

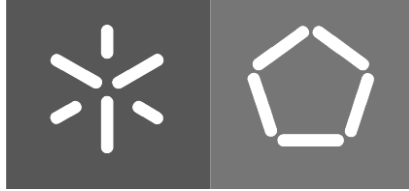


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Miguel Ferreira e Sousa

Monitorização e Melhoria da Qualidade num
Processo de Soldadura

João Miguel Ferreira e Sousa Monitorização e Melhoria da Qualidade num Processo de Soldadura



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Miguel Ferreira e Sousa

Monitorização e Melhoria da Qualidade num
Processo de Soldadura

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia e Gestão da Qualidade

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professora Doutora Isabel Silva Lopes

Outubro de 2024

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Não há palavras que expressem a minha gratidão a todas as pessoas que me apoiaram nesta fase da minha vida, que serviram de alicerces nos momentos de maior desmotivação e desespero. Quero agradecer à minha família, mais propriamente, pai e mãe por estes anos todos de apoio, ensino, de afeto e carinho que fizeram de mim a pessoa que sou hoje. Ao meu irmão Abílio, simplesmente um obrigado por tudo, o resto já sabes. Aos meus amigos e colegas que fui conhecendo em toda a minha caminhada académica desde Vila Real até o Minho, são amizades muito especiais dos quais não prescindo de nenhuma, sendo todas únicas e especiais.

A minha segunda família, o polo-aquático que sempre foi o escape emocional que para além da união pelo desporto e pelo amor a esta modalidade, encontrei irmãos.

Não podia faltar o agradecimento à minha orientadora, professora Isabel Lopes pela extrema paciência, orientações e ensinamentos que contribuíram para a realização deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Monitorização e Melhoria da Qualidade num Processo de Soldadura

RESUMO

Este trabalho, realizado numa empresa de fabricação de mobiliário de escritório, aborda a monitorização e melhoria da qualidade no processo de soldadura de traves utilizando o Controlo Estatístico de Processos (CEP). O estudo foca-se na optimização do processo de soldadura robotizada, nomeadamente para mitigar o problema de excesso de penetração de soldadura que levava à produção de peças não conformes e consequentemente a que haja retrabalho. Inicialmente, foi utilizado o diagrama de Ishikawa de forma a entender o processo e quais as fontes de variabilidade podiam ter influência. Com uma primeira aplicação do CEP, constatou-se que o processo não está sob controlo estatístico, apresentando várias regras que indicam a presença de causas especiais. Com a análise dos dados foi possível identificar problemas, como o design das peças e a programação dos movimentos do robot. Através da análise estatística e aplicação de ferramentas de qualidade, foram propostas melhorias significativas, como a alteração do diâmetro do arame de 0,8 mm para 1 mm, a reformulação do design das peças e o ajuste dos parâmetros de funcionamento do robô. Apesar dos avanços, após implementação das melhorias foi conseguido o objetivo de eliminar o problema relativo à produção de peças não conformes, verificou-se que o processo exige constante monitorização e ajustes periódicos. O estudo conclui que as melhorias implementadas contribuíram para um aumento da eficiência e qualidade do processo de soldadura, embora seja necessário um estudo mais aprofundado para atingir um processo capaz e que esteja apenas sujeito a variabilidade natural.

PALAVRAS-CHAVE

Controle Estatístico de Processos, Variabilidade, Melhoria Contínua, Qualidade.

Monitoring and Improving Quality in a Welding Process

ABSTRACT

This work carried out in an office furniture manufacturing company deals with monitoring and improving quality in the beam welding process using Statistical Process Control (SPC). The study focuses on the optimization of the robotic welding process, namely to mitigate the problem of excessive welding penetration which led to the production of non-conforming parts and consequently to rework. Initially, the Ishikawa diagram was used to understand the process and which sources of variability could have an influence. An initial application of the SPC showed that the process was not under statistical control, with various rules indicating the presence of special causes. By analyzing the data, it was possible to identify problems such as the design of the parts and the programming of the robot's movements. Through statistical analysis and the application of quality tools, significant improvements were proposed, such as changing the wire diameter from 0.8 mm to 1 mm, redesigning the parts and adjusting the robot's operating parameters. Despite the progress made in implementing the improvements, the objective of eliminating the problem of producing non-conforming parts was achieved, but it was found that the process requires constant monitoring and periodic adjustments. The study concludes that the improvements implemented have contributed to an increase in the efficiency and quality of the welding process, although further study is needed to achieve a capable process that is only subject to natural variability.

KEYWORDS

Statistical Process Control, Variability, Continuous Improvement, Quality.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Metodologia de investigação	2
1.4 Estrutura da dissertação.....	2
2 Fundamentação Teórica.....	4
2.1 Qualidade	4
2.2 Ferramentas da Qualidade	5
2.3 Controlo Estatístico de Processos	6
2.3.1 Variabilidade nos Processos Produtivos.....	7
2.3.2 Cartas de Controlo.....	9
2.3.3 Capacidade Máquina e Processo	17
2.3.4 Amostragem.....	21
2.4 Soldadura	22
2.4.1 História da Soldadura	22
2.4.2 Tipos de Soldadura.....	23
3 Definição e Implementação do CEP nas condições iniciais.....	26
3.1 Caracterização do problema e suas causas	26
3.2 Aplicação do CEP	30

4	Melhorias no Processo	40
4.1	Design da Trave	40
4.2	Diâmetro Do Arame Consumível	41
4.3	Layout Mesa de Trabalho	42
4.4	Programação e Configuração do Robot	42
5	Monitorização do Processo com as Melhorias Aplicadas	43
6	Conclusões	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Causas de variação (Retirado de Montgomery, 2009)	9
Figura 2: Carta de Controlo (Retirado de Vieira, 2012)	10
Figura 3: Árvore de decisão das cartas de controlo (Adaptado de Hessing, n.d.)	14
Figura 4: Exemplo de uma carta das médias ($\bar{X}$) (Obtido através do software Minitab)	15
Figura 5: Oito regras para deteção de causas especiais (Retirado de International Organization for Standardization, 2013)	17
Figura 6: Os indicadores C_p e C_{pk} (Retirado de Kaya & Kahraman, 2011)	19
Figura 7: Relação entre C_p e C_{pk} (Retirado de Montgomery, 2009)	20
Figura 8: Fundição direta: (A) placa de base para ter a peça fundida nela, (B) areia moldada na forma desejada, (C) derramamento de metal quente no molde, e (D) a peça fundida é agora parte da placa de base (Retirado de Jeffus (2016)).	22
Figura 9: Soldadura de fluxo: (A) duas peças de chapa metálica, (B) barragens de areia para manter o metal fundido no lugar, (C) metal fundido vertido entre as chapas metálicas, e (D) chapa soldada acabada (Retirado de Jeffus (2016)).	23
Figura 10: Mesa de trabalho, robot de soldadura	27
Figura 11: Componentes metálicos e acabamentos da trave	27
Figura 12: Resultado da soldadura em A e B.....	28
Figura 13: Diagrama de causa-efeito, processo de soldadura.....	29
Figura 14: Pontos críticos de A e B	31
Figura 15: Ponto A1; <i>compr</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	33
Figura 16: Ponto A1; <i>larg</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	33
Figura 17: Ponto A2; <i>compr</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	34
Figura 18: Ponto A2; <i>larg</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	35
Figura 19: Ponto A3; <i>compr</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	35
Figura 20: Ponto A3; <i>larg</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	36
Figura 21: Ponto B1; <i>compr</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	37
Figura 22: Ponto B1; <i>larg</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	38
Figura 23: Ponto B2; <i>compr</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	38
Figura 24: Ponto B2; <i>larg</i> - Carta $\bar{X}$ e <i>R</i>	39

Figura 25: Exemplo das diferentes dimensões da soldadura	40
Figura 26: Peça metálica C.....	41
Figura 27: Pontos críticos C.....	44
Figura 28: Ponto $C1$; <i>compr</i> – Carta $\bar{X}$ e R.....	44
Figura 29: Ponto $C1$; <i>larg</i> - Carta $\bar{X}$ e R.....	45
Figura 30: Ponto $C2$; <i>compr</i> – Carta $\bar{X}$ e R.....	45
Figura 31: Ponto $C2$; <i>larg</i> - Carta $\bar{X}$ e R.....	46
Figura 32: Ponto $C3$; <i>compr</i> – Carta $\bar{X}$ e R.....	46
Figura 33: Ponto $C3$; <i>larg</i> - Carta $\bar{X}$ e R.....	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Cartas de Controlo de Variáveis (Adaptado de Nikkel, 2007)	13
Tabela 2: Cartas de Controlo de Atributos (Adaptado de Nikkel, 2007)	13
Tabela 3: Oito regras para deteção de causas especiais (Adaptado de International Organization for Standardization, 2013)	16
Tabela 4: Relação entre Cp e a condição da qualidade (Adaptado Kaya & Kahraman, 2011)	18
Tabela 5: Desvio padrão global das variáveis.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

CEP – Controlo Estatístico de Processos

LIC – Limite Inferior de Controlo

LIE – Limite Inferior de Especificação

LSC – Limite Superior de Controlo

LSE – Limite Superior de Especificação

1 INTRODUÇÃO

O presente projeto de dissertação, realizado na Sotubo – Office Furniture, foi desenvolvido no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão da Qualidade. Neste capítulo é feito um breve enquadramento do tema, seguindo-se uma descrição dos objetivos do projeto e uma explicação da estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento

O detalhe é cada vez mais importante numa empresa, de forma a elevar a competitividade e a eficiência da mesma. Como afirma Ruivo (2022), torna-se necessário um aumento do rigor e inovação uma vez que as organizações têm de se desenvolver para garantirem o seu sucesso e a sua posição no mercado. É muito difícil alcançar qualquer tipo de eficiência ou de competitividade se não existir qualidade. Apesar de este conceito não ter uma definição única, ou seja, varia consoante a pessoa e o contexto em que está inserida, é de fácil perceção saber se algo tem qualidade ou não.

Sendo assim, o objetivo é melhorar os produtos, serviços e processos. De forma a perseguir a melhoria continua, um dos gurus da qualidade, Dr. Ishikawa, definiu as sete ferramentas da qualidade, que segundo o próprio “95% dos problemas de processo podem ser retificados utilizando as 7 ferramentas básicas da Qualidade”.

Estas ferramentas, apesar de na sua maioria serem simples e de fácil utilização, são bastante importantes. Tal como afirma Lee et al. (2018), as ferramentas da qualidade, utilizadas de forma correta, têm bastante impacto na análise e resolução de problemas.

Uma das ferramentas é a carta de controlo, e de todas é a que mais recorre à estatística determinando se um processo está ou não em estado de controlo estatístico (Bamford & Greatbanks, 2005). Esta ferramenta destaca as causas especiais de variação (Bamford & Greatbanks, 2005). É uma ferramenta muito utilizada no âmbito do Controlo Estatístico de Processos (CEP).

Os conceitos e métodos do CEP tornaram-se muito importantes nas indústrias de fabrico e de processo. O seu objetivo é monitorizar o desempenho de um processo ao longo do tempo, a fim de verificar se o processo se mantém num “estado de controlo estatístico” (MacGregor & Kourti, 1995).

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é monitorizar e melhorar o processo de soldadura de traves através de um, eliminando o problema de excesso de penetração que resulta em soldaduras que mal ou simplesmente

parcialmente soldadas, utilizando as ferramentas da Qualidade, tal como o Controlo Estatístico de Processo (CEP), de forma a identificar possíveis problemas. Com a utilização desta ferramenta é esperado que os dados obtidos evidenciem falta de capacidade do processo e variabilidade elevada. Sendo assim, serão sugeridas melhorias no processo e a alteração do design da peça cujo objetivo é facilitar o processo de soldadura.

Os resultados esperados são a melhoria da qualidade do produto produzido pelo robot de soldadura, através de uma melhor definição dos parâmetros de funcionamento do robot e eliminar o problema que levava a que haja retrabalho.

1.3 Metodologia de investigação

A investigação é mais do que ler alguns livros ou artigos, falar com algumas pessoas ou fazer perguntas. Embora a recolha de dados possa fazer parte do processo de investigação, se não for efetuada de forma sistemática e sem um objetivo claro, não será vista como investigação (Saunders et al., 2019).

Podemos, portanto, definir investigação como atividades levadas a cabo de uma forma sistemática para se descobrir novos factos, aumentando assim o conhecimento (ASQ, 2024a).

A realização desta dissertação segue uma filosofia positiva, onde se adota uma posição realista, utilizando o método científico empírico, formulando hipóteses testáveis de uma realidade observável. Segue também uma abordagem dedutiva, onde a conclusão tem o mesmo valor que as premissas. Como relata Saunders et al. (2019) quando as premissas são verdadeiras, a conclusão também deve ser verdadeira. Sendo assim a principal estratégia é a Investigação – Ação, que conta com o envolvimento de profissionais na investigação, não apenas o investigador, o que faz com que haja um ambiente colaborativo entre ambos. Distingue-se das restantes abordagens pela ênfase na ação.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos: Introdução, Revisão de Literatura, Apresentação da Empresa, Definição e Implementação do CEP nas Condições Iniciais, Melhorias no Processo, Monitorização do Processo com as Melhorias Aplicadas e Conclusão. Sendo que no primeiro capítulo é feito de forma sucinta um enquadramento relativo ao estudo realizado, dispondo dos objetivos e da metodologia de investigação e consta também a estrutura do relatório.

O segundo capítulo tem como intenção fornecer o contexto teórico que serviu como alicerce para o trabalho prático desenvolvido, abordando os temas da Qualidade, as técnicas de Controlo Estatístico de Processo.

No terceiro capítulo é descrita e analisada a situação atual, no que diz respeito ao processo alvo de estudo, compreendendo-se assim o circuito do processo de fabricação de traves, e é utilizada a técnica de CEP de forma a monitorizar e controlar o processo nas condições base de funcionamento, possibilitando assim a identificação de possíveis oportunidades de melhoria.

No quarto capítulo, tendo por base a análise realizada no capítulo anterior, é apresentada uma descrição das ações de melhoria propostas de forma a melhorar o processo, tendo em conta a avaliação realizada aquando da utilização do CEP.

O quinto capítulo é um homólogo do quarto capítulo, passando novamente pela utilização da metodologia CEP, mas com as propostas de melhoria implementadas.

No último capítulo avaliasse a eficácia e a eficiência das melhorias propostas, através da análise dos dados recolhidos nas duas fases em que foi utilizado o CEP, tirando conclusões sobre a evolução e novo estado do processo de fabricação de traves. Após a conclusão, são disponibilizadas as referências bibliográficas que serviram como fundamento para a realização deste projeto, tendo por fim alguns anexos e apêndices que apresentam informação complementar.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como finalidade apresentar e enquadrar conceitos teóricos e informações resultantes da pesquisa bibliográfica, nomeadamente através de livros, revistas, jornais científicos e normas, relativamente às temáticas relevantes ao projeto desta dissertação. Numa primeira etapa, são introduzidos conceitos relativos à Qualidade, de forma a perceber o seu desenvolvimento. De seguida, é apresentada com maior detalhe o Controlo Estatístico de Processo, onde são referidos os seus objetivos, ferramentas e as bases para a sua implementação.

2.1 Qualidade

A qualidade sempre teve um papel importante na evolução do ser humano, mesmo este sendo primitivo e não a sabendo reconhecer. Os recolhedores de comida primitivos tinham de aprender que alimentos eram indicados para comer e os que não eram, até os caçadores tinham de explorar as ferramentas que eram melhores para os seus propósitos (Elassy, 2015).

Como afirma Hoyer & Hoyer (2001), os standards da qualidade de hoje não são muito diferentes dos que eram há séculos atrás. As estratégias e os instrumentos para garantir a qualidade podem ter mudado, mas as expectativas básicas dos clientes têm-se mantido relativamente constantes ao longo do tempo.

Até aos dias de hoje a qualidade continua a ser fundamental, as empresas e organizações que realmente querem ser competitivas, destacar-se das demais e, mais importante, para sobreviver às constantes mudanças, têm de produzir com qualidade. A dificuldade reside na definição do que realmente esse termo que desde sempre nos acompanha significa, mas em contrapartida conseguimos reconhecer. Assim como é referido por Hoyer & Hoyer (2001), um dos pontos essenciais de Pirsig's é que a qualidade é como a arte moderna, podemos não conseguir definir o que é, mas frequentemente ou quase sempre reconhecemos quando a vemos.

Elassy (2015) quando à dificuldade de definir qualidade, sugere dois pontos cruciais, sendo eles a relatividade do conceito e o facto de a qualidade ser usada em vários contextos. A qualidade é um conceito relativo pois o que para uns pode ser considerado de elevada qualidade, para outros pode não o ser, tendo significados diferentes dependendo do contexto em que está a ser aplicado.

Sendo assim, a qualidade é um conceito complexo que varia de pessoa para pessoa e do contexto em que está inserida, não existindo assim uma única definição. Vários gurus da qualidade apresentam os

seus pontos de vista e definições, variando umas das outras. Por exemplo, Juran & Godfrey (1999) defendem que a qualidade pode ser definida em duas vertentes, a qualidade corresponde às características dos produtos que satisfazem as necessidades dos clientes e é a ausência de falhas ou erros que requerem uma nova ação de trabalho. Já Hoyer & Hoyer (2001) transcreve a definição de Philip Crosby como “Qualidade significa conformidade com as especificações”.

2.2 Ferramentas da Qualidade

A crescente globalização e a procura de qualidade a nível mundial nos produtos e serviços adquiridos aumentaram a pressão sobre as organizações para se manterem rentáveis (McDermott et al., 2022). Posto isto, a melhoria continua tem um papel fundamental na elevação dos padrões das organizações. De forma a analisar processos, procurar problemas e encontrar soluções que visam a constante melhoria, existem inúmeras ferramentas e técnicas que são bastante prestativas. Kaoru Ishikawa, um dos gurus da qualidade, definiu um conjunto de ferramentas que, segundo o mesmo, “95% dos problemas de processo podem ser retificados utilizando as 7 ferramentas básicas da Qualidade”. As ferramentas da qualidade são métodos utilizados para a melhoria de processos e soluções de problemas (Paulista & Alves, 2015). São utilizadas para facilitar mudanças e melhorias positivas (McQuater et al., 1995). Sendo elas:

- Diagrama de causa e efeito;
- *Checklist*;
- Histograma;
- Fluxograma;
- Diagrama de correlação;
- Diagrama de Pareto;
- Carta de controlo.

Cada ferramenta tem um propósito diferente, sendo que como afirma Pyo (2005), deve-se evitar utilizar apenas as preferidas. Para obter o máximo benefício, devem ser utilizadas várias ferramentas em combinação, uma vez que cada ferramenta desempenha um papel diferente.

Ainda assim, existem obstáculos que influenciam o sucesso da utilização destas ferramentas, como a falta de apoio e comprometimento da gestão de topo, uma fraca formação para a aplicação, o inapropriado uso das ferramentas e a má recolha de dados.

A utilização de uma ferramenta de forma incorreta pode resultar numa causa raiz errada e na aplicação de uma ação corretiva errónea, obrigando a reiniciar a definição do problema e a resolução do processo associado (McDermott et al., 2022).

No entanto, quando os fatores críticos de sucesso estão presentes, a utilização destas ferramentas e técnicas permite definir os problemas reais, identificar as causas profundas, desenvolver e testar soluções e implementar uma solução permanente (McQuater et al., 1995).

2.3 Controlo Estatístico de Processos

Nos dias que correm, devido à elevada produção, é necessário ter processos estáveis e com repetibilidade de forma que os produtos sejam o mais homogêneos possíveis. Desta forma, diminui-se a probabilidade de produzir produtos com defeito que geram custos às empresas através de retrabalho do produto, num caso mais favorável, e no pior dos cenários pode não ser possível “consertar” o produto e este contribuir apenas para prejuízo. A impraticabilidade de inspeção a 100%, devido a falta de recursos e de tempo, pode levar à entrega aos clientes de produtos com defeito, o que deixa uma má imagem das empresas. Sendo assim, as empresas sentem a necessidade de obter processos de excelência, que sejam capazes de cumprir as especificações.

Como relata Stuart et al. (1996), o primeiro controlo estatístico da qualidade começou na *Bell Telephone Company*, por volta de 1920 onde foi criada uma equipa para enfrentar os problemas inerentes à produção de grandes volumes de equipamento de boa qualidade para o sistema telefónico em rápida expansão. Foi então que Walter Shewhart desenvolveu metodologias técnicas de controlo estatístico de processos, utilizando a carta de controlo para obter uma representação gráfica para monitorização e controlo de processos. Mais tarde, em 1950, Deming contribuiu com progressos significativos para esta metodologia e começou a espalhar as suas ideias, particularmente, a importância do controlo estatístico na resolução de problemas na produção.

O CEP é uma poderosa coleção de ferramentas para a resolução de problemas de forma a alcançar a estabilidade do processo e melhorar a capacidade através da redução da variabilidade (Montgomery, 2009). De todas as ferramentas, a que mais se destaca é a carta de controlo.

Os principais objetivos desta técnica é a eliminação da inspeção a 100%, devido aos seus entraves como já tinha sido abordado acima, sendo utilizado uma inspeção por amostragem. Outra finalidade do CEP é dar um sinal quando o processo se altera, ou seja, quando a sua média se afasta do valor alvo e/ou a sua variabilidade aumenta (Škulj et al., 2013).

Nas seguintes subsecções deste capítulo são abordados com maior detalhe alguns pontos essenciais do CEP, nomeadamente a variabilidade dos processos, as cartas de controlo, onde consta as etapas de construção, os tipos de cartas normalmente utilizados e a análise e interpretação das mesmas. Também é descrito a forma como analisamos a capacidade da máquina e do processo e a amostragem.

2.3.1 Variabilidade nos Processos Produtivos

A intenção de uma empresa é ter a capacidade de produzir constantemente produtos iguais, porém é extremamente difícil ou impossível gerar todos os produtos conforme o valor nominal projetado. Daí se estabelecer uns limites de especificação para os quais se vai averiguar a conformidade dos produtos. Pode-se então afirmar que a Qualidade é a conformidade com as especificações.

A dificuldade em obter produtos iguais em qualquer processo de produção, independentemente de quão bem concebido ou cuidadosamente mantido seja, deve-se à variabilidade (Montgomery, 2009). A variabilidade não pode ser eliminada, mas pode ser conhecida e controlada (Vieira, 2012).

A variabilidade pode ser estratificada em dois tipos tal como relata Juran & Godfrey (1999). Shewhart definiu como “assinaláveis” e “não assinaláveis” as causas de variação. Mais tarde Deming utilizou os termos “especiais” e “comuns” para estas mesmas causas de variação.

As causas comuns resultam do efeito cumulativo de muitas causas pequenas e essencialmente inevitáveis (Montgomery, 2009). Quando um processo está a operar apenas influenciado por causas comuns, naturais, que são típicas do processo, podemos afirmar que está sob controlo. Segundo Nikkel (2007), as causas naturais podem ser:

- Vibração normal de uma máquina em boas condições;
- Variação normal das características da matéria-prima;
- Folgas normais entre os componentes da máquina;
- Pequenas variações de temperatura e humidade;
- Pequenas flutuações na energia elétrica;
- Desgaste normal da ferramenta de corte;

O mesmo não é aplicável às causas especiais. A variabilidade é geralmente grande quando comparada com as causas comuns e representa normalmente um nível inaceitável de desempenho do processo (Montgomery, 2009). O objetivo ao implementar o controlo estatístico de processos é monitorizar estas variações, de forma a que se detete o mais rapidamente possível, para que se possa realizar as ações corretivas antes que se produzam bastantes produtos defeituosos. Como relata Montgomery (2009), um

processo pode operar durante períodos relativamente longos num estado de controlo, no entanto, não permanece estável para sempre, ocorrerão causas especiais.

De acordo com Requeijo & Pereira (2012) estas fontes de variação dos processos devem-se a vários fatores, nomeadamente:

- **Mão de obra** - associado com os colaboradores, quer a nível da sua formação profissional, quer a nível do seu bem-estar físico e psicológico;
- **Máquinas/Equipamentos** - relacionado com o desgaste das máquinas e das peças, manutenção, calibração, ajustes nos equipamentos, entre outros;
- **Matéria-Prima** - defeitos na matéria-prima; matéria-prima inconsistente;
- **Meio ambiente** - o meio em que o processo se encaixa, envolvendo fatores naturais como o vento, humidade, luminosidade, temperatura, entre outros;
- **Métodos** - métodos desadequados ou insuficientes face às necessidades de produção e produto.

As variações são o maior inimigo da qualidade (Nikkel, 2007). Tendo isto, pode-se agora definir a Qualidade como sendo inversamente proporcional à variabilidade. Ou seja, como afirma Stuart et al. (1996), o objetivo é maximizar a produção com uma variação mínima, em circunstâncias em que pode haver uma estrutura de correlação substancial em medições sucessivas e em que as variáveis influentes, como as condições ambientais e as propriedades das matérias-primas naturais, podem ser difíceis de controlar.

Na figura 1 é demonstrada a forma como os tipos de variação atuam no processo produtivo. No instante t_0 , apenas a variação natural está presente, o que faz com que o processo esteja sob controlo. Quanto aos efeitos das causas assinaláveis, estes variam ao nível da forma, localização e dispersão, podendo existir a combinação destes 3 fatores. Os instantes t_1 , t_2 e t_3 retratam esses mesmos fatores.

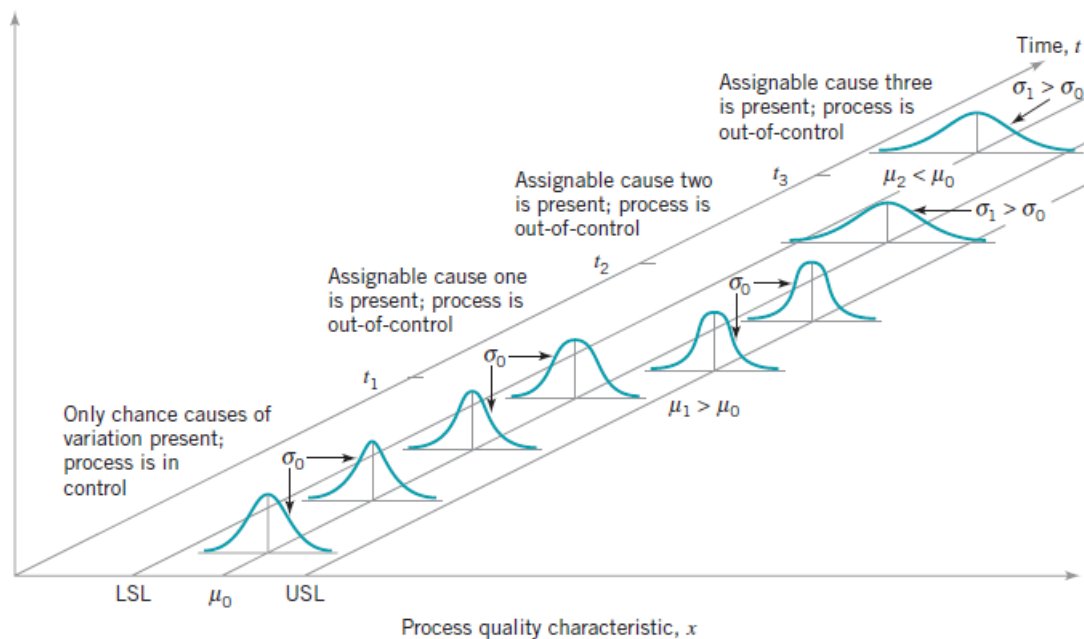


Figura 1: Causas de variação (Retirado de Montgomery, 2009)

2.3.2 Cartas de Controlo

De todas as ferramentas utilizadas no CEP, a que tem maior destaque é a carta ou gráfico de controlo e, tal como Stuart et al. (1996) afirma, o gráfico de controlo de Shewhart continua a ser, sem dúvida, a ferramenta estatística mais importante no controlo e melhoria da qualidade.

2.3.2.1 Fundamentos das Cartas de Controlo

De um modo geral, para construir um gráfico de controlo, são recolhidas amostras de produtos de saída, calcula-se uma estatística apropriada e é traçado num gráfico contendo linhas de fronteira que são utilizadas para determinar se o processo está estatisticamente “sob controlo” (Koutras et al., 2007). As linhas de fronteira são (figura 2):

- **LSC** – Representa o limite superior de controlo.
- **LIC** – Representa o limite inferior de controlo.
- **LC** – Linha central, que representa a média da característica da qualidade que está a ser alvo de monitorização.

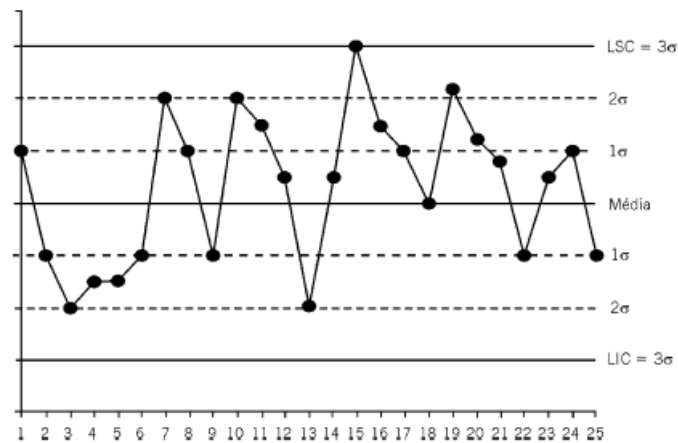


Figura 2: Carta de Controle (Retirado de Vieira, 2012)

Como referido na subsecção 2.3.1 é importante entender que existe variabilidade associada aos processos e para que um processo esteja sob controlo, este tem de estar a cumprir os limites estabelecidos, estando apenas sujeito a variação natural.

No entanto, cansaço do operador, desajuste de máquina, aumento da temperatura, além de outros problemas, fazem aumentar a variabilidade do processo, o que pode levar à produção de produtos não conformes (Vieira, 2012).

A carta de controlo, como expõe Vieira (2012), serve para:

- Mostrar a variabilidade típica do processo;
- Verificar se o processo está sob controlo;
- Monitorizar o processo de tal modo que causas especiais de variação sejam identificadas e corrigidas, o mais rapidamente possível;
- Verificar se as melhorias feitas determinaram menor variabilidade do processo;

Nikkel (2007), destaca algumas vantagens que podem advir do uso da carta de controlo:

- A carta de controlo é uma ferramenta simples e eficiente para alcançar o estado de controlo estatístico. Pode ser utilizada no local de trabalho pelo próprio operador e fornece ao pessoal envolvido na operação informação confiável de quando intervir ou não no processo;
- Quando um processo está sob controlo estatístico, o seu desempenho em atender especificações é previsível. Dessa forma, ambos, fornecedor e cliente, podem confiar nos níveis de qualidade e nos custos estáveis necessários para alcançar aqueles níveis de qualidade;

- Estando o processo sob controlo estatístico, o seu desempenho pode ainda ser melhorado, reduzindo a sua variação. Os efeitos dos aperfeiçoamentos propostos ao sistema podem ser antecipados, e os efeitos reais, mesmo decorrentes de modificações subtis, podem ser identificados pelas informações das cartas de controlo.

2.3.2.2 Etapas para a Construção das Cartas de Controlo

Para a construção das cartas de controlo, existem diferentes abordagens defendidas por vários autores. O método mais habitual, que é defendido por Montgomery (2009), e por outros autores como Benková et al. (2023), Koutras et al. (2007) e Bersimis et al. (2007) é a aplicação da carta de controlo em duas fases, a fase de retrospectiva (Fase I) e a fase de monitorização (Fase II).

Cada fase tem um conteúdo e um objetivo diferente (Benková et al., 2023). Na Fase I, tal como afirma Bersimis et al. (2007), há muito mais a fazer do que simplesmente traçar alguns gráficos, vai-se estudar o processo de forma muito intensiva. Deve-se partir do pressuposto que o processo está fora de controlo e então utilizar os dados para analisar retrospectivamente o comportamento do processo (Benková et al., 2023).

Os pontos que estão fora dos limites de controlo ou a deteção das regras estabelecidas pela norma 7870, que indicam a presença de causas assinaláveis, são investigados, procurando as potenciais causas com o intuito de as eliminar (Montgomery, 2009).

Assim que se considerar o processo sob controlo, procede-se à avaliação dos parâmetros de controlo que serão posteriormente utilizados na fase seguinte (Koutras et al., 2007).

Algumas etapas devem ser consideradas na aplicação da primeira fase (adaptado de Requeijo & Pereira (2012)) :

- Seleção da(s) característica(s) da qualidade a controlar;
- Seleção do tipo de carta em função da característica e da estatística amostral que se pretende monitorizar;
- Elaboração de um plano de controlo que inclua a dimensão da amostra (***n***), a frequência da amostragem, o número de amostras ou subgrupos racionais (***m***) e o método de medição mais adequado;
- Assegurar a recolha de ***m*** amostras de dimensão ***n***, sendo habitual perfazer um total de pelo menos 100 unidades ($N \geq 100$), em que $N = m \times n$;
- Cálculo dos limites de controlo e representação gráfica das amostras obtidas e limites calculados;

- Verificação da existência de causas especiais.

Na Fase II, o objetivo básico é testar os dados futuros para especificar se o processo permanece sob controle ou se passou para o estado de fora de controle (Koutras et al., 2007). É preciso ter em atenção nesta fase de monitorização que as causas assinaláveis que ocorrem na fase II resultam em mudanças de processo menores, porque espera-se que a maioria das fontes de variabilidade tenham sido sistematicamente removidas durante a fase I (Montgomery, 2009). Os limites de controle utilizados para a monitorização do processo são os que foram calculados na fase I.

2.3.2.3 Tipos de Cartas de Controlo

Cada vez mais estão a ser desenvolvidas novas cartas de controlo que são utilizadas em numerosas situações, daí ser necessário ter muita atenção a qual se vai usar. As cartas de controlo podem ser de dois tipos, como demonstra na ISO 7870-2: 2013 (International Organization for Standardization, 2013), podem ser cartas de controlo de variáveis e cartas de controlo de atributos.

Os gráficos do controlo de atributos monitorizam características qualitativas dos itens produzidos, registando a presença ou quantidade de defeitos e têm a vantagem de permitir que várias características de qualidade sejam consideradas em conjunto e podendo a unidade ser classificada como conforme ou não-conforme em relação às especificações de determinadas características da qualidade.

As cartas de controlo de variáveis, pelo contrário, fornecem informações muito mais úteis sobre o desempenho do processo do que uma carta de controlo de atributos. A informação específica sobre a média e a variabilidade do processo é obtida diretamente. Além disso, quando os pontos estão fora dos limites de controlo nas cartas de controlo de variáveis, normalmente é fornecida muito mais informação relativa à causa potencial que originou estas pontes (Montgomery, 2009).

As principais cartas de controlo são (Tabela 1 e 2):

Tabela 1: Cartas de Controlo de Variáveis (Adaptado de Nikkel, 2007)

Tipos de Dados	Parâmetros	Uso Típico	Vantagens	Desvantagens	Comentários
$\bar{X}$ e R/s	Média e amplitude ou desvio-padrão do subgrupo.	Processos onde predomina o uso da máquina.	Uma ótima visão da variação estatística de um processo.	Cálculos complexos, resposta demorada, relação indireta entre limites de controlo e tolerância.	Selecionar cuidadosamente o tamanho do subgrupo, frequência e número de subgrupos usados para o estabelecimento de limites de controlo.
X e Rm	Média individual e amplitude móvel.	Onde apenas uma observação por lote é disponível.	Mais rápidos, mais fáceis de serem completados e explicados. Comparáveis diretamente com a tolerância.	Os dados têm de seguir uma distribuição normal. Não são tão sensíveis quanto os gráficos $\bar{X}/R$.	

Tabela 2: Cartas de Controlo de Atributos (Adaptado de Nikkel, 2007)

Tipos de Dados	Parâmetros	Uso Típico	Vantagens	Desvantagens	Comentários
p	Fração de não-conformes.	Apenas dados de atributos disponíveis ou para monitorizar a qualidade de uma unidade complexa com mais de uma característica de interesse.	Os dados são geralmente mais fáceis de obter do que os dados de variáveis. Os cálculos são mais fáceis que no gráfico $\bar{X}/R$.	Atributos não são tão úteis para trabalho de diagnóstico quanto os dados variáveis.	À medida que a qualidade melhora, os subgrupos ficam maiores. Consequentemente, todos os gráficos de atributos tornam-se obsoletos.
np	Número de não-conformes.				
u	Não-conformidades por unidade.				
c	Número de não-conformidades.				

De forma a ser mais perceptível e simples, recorrendo ao fluxograma da figura 3, consegue-se seleccionar a melhor carta de controlo a utilizar.

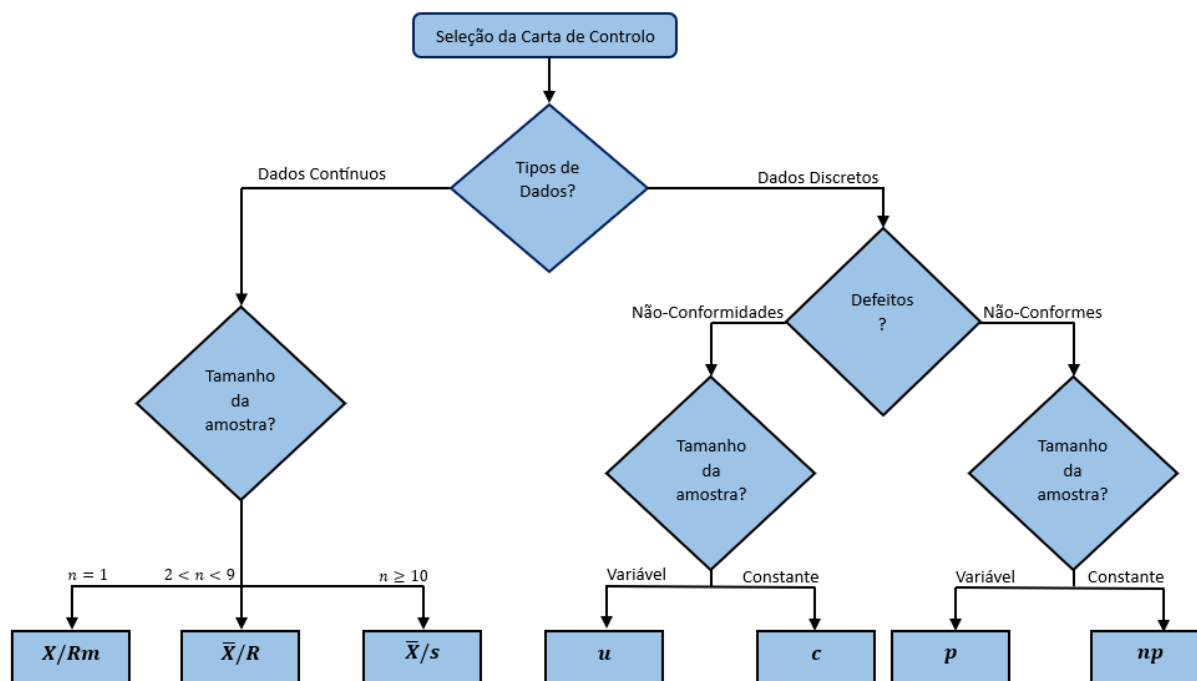


Figura 3: Árvore de decisão das cartas de controlo (Adaptado de Hessing, n.d.)

No projeto desenvolvido na presente dissertação, as características da qualidade selecionadas para implementar o CEP e aplicar as cartas de controlo são características que podem ser medidas, ou seja, características que são avaliadas em termos de variáveis. Para isso, foram utilizadas cartas de controlo por variáveis, nomeadamente as Cartas $\bar{X} - R$ que serão abordadas com maior detalhe.

2.3.2.4 Carta da Média ($\bar{X}$) e da Amplitude (R)

Quando se trabalha com variáveis é usual monitorizar, além da média, uma medida de variabilidade (Vieira, 2012). No caso destas cartas, para além da média, também se controla a amplitude, que é a maior diferença entre as amostras do mesmo grupo amostral. De todas as cartas de controlo, é a mais conhecida e a mais utilizada, sendo muito importante quando se pretende detetar pequenas variações no processo.

Como afirma Tague (2023), são especialmente usadas na indústria, onde uma amostra de quatro ou cinco peças pode ser utilizada para representar a produção de várias centenas ou milhares de peças.

O gráfico de Shewhart para monitorizar a média de um processo consiste numa linha central ao nível do processo histórico e nos limites de controlo superior e inferior. As médias das amostras são registadas ao longo do tempo (figura 4). É emitido um sinal de “fora de controlo” quando uma média de amostra ultrapassa os limites de controlo. Os limites de controlo são frequentemente fixados em 3 sigma (3σ) a

partir da linha central, em que “sigma” é o erro padrão estimado a partir das amostras (Woodall & Montgomery, 1999).

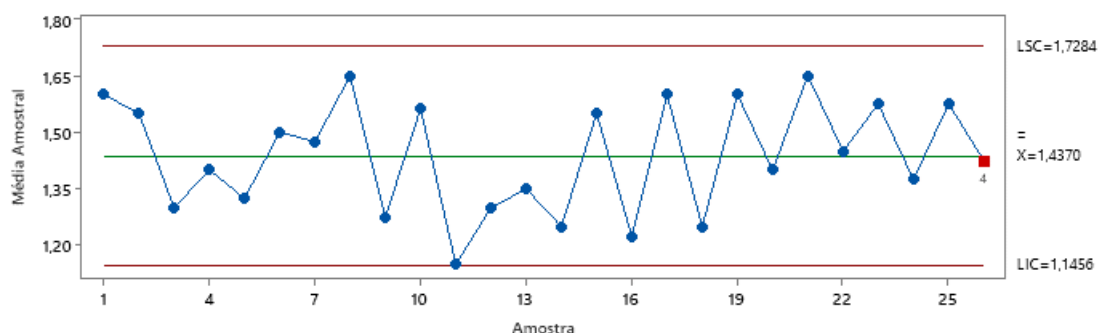


Figura 4: Exemplo de uma carta das médias ($\bar{X}$) (Obtido através do software Minitab)

Os limites de controlo são assim definidos com base em dados históricos do processo, e quanto maior a quantidade de dados confiáveis existirem, melhor definidos serão os limites de controlo e maior será a sua capacidade em retirar conclusões sobre a variação do processo. Relativamente ao gráfico das amplitudes (**R**), este tem como objetivo medir a variabilidade dentro de uma determinada amostra. Para construir os limites de controlo é necessário, inicialmente, estimar o valor da amplitude de cada amostra que é calculado através da diferença entre o maior e o menor valor observado.

2.3.2.5 Análise e Interpretação das Cartas de Controlo

A carta de controlo exibe uma faixa de variação determinada pelos limites de controlo superior (LSC) e inferior (LIC) (Vieira, 2012). Estes limites servem para perceber a variação típica do processo. Para além disso, um processo está fora de controlo estatístico quando apresenta pontos fora dos limites. Tal como relata Nikkel (2007), deve-se procurar o que esteja a causar esse problema de forma a ser detetado o mais rapidamente possível para que possa ser corrigido. Pois a carta de controlo por si só não corrige qualquer tipo de problema no processo, apenas serve como detetor de problemas.

Como já tinha sido abordado, é usual estabelecer os limites de controlo como múltiplos de sigma (σ), que significa desvio-padrão. Os limites normalmente estabelecidos são de “3-sigma” pois apresentam bons resultados.

Para além de averiguar se todos os pontos estão dentro dos limites de controlo, como afirma Tague (2023), podem-se acrescentar outros critérios ou padrões que indiciam a presença de causas assinaláveis.

Vieira (2012) refere que um processo está fora de controlo se apresentar:

- **Periodicidade**, ou seja, “subidas” e “descidas” em intervalos regulares de tempo;
- **Tendência**, isto é, os pontos se direccionam nitidamente para cima ou para baixo;
- **Estratificação**, isto é, mudança no nível de desempenho do processo.

O problema está no reconhecimento de padrões, ou seja, reconhecer padrões sistemáticos ou não aleatórios na carta de controlo e identificar a razão para este comportamento. A capacidade de interpretar um determinado padrão em termos de causas atribuíveis requer experiência e conhecimento do processo. Ou seja, não só temos de conhecer os princípios estatísticos das cartas de controlo, como também temos de ter um bom conhecimento do processo (Montgomery, 2009).

De forma a ajudar na interpretação das cartas de controlo, foram estabelecidas oito regras, que indicam a presença de causas especiais no processo e por consequência, este está fora de controlo estatístico. Havendo, portanto, a necessidade de intervir no processo. As regras, demonstradas na tabela 3 e figura 5, foram republicadas pela norma ISO 7870-2.

De forma ajudar na interpretação, a carta de controlo é dividida em seis zonas de igual largura (um desvio-padrão), no espaço entre o limite superior e inferior de controlo, chamadas de zonas A, B e C, localizadas simetricamente em relação à linha média (Nikkel, 2007).

Tabela 3: Oito regras para deteção de causas especiais (Adaptado de International Organization for Standardization, 2013)

Regra	Descrição
1	Um ou mais pontos fora dos limites de controlo (para lá da zona A)
2	Nove pontos consecutivos no mesmo lado da linha central
3	Seis pontos consecutivos no sentido ascendente ou descendente
4	Catorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente
5	Dois de três pontos consecutivos na zona A, do mesmo lado da linha central
6	Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A do mesmo lado da linha central
7	Quinze pontos consecutivos na zona C acima ou abaixo da linha central
8	Oito pontos consecutivos de ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C

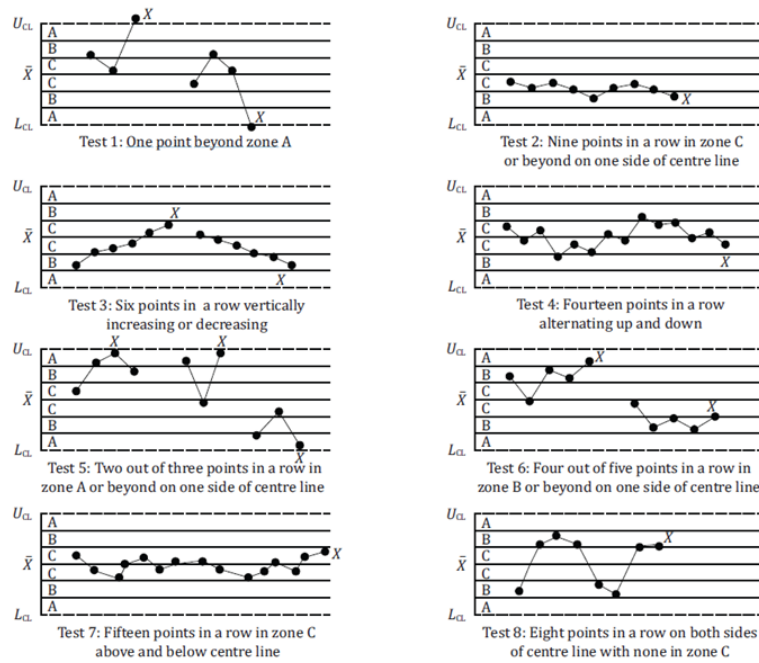


Figura 5: Oito regras para detecção de causas especiais (Retirado de International Organization for Standardization, 2013)

2.3.3 Capacidade Máquina e Processo

As técnicas estatísticas podem ser úteis ao longo do ciclo do produto, incluindo as atividades de desenvolvimento antes do fabrico, na quantificação da variabilidade do processo, na análise dessa variabilidade relativamente aos requisitos ou especificações do produto e na assistência ao desenvolvimento e fabrico na eliminação ou redução significativa dessa variabilidade. Esta atividade é designada de análise da capacidade de processo (Montgomery, 2009).

Os projetos de produção fornecem não somente as medidas que o produto ou a peça devem ter, mas também o intervalo em que essas medidas podem variar. Esses valores são as especificações do projeto (Vieira, 2012). Sendo definidos com um valor nominal, um limite superior de especificação (LSE) e um limite inferior de especificação (LIE). A diferença entre o limite superior de especificação e o limite inferior de especificação é a tolerância do projeto e não existe qualquer relação matemática ou estatística entre limite de controlo e limite de especificação (Vieira, 2012).

Os dois índices de capacidade que normalmente são utilizados são:

- C_p
- C_{pk}

A introdução do C_p foi efetuada por Juran. O índice C_p , que é o primeiro índice de precisão, é definido como o rácio da amplitude da especificação ($LSE - LIE$) sobre a amplitude do processo (6σ). A amplitude da especificação representa as expectativas do cliente e/ou do produto (Avakh Darestani & Nasiri, 2016).

Existe uma relação inversa entre a variação do processo e a tolerância do projeto. Isto significa que se a variação do processo for muito grande, o valor é pequeno e representa uma capacidade de processo baixa. O índice C_p mostra até que ponto o processo se enquadra nos limites de especificação, como demonstra a tabela 4.

Tabela 4: Relação entre C_p e a condição da qualidade (Adaptado Kaya & Kahraman, 2011)

Condição da Qualidade	Valores de C_p
Super excelente	$2,00 \leq C_p$
Excelente	$1,67 \leq C_p < 2,00$
Satisfatório	$1,33 \leq C_p < 1,67$
Capaz	$1,00 \leq C_p < 1,33$
Inadequado	$0,67 \leq C_p < 1,00$
Pobre	$C_p < 0,67$

Para determinar a capacidade do processo, é necessário que o processo esteja sob controlo estatístico, ou seja, sujeito apenas às variações aleatórias (causas comuns) (Nikkel, 2007). Estando cumprida esta condição, podemos então calcular a capacidade do processo através da seguinte expressão:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (1)$$

O indicador C_p considera o comportamento da dispersão dos valores medidos em relação à tolerância. Como foi definido, a capacidade do processo pressupõe que tanto o LSE como o LIE do processo estejam estabelecidos.

Em alguns processos, porém, a especificação é unilateral, isto é, existe apenas um dos limites. Nesses casos, a capacidade do processo é então assim definida:

$$C_{pu} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (2)$$

$$C_{pl} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad (3)$$

A capacidade do processo não leva em consideração a localização do valor nominal porque é a razão entre a diferença das especificações e a dispersão do processo, medida em desvio padrão (Vieira, 2012), ou seja, como relata Avakh Darestani & Nasiri (2016), não dá qualquer aviso sobre o desempenho real do processo.

Foi então definida uma nova razão de capacidade do processo, que para além da dispersão dos valores, leva em conta o centro do processo, como afirma Avakh Darestani & Nasiri (2016). O índice é utilizado para alertar para a variabilidade associada a um processo e ilustra a forma como um processo atua dentro das especificações.

$$C_{pk} = \min(C_{pu}; C_{pl}) \quad (4)$$

Os índices C_p e C_{pk} , demonstrados na figura 6, são medidas de progresso adequadas para a melhoria da qualidade quando a redução da variabilidade é o fator orientador e o rendimento do processo é a principal medida de sucesso (Avakh Darestani & Nasiri, 2016).

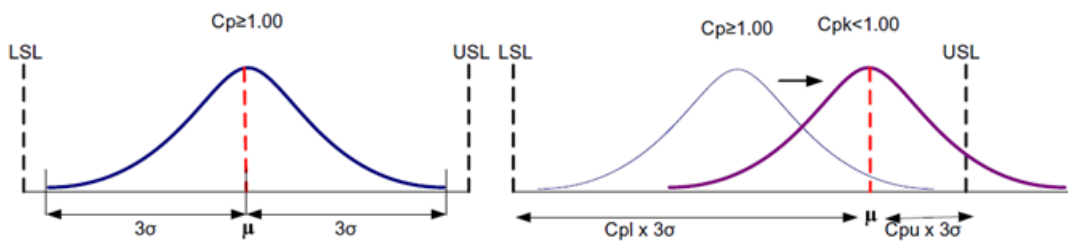


Figura 6: Os indicadores C_p e C_{pk} (Retirado de Kaya & Kahraman, 2011)

A capacidade (C_p) e a capacidade efetiva durante a produção (C_{pk}) são estimativas da capacidade do processo. Ambos mostram a capacidade de um processo para cumprir os seus limites de especificação, utilizados com dados contínuos. São ferramentas valiosas para avaliar a capacidade inicial e contínua de peças e processos (ASQ, 2024b).

De acordo com Ott et al. (2005), a relação entre estes dois indicadores pode ser visualizada na figura 7 e pode ser descrita da seguinte forma:

- C_{pk} pode ser igual, mas nunca maior que C_p ;
- C_p e C_{pk} são iguais apenas quando o processo está centrado no objetivo;
- Se C_p for maior do que C_{pk} , então o processo não está centrado no objetivo;
- Se C_p e C_{pk} forem ambos > 1 , o processo é capaz e está a funcionar dentro das especificações;
- Se C_p e C_{pk} forem ambos < 1 , o processo não é capaz e não está a funcionar dentro das especificações;
- Se C_p for > 1 e C_{pk} for < 1 , o processo é capaz, mas não está centrado e não está a funcionar dentro das especificações.

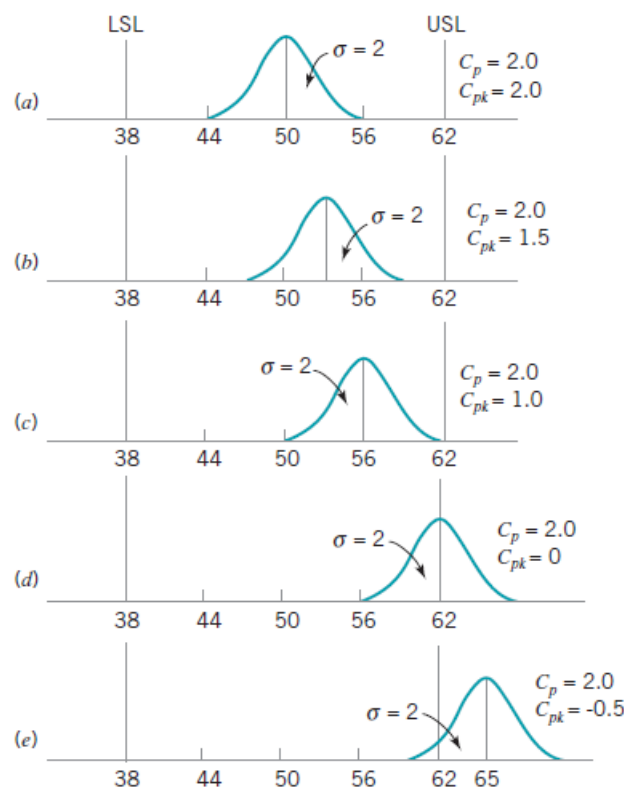


Figura 7: Relação entre C_p e C_{pk} (Retirado de Montgomery, 2009)

2.3.4 Amostragem

A amostragem é a seleção de um conjunto de elementos de uma população-alvo ou de um lote de produtos. A amostragem é frequentemente utilizada porque a recolha de dados sobre todos os elementos de uma população-alvo ou sobre todos os produtos produzidos por uma empresa é muitas vezes impossível, impraticável ou demasiado dispendiosa. A amostragem permite tirar conclusões ou fazer inferências sobre a população ou o lote de produtos de onde a amostra é retirada (ASQ, 2024c).

Ao escolher a dimensão da amostra, devemos ter em conta a dimensão da variação que estamos a tentar detetar. Se a deslocação do processo for relativamente grande, então utilizamos amostras mais pequenas do que as que seriam utilizadas se a deslocação de interesse fosse relativamente pequena (Montgomery, 2009).

A situação mais desejável do ponto de vista da deteção de desvios seria a recolha frequente de grandes amostras, no entanto, tal não é geralmente viável do ponto de vista económico (Montgomery, 2009).

Foi efetuado um trabalho considerável sobre métodos que permitem variar a dimensão das amostras e os intervalos de amostragem com base nas informações obtidas do processo. Por exemplo, se parecer que um processo está a afastar-se do objetivo, a amostra seguinte é recolhida mais cedo ou a dimensão da amostra seguinte é aumentada. A possibilidade de variar a dimensão da amostra e/ou os intervalos de amostragem permite uma deteção mais rápida das alterações do processo, embora aumente a complexidade administrativa do sistema de monitorização (Woodall & Montgomery, 1999).

Outra forma de avaliar as decisões relativas à dimensão da amostra e à frequência de amostragem é através do comprimento médio de execução (**ARL**) da carta de controlo. Essencialmente, o **ARL** é o número médio de pontos que devem ser traçados antes de um ponto indicar uma condição fora de controlo (Montgomery, 2009).

$$ARL = \frac{1}{p} \tag{5}$$

Onde **p** é a probabilidade de um ponto exceder os limites de controlo. A equação (5) pode ser utilizada para avaliar o desempenho da carta de controlo.

2.4 Soldadura

A soldadura é essencial em diversas áreas da indústria, sendo um termo que se refere ao processo e ao resultado de soldar, estabelecer uma união sólida entre duas coisas com um material que é semelhante ou o mesmo que o delas. Num sentido mais amplo, soldar consiste em emendar ou reparar algo (Equipa editorial de Conceito, 2014).

2.4.1 História da Soldadura

À medida que os métodos de união de materiais foram melhorando ao longo dos tempos, o mesmo aconteceu com o ambiente e o modo de vida dos seres humanos. Os materiais, ferramentas e maquinaria foram melhorando à medida que a civilização se desenvolvia. A união das partes dos instrumentos de trabalho começou quando alguém ligou um pau a uma pedra para fazer uma lança ou um machado. Os egípcios utilizavam ferramentas de pedra para criar templos e pirâmides que eram fixados com um adesivo de argamassa de gesso. Outros tipos de adesivos eram utilizados para unir madeira e pedra nos tempos antigos. No entanto, demorou muito tempo até que os antigos descobrissem um método para unir metais (Jeffus, 2016).

Os primeiros métodos de união de metais incluíam processos como a formação de um molde de areia em cima de uma peça de metal e a fundição da forma desejada diretamente no metal de base, de modo que ambas as partes se fundissem, figura 8 (Jeffus, 2016).

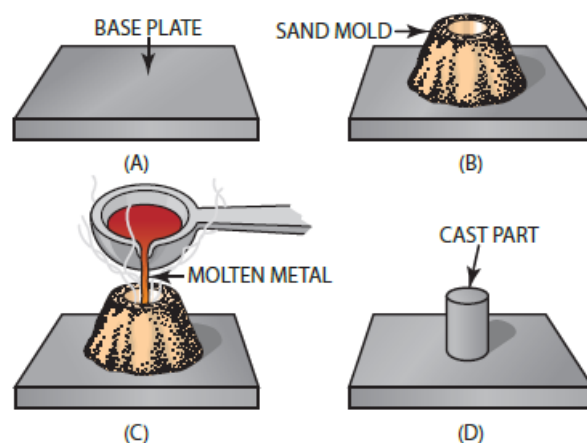


Figura 8: Fundição direta: (A) placa de base para ter a peça fundida nela, (B) areia moldada na forma desejada, (C) derramamento de metal quente no molde, e (D) a peça fundida é agora parte da placa de base (Retirado de Jeffus (2016)).

Outro método de união de metais utilizado nos primeiros anos consistia em colocar duas peças de metal próximas uma da outra e deitar metal fundido entre elas. Quando as arestas do metal de base derretido, o fluxo de metal era então represado e deixado a endurecer (figura 9).

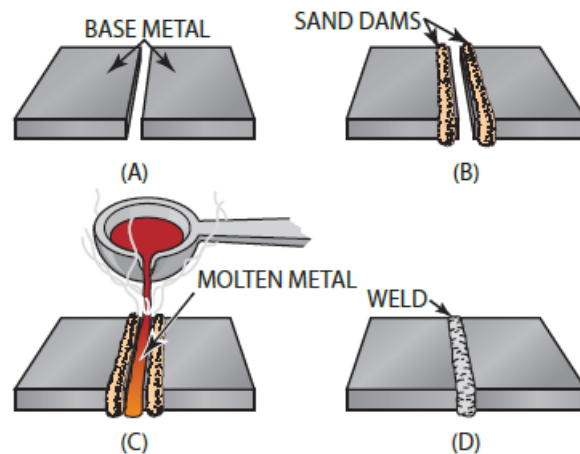


Figura 9: Soldadura de fluxo: (A) duas peças de chapa metálica, (B) barragens de areia para manter o metal fundido no lugar, (C) metal fundido vertido entre as chapas metálicas, e (D) chapa soldada acabada (Retirado de Jeffus (2016)).

A Revolução Industrial, de 1750 a 1850, introduziu um método de união de peças de ferro conhecido como soldadura por forja ou soldadura por martelo. Este processo envolvia a utilização de uma forja para aquecer o metal a uma temperatura macia e plástica (Jeffus, 2016).

As extremidades do ferro eram então colocadas juntas e marteladas até que a fusão ocorresse. A soldadura por forja continuou a ser o principal método de soldadura até que Elihu Thomson, no ano de 1886, desenvolveu a técnica de soldadura por resistência. Esta técnica proporcionou uma forma mais fiável e rápida de unir metais do que os métodos anteriores (Jeffus, 2016).

Desde o final da Primeira Guerra Mundial, foram desenvolvidos muitos métodos de soldadura para unir metais. Estes vários métodos de soldadura desempenham um papel importante na expansão e produção da indústria de soldadura. A soldadura tornou-se um método fiável, eficiente e económico para unir metais (Jeffus, 2016).

2.4.2 Tipos de Soldadura

Soldadura por Arco Elétrico: Usa um arco elétrico para derreter as extremidades das peças metálicas. Usa-se um elétrodo, revestido ou não, para obter corrente elétrica para a criação do arco. Esse processo

de soldagem é aplicado em aço, ferro, cobre, alumínio e ligas metálicas (Equipa editorial de Conceito, 2014).

Sendo que os processos mais conhecidos são:

- **MIG (Metal Inert Gas):** também chamada de soldadura a arco com proteção gasosa. A soldadura MIG usa um arco elétrico com o objetivo de fundir as peças metálicas, sendo que um gás inerte, como o argônio, é proporcionado para resguardar a poça de fusão de reações não desejadas com o ar. Esse processo é muito usado na indústria e é ideal para soldar aço, alumínio e também ligas metálicas (Equipa editorial de Conceito, 2014);
- **TIG (Tungsten Inert Gas):** já esta soldadura é similar à soldadura MIG, mas usa um eletrodo de tungstênio não consumível a fim de criar o arco elétrico. Esse método é recomendado para soldar materiais mais finos e delicados, a exemplo do alumínio e do aço inoxidável (Equipa editorial de Conceito, 2014);
- **SMAW (Shielded Metal Arc Welding):** utiliza um eletrodo consumível que conduz a corrente de soldadura do suporte do eletrodo para o trabalho e, à medida que o arco derrete a extremidade do eletrodo, este torna-se parte do metal de solda (Jeffus, 2016).
- **Soldadura a Laser:** Consiste na fundição da área de contacto dos materiais através do calor obtido pela aplicação de um feixe de luz concentrado de alta energia e densidade (Intermetal, 2023).
- **Soldadura por Fricção (FSW):** é um processo de soldadura específico que gera calor através da fricção mecânica entre uma peça de trabalho em movimento e um componente fixo.
- **Soldadura por Resistência:** Trata-se da aplicação de corrente elétrica através de eletrodos, que por sua vez exercem pressão sobre o material a ser fundido. O processo recebe o nome de soldagem por resistência porque o calor gerado é consequência do aquecimento provocado pelas resistências envolvidas. A aplicação soldadura por resistência engloba a soldadura por pontos e a soldadura por roletes (AirLiquide, n.d.).

2.4.2.1 Soldadura MIG

A soldagem MIG é um processo com um alto grau de eficiência, uma vez que o arame de eletrodo é transportado continuamente e também funciona como condutor de corrente elétrica. Com a corrente a passar pelo arame, o arco elétrico inicia-se e provisiona energia para fundir o arame e as superfícies das peças que se pretendem unir. O processo de soldagem MIG também utiliza gás inerte, como argônio ou

mistura de argônio-dióxido de carbono para proteger o arco da poça e as superfícies das peças que se pretendem soldar da contaminação de oxigênio e humidade no ar. Dessa maneira, essa técnica produz soldas mais limpas e homogêneas. Além de permitir deposição relativamente alta, o que torna tais técnicas apropriadas para trabalho em velocidade e cadência. Contudo, uma desvantagem significativa é que não são ideais para metais não ferrosos e têm menos solda de qualidade quando usadas em trabalhos externos devido ao comprometimento do gás de proteção e da poça de solda devido à exposição ao vento e à humidade.

2.4.2.2 Aplicações e Desafios

No geral, a soldadura é aplicada em várias áreas. No entanto, a soldadura MIG é usada em vários processos e indústrias. Por exemplo, na indústria automóvel, a soldadura MIG é usada na fabricação de chassis, carrocerias e sistemas de exaustão. Da mesma forma, na construção civil, é utilizada em várias montagens de juntas de estruturas metálicas, tubulações e reforços. Outras indústrias, como a naval e a de fabrico de equipamento pesado, favorecem a soldadura MIG porque possibilita a fabricação de componentes que são fortes e duradouros. Embora traga vários benefícios, a soldadura MIG é afetada por vários desafios, como a distorção térmica e defeitos nas regiões soldadas. No entanto, o uso de soldadura a laser e soldadura híbrida promoveu melhorias. A investigação atual baseia-se na forma de otimizar os parâmetros do processo de soldadura com base na natureza dos diferentes materiais e no desenvolvimento de automação avançada, que promete aumentar ainda mais a produtividade e eficiência do processo.

3 DEFINIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO CEP NAS CONDIÇÕES INICIAIS

Neste capítulo da dissertação é realizada uma breve descrição e avaliação do processo em estudo no seu estado inicial. É aplicado o CEP e é descrito o procedimento seguido para o aplicar. Nesta primeira fase, o objetivo ao utilizar esta ferramenta da qualidade não é monitorizar, nem controlar o processo, mas como já tinha sido referido, o propósito é realizar uma análise ao processo de forma a avaliar a sua capacidade, para que se possa sugerir melhorias no processo.

3.1 Caracterização do problema e suas causas

No que diz respeito à aplicação do CEP no processo de soldadura através de um robot, não tinha sido implementada nenhuma ferramenta. À priori, foi feita uma breve análise ao processo, recolhendo informação através do responsável da qualidade e dos operadores encarregues pelo processo, sendo já expectável que o processo apresentasse falta de capacidade e bastantes oportunidades de melhoria (Figura 10). A análise revelou que havia um número considerável de produtos não conformes, soldaduras que ficavam mal ou parcialmente soldadas por causa do excesso de penetração da solda, pelo que exigia que houvesse um retrabalho para que estes pudessem prosseguir para as fases seguintes.

As ocorrências detetadas estavam diretamente relacionadas com a performance do robot de soldadura, que apresentava dificuldades específicas no contexto em que estava a operar. Tendo este já apresentado sinais de desgaste, com registos anteriores de falhas e avarias, já era usual a constante monitorização dos parâmetros de funcionamento do robot, velocidade de execução, intensidade da corrente e voltagem, de forma a tentar que houvesse maior consistência na soldadura.

Com estes fatores em mente, a implementação do CEP foi considerado crucial para identificar e corrigir as variações no processo, de forma a garantir um controlo mais rigoroso e uma redução substancial de produtos não conformes.



Figura 10: Mesa de trabalho, robot de soldadura

O processo analisado consiste na soldadura MIG, bastante utilizado em processos industriais quando se pretende soldaduras homogêneas. Neste processo são soldados dois tipos de peças metálicas, A e B a uma trave, que tem acabamentos respetivos à peça que se ira soldar (Figura 11), especificamente, para completar cada trave, são soldadas quatro peças metálicas, duas A e duas B a cada trave.



Figura 11: Componentes metálicos e acabamentos da trave

Durante a execução do processo, o robot de soldadura une duas peças em cada uma das oito traves iniciais. Ao fim de uma execução do robot, apenas quatro traves estão completas, com peças soldadas em ambos os lados, demonstrado na Figura 12 o resultado da soldadura em ambas as peças, enquanto as outras quatro têm apenas duas peças soldadas em um dos lados, sendo estas últimas transferidas

para a posição das traves completas, onde o robot solda as restantes peças. Esse ciclo assegura a produção de traves completas e semi-completas de forma sequencial.



Figura 12: Resultado da soldadura em A e B

O programa de soldadura, que define os parâmetros de funcionamento é previamente configurado, podendo ser ajustado no início de cada ciclo de produção, assim como a configuração dos movimentos do robot, onde se estabelece os pontos iniciais e finais de soldadura. No entanto, o processo requer intervenção humana, principalmente na monitorização e na transferência manual das traves, quer na acomodação das traves e dos componentes metálicos para serem soldados, quer para a passagem da trave completa para a fase seguinte.

Embora não existam registos detalhados de defeitos no processo, a perceção dos operadores e do responsável da qualidade é de que os principais problemas estão relacionados com a falta de uniformidade na soldadura, resultando em soldas incompletas ou mal posicionadas. Estes defeitos têm impacto direto na empresa, pois geram a necessidade de retrabalho, atrasando o processo produtivo e aumentando os custos operacionais.

De forma a ter um melhor conhecimento acerca do processo, foi realizada uma recolha de informação junto de todos os intervenientes do processo de fabricação de traves e foi utilizada a ferramenta da qualidade, diagrama de causa-efeito ou diagrama de Ishikawa. Esta ferramenta é muito eficaz não só para recolher informações de várias fontes sobre as causas dos problemas, mas também para compreender o processo envolvido (Figura 13).

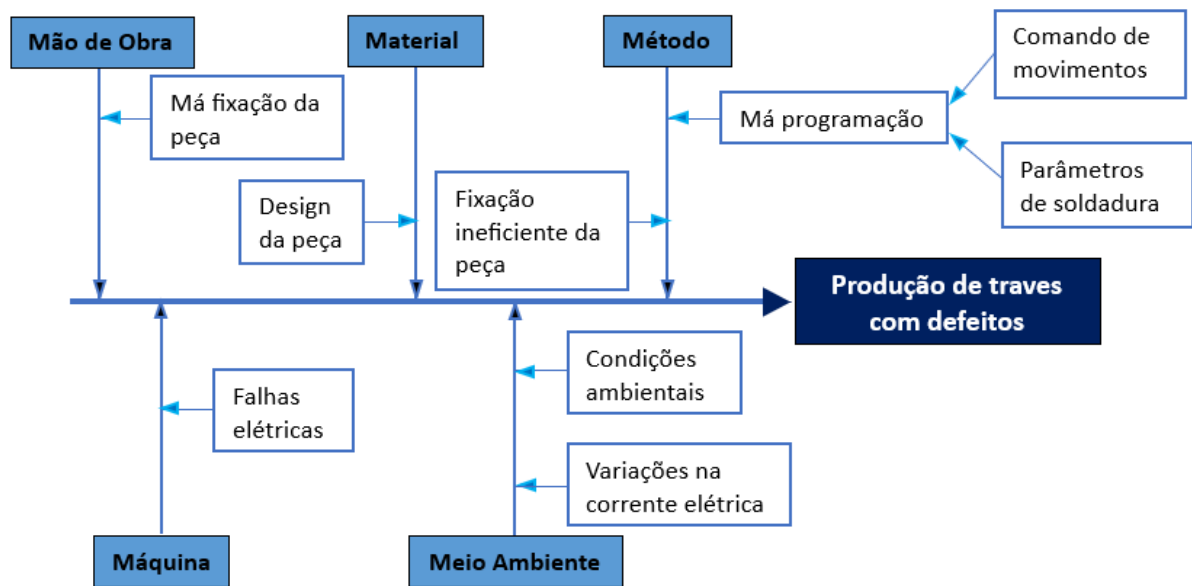


Figura 13: Diagrama de causa-efeito, processo de soldadura

Mão de Obra:

- **Má fixação da peça** - A falta de formação do operador ou a falta de atenção na altura de colocar as peças na máquina, pode fazer com que as peças não estejam colocadas na posição correta antes de serem soldadas.

Material:

- **Design da peça** - O tamanho excessivo dos orifícios onde a solda penetra de forma a juntar as duas peças metálicas faz com que exista muita variabilidade. Pois a maior parte das vezes a soldadura não agarra nas duas peças e "cai dentro do buraco".

Método:

- **Fixação ineficiente da peça** - A forma como as peças são fixas na mesa de trabalho são suscetíveis de erros. É utilizado um sistema que fixa as duas peças utilizando uma mola que pode perder força devido ao uso recorrente ou então soltar-se durante o processo de soldadura, desalinhando as peças.
- **Má programação** - Ao programar o comando de movimentos do robot, é quase impossível que todas as soldaduras tenham o mesmo comprimento. Pois em cada execução do processo são produzidas 8 traves, sendo o comando de movimentos de cada soldadura programado individualmente, o que não garante que o ponto de início e de fim de soldadura seja o mesmo, podendo ser no máximo aproximado. Quanto aos parâmetros de funcionamento do robot, têm

influência na largura da soldadura, podendo ser alterados de forma a obter um valor nominal que melhor se adequa.

Máquina:

- **Falhas elétricas** - Por ser uma máquina já com bastantes anos e ter historial de falhas, nomeadamente falhas de corrente elétrica, faz com que o processo tenha muita variabilidade. Por isso é necessário que o plano de manutenção preventiva seja realizado com maior detalhe e recorrentemente.

Meio Ambiente:

- Segundo o operador responsável pelo processo, os fatores externos têm bastante influência na variabilidade. Sendo que às vezes durante o decorrer do dia ter de alterar os parâmetros de funcionamento pois os que, por exemplo, de manhã estavam a ser utilizados, de tarde não apresentam os mesmos resultados.
- Pela empresa se localizar numa zona industrial, a corrente elétrica pode sofrer alterações. Por exemplo, se for necessário trabalhar num sábado, como as empresas à volta não estão em funcionamento a corrente elétrica é mais forte, tendo de ser alterados os parâmetros de funcionamento.

3.2 Aplicação do CEP

Como tem sido abordado ao longo deste projeto, as empresas que pretendem destacar-se das demais têm de implementar programas de qualidade e de melhoria continua visando a interação de todos os presentes nas organizações, desde operadores até à gestão de topo, com o intuito de fornecer um esforço continuo para a elevação dos padrões das empresas. Tendo como foco melhorar os produtos, os processos e os serviços, a aplicação do CEP de forma eficiente permite atingir esses objetivos.

Para o desenvolvimento inicial deste projeto, é aplicado o CEP para avaliar a capacidade do processo nas condições iniciais de funcionamento, para que posteriormente se possa proceder a melhorias para atingir melhores resultados.

O processo em estudo é a soldadura de quatro peças metálicas, iguais duas a duas, com um tubo metálico com dois tipos de acabamento, um para cada tipo de peça a ser soldada.

Foram então designados os pontos, que são considerados características críticas para o produto final (Figura 14).



Figura 14: Pontos críticos de A e B

Para iniciar os primeiros estudos de monitorização do processo e verificar a aplicabilidade do projeto piloto foram selecionadas as peças A e B, sendo que cada trave é composta por duas peças de cada. No processo produtivo, a cada quinze minutos são produzidas quatro traves completas, o que totaliza dezasseis peças metálicas, sendo que oito são do tipo A e oito do tipo B.

Antes de se proceder à implementação da metodologia e por consequência, à recolha de dados, foi imperativo definir o conceito de subgrupo e o método de medição a ser utilizado. A escolha do tamanho da amostra foi baseada na necessidade de obter um equilíbrio entre precisão e viabilidade. Uma inspeção a 100% do processo não seria adequada devido aos recursos limitados, para além de comprometer a continuidade da produção, uma vez que antes de recolher os dados, por questões de segurança, é necessário que haja um período de arrefecimento da soldadura. Por essa razão e para manter o ritmo de produção, foi definido que o tamanho da amostra seria de 4 unidades para cada ponto crítico, perfazendo assim cerca de 50% do total de pontos críticos disponíveis.

Quanto ao método de medição, devido à grande variabilidade dos dados foi utilizado a fita métrica, pois não havia necessidade nesta primeira fase de retirar valores mais precisos, sendo o objetivo avaliar

tendências e padrões. Foram efetuados estudos de CEP e, conseqüentemente, uma análise do processo nas condições atuais.

Peça A

Para a realização do estudo de CEP na peça A foram considerados três pontos críticos (A_1 , A_2 , A_3), para analisar tanto a largura como o comprimento da soldadura, ou seja, foram analisadas seis características críticas ($A_{1;compr}$, $A_{1;larg}$, $A_{2;compr}$, $A_{2;larg}$, $A_{3;compr}$, $A_{3;larg}$). Foi definido que se iria implementar as técnicas do CEP com amostras cuja dimensão do subgrupo seria de 4 unidades.

Como o processo de soldadura é contínuo e sequencial, a cada quinze minutos saem quatro traves completas, sendo que as medições foram feitas de forma consecutiva ao longo de um dia de trabalho, para que se pudesse assegurar que as amostras fossem representativas do processo e de forma a tentar impedir que haja influência de causas assinaláveis. Sendo assim, para cada ponto crítico foi possível obter um total de 26 amostras, perfazendo um total de 104 unidades (valores obtidos no Anexo 2). O tamanho da amostra foi considerado válido, dado que se conseguiu perfazer mais de 100 medições, valor mínimo recomendado para definir limites das cartas de controlo.

Para detetar a existência de eventuais causas especiais no processo e verificar se este se encontra sob controlo estatístico, procedeu-se à elaboração das cartas de controlo $\bar{X}$ e R para cada característica dos pontos críticos selecionados, através do software Minitab.

○ A_1

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $A_{1;compr}$, (Figura 15) concluiu-se que o processo não está sob controlo. Foram detetadas causas especiais em ambos os gráficos. É de realçar a existência de pontos fora dos limites de controlo, no gráfico $\bar{X}$, os pontos 2, 11, 16, 20 e no gráfico R , o ponto 5. Verifica-se também a existência de várias regras que indicam a presença de causas especiais, no gráfico $\bar{X}$, a regra 4, sendo esta um conjunto consecutivo de valores que vão crescendo e decrescendo.

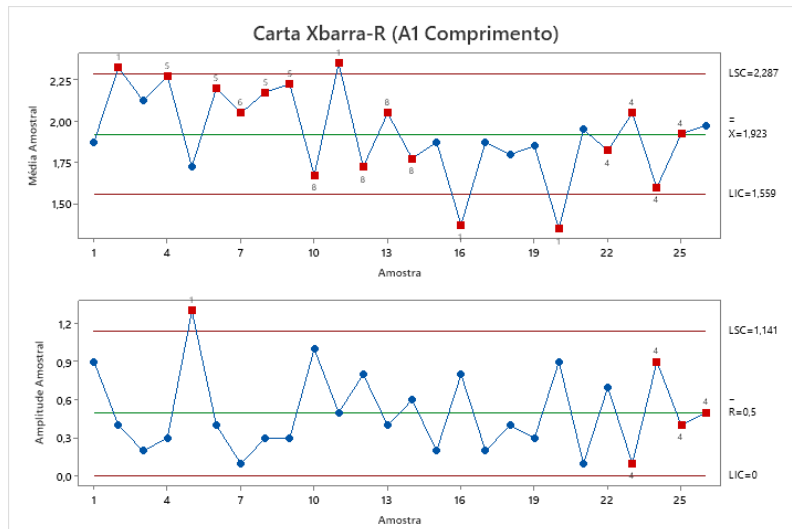


Figura 15: Ponto $A_{1;compr}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $A_{1;larg}$, (Figura 16) o processo não está sob controle. Apenas foram detetadas causas especiais no gráfico $\bar{X}$ que apresenta pontos fora dos limites de controle, ponto 2 e 14 e apresenta também um conjunto consecutivo de valores que vão crescendo e decrescendo alternadamente, entre os pontos 10 e 26, sendo uma das regras que indica a presença de causas especiais no processo, regra 4.

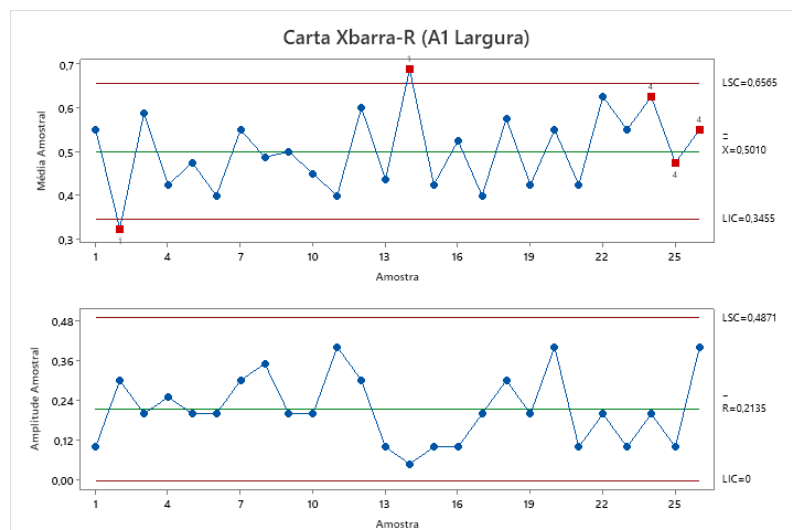


Figura 16: Ponto $A_{1;larg}$ - Carta $\bar{X}$ e R

○ A_2

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $A_{2;compr}$, (Figura 17) o processo não está sob controle. Apenas foram detetadas causas especiais no gráfico $\bar{X}$, de realçar a existência de pontos fora dos limites de controlo, ponto 8 e 22, e a presença da regra 8, 8 pontos consecutivos com mais de 1 desvio padrão da linha central, do ponto 12 ao ponto 19.

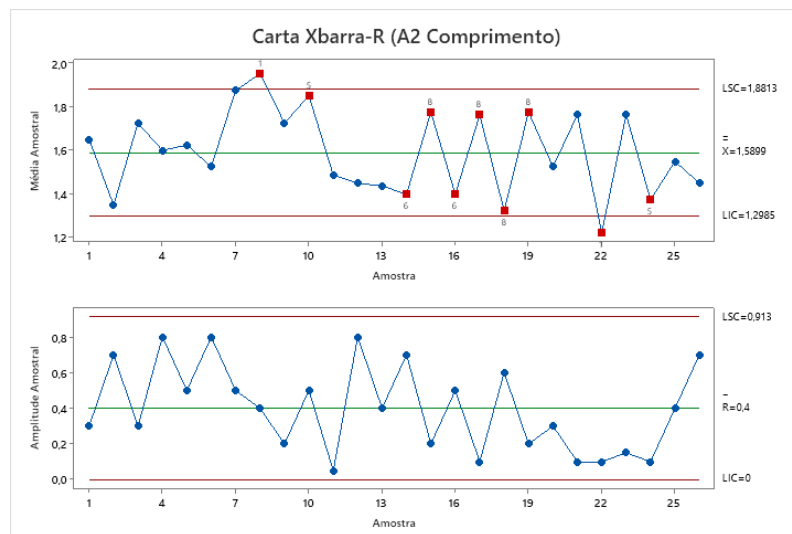


Figura 17: Ponto $A_{2;compr}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $A_{2;larg}$, (Figura 18) o processo não está sob controle. Apenas foram detetadas causas especiais no gráfico $\bar{X}$, no qual apresenta bastantes pontos fora dos limites de controlo, ponto 4, 10, 16 e 24 e a presença da regra 6, 4 de 5 pontos seguidos com mais de 1 desvio padrão da linha central, entre os pontos 7 e 11.

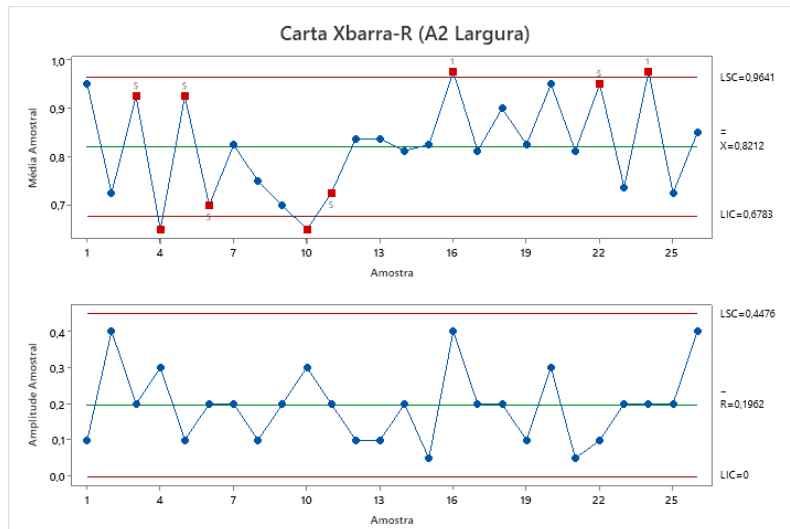


Figura 18: Ponto $A_{2;larg}$ - Carta $\bar{X}$ e R

○ A_3

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $A_{3;compr}$, (Figura 19) o processo não está sob controle. Foram detetadas causas especiais em ambos os gráficos, apresentando pontos fora dos limites de controle, no gráfico $\bar{X}$, os pontos 7, 8, 17, e 19 e no gráfico R, os pontos 2 e 4. De destacar também no gráfico do $\bar{X}$ a presença de 8 pontos consecutivos com mais de 1 desvio padrão da linha central, sendo um a regra 8, que indica a presença de causas especiais.

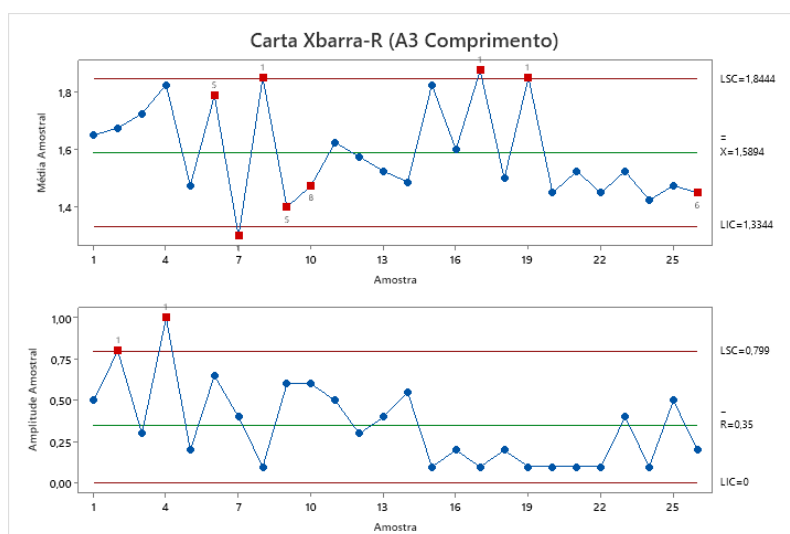


Figura 19: Ponto $A_{3;compr}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $A_{3;larg}$, (Figura 20) o processo não está sob controle. Foram detetadas causas especiais em ambos os gráficos. De todas as inconformidades, é de realçar a existência de bastantes pontos fora dos limites de controlo, no gráfico $\bar{X}$, os pontos 1, 2, 4, 8, 11, 12, 13, 15, 17 e no gráfico R , o ponto 4. Apresenta também no gráfico $\bar{X}$ 9 pontos seguidos no mesmo lado da linha central, entre os pontos 6 e 14, sendo esta a regra 2.

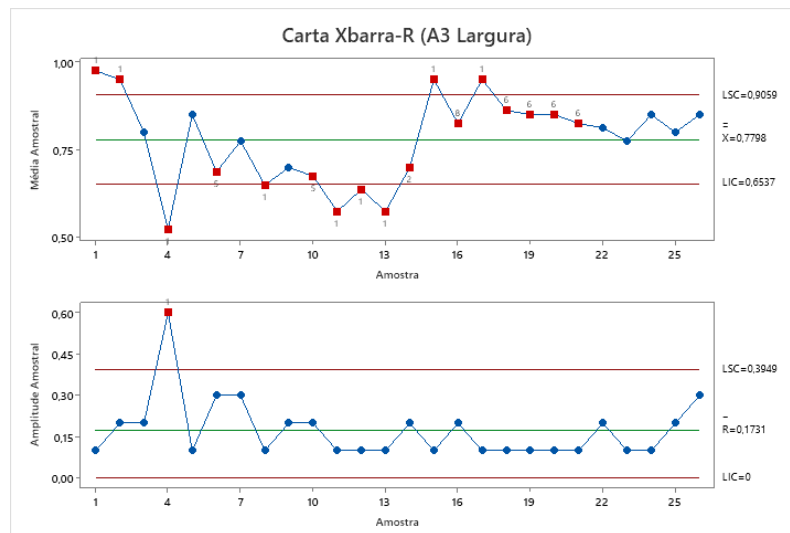


Figura 20: Ponto $A_{3;larg}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Uma vez que após a análise das características tidas como críticas para o produto, chegou-se à conclusão que o processo não se encontra sob controlo estatístico relativamente às características analisadas, pelo que não se procedeu ao cálculo e elaboração do relatório de capacidade.

De ter em atenção que as causas especiais foram essencialmente detetadas pela existência de pontos fora dos limites de controlo.

Peça B

Para a realização do estudo de CEP, na peça B, para dois pontos críticos (B_1 , B_2), para a largura como para o comprimento da soldadura, ou seja, são analisadas quatro características críticas ($B_{1;compr}$, $B_{1;larg}$, $B_{2;compr}$, $B_{2;larg}$), assim como na peça A, foi definido que se iria implementar a metodologia com amostras cuja dimensão do subgrupo era de 4 unidades.

Sendo assim, para cada ponto crítico foi possível obter um total de 26 amostras, perfazendo um total de 104 unidades (valores obtidos no Anexo 2). O tamanho da amostra foi considerado valido, dado que se

conseguiu perfazer mais de 100 medições, valor mínimo recomendado para definir limites das cartas de controlo.

Para detetar a existência de eventuais causas especiais no processo e verificar se este se encontrava sob controlo estatístico, procedeu-se à elaboração das cartas de controlo $\bar{X}$ e R para cada ponto crítico, através do software Minitab.

○ B_1

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $B_{1;compr}$, (Figura 21) o processo não está sob controlo. Foram detetadas causas especiais em ambos os gráficos, no gráfico $\bar{X}$, apresenta mais de 14 pontos seguidos nos quais vão crescendo e decrescendo alternadamente, regra 4, entre os pontos 6 e 26. No gráfico R é evidenciado um ponto fora dos limites de controlo, ponto 1.

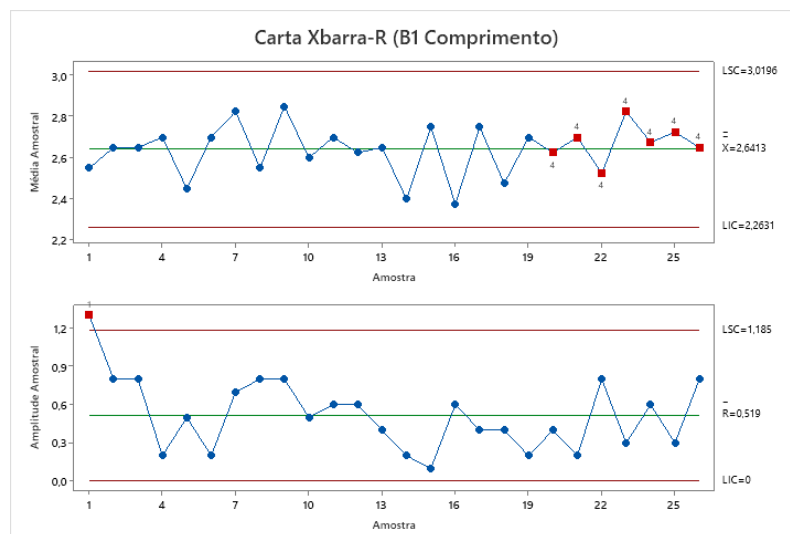


Figura 21: Ponto $B_{1;compr}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $B_{1;larg}$, (Figura 22) o processo não está sob controlo. Foram detetadas causas especiais em ambos os gráficos, de todas as inconformidades, é de realçar a existência de bastantes pontos fora dos limites de controlo, no gráfico $\bar{X}$, os pontos 1, 2, 11, 16, 17, 19 e 23, no gráfico R , o ponto 22. Apresenta também no gráfico $\bar{X}$ pelo menos 9 pontos no mesmo lado da linha central, regra 2, entre os pontos 3 e 12.

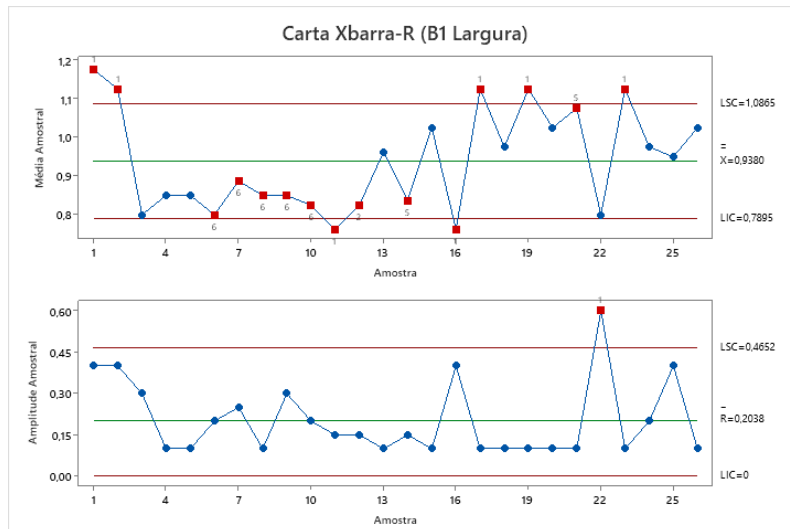


Figura 22: Ponto $B_{1,larg}$ - Carta $\bar{X}$ e R

○ B_2

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $B_{2;compr}$, (Figura 23) o processo não está sob controle. Foram detetadas causas especiais em ambos os gráficos, no gráfico $\bar{X}$, apresenta um conjunto elevado de valores seguidos nos quais vão crescendo e decrescendo alternadamente, regra 4, entre os pontos 12 e 26. No gráfico R é de notar que existe 9 pontos no mesmo lado da linha central, regra 2, entre os pontos 16 e 24.

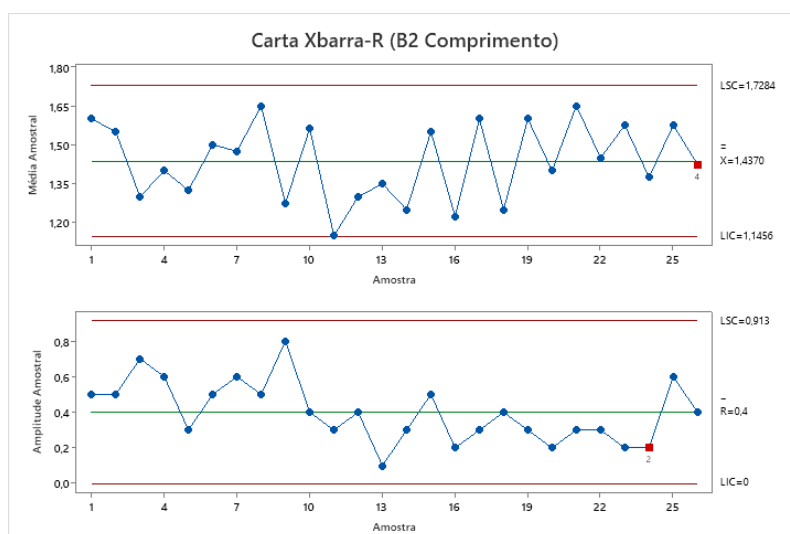


Figura 23: Ponto $B_{2;compr}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $B_{2;larg}$, (Figura 24), o processo não está sob controlo. Foram detetadas causas especiais em ambos os gráficos, a existência de pontos fora dos limites de controlo, no gráfico $\bar{X}$, os pontos 2, 5 e 6, no gráfico R , o ponto 1. Apresenta também no gráfico $\bar{X}$ pelo menos 9 pontos consecutivos no mesmo lado da linha central, regra 2, entre os pontos 3 e 13.

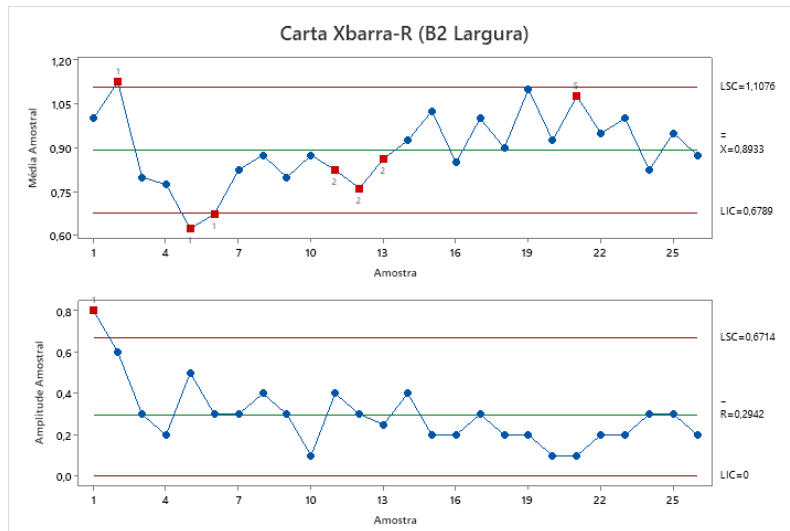


Figura 24: Ponto $B_{2;larg}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Tal como a peça A, após a análise das características tidas como críticas para o produto, chegou-se à conclusão de que o processo não se encontra sob controlo estatístico, evidenciando também bastantes pontos fora dos limites de controlo, pelo que não se procedeu ao cálculo e elaboração do relatório de capacidade.

4 MELHORIAS NO PROCESSO

Neste capítulo são descritas todas as alterações no processo com o intuito de melhorar e aprimorar o mesmo, de forma que entre num estado de controlo estatístico, o que não se verifica nas condições iniciais, como demonstrado no capítulo 4. Com estas melhorias no processo, o objetivo é diminuir a variabilidade do processo e torná-lo capaz.

As alterações mais significativas que foram efetuadas foi a alteração do design das traves.

4.1 Design da Trave

Um dos pontos mais claros acerca de melhorias possíveis no processo, foi a alteração do design da trave. Numa primeira análise ao processo foi possível averiguar que o design da trave não era o ideal, visto que poderia contribuir para a elevada variabilidade do mesmo, como foi posteriormente comprovado aquando da aplicação da metodologia CEP, no estudo de monitorização do processo, em que existem vários pontos fora dos limites de controlo que se poderão associar a este facto.

O problema que se destacava era o tamanho dos orifícios nos quais as peças metálicas iriam ser soldadas ao tubo metálico. Devido às elevadas dimensões dos orifícios, as soldaduras resultantes apresentavam elevada variabilidade quanto aos comprimentos, pois existia demasiada penetração da soldadura fazendo com que apenas a peça ficasse parcialmente soldada, como demonstrado na Figura 25.

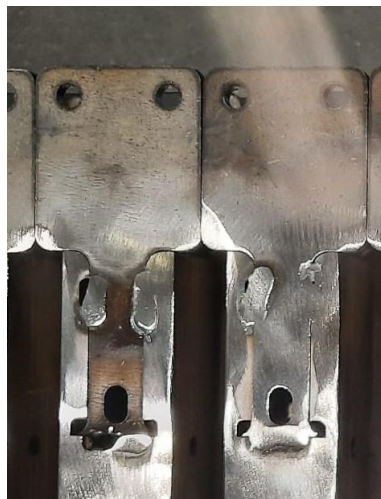


Figura 25: Exemplo das diferentes dimensões da soldadura

Foi então discutido com o departamento de produção e com o responsável da Qualidade, a proposta de alteração do design da trave, tendo sido alterada a estrutura da peça metálica e do acabamento a que esta é soldada, de forma a diminuir a variabilidade do processo.

Com esta melhoria de processo, em vez de ter duas peças metálicas (A e B) e dois tipos de acabamentos da trave respetivos a cada peça metálica a ser soldada, passou a ser obtida apenas uma peça metálica, designada como C, e apenas um tipo de acabamento, como demonstra a Figura 26. De realçar que a nova peça metálica, C, é bastante similar à antiga peça A. Sendo que a diferença entre ambas é na acomodação junto com o acabamento da trave, apresentando uns orifícios de menor dimensão de forma a tentar mitigar o problema detetado.



Figura 26: Peça metálica C

4.2 Diâmetro Do Arame Consumível

Uma das principais mudanças no processo foi a alteração do diâmetro do arame consumível, que passou de 0,8 mm para 1 mm. Esta alteração teve um impacto significativo na soldadura, afetando diretamente a taxa de deposição de material e o controlo térmico. Arames de menor diâmetro, como o de 0,8 mm, proporcionam uma maior taxa de deposição para o mesmo nível de corrente. Com o arame de 1 mm, a

taxa de deposição é menor, exigindo ajustes na corrente para compensar, o que pode aumentar o tempo de soldadura e visa mitigar o excesso de penetração da solda na peça.

4.3 Layout Mesa de Trabalho

Outra mudança importante foi no layout da mesa de trabalho. Devido à nova composição da peça, foi possível integrar ainda mais traves durante um ciclo do processo, aumentando assim a taxa de produção, que passou de 8 traves, para 12 traves a serem soldadas por ciclo, onde em cada execução do processo são soldadas 24 peças metálicas, duas peças em cada uma das 12 traves. No final do processo, apenas 6 traves estão completas, com peças soldadas em ambos os lados. As outras 6 traves têm apenas duas peças soldadas do mesmo lado da trave e são transferidas para a posição das traves que ficaram completas, para que as peças restantes possam ser soldadas.

4.4 Programação e Configuração do Robot

A troca do arame consumível tornou necessário ajustar os parâmetros de funcionamento do robot de soldadura. No entanto, devido à alta variabilidade do processo, provocada por problemas elétricos e falhas mecânicas recorrentes, não foi possível realizar um estudo detalhado para otimizar esses parâmetros de forma criteriosa. Assim, a definição dos parâmetros baseou-se na experiência acumulada até o momento, permanecendo sujeita a ajustes constantes conforme surgem novos desafios.

A programação dos movimentos do braço do robot também precisou ser adaptada. Com as alterações no design das peças e no layout da mesa de trabalho, a programação tornou-se mais complexa, já que o robot agora solda várias traves em diferentes posições, que precisam ser programadas individualmente. Como as soldaduras são curtas, garantir que o ponto de início e fim de cada solda seja exatamente o mesmo em cada ciclo é uma tarefa árdua, o que gera pequenas variações no processo e, consequentemente, na qualidade final.

5 MONITORIZAÇÃO DO PROCESSO COM AS MELHORIAS APLICADAS

Depois de aplicar as melhorias voltou-se a realizar o estudo de monitorização do processo e verificar se com as evoluções no processo se conseguiu obter um processo estável.

Para a realização do estudo de CEP, agora apenas para a peça C (Figura 27), para os três pontos críticos (C1, C2, C3), tanto para a largura como para o comprimento da soldadura, foram analisadas seis características críticas ($C_{1;compr}$, $C_{1;larg}$, $C_{2;compr}$, $C_{2;larg}$, $C_{3;compr}$, $C_{3;larg}$). Da mesma forma como na primeira aplicação do CEP, uma inspeção a 100% não seria prática devido aos mesmos motivos, falta de recursos e para não comprometer a continuidade da linha de produção. Foi então definido que se iria implementar a metodologia com amostras cuja dimensão do subgrupo seria de 6 unidades. Considerando que estão disponíveis 6 traves completas em cada execução do robot, cada trave contém 4 peças C, ou seja, 4 pontos para cada ponto critico definido, sendo escolhido de forma aleatória em cada uma das 6 traves 1 ponto critico para ser medido, dos 4 pontos críticos disponíveis, perfazendo assim uma amostra de 6 unidades para cada ponto critico.

Com a alteração do layout da mesa de trabalho, passaram a serem produzidas em cerca de 20 minutos 6 traves completas, sendo que as medições foram feitas de forma consecutiva ao longo de um dia de trabalho, de forma a conseguir retirar todas as medidas nas mesmas condições, sendo assim, para cada ponto critico foi possível obter um total de 17 amostras, perfazendo um total de 102 unidades (valores obtidos no Anexo 3). O tamanho da amostra foi considerado valido, dado que se conseguiu perfazer mais de 100 medições, valor mínimo recomendado para definir limites das cartas de controlo.

Para detetar a existência de eventuais causas especiais no processo e verificar se este se encontrava sob controlo estatístico, procedeu-se à elaboração das cartas de controlo $\bar{X}$ e R para cada ponto critico, através do software Minitab.

Quanto ao método de medição, ao contrário da anterior aplicação desta metodologia em que não era pretendido ter uma elevada exatidão dos dados, passou-se a usar um paquímetro para que os dados fossem o mais exatos possíveis.



Figura 27: Pontos críticos C

○ C_1

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $C_{1;compr}$, (Figura 28) o processo está sob controle, não foram detetadas causas especiais em nenhum dos gráficos. De destacar, comparando o desvio padrão global, que tem em conta não apenas a variação dentro do subgrupo, mas sim de todo o processo obtido, com a variável $A_{1;compr}$, visto que existe similaridade entre a peças A e C, com as melhorias aplicadas foi possível passar de 3,53411 para 2,78674.

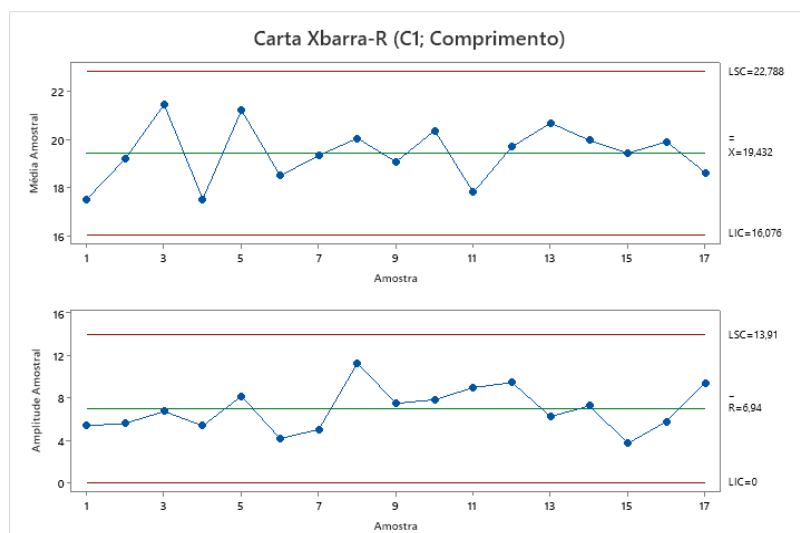


Figura 28: Ponto $C_{1;compr}$ – Carta $\bar{X}$ e R

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $C_{1;larg}$, (Figura 29) o processo não está sob controle. Sendo que apenas foram detetadas causas especiais no gráfico $\bar{X}$, apresenta 4 de 5 pontos com mais de um desvio padrão da linha central, do mesmo da linha central, regra 6, pontos entre os pontos 2 e 8.

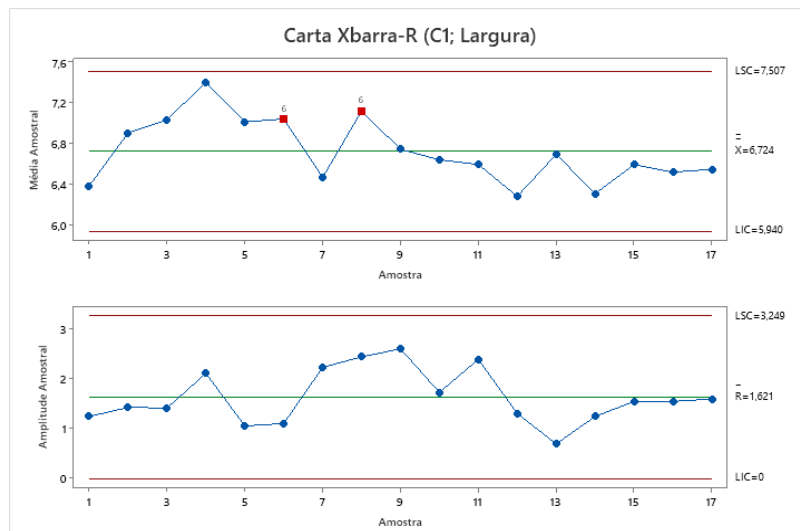


Figura 29: Ponto $C_{1;larg}$ - Carta $\bar{X}$ e R

○ C_2

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $C_{2;compr}$, (Figura 30) o processo está sob controle, não foram detetadas causas especiais em nenhum dos gráficos. Comparando o desvio padrão global obtido na variável $A_{2;compr}$, foi possível diminuir de 2,6017 para 1,40523.

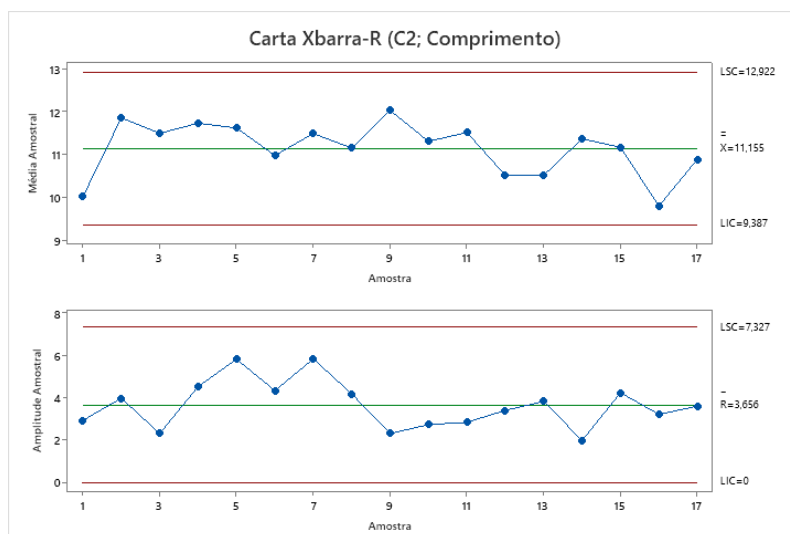


Figura 30: Ponto $C_{2;compr}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $C_{2;larg}$, (Figura 31) o processo está sob controle, não foram detetadas causas especiais em nenhum dos gráficos. Tendo sido possível diminuir ligeiramente o desvio padrão global, comparando com a variável $A_{2;larg}$, de 1,33782 para 0,752965.

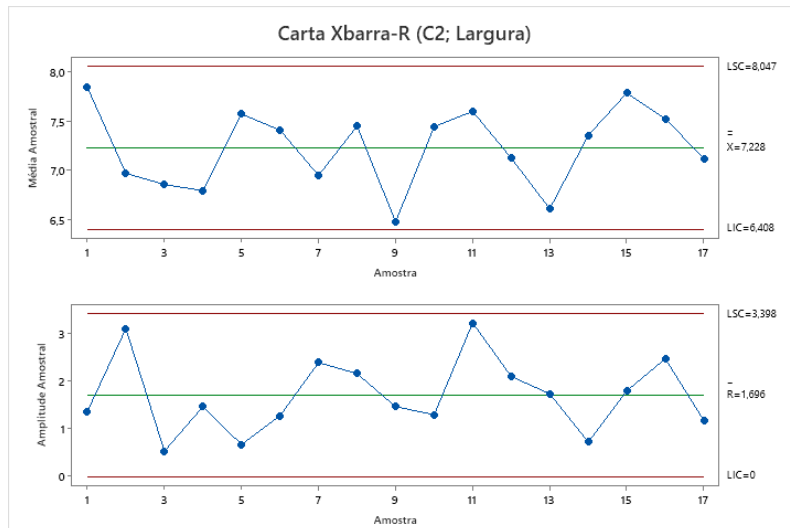


Figura 31: Ponto $C_{2;larg}$ - Carta $\bar{X}$ e R

○ C_3

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $C_{3;compr}$, (Figura 32) o processo está sob controle, não foram detetadas causas especiais em nenhum dos gráficos. Comparando o desvio padrão global obtido na variável $A_{3;compr}$, foi possível diminuir de 2,36445 para 1,14544.

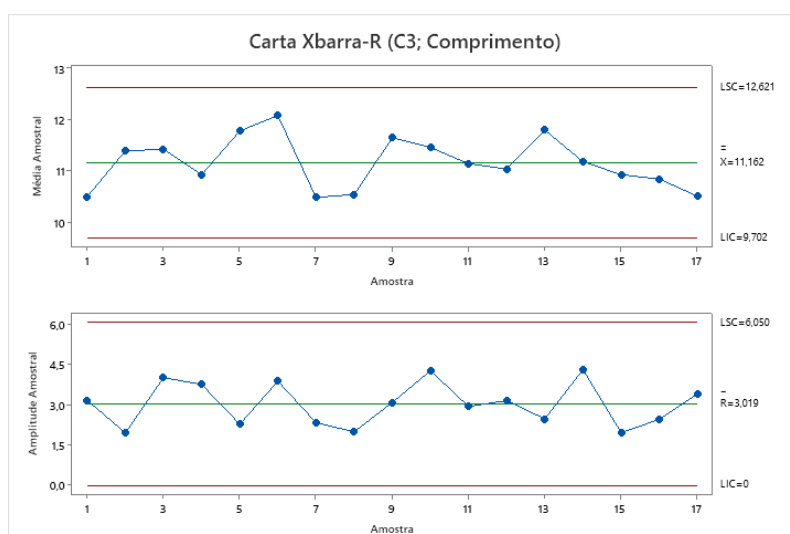


Figura 32: Ponto $C_{3;compr}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Pela análise dos gráficos $\bar{X}$ e R referentes à variável $C_{3;larg}$, (Figura 33) o processo está sob controle, não foram detetadas causas especiais em nenhum dos gráficos. Tendo sido possível diminuir o desvio padrão global, comparando com a variável $A_{3;larg}$, de 1,45735 para 0,63991.

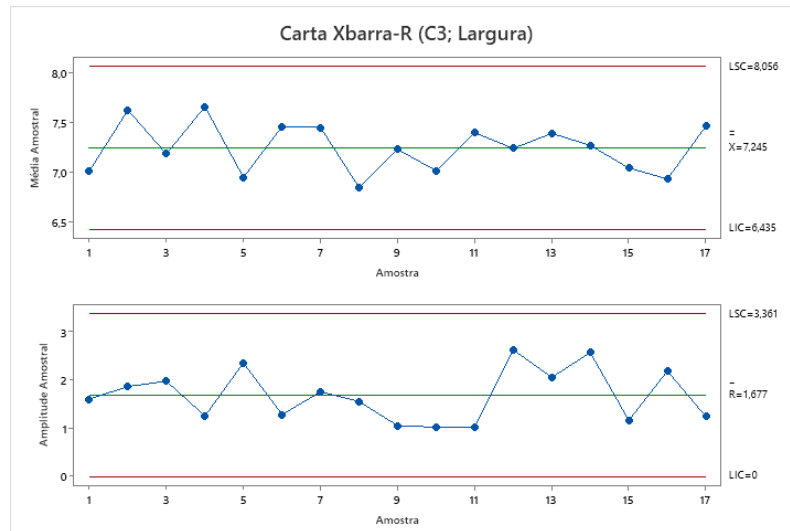


Figura 33: Ponto $C_{3;larg}$ - Carta $\bar{X}$ e R

Uma vez que após a análise das características tidas como críticas para o produto, chegou-se à conclusão de que o processo se encontra sob controle estatístico, com exceção da variável $C_{1;larg}$ em que foi detetada uma causa especial. É de destacar as melhorias do desvio padrão como se pode constatar na tabela 5, nomeadamente na comparação entre os pontos críticos de A e C, onde se conseguiu diminuir bastante o desvio padrão global, estimativa da variação global do processo, não apenas o desvio padrão dentro do subgrupo, ou seja, foi possível diminuir variabilidade.

De destacar que o principal objetivo, mitigar o problema referente às soldaduras que ficavam apenas parcialmente ou mal soldadas foi conseguido com êxito, levando a que deixasse de ter de ser preciso voltar a soldar novamente.

Tabela 5: Desvio padrão global das variáveis

Variável	Desvio Padrão Global
$A_{1;compr}$	3,53411
$A_{1;larg}$	1,28279
$A_{2;compr}$	2,6017
$A_{2;larg}$	1,33782
$A_{3;compr}$	2,36445
$A_{3;larg}$	1,45735
$B_{1;compr}$	2,56795
$B_{1;larg}$	1,6153
$B_{2;compr}$	2,21644
$B_{2;larg}$	1,76544
$C_{1;compr}$	2,78674
$C_{1;larg}$	0,660914
$C_{2;compr}$	1,40523
$C_{2;larg}$	0,752965
$C_{3;compr}$	1,14544
$C_{3;larg}$	0,63991

6 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo monitorizar e melhorar a qualidade do processo de soldadura de traves utilizando a metodologia do Controlo Estatístico de Processos (CEP). Através da implementação desta ferramenta, foi possível identificar fontes de variabilidade significativas que afetavam diretamente a estabilidade do processo e a qualidade das soldaduras.

As melhorias propostas, como a alteração do design das peças e a troca do diâmetro do arame consumível, foram essenciais para reduzir a variabilidade do processo e mitigar o problema das peças que eram mal ou parcialmente soldadas. A alteração do arame, de 0,8 mm para 1 mm, embora tenha trazido novos desafios relacionados à taxa de deposição, mostrou-se eficaz ao ser complementada com ajustes nos parâmetros de funcionamento do robot. O novo layout da mesa de trabalho, permitindo a soldadura de 12 traves por ciclo em vez das 8 que eram no início deste projeto, também contribuiu para aumentar a eficiência da produção.

O histórico de avarias do robot e a variabilidade natural do mesmo indicam que o processo, embora mais estável, continua a apresentar oportunidades de melhoria. A programação dos movimentos do braço do robot, dada a complexidade das soldaduras pequenas e a dificuldade em garantir precisão constante, é outro fator a ser aprimorado, possivelmente com um estudo mais aprofundado dos parâmetros de soldagem.

Em conclusão, as alterações implementadas resultaram em avanços claros na qualidade do processo, mas o mesmo ainda não alcançou todo o seu potencial. A continuidade das monitorizações e a realização de estudos adicionais, como o Planeamento de Experiências (DOE), serão essenciais para reduzir ainda mais a variabilidade e garantir um processo de soldadura robusto e eficiente a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AirLiquide. (n.d.). *Soldadura por resistência*. Retrieved June 26, 2024, from <https://pt.airliquide.com/solucoes/soldadura-industrial/soldadura-por-resistencia>
- ASQ. (2024a). *Quality Glossary*. ASQ - American Society for Quality. <https://asq.org/quality-resources/quality-glossary>
- ASQ. (2024b). *What is Process Capability?* ASQ - American Society for Quality. <https://asq.org/quality-resources/process-capability>
- ASQ. (2024c). *What is Sampling?* ASQ - American Society for Quality. <https://asq.org/quality-resources/sampling>
- Avakh Darestani, S., & Nasiri, M. (2016). Statistical process control. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 33(1), 2–24. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-08-2013-0130>
- Bamford, D. R., & Greatbanks, R. W. (2005). The use of quality management tools and techniques: a study of application in everyday situations. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 22(4), 376–392. <https://doi.org/10.1108/02656710510591219>
- Benková, M., Bednárová, D., Bogdanovská, G., & Pavlíčková, M. (2023). Use of Statistical Process Control for Coking Time Monitoring. *Mathematics*, 11(16), 3444. <https://doi.org/10.3390/math11163444>
- Bersimis, S., Psarakis, S., & Panaretos, J. (2007). Multivariate statistical process control charts: an overview. *Quality and Reliability Engineering International*, 23(5), 517–543. <https://doi.org/10.1002/qre.829>
- Elassy, N. (2015). The concepts of quality, quality assurance and quality enhancement. *Quality Assurance in Education*, 23(3), 250–261. <https://doi.org/10.1108/QAE-11-2012-0046>
- Equipa editorial de Conceito. (2014, September 29). *Soldadura - O que é, tipos, conceito e definição*. <https://conceito.de/soldadura>
- Hessing, T. (n.d.). *X Bar R Control Charts*. Sixsigmastudyguide.Com. Retrieved February 29, 2024, from <https://sixsigmastudyguide.com/x-bar-r-control-charts/>
- Hoyer, R., & Hoyer, B. (2001, July). What is Quality? *American Society for Quality*, 52–62. <https://www.proquest.com/magazines/what-is-quality/docview/214749408/se-2?accountid=39260>
- Intermetal. (2023). *Soldadura a laser: da automática à manual*. <https://www.intermetal.pt/Artigos/469205-Soldadura-a-laser-da-automatica-a-manual.html>

- International Organization for Standardization. (2013). *Control charts - Part 2: Shewhart control charts (ISO 7870-2)*.
- Jeffus, L. (2016). *Welding: Principles and Applications* (Eighth Edition). Cengage Learning .
- Juran, J., & Godfrey, B. (1999). *Juran 's Quality Handbook* (Fifth Edition). McGraw-Hill Companies.
- Kaya, İ., & Kahraman, C. (2011). Process capability analyses based on fuzzy measurements and fuzzy control charts. *Expert Systems with Applications*, 38(4), 3172–3184. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.09.004>
- Koutras, M. V., Bersimis, S., & Maravelakis, P. E. (2007). Statistical Process Control using Shewhart Control Charts with Supplementary Runs Rules. *Methodology and Computing in Applied Probability*, 9(2), 207–224. <https://doi.org/10.1007/s11009-007-9016-8>
- Lee, M.-G., Chechurin, L., & Lenyashin, V. (2018). Introduction to cause-effect chain analysis plus with an application in solving manufacturing problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(9–12), 2159–2169. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2217-1>
- MacGregor, J. F., & Kourti, T. (1995). Statistical process control of multivariate processes. *Control Engineering Practice*, 3(3), 403–414. [https://doi.org/10.1016/0967-0661\(95\)00014-L](https://doi.org/10.1016/0967-0661(95)00014-L)
- McDermott, O., Antony, J., & Sony, M. (2022). The Use and Application of Ishikawa 's Seven Tools in European Organisations. *International Journal for Quality Research*, 16(4), 1071–1082. <https://doi.org/10.24874/IJQR16.04-07>
- McQuater, R. E., Scurr, C. H., Dale, B. G., & Hillman, P. G. (1995). Using quality tools and techniques successfully. *The TQM Magazine*, 7(6), 37–42. <https://doi.org/10.1108/09544789510103761>
- Montgomery, D. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control* (6th Edition). Wiley.
- Nikkel, W. (2007). *Estatística Aplicada à Produção*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM267/Apostila-Estatistica%20Aplicada-a-Producao-TM267.pdf
- Ott, E., Schilling, E., & Neubauer, D. (2005). *Process Quality Control: Troubleshooting and Interpretation of Data* (Fourth Edition). ASQ - American Society for Quality.
- Paulista, P., & Alves, R. (2015). Ferramentas da Qualidade: Uma Revisão Bibliográfica e Análise de Publicações no ENEGEP. *Universidade Federal de Campina Grande*. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/29804>
- Pyo, S. (2005). Choosing Quality Tools. *Journal of Quality Assurance in Hospitality & Tourism*, 6(1–2), 1–8. https://doi.org/10.1300/J162v06n01_01

- Requeijo, J., & Pereira, Z. (2012). *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos* (2ª Edição). Fundação FCT.
- Ruivo, P. (2022). *Conceção e Implementação de um Sistema Digital de Controlo Estatístico de Processo numa Indústria Ótica* [Universidade do Minho]. <https://hdl.handle.net/1822/84659>
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2019). *Research Methods For Business Students* (Eighth Edition). Pearson.
- Singh, S., Kumar, V., Kumar, S., & Kumar, A. (2022). Variant of MIG welding of similar and dissimilar metals: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 3550–3555. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.287>
- Škulj, G., Vrabič, R., Butala, P., & Sluga, A. (2013). Statistical Process Control as a Service: An Industrial Case Study. *Procedia CIRP*, 7, 401–406. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.006>
- Stuart, M., Mullins, E., & Drew, E. (1996). Statistical quality control and improvement. *European Journal of Operational Research*, 88(2), 203–214. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00069-0](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00069-0)
- Tague, N. (2023). *The Quality Toolbox* (Third Edition). ASQ Quality Press.
- Vieira, S. (2012). *Estatística para a Qualidade* (2ª Edição). Elsevier.
- Woodall, W. H., & Montgomery, D. C. (1999). Research Issues and Ideas in Statistical Process Control. *Journal of Quality Technology*, 31(4), 376–386. <https://doi.org/10.1080/00224065.1999.11979944>

ANEXOS

Anexo 1 – Constantes Limites de Controlo

Tamanho do subgrupo	Valores das constantes, para cálculo de:														
	Carta $\bar{X}$			Carta $\bar{X}$ - S						Carta $\bar{X}$ - R					
	Limites de controlo das médias			Linha central do desvio padrão		Limites de controlo dos desvios padrão				Linha central das amplitudes		Limites de controlo das amplitudes			
	A	A2	A3	c4	c5	B3	B4	B5	B6	d2	d3	D1	D2	D3	D4
2	2,121	1,881	2,659	0,798	0,603	0	3,267	0	2,606	1,128	0,853	0	3,687	0	3,269
3	1,732	1,023	1,954	0,886	0,463	0	2,568	0	2,276	1,693	0,888	0	4,357	0	2,574
4	1,5	0,729	1,628	0,921	0,389	0	2,266	0	2,088	2,059	0,88	0	4,699	0	2,282
5	1,342	0,577	1,427	0,94	0,341	0	2,089	0	1,964	2,326	0,864	0	4,918	0	2,115
6	1,225	0,483	1,287	0,952	0,308	0,03	1,97	0,029	1,874	2,534	0,848	0	5,078	0	2,004
7	1,134	0,419	1,182	0,959	0,282	0,118	1,882	0,113	1,806	2,704	0,833	0,205	5,203	0,076	1,924
8	1,061	0,373	1,099	0,965	0,262	0,185	1,815	0,179	1,751	2,847	0,82	0,387	5,307	0,136	1,864
9	1	0,337	1,032	0,969	0,246	0,239	1,761	0,232	1,707	2,97	0,808	0,546	5,394	0,184	1,816
10	0,949	0,308	0,975	0,973	0,232	0,284	1,716	0,276	1,669	3,078	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777
11	0,905	0,285	0,927	0,975	0,221	0,321	1,679	0,313	1,637	3,173	0,787	0,812	5,534	0,256	1,744
12	0,866	0,266	0,886	0,978	0,211	0,354	1,646	0,346	1,61	3,258	0,778	0,924	5,592	0,284	1,716
13	0,832	0,249	0,85	0,979	0,202	0,382	1,618	0,374	1,585	3,336	0,77	1,026	5,646	0,308	1,692
14	0,802	0,235	0,817	0,981	0,194	0,406	1,594	0,399	1,563	3,407	0,762	1,121	5,693	0,329	1,671
15	0,775	0,223	0,789	0,982	0,187	0,428	1,572	0,421	1,544	3,472	0,755	1,207	5,737	0,348	1,652
16	0,75	0,212	0,763	0,983	0,181	0,448	1,552	0,44	1,526	3,532	0,749	1,285	5,779	0,364	1,636
17	0,728	0,203	0,739	0,985	0,175	0,466	1,534	0,458	1,511	3,588	0,743	1,359	5,817	0,379	1,621
18	0,707	0,194	0,718	0,985	0,17	0,482	1,518	0,475	1,496	3,64	0,738	1,426	5,854	0,392	1,608
19	0,688	0,187	0,698	0,986	0,165	0,497	1,503	0,49	1,483	3,689	0,733	1,49	5,888	0,404	1,596
20	0,671	0,18	0,68	0,987	0,161	0,51	1,49	0,504	1,47	3,735	0,729	1,548	5,922	0,414	1,586
21	0,655	0,173	0,663	0,988	0,157	0,523	1,477	0,516	1,459	3,778	0,724	1,606	5,95	0,425	1,575
22	0,64	0,167	0,647	0,988	0,153	0,534	1,466	0,528	1,448	3,819	0,72	1,659	5,979	0,434	1,566
23	0,626	0,162	0,633	0,989	0,15	0,545	1,455	0,539	1,438	3,858	0,716	1,71	6,006	0,443	1,557
24	0,612	0,157	0,619	0,989	0,147	0,555	1,445	0,549	1,429	3,895	0,712	1,759	6,031	0,452	1,548
25	0,6	0,153	0,606	0,99	0,144	0,565	1,435	0,559	1,42	3,931	0,709	1,804	6,058	0,459	1,541

Anexo 2 – Dados Traves nas Condições Primarias de Funcionamento (Valores em cm)

		A1		A2		A3		B1		B2	
		Compri	Largura	Compri	Largura	Compri	Largura	Compri	Largura	Compri	Largura
Amostra 1	1	2,1	0,6	1,6	1	1,6	1	2,5	1,4	1,3	1
	2	1,9	0,5	1,5	0,9	1,5	0,9	1,9	1	1,8	1
	3	1,3	0,5	1,8	0,9	2	1	2,6	1	1,5	1,4
	4	2,2	0,6	1,7	1	1,5	1	3,2	1,3	1,8	0,6
Amostra 2	5	2,3	0,3	1,5	0,9	1,5	1	2,9	1,3	1,5	0,9
	6	2,5	0,3	0,9	0,6	1,6	1	2,9	1,3	1,6	1
	7	2,4	0,2	1,4	0,5	2,2	1	2,1	0,9	1,3	1,1
	8	2,1	0,5	1,6	0,9	1,4	0,8	2,7	1	1,8	1,5
Amostra 3	9	2,2	0,55	1,6	1	1,8	0,8	2,4	0,6	1,6	0,6
	10	2,2	0,6	1,9	0,8	1,9	0,7	2,6	0,9	0,9	0,8
	11	2,1	0,5	1,8	0,9	1,6	0,8	3,2	0,9	1,2	0,9
	12	2	0,7	1,6	1	1,6	0,9	2,4	0,8	1,5	0,9
Amostra 4	13	2,4	0,3	1,6	0,8	1,8	0,8	2,6	0,9	1,4	0,9
	14	2,2	0,55	2	0,5	1,5	0,5	2,7	0,8	1,7	0,8
	15	2,4	0,4	1,6	0,5	2,5	0,2	2,7	0,8	1,1	0,7
	16	2,1	0,45	1,2	0,8	1,5	0,6	2,8	0,9	1,4	0,7
Amostra 5	17	1,4	0,6	1,4	1	1,5	0,9	2,3	0,9	1,3	0,7
	18	2,2	0,4	1,6	0,9	1,4	0,8	2,3	0,8	1,5	0,5
	19	1	0,5	1,9	0,9	1,6	0,8	2,4	0,8	1,3	0,9
	20	2,3	0,4	1,6	0,9	1,4	0,9	2,8	0,9	1,2	0,4
Amostra 6	21	2	0,5	1,9	0,6	1,5	0,75	2,7	0,9	1,8	0,8
	22	2,2	0,4	1,5	0,7	2,15	0,8	2,6	0,7	1,3	0,5
	23	2,2	0,4	1,1	0,8	1,8	0,5	2,8	0,8	1,5	0,7
	24	2,4	0,3	1,6	0,7	1,7	0,7	2,7	0,8	1,4	0,7
Amostra 7	25	2	0,4	1,8	0,9	1,2	0,9	2,4	0,9	1,5	0,7
	26	2	0,7	2	0,8	1,2	0,9	2,9	0,75	1,8	0,9
	27	2,1	0,6	2,1	0,7	1,2	0,7	3,1	1	1,4	0,7
	28	2,1	0,5	1,6	0,9	1,6	0,6	2,9	0,9	1,2	1
Amostra 8	29	2	0,3	2	0,8	1,8	0,7	2,2	0,9	1,4	0,6
	30	2,3	0,5	1,7	0,7	1,9	0,6	2,6	0,8	1,6	1
	31	2,3	0,65	2	0,8	1,9	0,7	2,4	0,8	1,7	0,9
	32	2,1	0,5	2,1	0,7	1,8	0,6	3	0,9	1,9	1
Amostra 9	33	2,2	0,6	1,7	0,6	1,6	0,8	3,3	1	1	0,7
	34	2,1	0,5	1,8	0,7	1,1	0,7	2,6	0,7	1,5	0,8
	35	2,4	0,4	1,8	0,7	1,2	0,7	2,5	0,9	0,9	0,7
	36	2,2	0,5	1,6	0,8	1,7	0,6	3	0,8	1,7	1
Amostra 10	37	2,2	0,5	1,9	0,5	1,2	0,6	2,4	0,9	1,7	0,9
	38	1,3	0,5	1,8	0,7	1,8	0,8	2,7	0,8	1,6	0,9
	39	1,2	0,3	1,6	0,8	1,4	0,6	2,4	0,7	1,3	0,8
	40	2	0,5	2,1	0,6	1,5	0,7	2,9	0,9	1,65	0,9
Amostra 11	41	2,4	0,3	1,45	0,8	1,4	0,6	2,5	0,7	1,2	0,8
	42	2,3	0,3	1,5	0,7	1,8	0,6	2,4	0,7	1,1	1
	43	2,1	0,3	1,5	0,8	1,4	0,6	2,9	0,85	1	0,9
	44	2,6	0,7	1,5	0,6	1,9	0,5	3	0,8	1,3	0,6
A	45	2	0,7	1,8	0,8	1,4	0,6	2,6	0,85	1,3	0,85

	46	1,3	0,6	1,5	0,85	1,5	0,7	3	0,9	1,3	0,9
	47	1,5	0,7	1	0,8	1,7	0,65	2,5	0,75	1,5	0,6
	48	2,1	0,4	1,5	0,9	1,7	0,6	2,4	0,8	1,1	0,7
Amostra 13	49	2,3	0,4	1,45	0,9	1,4	0,6	2,5	0,9	1,3	0,9
	50	1,9	0,45	1,5	0,8	1,75	0,5	2,9	1	1,3	1
	51	2	0,5	1,2	0,8	1,6	0,6	2,6	1	1,4	0,8
	52	2	0,4	1,6	0,85	1,35	0,6	2,6	0,95	1,4	0,75
Amostra 14	53	2,1	0,7	1,8	0,7	1,4	0,7	2,4	0,8	1,1	0,9
	54	2	0,7	1,5	0,9	1,5	0,8	2,4	0,75	1,2	1
	55	1,5	0,65	1,2	0,85	1,25	0,6	2,5	0,9	1,4	0,7
	56	1,5	0,7	1,1	0,8	1,8	0,7	2,3	0,9	1,3	1,1
Amostra 15	57	1,8	0,5	1,9	0,85	1,8	0,9	2,7	1	1,5	0,9
	58	1,8	0,4	1,7	0,8	1,9	1	2,8	1	1,6	1,1
	59	1,9	0,4	1,8	0,8	1,8	0,9	2,8	1,1	1,8	1,1
	60	2	0,4	1,7	0,85	1,8	1	2,7	1	1,3	1
Amostra 16	61	0,9	0,6	1,2	0,8	1,5	0,9	2	0,7	1,1	0,8
	62	1,4	0,5	1,2	0,9	1,7	0,7	2,3	0,6	1,3	0,8
	63	1,7	0,5	1,7	1	1,6	0,9	2,6	1	1,2	1
	64	1,5	0,5	1,5	1,2	1,6	0,8	2,6	0,75	1,3	0,8
Amostra 17	65	1,8	0,3	1,8	0,85	1,9	1	3	1,1	1,5	0,8
	66	1,9	0,4	1,7	0,9	1,9	1	2,7	1,1	1,5	1,1
	67	2	0,5	1,8	0,7	1,9	0,9	2,6	1,1	1,8	1
	68	1,8	0,4	1,75	0,8	1,8	0,9	2,7	1,2	1,6	1,1
Amostra 18	69	2,1	0,5	1,3	0,9	1,4	0,85	2,5	1	1	1
	70	1,7	0,5	1	0,8	1,5	0,8	2,2	0,9	1,4	0,8
	71	1,7	0,5	1,6	0,9	1,6	0,9	2,6	1	1,4	0,8
	72	1,7	0,8	1,4	1	1,5	0,9	2,6	1	1,2	1
Amostra 19	73	1,7	0,5	1,8	0,8	1,8	0,9	2,7	1,1	1,8	1,2
	74	1,9	0,3	1,7	0,9	1,9	0,8	2,6	1,1	1,5	1,1
	75	1,8	0,5	1,9	0,8	1,9	0,8	2,7	1,2	1,5	1
	76	2	0,4	1,7	0,8	1,8	0,9	2,8	1,1	1,6	1,1
Amostra 20	77	1	0,3	1,7	1	1,5	0,9	2,8	1,1	1,4	0,9
	78	1	0,5	1,5	0,9	1,4	0,8	2,4	1	1,5	0,9
	79	1,5	0,7	1,4	0,8	1,4	0,9	2,7	1	1,3	0,9
	80	1,9	0,7	1,5	1,1	1,5	0,8	2,6	1	1,4	1
Amostra 21	81	2	0,4	1,75	0,8	1,5	0,8	2,7	1,1	1,7	1,1
	82	1,9	0,5	1,8	0,8	1,5	0,8	2,8	1,1	1,5	1
	83	1,9	0,4	1,7	0,85	1,6	0,8	2,6	1	1,6	1,1
	84	2	0,4	1,8	0,8	1,5	0,9	2,7	1,1	1,8	1,1
Amostra 22	85	1,4	0,6	1,2	1	1,4	0,85	2,6	0,8	1,4	0,9
	86	1,8	0,5	1,2	0,9	1,5	0,9	2,5	0,5	1,3	0,9
	87	2	0,7	1,3	1	1,4	0,7	2,1	0,8	1,5	1,1
	88	2,1	0,7	1,2	0,9	1,5	0,8	2,9	1,1	1,6	0,9
Amostra 23	89	2,1	0,6	1,7	0,8	1,8	0,8	2,7	1,1	1,6	1
	90	2	0,5	1,8	0,8	1,5	0,8	2,8	1,1	1,7	1,1
	91	2	0,6	1,85	0,75	1,4	0,7	3	1,1	1,5	0,9
	92	2,1	0,5	1,7	0,6	1,4	0,8	2,8	1,2	1,5	1
Amostra 24	93	1,4	0,6	1,3	1,1	1,4	0,8	2,6	1	1,3	0,7
	94	1,7	0,7	1,4	1	1,4	0,9	3	1,1	1,4	0,9
	95	1,2	0,5	1,4	0,9	1,4	0,9	2,7	0,9	1,3	0,7
	96	2,1	0,7	1,4	0,9	1,5	0,8	2,4	0,9	1,5	1

Amostra 25	97	2	0,5	1,7	0,8	1,8	0,9	2,6	1	1,7	1
	98	2,1	0,5	1,7	0,8	1,5	0,8	2,7	1	1,6	0,9
	99	1,9	0,5	1,5	0,7	1,3	0,7	2,7	1,1	1,8	1,1
	100	1,7	0,4	1,3	0,6	1,3	0,8	2,9	0,7	1,2	0,8
Amostra 26	101	1,6	0,3	1,3	1	1,5	0,9	2,6	1	1,2	0,9
	102	2,1	0,6	1,1	0,9	1,3	0,8	2,2	1	1,4	0,8
	103	2,1	0,7	1,6	0,9	1,5	1	3	1,1	1,5	0,8
	104	2,1	0,6	1,8	0,6	1,5	0,7	2,8	1	1,6	1

Anexo 3 – Dados Traves após Melhorias (Valores em mm)

		C1		C2		C3	
		Comprimento	Largura	Comprimento	Largura	Comprimento	Largura
Amostra 1	1	15,04	6,95	10,62	7,01	9,39	7,3
	2	17,82	5,75	8,09	8,08	12,55	6,88
	3	16,64	5,88	10,39	7,09	9,7	6,01
	4	16,47	6,4	11,03	8,25	10,57	7,49
	5	18,83	6,34	9,26	8,23	10,04	7,61
	6	20,43	6,99	10,82	8,37	10,79	6,8
Amostra 2	7	16,83	7,41	12,03	6,6	12,02	8,81
	8	22,45	6,48	12,66	6,87	10,43	7,25
	9	18,43	7,73	13,99	9,01	11,12	7,65
	10	22,2	6,31	11,45	5,92	12,38	6,95
	11	17,83	6,72	10,01	6,82	11,42	7,53
	12	17,52	6,78	11,02	6,61	11	7,54
Amostra 3	13	18,26	7,95	12,36	7,05	10,57	7,49
	14	25	7,42	10,04	6,76	10,09	8,25
	15	22,6	6,54	11,98	6,92	9,91	6,52
	16	22,56	6,77	10,87	7,08	13,91	7,55
	17	18,35	6,56	12,09	6,79	11,6	7,02
	18	21,85	6,96	11,68	6,55	12,47	6,28
Amostra 4	19	15,04	7,87	11,3	7,3	11,7	8,13
	20	17,82	6,98	9,42	7,11	10,88	8,2
	21	16,64	7,36	11,49	6,75	10,29	7,39
	22	16,47	8,18	13,95	6,08	12,28	6,95
	23	18,83	7,94	12,62	7,5	11,91	7,81
	24	20,43	6,08	11,65	6,04	8,53	7,46
Amostra 5	25	16,83	7,34	9,54	7,76	12,51	6,65
	26	25	6,62	12,83	7,24	12,14	7,87
	27	22,6	6,65	9,14	7,26	10,24	7,61
	28	22,56	6,99	12,01	7,86	11,79	7,49
	29	18,35	6,81	11,28	7,38	12,45	5,52
	30	21,85	7,67	14,96	7,91	11,55	6,57
Amostra 6	31	19,11	7,22	10,42	7,63	13,57	6,94
	32	17,33	6,8	8,87	7,89	13,01	7,39
	33	19,09	7,01	11,2	6,82	12,22	7,08
	34	17,99	6,94	13,21	7,51	9,7	7,87
	35	16,65	7,69	11,41	6,66	12,08	8,22
	36	20,84	6,59	10,83	7,93	11,88	7,25
Amostr a 7	37	21,59	6,92	14,5	6,99	9,91	6,65
	38	16,54	6,16	13,1	7,84	10,43	7,46

	39	18,41	5,06	8,67	6,88	10,12	7,05
	40	19,19	7,15	9,61	7,58	9,36	8,4
	41	19,84	7,28	11,3	5,46	11,69	6,98
	42	20,43	6,24	11,81	6,95	11,45	8,15
Amostra 8	43	21,95	8,2	10,36	7,44	10,58	6,45
	44	26,72	5,77	8,55	7,44	10,9	7,1
	45	21,99	6,75	11,57	7,75	10,35	6,49
	46	16,68	6,6	11,43	7,52	9,22	6,23
	47	15,46	7,72	12,74	8,34	11,05	7,78
	48	17,46	7,68	12,33	6,19	11,21	7,05
Amostra 9	49	19,96	6,82	10,88	5,96	11,56	7,19
	50	19,29	6,97	10,75	6,95	12,31	6,95
	51	17,9	6,14	13,07	7,33	13,32	7,24
	52	17,44	5,73	12,31	6,24	10,24	7,85
	53	16,18	6,49	12,13	5,87	11,39	7,35
	54	23,67	8,32	13,06	6,54	11,06	6,8
Amostra 10	55	15,63	7,52	12,22	7,48	11,1	7,08
	56	20,78	7,5	10,88	7,82	11,75	6,75
	57	21,65	6,47	10,79	8,06	12,46	6,45
	58	17,5	6,52	11,01	7,53	10,9	7,47
	59	23,47	6,04	10,13	6,99	9,15	7,3
	60	23,16	5,8	12,87	6,77	13,41	7,06
Amostra 11	61	16,11	5,61	10,35	7,47	10,61	7,92
	62	16,06	7,99	11,66	8,18	11,63	7,64
	63	24,96	6,39	11,37	9,23	9,68	7,02
	64	16,55	6,44	13,2	6,02	12,61	7,25
	65	17,23	5,91	11,52	6,26	10,62	7,65
	66	15,99	7,23	11,04	8,41	11,73	6,9
Amostra 12	67	20,59	5,67	10,32	7,29	9,59	8,08
	68	21,43	6,58	10,9	7,32	11,54	6,09
	69	15,81	6,14	10,14	8	11,99	6,64
	70	18,78	6,97	8,75	7,04	10,96	7,16
	71	25,26	6,39	12,16	7,19	12,67	8,71
	72	16,33	5,95	10,92	5,91	9,52	6,76
Amostra 13	73	19,62	6,7	8,57	6	11,56	8,24
	74	18,8	7	9,8	6,35	11,77	7,47
	75	20,82	6,76	10,95	5,65	13,31	7,42
	76	22,81	6,92	12,4	7,32	11,67	6,19
	77	17,86	6,31	11,86	7,38	11,64	7,39
	78	24,11	6,48	9,61	6,98	10,84	7,63
Amostra 14	79	15,85	6,28	10,7	7,16	13,17	6,24
	80	22,19	6,49	10,28	7,8	11,88	7,08
	81	20,41	6,19	12,27	7,48	11,61	7,8

	82	17,19	5,6	11,84	7,53	9,95	7,52
	83	23,11	6,84	11,77	7,08	11,63	8,77
	84	21,03	6,46	11,4	7,08	8,87	6,21
Amostra 15	85	21,18	5,66	11,02	8,97	10,55	7,38
	86	17,43	7,02	9,49	7,29	11,4	7,42
	87	18,62	6,13	9,02	7,18	10	7,16
	88	18,76	6,75	13,26	7,45	11,55	6,26
	89	20,65	7,2	12,07	7,81	11,96	6,86
	90	19,95	6,8	12,22	7,98	10,15	7,19
Amostra 16	91	17,85	7,46	9,77	6,31	9,63	6,75
	92	17,35	5,92	9,95	8,71	10,91	7,46
	93	23,15	6,98	9,62	7,9	12,08	8,16
	94	19,63	6,27	7,98	7,72	10,19	6,72
	95	18,47	6,15	11,2	6,25	10,49	5,98
	96	22,95	6,34	10,39	8,24	11,8	6,54
Amostra 17	97	13,44	6,52	11,45	7,24	11,1	7,31
	98	19,15	6,76	11,76	6,56	10,27	7,05
	99	20,48	5,96	12,22	7,32	10,68	8,29
	100	20,8	7,31	10,07	7,07	8,48	7,58
	101	22,86	7,02	11,3	7,73	11,88	7,37
	102	15,05	5,72	8,61	6,8	10,7	7,17