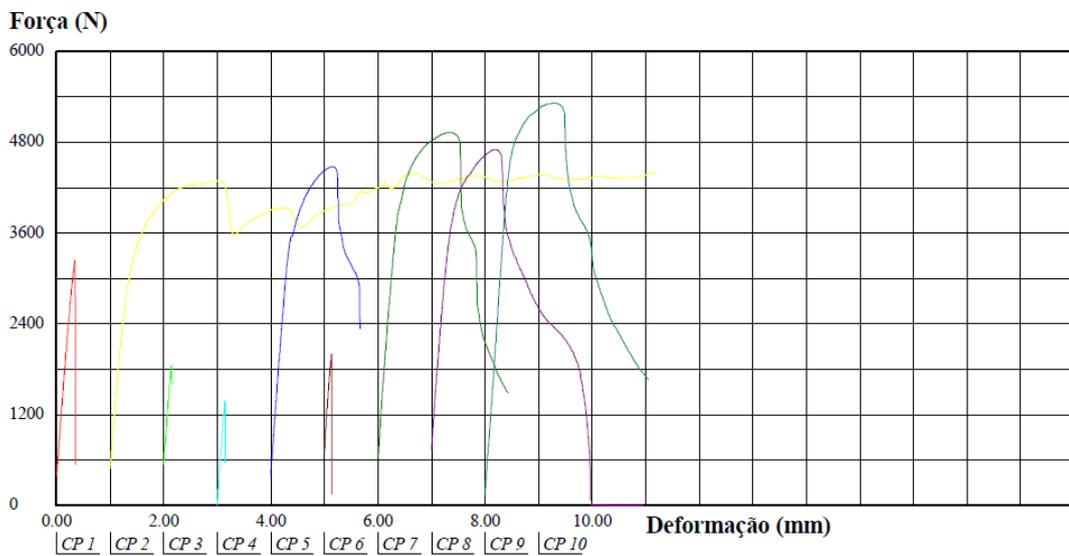


Figura D.6 – Gráfico para teste de cisalhamento, Máquina 2 – Réplica 3

Observação: As Figuras D.4 e D.6 apresentam nove testes de cisalhamento, pois foi necessário realizar um novo teste com um novo corpo de prova, uma vez que a peça deslizou na hora do teste, caracterizando uma deficiência do equipamento na fixação do corpo de prova.