

Desenho de um sistema de controlo estatístico num processo de cravação de componentes eletrónicos

Pedro Moura Monteiro

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Paulo Luís Cardoso Osswald



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2018-07-23

Resumo

Nos últimos anos tem-se assistido a uma implementação crescente de sistemas de aquisição de dados na indústria. A sua utilização levou a um aumento de oportunidades de melhorias, despoletadas pelo aumento da capacidade de análise de dados em grande escala.

Este projeto propõe-se a conceber e implementar um sistema de controlo estatístico numa linha de produção na área da indústria automóvel. Isto permitirá compreender melhor o processo e implementar melhorias eficazes para aumentar a qualidade dos produtos e consequente satisfação dos clientes.

No processo em estudo é realizada a montagem por cravação de uma placa eletrónica de circuito impresso com furos num conector plástico com pinos metálicos côncavos, que garantem a ligação física e elétrica, utilizando um cilindro hidráulico e suportes apropriados. De seguida é efetuada uma medição da altura dos pinos, por varrimento laser, resultando num sinal que indica se cada peça está conforme com os limites de especificação. No início deste projeto não se aplicava qualquer análise estatística aos dados desta medição. Para que isso fosse possível, foi solicitada a disponibilização automática destes dados. A partir daí, desenvolveu-se um sistema que permite a visualização de cartas de controlo, índices de capacidade de processo e mais algumas análises em tempo real. Para isto foi utilizado o *software RapidMiner* para a transformação de dados em formato de texto para uma tabela através de programação por blocos e o *Qlik Sense* para a visualização de dados em tempo real, online, utilizando gráficos e indicadores de estado.

Este sistema permite detetar rapidamente desvios dos resultados relativamente ao esperado e tendências no processo. Os potenciais ajustes efetuados são mais eficazes por se basearem numa análise estatística mais completa.

Após uma análise dos dados do processo, verificou-se a existência de uma diferença significativa entre a altura dos vários pinos. Foi proposta e implementada uma alteração do suporte das peças no processo de cravação, de modo a reduzir a flexão do conector plástico. Isto resultou numa cravação mais estável e uma redução significativa da variabilidade do processo. Assim há um maior controlo da qualidade e uma quantidade de sucata prevista mais baixa.

Em trabalhos futuros este projeto pode ser aplicado de forma semelhante a outros processos, monitorizando as variáveis críticas. Seria também interessante integrar conceitos de *machine learning*, sendo o RapidMiner uma ferramenta com várias funcionalidades neste campo, que otimizam autonomamente os parâmetros de entrada de uma máquina em função de medições resultantes do processo.

Palavras-chave: Controlo Estatístico de Processo, Cartas de Controlo, Análise de Capacidade de processo, Análise de Dados, Indústria 4.0, Indústria Automóvel, Eletrónica.

Design of a statistical process control system in the *press fit* of electronic components

Abstract

In the last years there has been a growing integration of data acquisition systems in the industry. Their application led to an increase in new improvement opportunities, created by the increase in big data analysis capacity.

This project's goal is to design and implement a statistical process control system in a production line in the automotive industry field. This will provide a deeper knowledge of the process and allow an implementation of more effective improvements, thus improving quality and thus customer satisfaction.

The process in study consists in the assembly through *press fit* of a printed circuit board assembled with holes in a plastic connector with concave metallic power pins, that assure the physical and electrical connection, using a hydraulic cylinder and appropriate support. After that, the height of the power pins is measured by a laser scanner that sends a signal indicating whether each part is conforming with the specification limits or not. At the start of the project there was no statistical analysis made with this data. So, there was a request to have the data available automatically. Then, a system was developed to allow the visualization of control charts, capability indexes and some other analysis. For this, it was used *RapidMiner* software transform the data from a text file to a table, through block programming, and *Qlik Sense* for data visualization in real time, online, using charts and key performance indicators.

This system quickly detects deviations in the results from the expected values, as well as trends in the process. Besides that, adjustments made to the machines will be more effective because they follow a more complete statistical analysis.

After analyzing the process data, it was noticed that there was a difference between the height of the various power pins. A change to the support tools in the *press fit* process was suggested and implemented to reduce the flexion in the connector. This improvement has resulted in a more stable *press fit* and a significant reduction in the variability of the process, which allows a better quality control and a lower amount of expected scrap.

In future projects it is possible to apply the developed system to other processes in a similar way, monitoring the critical variables. It would also be interesting to include concepts of machine learning and *RapidMiner* has some functionalities in this field that can optimize autonomously the inputs of a machine according to the resulting measures of a process.

Keywords: Statistical Process Control, Control Charts, Capability Analysis, Big Data Analytics, Industry 4.0, Automotive Industry, Electronics.

Agradecimentos

No desenvolvimento deste projeto pude contar com algumas contribuições importantes, pelo que gostaria de agradecer:

Aos meus pais pelo contínuo apoio, fundamental neste percurso;

Ao meu orientador na empresa, Eng. Nuno Peixoto, pelo desafio lançado e disponibilidade no acompanhamento dentro da organização;

Ao meu orientador na FEUP, Prof. Eng. Paulo Osswald, pelas recomendações que me ajudaram a manter a direção certa e produzir uma dissertação com melhor qualidade;

À Prof. Eng. Henriqueta Nóvoa pelo esclarecimento de algumas questões e sugestões úteis;

À FEUP e a todos os colaboradores por proporcionarem um ensino de qualidade e com excelentes condições;

À BorgWarner e a todos os colaboradores por me receberem e ajudarem a encontrar soluções;

À minha família e amigos pelo convívio, amizade e motivação para seguir os meus objetivos.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	BorgWarner Viana.....	2
1.3	Objetivos do projeto	3
1.4	Método seguido no projeto.....	5
1.5	Estrutura da dissertação	6
2	Revisão bibliográfica: O Controlo Estatístico de Processo.....	7
2.1	Cartas de controlo	8
2.2	Índices de capacidade de processo	12
2.3	DMAIC.....	13
3	Situação inicial	14
3.1	Descrição da linha de produção em análise.....	14
3.2	Sistema de medição e controlo	20
3.3	Validação do instrumento de medição no <i>press fit</i>	21
4	Desenho de um sistema de controlo estatístico de processo	22
4.1	Recolha de dados	23
4.2	Tratamento de dados em RapidMiner	23
4.3	Desenho de cartas de controlo	25
4.4	Visualização de dados em Qlik	25
5	Soluções propostas e implementadas	27
5.1	Análise de capacidade de processo de <i>press fit</i>	27
5.2	Problemas detetados e possíveis causas	29
5.3	Melhorias no funcionamento da linha.....	30
5.3.1	Alteração do desenho dos ninhos.....	30
5.3.2	Redução de tempo de ciclo no <i>press fit</i>	34
5.4	Outras análises de capacidade de processo.....	36
5.5	Outras causas de variação.....	36
6	Conclusões e perspetivas de trabalho futuro.....	37
	Referências	38
ANEXO A:	Tabela de valores de d2	39
ANEXO B:	Soma cumulativa e média móvel exponencialmente ponderada	40
ANEXO C:	Validação do sistema de medição	43
ANEXO D:	Programas usados para tratamento e análise de dados.....	49
ANEXO E:	Documentação do sistema de controlo estatístico de processo	52
ANEXO F:	Análise da capacidade de processo inicial.....	65
ANEXO G:	Análise de capacidade de processo depois da alteração nos ninhos.....	84
ANEXO H:	Análise de capacidade de processo no fim de linha	87
ANEXO I:	Correlação entre altura dos pinos, força e deslocamento	89

Siglas

AOI – Automated Optical Inspection (Inspeção ótica automática)

CEP – Controlo Estatístico de Processo

Cp – Process Capability (Capacidade de processo)

Cpk – Process Capability Index (Índice de capacidade de processo)

Cusum – Cumulative Sum (Soma cumulativa)

DMAIC - Define, Measure, Analyze, Improve and Control (Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar)

DMC - Data Matrix Code (Código de matriz de dados)

EGR – Exhaust Gas Recirculation (Recirculação de gases de escape)

EWMA – Exponentially Weighted Moving Average (Média móvel exponencialmente ponderada)

GPCM – Glow Plug Control Module (Módulo de controlo de velas de incandescência)

GR&R - Gage Repeatability and Reproducibility (Estudo de repetibilidade e reprodutibilidade)

LIC – Limite Inferior de Controlo

LIE – Limite Inferior de Especificação

LSC – Limite Superior de Controlo

LSE – Limite Superior de Especificação

PCB – Printed Circuit Board (Placa de circuito impresso)

PCBA – Printed Circuit Board Assembled (Placa de circuito impresso montada)

Pp – Process Performance (Desempenho de processo)

Ppk – Process Performance Index (Índice de performance de processo)

PPM – Partes por milhão

RPP – Reverse Polarity Protection (Proteção contra inversão de polaridade)

Índice de Figuras

Figura 1 - Indicadores operacionais (BorgWarner Inc. 2018).....	2
Figura 2 - Distribuição de vendas por clientes em 2016 (BorgWarner Inc. 2018).....	2
Figura 3 – BorgWarner em Viana do Castelo (BorgWarner Inc. 2018).....	3
Figura 4 - Quantidade de peças rejeitadas em 2017 (BorgWarner Inc. 2018)	4
Figura 5 - Exemplo de carta de controlo (adaptado de Montgomery 2009).....	9
Figura 6 - Abastecimento à linha de PCBAs (esquerda) e conectores (direita)	14
Figura 7 – Exemplo de GPCM com esquema dos pinos de ligação e especificação de altura.	15
Figura 8 - Vista geral da máquina de <i>press fit</i>	15
Figura 9 - Etapa de <i>press fit</i>	16
Figura 10 - Scanner laser Keyence LJ-G200.....	16
Figura 11 - Sistema de medição	17
Figura 12 - GPGM Ford DVNEO com ordem de medição	18
Figura 13 - Etapa de gravação	19
Figura 14 – Visão geral da parte final da linha.....	20
Figura 15 - Visualização dos resultados do sistema de medição e painel de controlo	21
Figura 16 - Diagrama de funcionamento do sistema de CEP	22
Figura 17 - Exemplo de dados a recolher na máquina	23
Figura 18 - Vista geral do processo usado para atualizar dados (RapidMiner Studio 8.1)	23
Figura 19 – Subprocesso para transformação de texto em tabela (RapidMiner Studio 8.1)	24
Figura 20 - Tabela com os dados resultantes da medição (RapidMiner Studio 8.1).....	24
Figura 21 - Visualização de dados (Qlik Sense).....	25
Figura 22 - Máquina de <i>press fit</i> com sistema de controlo estatístico.....	26
Figura 23 – Cartas de controlo por linhas (Ford) (Minitab 17).....	28
Figura 24 - Distribuição da altura dos pinos por linhas de medição	28
Figura 25 - Diagrama causa efeito para altura dos pinos não conforme (Minitab 17)	29
Figura 26 - Desenho de um GPCM com zonas de suporte e sem suporte.....	30
Figura 27 - Ninhos do <i>press fit</i> antes (esquerda) e depois (direita) da alteração.....	31
Figura 28 - Comparação da altura dos pinos antes e depois dos novos ninhos (Microsoft Excel 2010).....	31
Figura 29 - Histograma global antes do suporte central (Minitab 17)	32
Figura 30 - Histograma global depois do suporte central (Minitab 17)	32
Figura 31 - Análise de capacidade de processo no <i>press fit</i> antes do suporte central nos ninhos (Minitab 17).....	33
Figura 32 - Análise de capacidade de processo no <i>press fit</i> depois do suporte central nos ninhos (Minitab 17).....	33

Figura 33 - Sugestão de melhoria no suporte central	34
Figura 34 - Sistema de medição	35
Figura 35 - Linhas de medição laser.....	35
Figura 36 - Processo de cravação do PCBA no conector (<i>press fit</i>).....	36
Figura 37 - Carta de controlo de Shewhart (Montgomery 2009)	40
Figura 38 - Carta de controlo “Cusum” (Montgomery 2009)	40
Figura 39 - Peso da média em função da idade da amostra para 5 períodos (Montgomery 2009).....	41
Figura 40 - Carta de controlo EWMA	41
Figura 41 - Teste de repetibilidade pino 1	43
Figura 42 - Teste de repetibilidade pino 2	44
Figura 43 - Teste de repetibilidade pino 3	44
Figura 44 - Teste de repetibilidade pino 4	45
Figura 45 - Teste de repetibilidade pino 5	45
Figura 46 - Teste de repetibilidade pino 7	46
Figura 47 - Teste de repetibilidade pino 8	46
Figura 48 - Teste de repetibilidade pino 9	47
Figura 49 - Teste de repetibilidade pino 10	47
Figura 50 - Teste de repetibilidade pino 11	48
Figura 51 - Aspeto do ambiente do RapidMiner (RapidMiner Studio 8.1).....	49
Figura 52 - Exemplo de sistema de visualização gráfica (Qlik Sense)	50
Figura 53 - Ambiente do Minitab 17 (Minitab 17).....	51
Figura 54 - Assistente do minitab para escolha de cartas de controlo (Minitab 17)	51
Figura 55 - Teste de normalidade à linha 1 da Renault (Minitab 17).....	65
Figura 56 - Teste de normalidade à linha 2 da Renault (Minitab 17).....	66
Figura 57 - Teste de normalidade à linha 3 da Renault (Minitab 17).....	66
Figura 58 - Teste de normalidade à linha 4 da Renault (Minitab 17).....	67
Figura 59 - Gráfico de capacidade de processo global do <i>press fit</i> Renault (Minitab 17)	68
Figura 60 - Carta I-AM para análise de valor individual (em cima) e amplitude móvel (em baixo) por linha de medição (Renault) (Minitab 17).....	69
Figura 61 - Análise de capacidade de processo à linha 1 Renault (Minitab 17)	70
Figura 62 - Análise de capacidade de processo à linha 2 Renault (Minitab 17)	71
Figura 63 - Análise de capacidade de processo à linha 3 Renault (Minitab 17)	72
Figura 64 - Análise de capacidade de processo à linha 4 Renault (Minitab 17)	73
Figura 65 - Teste de normalidade à linha 1 da Ford (Minitab 17).....	74
Figura 66 - Teste de normalidade à linha 2 da Ford (Minitab 17).....	75
Figura 67 - Teste de normalidade à linha 3 da Ford (Minitab 17).....	75

Figura 68 - Teste de normalidade à linha 4 da Ford (Minitab 17).....	76
Figura 69 - Teste de normalidade à linha 5 da Ford (Minitab 17).....	76
Figura 70 - Gráfico de capacidade de processo global do <i>press fit</i> Ford (Minitab 17)	77
Figura 71 - Carta I-AM para análise de valor individual (em cima) e amplitude móvel (em baixo) por linha de medição (Ford) (Minitab 17).....	78
Figura 72 - Análise de capacidade de processo à linha 1 Ford (Minitab 17)	79
Figura 73 - Análise de capacidade de processo à linha 5 Ford (Minitab 17)	80
Figura 74 - Análise de capacidade de processo à linha 4 Ford (Minitab 17)	81
Figura 75 - Análise de capacidade de processo à linha 3 Ford (Minitab 17)	82
Figura 76 - Análise de capacidade de processo à linha 2 Ford (Minitab 17)	83
Figura 77 - Análise de capacidade de processo no <i>press fit</i> (Pinos 1 a 4) para Ford em 2018.05.07 (Minitab 17).....	84
Figura 78 - Análise de capacidade de processo no <i>press fit</i> (Pinos 5 a 8) para Ford em 2018.05.07 (Minitab 17).....	85
Figura 79 - Análise de capacidade de processo no <i>press fit</i> (Pinos 9 a 11) para Ford em 2018.05.07 (Minitab 17).....	86
Figura 80 - Histogramas para comparação entre ninhos no teste funcional 2.0 (Minitab 17)..	87
Figura 81 - - Histogramas para comparação entre ninhos no teste funcional 3.1 (Minitab 17)	88
Figura 82 - Correlação entre o deslocamento do cilindro e a altura dos pinos (Qlik Sense) ...	89
Figura 83 - Correlação entre a força do cilindro e a altura dos pinos (Qlik Sense)	90

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Objetivo de redução de sucata para 2018 (BorgWarner Inc. 2018)	3
Tabela 2 - Valores de d_2	39

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

O mercado na indústria automóvel é muito competitivo e por isso, para garantirem a sua sustentabilidade, é importante as empresas terem um foco na melhoria contínua e na eficiência, quer nos produtos em produção, quer no lançamento de novos projetos. Para isto é importante definir especificações de certos parâmetros e garantir que estas são cumpridas.

Na BorgWarner Viana está em desenvolvimento uma nova linha de produção de GPCM (módulo de controlo de velas de incandescência). Esta foi a linha escolhida para a implementação deste projeto porque, estando numa fase inicial, existem mais problemas que podem ser melhorados. Além disso, há mais tempo disponível com a linha parada para realizar testes e experiências. Nesta linha, existe um processo de conexão de dois componentes, designado *press fit*, que tem uma grande importância no produto final pois aqui é garantido o contacto elétrico entre esses componentes. Este processo em particular deve cumprir determinadas especificações.

A abordagem inicial de controlo de qualidade por parte da empresa foi medir todos os componentes produzidos para garantir que todas as peças enviadas para os clientes cumprem as especificações acordadas. Esta abordagem oferece um elevado nível de confiança aos clientes, no entanto, as peças que não cumprem as especificações são consideradas sucata e frequentemente não é claro qual a causa da produção dessas peças não conformes com as especificações. Além disso, só é considerado que existe algo fora do normal depois de se produzir três peças consecutivas para sucata, o que leva à paragem da máquina e não existe qualquer aviso com mais antecedência. Assim não é possível ter um controlo robusto do processo, o que não agrada aos clientes.

Desse modo surge a necessidade de um sistema que possa monitorizar o estado do processo, respondendo rapidamente no caso de problemas, evitando a produção de sucata e os desperdícios associados. Além disso, existe mais confiança, tanto por parte da empresa como dos clientes, em que o processo vai funcionar conforme esperado no futuro e que eventuais problemas serão detetados rapidamente reduzindo o seu impacto.

1.2 BorgWarner Viana

A BorgWarner Inc. é uma empresa que tem como área de negócio o desenvolvimento, produção e venda de componentes para a indústria automóvel. Lida principalmente com componentes integrantes de sistemas de propulsão e transmissão.

Na Figura 1 destacam-se alguns indicadores da situação da empresa no final de 2017:

- 9.8 mil milhões de dólares em vendas consolidadas;
- cerca de 29 000 colaboradores a nível global a 31 de dezembro de 2017;
- 66 localizações em 17 países;
- Fornece os mercados de veículos: ligeiros, pesados, fora de estrada e após-venda.



Figura 1 - Indicadores operacionais (BorgWarner Inc. 2018)

Um dos principais pilares desta organização é a diversidade, desde as tecnologias, até às pessoas, passando por localização geográfica das fábricas e dos clientes. Na Figura 2 é apresentado um resumo das vendas de 2016 para os vários clientes e mercados.

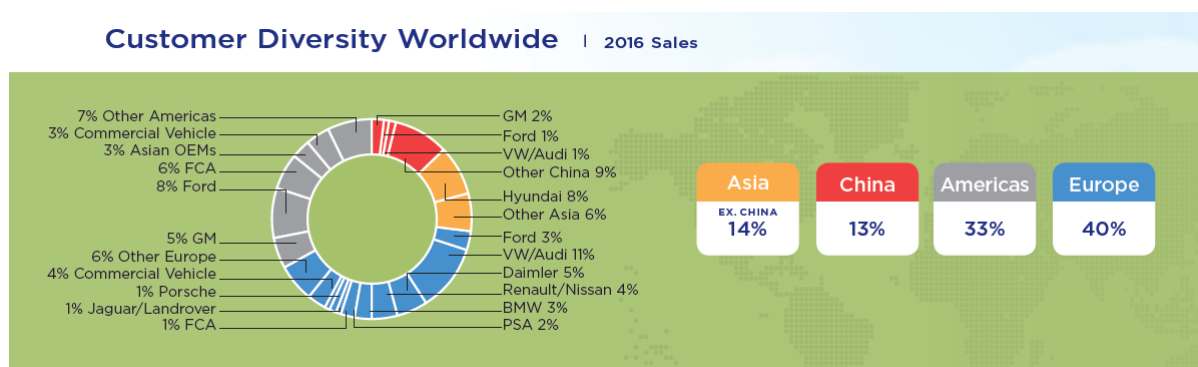


Figura 2 - Distribuição de vendas por clientes em 2016 (BorgWarner Inc. 2018)

A fábrica da *BorgWarner Emissions Systems*, Viana, apresentada na Figura 3 foi inaugurada em 2014, integrada no parque industrial de Lanheses, em Viana do Castelo. Esta unidade foca-se na produção de componentes para a redução de emissões poluentes, no sentido de auxiliar os seus clientes a produzirem automóveis com menor impacto ambiental e cumprirem as legislações cada vez mais exigentes neste domínio, acompanhada de uma redução no consumo de combustível. Pretende-se atingir estes objetivos não pela redução do desempenho dinâmico dos automóveis, mas sim com inovação tecnológica, aumentando assim a qualidade dos produtos com impacto mais reduzido para o ambiente.



Figura 3 – BorgWarner em Viana do Castelo (BorgWarner Inc. 2018)

Os produtos em comercialização enquadram-se nas seguintes categorias: GPCM (*Glow Plug Control Module*) ou módulos de controlo eletrónico de velas de incandescência, *coolers* EGR (*Exhaust gas recirculation*), tubos para circulação de fluidos e válvulas para ativação dos circuitos EGR (BorgWarner Inc., 2018).

1.3 Objetivos do projeto

A BorgWarner Viana é uma empresa em crescimento e que se foca na sua melhoria contínua e para isso, são definidos indicadores anuais, para medir o estado de funcionamento da empresa e criar objetivos para o futuro, de que se destacam os seguintes:

Redução de peças não conformes com as especificações

Um ponto importante para assegurar a eficiência da produção é um baixo nível de sucata, resultando daí uma boa rentabilidade dos investimentos. A empresa definiu para 2018 um objetivo geral de 0,50 % de peças produzidas enviadas para sucata. Na Tabela 1 pode observar-se alguns dados relativos à linha objeto deste trabalho relativos à produção efetuada em 2017 (ano de arranque da linha) e à previsão para 2018.

Tabela 1 - Objetivo de redução de sucata para 2018 (BorgWarner Inc. 2018)

7E07 K9K+DVNeo	Quantidade vendida	Sucata (%)
2017 resultados	2.789	3,28
2018 objetivo	444.788	0,50

Verifica-se que é pretendida uma redução significativa na percentagem de sucata, o que se explica pelo facto de a linha estar num estado de desenvolvimento anterior a produção em série. É por isso importante analisar e melhorar a capacidade do processo para garantir que no futuro a quantidade de sucata produzida vai ser reduzida.

Reclamações de clientes

Outro ponto importante para melhorar a qualidade dos produtos é diminuir o número de reclamações ou peças rejeitadas pelos clientes. Como se observa na Figura 4, no ano 2017 a quantidade de peças rejeitadas pelos clientes em GPCM foi 38 PPM, sendo que este valor engloba todas as linhas de produção de GPCM na área de eletrónica. Assim, para 2018 o objetivo é melhorar este indicador e para isso é necessário garantir um controlo rigoroso dos processos e, por sua vez, uma quantidade reduzida de peças não conformes com as especificações. Isso permite aumentar a confiança dos clientes (atuais e potenciais) e ganhar novos projetos, o que é fundamental para a sustentabilidade da empresa.

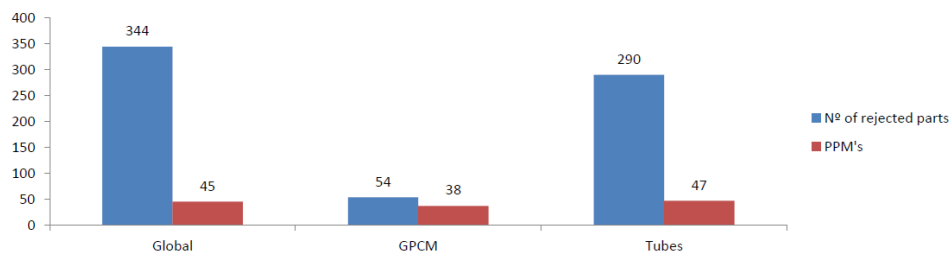


Figura 4 - Quantidade de peças rejeitadas em 2017 (BorgWarner Inc. 2018)

Projeto de dissertação

Este projeto foca-se na implementação de um sistema de controlo estatístico de processo em tempo real numa linha de produção de GPCM (módulos de controlo eletrónico de velas de incandescência), com algumas recomendações para o alargamento do sistema a outros processos dentro da fábrica. O principal resultado esperado com esta melhoria é obter um melhor controlo do processo, resultando na redução da quantidade de sucata produzida e retrabalho necessário, aumentando assim a eficiência e reduzindo custos. Isto será possível mudando de uma atitude reativa, onde se atua quando se atinge uma determinada quantidade de peças rejeitadas, para uma atitude preditiva e preventiva, onde assim que seja detetado um desvio nos resultados do processo são ajustados alguns parâmetros de entrada.

O ponto de partida é a medição de um parâmetro resultante do processo, de onde resulta a aprovação ou rejeição de cada peça. A partir disto pretende-se desenvolver um sistema capaz de analisar estatisticamente o processo, a uma frequência o mais próximo possível de tempo real. Isto é, a cada peça produzida e medida é atualizado o estado do processo e no caso de algum desvio fora do normal é enviado um aviso. Isto permite ir além do controlo e compreender qual é a causa dos problemas, não só no caso de se produzirem peças rejeitadas, mas também no caso de se produzirem consistentemente peças num processo significativamente descentrado, o que aumenta a probabilidade de se produzir uma peça não conforme com as especificações. Para isto o objetivo é atingir valores de rejeição inferiores a 0,50% relativamente às peças produzidas e índices de capacidade de processo “Cpk” superiores a 1,67.

Para implementar este sistema serão recolhidos os dados resultantes da medição das peças e a partir disso será necessário automatizar a leitura desses dados, a sua análise estatística e criar um sistema de monitorização visual, com alertas no caso de anomalias.

Um objetivo complementar passa por explorar os softwares RapidMiner e Qlik Sense no sentido de compreender qual a sua potencial utilidade dentro da empresa.

1.4 Método seguido no projeto

Para a organização do trabalho desenvolvido foi utilizada a metodologia DMAIC, habitualmente usada na empresa, nomeadamente em projetos de seis sigma. As etapas do projeto são:

Definir

- Conhecer o funcionamento da empresa e o enquadramento do processo a analisar;
- Fazer um levantamento da situação inicial;
- Definir detalhadamente o processo *press fit*, indicadores de qualidade e parâmetros de entrada ajustáveis;
- Definir detalhadamente os dados a recolher do processo e qual o formato;

Medir

- Contar a quantidade de componentes inicialmente produzidos e, entre estes, os rejeitados;
- Identificar e medir parâmetros críticos do processo.

Analisar

- Analisar estatisticamente os dados recolhidos, possivelmente em tempo real;
- Desenhar cartas de controlo e respetivos limites;
- Desenhar e implementar um sistema de leitura, processamento e visualização de dados para controlo estatístico em tempo real;
- Escolher software e hardware a utilizar.

Implementar melhorias

- Instalar o sistema na linha de produção;
- Alertar caso o processo passe a estar fora de controlo, com eventual contacto para a equipa de manutenção;
- Ajustar os parâmetros da máquina de modo a corrigir desvios no processo, através de indicações para a equipa de manutenção ou eventualmente por ajuste automático.

Controlar

- Testar funcionamento do sistema conforme o esperado;
- Seguimento da quantidade de componentes rejeitados;
- Comparação com os valores inicialmente medidos;
- Análise de redução de custos e aumento da qualidade e satisfação do cliente.

1.5 Estrutura da dissertação

No capítulo 2 faz-se uma breve revisão bibliográfica sobre os principais conceitos de CEP (Controlo estatístico de processo), nomeadamente cartas de controlo. Aqui explica-se qual o seu objetivo, funcionamento e diferenças entre as ferramentas mais usadas. Além disso são revistos os índices de capacidade de processo, a metodologia de organização de projetos DMAIC e os programas utilizados.

No capítulo 3 analisa-se a situação inicial da linha de produção, com especial foco no processo de cravação e respetivo sistema de medição e controlo de qualidade, incluindo a sua validação.

No capítulo 4 explica-se detalhadamente o sistema de controlo estatístico desenhado e implementado, incluindo programas e equipamentos usados e os principais processos que definem este sistema.

No capítulo 5 analisa-se o desempenho do processo, identificam-se alguns problemas, possíveis causas, oportunidades para melhorias e soluções implementadas.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões retiradas do trabalho desenvolvido e propostas para trabalhos futuros.

No final do documento há uma secção de anexos, referenciados ao longo do texto, que tem por objetivo manter a simplicidade e facilitar a leitura, sem deixar de incluir informação de análises e descrições mais detalhadas.

2 Revisão bibliográfica: O Controlo Estatístico de Processo

Atualmente os mercados são cada vez mais abertos e globais pela crescente facilidade nos transportes e redução das barreiras culturais e políticas. Isto aumenta a concorrência entre organizações com o mesmo mercado alvo e produtos equiparáveis. Assim, para assegurar a sua sustentabilidade, estas devem ser cada vez mais eficientes, operando com elevados níveis de qualidade ao menor custo possível. A indústria automóvel tende a ser das mais competitivas, o que leva a que seja uma das mais inovadoras e na qual se assiste a mudanças rápidas para se adaptar a novas exigências.

Para se obter uma baixa quantidade de peças rejeitadas por não conformidade com as especificações é necessário um controlo apertado de certos parâmetros que se revelem críticos. Só assim é possível compreender o estado atual de um processo, controlá-lo e implementar melhorias no seu funcionamento. Neste sentido, para garantir que um produto comercializado cumpre os requisitos e as expectativas dos clientes, é necessário que o seu processo produtivo seja estável e tenha boa repetibilidade. Isto é, os seus parâmetros críticos devem ter pouca variabilidade e estar centrados no alvo. Desta forma é mantida a sua qualidade e fiabilidade, continuamente (Automotive Industry Action Group 2005).

A produção de peças defeituosas leva a uma necessidade de retrabalho ou produção de sucata. Isto aumenta o tempo de produção, recursos materiais e humanos utilizados, reduzindo a eficiência e aumentando os custos. No sentido de melhorar a qualidade dos processos surge a necessidade de obter um conhecimento mais aprofundado dos mesmos.

Um bom método para atingir o objetivo de melhorar a qualidade passa pela análise estatística dos processos. Esta análise é muito mais eficaz se for feita em tempo real e com a rápida evolução tecnológica surgem sistemas capazes de a realizar. Assim é mais fácil atuar preventivamente nos parâmetros do processo e impedir que sejam produzidas peças não conformes com as especificações (Lettiere, 2012).

Daí surge a tendência da indústria 4.0 que tem como objetivo ajustar os parâmetros de um processo automaticamente, com base num histórico de dados medidos e registados anteriormente.

Para obter este controlo pode recorrer-se ao CEP (*controlo estatístico do processo*) que tem como objetivo orientar e documentar as medições e análises necessárias. Assim é possível ter um conhecimento mais detalhado dos processos, atuando objetivamente na origem dos problemas. Este conceito baseia-se numa coleção de ferramentas, entre as quais se destacam sete principais (Montgomery 2009):

1. Histograma
2. Folha de verificação
3. Diagrama de Pareto
4. Diagramas de causa-efeito (espinha de peixe ou Ishikawa)
5. Gráficos de dispersão
6. Diagrama de Dispersão
7. Carta de controlo

2.1 Cartas de controlo

As cartas mais úteis para o processo que se abordará ao longo deste projeto de Dissertação são as cartas de controlo, inicialmente desenvolvidas por Walter A. Shewhart nos anos 20 do século XX na *Bell Telephone Laboratories*. As cartas de controlo são uma ferramenta útil para monitorização de processo, indicando se a sua variabilidade é a esperada, relativamente às especificações definidas ou a um histórico de um determinado período. É possível detetar um desvio nos parâmetros do processo, quando um dos pontos sai fora dos limites de controlo. Esta é uma forma de análise de dados simples, rápida, visual e intuitiva sendo, por isso, uma boa forma de visualização de dados numa linha de produção.

Uma carta de controlo é um gráfico que mostra a evolução de um conjunto de dados ao longo do tempo ou do número de amostras. Estes dados podem em algumas situações ser agrupados em subgrupos, em função do dia, turno ou operador na altura da medição, por exemplo.

O gráfico representado na Figura 5 contém uma linha central e limites de controlo superior e inferior (LC, LSC e LIC, respetivamente). A linha central é o alvo onde se pretende que esteja a medida em análise. Os limites de controlo servem de aviso caso o processo sofra um desvio, nesta situação a sua causa deve ser investigada e corrigida. Assim o uso sistemático destas cartas é uma boa forma de monitorização de um processo. No caso das cartas de controlo que analisam as médias de subgrupos os limites de controlo são definidos por (Montgomery 2009):

$$LSC = \mu + L * \sigma \quad (2.1)$$

$$LC = \mu \quad (2.2)$$

$$LIC = \mu - L * \sigma \quad (2.3)$$

Onde:

μ . é a média do processo

σ . é o desvio padrão das médias das amostras ou subgrupos e

L. é o número de desvios padrão que define a distância dos limites de controlo à linha central

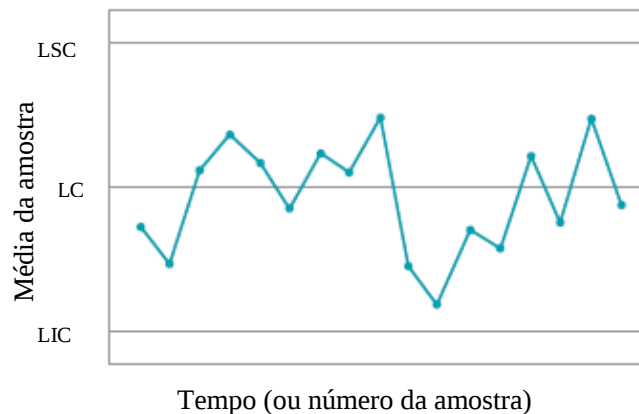


Figura 5 - Exemplo de carta de controlo (adaptado de Montgomery 2009)

Nas cartas de controlo estabelece-se uma divisão entre causas comuns de variação que resultam da variabilidade natural de qualquer processo e causas assinaláveis que evidenciam um desvio significativo em algum dos parâmetros do processo. O objetivo é identificar variações no processo devido a causas assinaláveis e corrigir as causas, sem que o resultado seja afetado pelas causas comuns de variação presentes (Sundholm, 2015).

Escolher os limites de controlo é um exercício de equilíbrio. Por um lado, afastar os limites da linha central diminui o risco de um erro tipo I, isto é, o risco de se obter um ponto fora dos limites de controlo, indicando que o processo não está em controlo, quando na realidade não existe qualquer causa assinalável. No entanto, esta ampliação dos limites aumenta simultaneamente o risco de um erro tipo II, isto é, o risco de se obter um ponto dentro dos limites quando na realidade o processo está fora de controlo. Por outro lado, mover os limites de controlo para mais próximo da linha central tem o efeito oposto, ou seja, aumenta o risco de erro tipo I enquanto que o risco tipo de erro II é diminuído. Para uma aplicação eficiente desta ferramenta devem ser utilizadas regras que garantam o destaque de desvios com impacto económico relevante (Montgomery 2009).

É importante fazer uma distinção entre variáveis (dados contínuos) e atributos (dados discretos). São usadas cartas de controlo distintas em função da categoria da informação usada. As cartas de controlo podem ser construídas com valores individuais ou divididas em subgrupos, por exemplo com diferentes operadores, lotes de material, dias da semana ou *setups*. Os gráficos R e S analisam a dispersão dentro de cada subgrupo, sendo que se usa o R para grupos de 8 ou menos elementos e o S para mais do que 8 elementos. Se a dispersão dentro dos subgrupos estiver fora de controlo a análise das suas médias não será muito fiável, caso contrário pode-se prosseguir para aquela análise. O gráfico “Xbar” analisa a variação da média dos subgrupos ao longo do tempo, assim torna-se mais fácil detetar causas assinaláveis de variação. As cartas “Xbar-R” e “Xbar-S” são duas cartas que analisam simultaneamente dispersão e valores médios. Os limites de controlo do gráfico “Xbar” são calculados a partir dos valores de dispersão obtidos nas cartas R ou S. Normalmente, obtém-se resultados representativos da população para, pelo menos, 25 subgrupos com, pelo menos, 4 elementos cada.

No caso da indústria automóvel, estas cartas podem ser úteis para monitorizar uma determinada característica de um produto fornecido a uma linha, de um produto produzido ou um parâmetro de um processo.

Caso não seja possível usar uma carta S por não existirem subgrupos lógicos (por exemplo, no caso de testes destrutivos ou para níveis de produção baixos), pode recorrer-se à carta “I-AM”. Esta carta são duas cartas juntas: a carta “I” serve para analisar valores individuais, deve testar-se a hipótese de assumir uma distribuição normal. Por defeito os limites de controlo são definidos a mais ou menos 3 desvios padrão de distância da linha central, isto é, $L=3$ de acordo com a equação (2.1). Para analisar a variabilidade equivalente à dispersão dentro dos subgrupos (neste caso de tamanho igual a 1) é usada a carta “AM”. Esta carta requer que os dados sigam uma distribuição normal. Os valores analisados correspondem à amplitude móvel que mostra a diferença entre valores sucessivos, sendo calculada através da seguinte expressão:

$$R_i = \text{Max}[x_i, \dots, x_{i-w+1}] - \text{Min}[x_i, \dots, x_{i-w+1}], \text{ para } i = w, \dots, n \quad (2.4)$$

Onde:

- R_i . é a amplitude móvel número i
- x_i . são as medidas registadas
- n. é o número total de observações

Regressando às cartas “I” de valores individuais, existem duas alternativas para calcular os limites de controlo. Para processos estáveis é definido o desvio padrão esperado e depois é verificada a correspondência dos resultados. Para processos com maior variabilidade é calculada uma estimativa dinâmica do desvio padrão usando, entre outras opções, a amplitude móvel média, através das seguintes expressões:

$$\sigma_{dentro} = \frac{Rbar}{d_2(w)} \quad (2.5)$$

Onde:

- σ_{dentro} . é o desvio padrão dentro dos subgrupos
- w. é o número de observações usadas na amplitude móvel, normalmente $w=2$ (Wheatley 2015)
- $d_2(w)$. é o valor esperado da amplitude de n observações de uma população normal com $\sigma = 1$. No **ANEXO A: Tabela de valores de d2** podem ser consultados valores para esta constante ("Unbiasing constants d2(), d3(), and d4()" 2016).
- Rbar é a amplitude móvel média, calculada por:

$$Rbar = (R_w + \dots + R_n) / (n - w + 1) \quad (2.6)$$

(Wheatley 2015)

Por defeito é usado um comprimento da amplitude móvel igual a 2, assim são analisadas as diferenças entre pares de observações sucessivos.

As cartas para valores individuais também são usadas no caso de processos com inspeção e medição automática feitas a todas as peças. Aqui não há base lógica para a formação de subgrupos (Montgomery 2009).

Fases de implementação de cartas de controlo

A implementação de cartas de controlo em tempo real, por exemplo numa linha de produção industrial, deve seguir duas fases distintas. Numa primeira fase, quando o processo ainda está em desenvolvimento, normalmente são mais frequentes as causas assinaláveis de variação e o processo não é muito estável. Assim é difícil calcular limites de controlo fiáveis, portanto utiliza-se uma estimativa da variabilidade recorrendo à amplitude média móvel.

Numa segunda fase, quando a maior parte das causas assinaláveis de variação foram corrigidas, existe um volume de produção elevado e o processo é estável ($Cpk > 1,33$). Neste caso é possível calcular limites de controlo com fiabilidade partindo de um histórico de dados e de seguida verifica-se se a produção futura cai dentro dos limites esperados. Para processos muito estáveis poderá ser mais eficaz utilizar critérios adicionais (Montgomery 2009).

Critérios adicionais para a deteção de causas assinaláveis

Numa carta de controlo, o critério mais usado para detetar a presença de causas assinaláveis que levam a processos fora de controlo é a presença de um ponto fora dos limites de controlo. No entanto este critério é muito pouco sensível a pequenas variações no processo, inferiores a cerca de 1,5 vezes o desvio padrão, assumindo que todas elas são variações naturais do processo. Ainda assim, há situações em que é clara a presença de desvios provenientes de causas assinaláveis, mesmo com os valores medidos mantendo-se dentro dos limites de controlo.

No sentido de detetar estas variações, existem critérios adicionais que podem ser aplicados. É importante notar que estes critérios não devem ser usados simultaneamente pois isso levaria a uma sensibilidade exagerada e um custo de qualidade desnecessário devido a falsos alarmes, e os técnicos de manutenção despenderiam tempo em ajustes nas máquinas. Assim sendo, estes critérios devem ser usados apenas se forem adequados para cada processo em concreto.

Por exemplo, numa primeira fase de desenvolvimento é normal existir um maior número de causas assinaláveis e estas têm um maior impacto, por isso os limites de controlo devem ser suficientes para detetar a maioria das causas assinaláveis. Já na segunda fase do processo, em que já se entrou em produção em série e os principais problemas foram resolvidos, é normal que as causas assinaláveis não provoquem variações tão acentuadas. Assim, torna-se útil aplicar critérios adicionais para aumentar a sensibilidade, garantindo que o processo mantém uma boa performance produzindo peças com qualidade.

São apresentados a seguir alguns exemplos de critérios que podem ser usados:

- 1 ponto a uma distância superior a 3 desvios padrão da linha central (fora de controlo);
- 7 pontos seguidos do mesmo lado da linha central;
- 6 pontos seguidos em ordem crescente ou decrescente;
- 14 pontos seguidos alternados acima e abaixo da linha central;
- 2 em 3 pontos a mais de 2 desvios padrão da linha central (do mesmo lado);
- 4 em 5 pontos a mais de 1 desvio padrão da linha central (do mesmo lado);
- 15 pontos seguidos a menos de 1 desvio padrão da linha central (ambos os lados);
- 8 pontos seguidos a mais de 1 desvio padrão da linha central (ambos os lados).

(Automotive Industry Action Group 2005)

Em alternativa à adição de critérios adicionais, para o caso de processos muito estáveis onde se pretende detetar variações reduzidas, pode recorrer-se a cartas de controlo alternativas, por exemplo as apresentadas no **ANEXO B: Soma cumulativa e média móvel exponencialmente ponderada**.

2.2 Índices de capacidade de processo

Frequentemente são utilizados os seguintes indicadores para medir a capacidade do processo: “Cp”, “Cpk”, “Pp” e “Ppk”.

O “Cp” e o “Cpk” medem a capacidade do processo analisando a média dos desvios padrão dos subgrupos. Assim não são sensíveis a variações entre subgrupos. Um índice “Cp” alto significa que os dados estão concentrados em torno da média da distribuição. Um índice “Cpk” alto, além disso, indica que os dados estão centrados no alvo (média dos limites de especificação), portanto estão longe dos limites de especificação. Em baixo apresentam-se as expressões usadas para calcular os índices referidos:

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6 \times \sigma_{dentro}} \quad (2.7)$$

$$Cpk = \min \left\{ \frac{LSE - \mu}{3 \times \sigma_{dentro}}, \frac{\mu - LIE}{3 \times \sigma_{dentro}} \right\} \quad (2.8)$$

Onde:

σ_{dentro} . é a média dos desvios padrão dentro dos subgrupos (calculado em 2.1)

μ . é a média global do processo

LIE. é o limite inferior de especificação e

LSE. é o limite superior de especificação

“Pp” e “Ppk” medem o desempenho do processo. A AIAG (*Automotive Industry Action Group*) recomenda utilizar estes indicadores para processos que não estão em controlo. No entanto, no caso de processos fora de controlo esta análise de capacidade de processo é de baixa precisão e assim sendo, não deve ser usada para fazer previsões de capacidade de processo futuras, logo a utilidade das mesmas é bastante limitada (Automotive Industry Action Group 2005).

Estes indicadores analisam os dados globalmente, sem separação por subgrupos, assim são sensíveis a variações entre subgrupos. De forma semelhante à capacidade de processo, o índice “Pp” mede a variabilidade dos dados e o “Ppk” mede também a sua centralidade, ou seja, a distância aos limites de especificação. Considerando que idealmente não haveria diferenças entre os subgrupos, isto é, para diferentes condições de funcionamento de um processo (na realidade verificam-se diferenças), os índices de capacidade de processo indicam a melhor situação possível se não houver variação entre subgrupos e os índices de desempenho indicam a situação atual com essa variação. Em baixo apresentam-se as expressões usadas para calcular os índices referidos:

$$Pp = \frac{LSE - LIE}{6 \times \sigma} \quad (2.9)$$

$$Ppk = \min \left\{ \frac{LSE - \mu}{3 \times \sigma}, \frac{\mu - LIE}{3 \times \sigma} \right\} \quad (2.10)$$

Onde:

σ_{global} . é o desvio padrão global e

μ . é a média global do processo

Para estes indicadores, um valor inferior a 1 indica que o processo não tem capacidade de corresponder às especificações e um valor superior a 1 indica que um processo é minimamente capaz. Normalmente é usado como valor de referência 1.33 para indicar um processo robusto, isto é, capaz de corresponder às especificações com fiabilidade (Montgomery 2009).

2.3 DMAIC

A metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) tem como objetivo agilizar a organização e seguimento de um projeto de melhoria da qualidade dentro de uma organização, através da definição de metas e verificação em pontos de controlo. Frequentemente associado a projetos seis sigma, esta metodologia pode ser aplicada a qualquer projeto de melhoria contínua.

A sua aplicação divide-se em 5 etapas pré-definidas, sendo que estas devem ser personalizadas para cada caso específico (Montgomery 2009):

- **Definir** – Identificar e validar as oportunidades mais relevantes para melhorias, definir as especificações requeridas, estabelecer tarefas, pessoas responsáveis e documentação;
- **Medir** – Determinar quais os pontos a medir, validar os instrumentos de medição, desenvolver sistema de medição de dados;
- **Analisar** – Monitorizar o comportamento de parâmetros críticos em relação ao expectável e identificar causas de eventuais problemas;
- **Implementar melhorias** – Desenvolver soluções possíveis, escolher a mais adequadas, garantir aprovação e implementar a solução final;
- **Controlar** – Garantir que o processo é à prova de erros, monitorizar e controlar parâmetros críticos, desenvolver planos de resposta rápida a situações fora de controlo.

3 Situação inicial

Neste capítulo faz-se uma descrição do estado inicial de funcionamento da linha de produção, com particular atenção ao sistema de medição e controlo da 1ª estação (*press fit*) e validação de instrumentos de medição, através da medição em laboratório e de um estudo GR&R (gage repeatability and reproducibility).

3.1 Descrição da linha de produção em análise

Este projeto foca-se na linha 7E07 dedicada à produção de GPCM (módulo de controlo eletrónico para velas de incandescência) para os motores Renault K9K e Ford DVNEO, com ligeiras diferenças. A sua função é controlar o funcionamento das velas de veículos diesel, ajustando parâmetros como o tempo de incandescência, a intensidade da corrente e temperatura, em função do regime de operação do motor e condições ambientes. Assim é possível obter um funcionamento mais eficiente, reduzindo emissões e consumos.

Os componentes iniciais para este processo são um PCBA (*Printed Circuit Board Assembled*), que faz o controlo eletrónico pretendido, um conector plástico, que protege os componentes eletrónicos e assegura a ligação física, e numa fase posterior é acrescentada uma tampa para isolar o produto. É apresentado na Figura 6 um exemplo do sistema de abastecimento de matérias primas à linha.



Figura 6 - Abastecimento à linha de PCBAs (esquerda) e conectores (direita)

A primeira estação da linha de produção, designada por *press fit*, consiste na montagem do PCBA no conector por meio de pinos metálicos com curvatura incluídos no conector e furos no PCB. Na Figura 7 apresenta-se um exemplo de um GPCM produzido na fábrica com o conector, PCBA, tampa e o detalhe dos pinos de ligação. Nesta montagem os pinos deformam-se e criam-se pontos de ligação que fazem o contacto elétrico e fixam os componentes fisicamente.

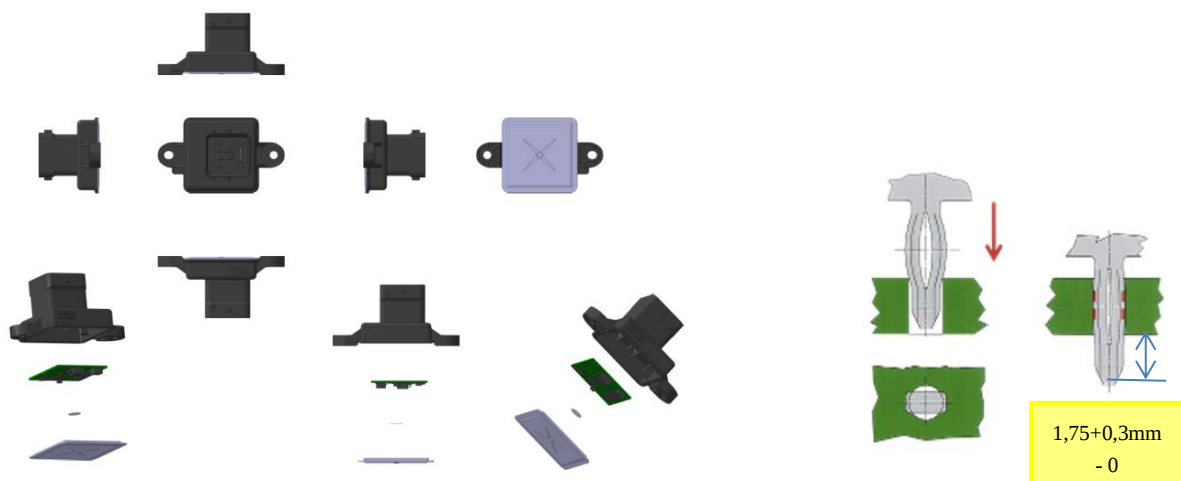


Figura 7 – Exemplo de GPCM com esquema dos pinos de ligação e especificação de altura (BorgWarner Inc. 2018)

Na Figura 8 é apresentada uma vista geral da parte da máquina de *press fit* acessível ao operador. Esta estação processa quatro peças em simultâneo em postos diferentes e um prato rotativo faz o transporte automaticamente entre eles, para isso há quatro suportes para peças designados por “ninhos”. No *setup*, estes ninhos são trocados de acordo com a referência da peça a ser produzida.



Figura 8 - Vista geral da máquina de *press fit*

A junção do conector com o PCBA é feita num processo de cravação, por pressão mecânica através de um cilindro hidráulico numa máquina automática, como se vê na Figura 9. São controlados vários parâmetros de entrada como a força e o deslocamento exercidos pela ferramenta, bem como a velocidade e aceleração.

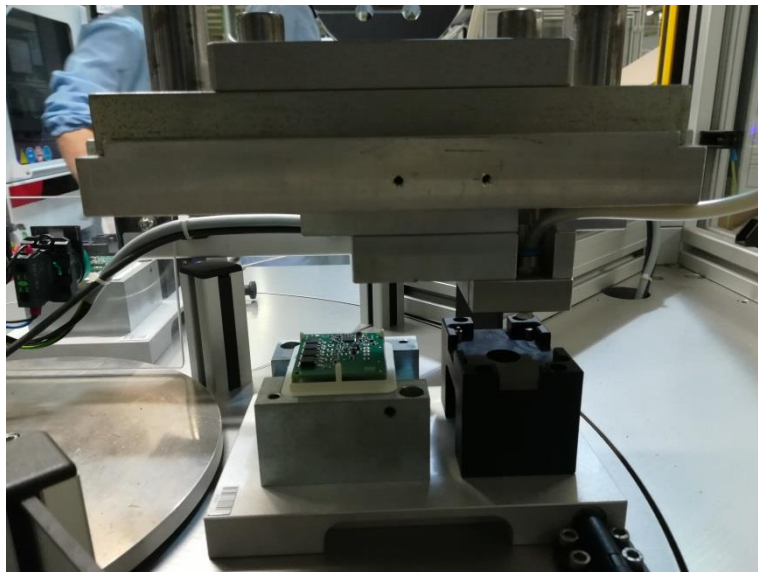


Figura 9 - Etapa de *press fit*

A verificação desta montagem é feita através da medida da altura livre de cada pino e a base do PCBA, utilizando um scanner laser Keyence LJ-G200 que faz uma leitura por varrimento, mostrado na Figura 10.

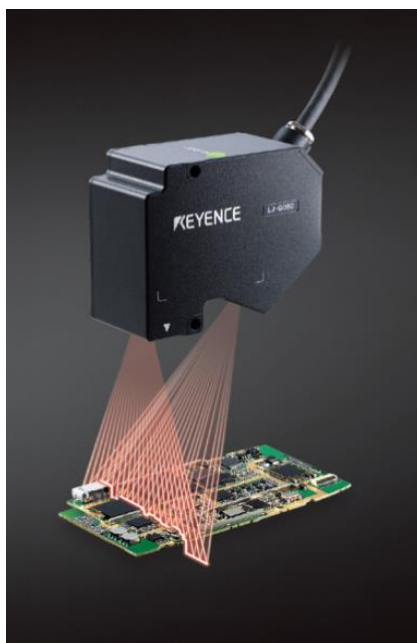


Figura 10 - Scanner laser Keyence LJ-G200

O sistema de medição utilizado na máquina é apresentado na Figura 11.

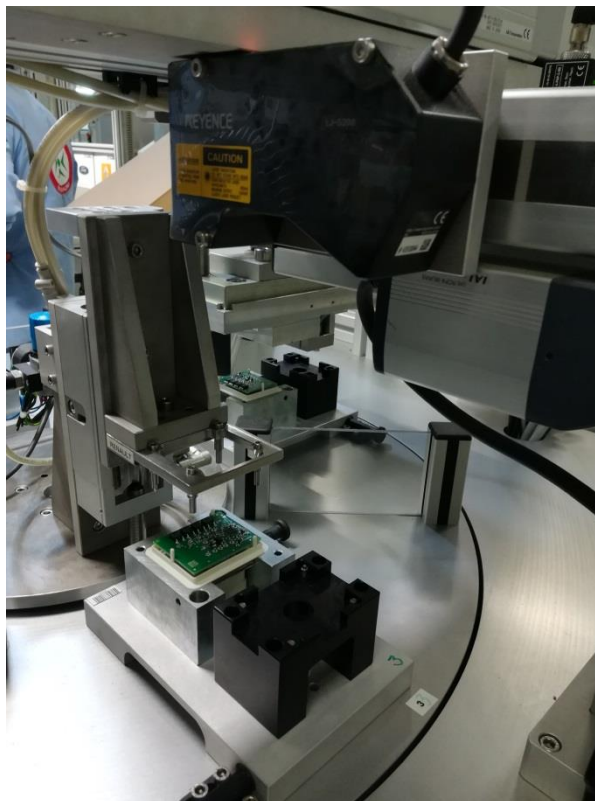


Figura 11 - Sistema de medição

Na Figura 12 é apresentado um componente do modelo Ford DVNeo com a sequência de medição. Esta medição é feita por varrimentos lineares em que são medidos vários pontos em cada perfil, correspondentes a cada pino. No caso da Ford é também medido o termofusível para garantir que não está acionado. O sensor move-se de um perfil para o próximo, isto é, primeiro é medida a linha com o termofusível (designada linha 1), depois a linha com 4 pinos (linha 5), de seguida para a linha central com 2 pinos (linha 4). Na linha mais abaixo, como os pinos têm uma orientação diferente (os três pinos centrais estão rodados 90°), é medido primeiro o perfil com os dois pinos exteriores (linha 3) e depois o perfil com os três pinos centrais (linha 2).

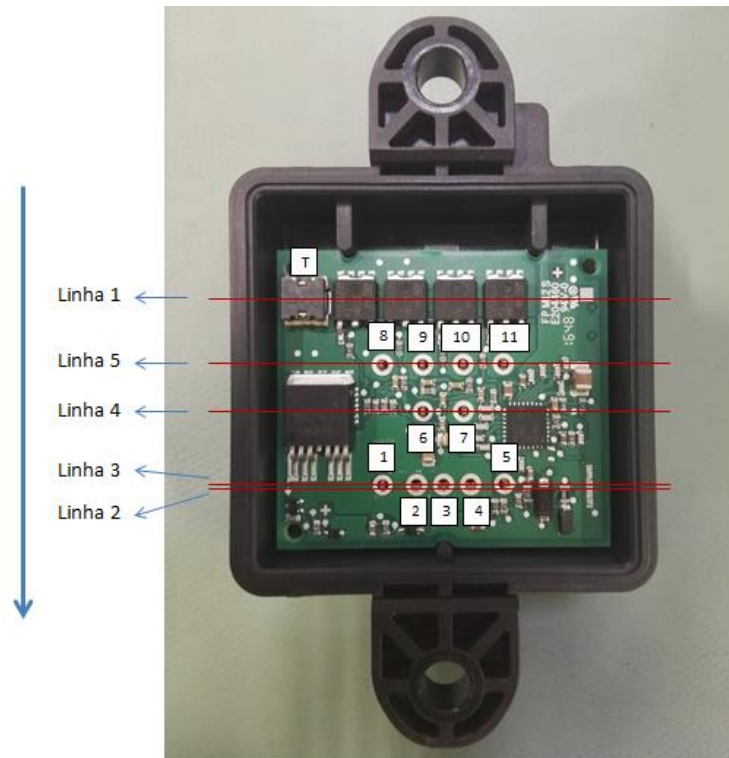


Figura 12 - GPGM Ford DVNEO com ordem de medição

Os limites inferior e superior de especificação no desenho de projeto da peça são 1,75 mm e 2,05 mm, respetivamente, para todos os pinos. No entanto, verificaram-se algumas dificuldades em conseguir cumprir estes limites nos testes iniciais da linha. Assim, os limites foram ampliados para 1,65 mm a 2,15 mm e a validação do processo foi realizada com estes limites, com o consentimento dos clientes. No início deste projeto, estes eram os valores limites utilizados. É fundamental garantir que, pelo menos, estas especificações são respeitadas para se reduzir ao mínimo a quantidade de retrabalho ou sucata produzida. Inicialmente, esta medida era apresentada num ecrã sendo os resultados obtidos do tipo “passa / não passa” para cada componente. Uma desvantagem desta abordagem (sem controlo estatístico) é que não é possível prever ou condicionar por ações preventivas o risco de se produzir peças não conformes. A inspeção é feita a 100% das peças produzidas e as peças não conformes com as especificações são separadas para um compartimento dedicado para posterior retrabalho e remedição. Quando forem rejeitadas 3 peças seguidas a máquina pára e é analisada a causa do problema.

O último processo desta etapa é uma gravação de um código DMC (*Data Matrix Code*) contendo informação relativa ao PCBA, mostrado na Figura 13. O tempo de ciclo deste posto é normalmente entre 13 e 14 segundos, sendo o gargalo o processo de *press fit* para a Renault e a medição para a Ford com diferenças entre 1 e 2 segundos entre estes.



Figura 13 - Etapa de gravação

A etapa seguinte consiste na aplicação de uma camada protetora líquida, seguida de verificação visual por parte de um operário com auxílio de luz ultravioleta. Depois a peça segue para um forno para secagem, onde aquela camada solidifica. Finalmente, é feita uma inspeção visual automática ou “AOI” (Automated optical inspection) com uma câmara de vídeo digital.

Na terceira etapa da linha é colocada uma tampa que sela o produto. A junção entre esta tampa e a cobertura plástica é feita por soldadura laser. Esta etapa é feita numa máquina em que o processo é automático com alimentação manual feita por um operador.

No fim da linha é feito um teste de estanqueidade e um teste funcional com testes no circuito elétrico. Aqui, os componentes produzidos são comparados com componentes padrão tipo “passa / não passa”. Estes testes são registados e filmados por câmaras para comprovar que os produtos saem da fábrica em boas condições de funcionamento. Finalmente são impressas algumas informações nas peças. Daqui as peças seguem para embalagem. Na Figura 14 é apresentada uma imagem da linha depois da estação de *press fit*.



Figura 14 – Visão geral da parte final da linha

3.2 Sistema de medição e controlo

Na sequência da produção dos “GPCM”, alguns clientes pedem análises de controlo estatístico dos processos produtivos, algo que a empresa não podia fornecer inicialmente, porque os dados dos testes eram enviados do sensor de medição para um ecrã, mas não estavam disponíveis para análise com outro software ou hardware e assim não era feito qualquer controlo estatístico. A única análise era a inspeção individual automática a 100% dos componentes. Têm existido alguns produtos que não passaram nestas inspeções de qualidade, devido a uma altura de um dos pinos fora dos limites de especificação, levando isto a uma necessidade de remediação e por vezes à rejeição da peça.

Os potenciais problemas de não cumprir esta especificação são existir um mau contacto elétrico entre o “PCBA” e os pinos metálicos do conector, o que pode resultar numa falha funcional da peça, ou em casos mais extremos o “PCBA” pode quebrar devido a excesso de aperto, acentuado pelas vibrações presentes nos automóveis, ou então este pode acabar por se desconectar. Logo aqui há um dilema porque, por um lado é necessário aplicar força suficiente no *press fit* para garantir a fixação do “PCBA” ao respetivo suporte com o contacto elétrico apropriado e, por outro lado, essa força não pode ser excessiva porque aí corre-se o risco de quebrar o “PCBA”.

No momento da análise da situação inicial em fevereiro de 2018, a verificação existente neste processo era a medição da altura de cada pino em cada conector, comparando-se esta medida com os limites de especificação. Num ecrã na linha, apresentado na Figura 15, aparece o valor da medição de um único pino por cada linha, um indicador “ok / não ok” para cada pino e um indicador “ok / não ok” geral para cada produto (este decide se a peça é aprovada ou rejeitada), em tempo real.

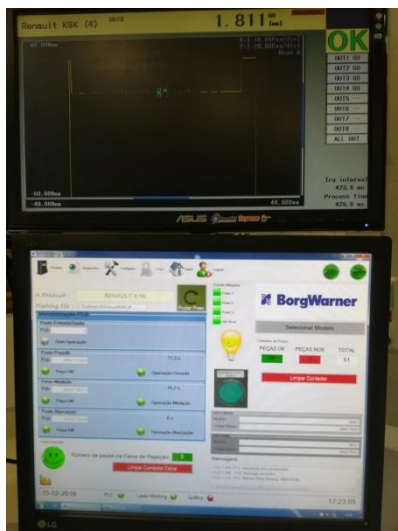


Figura 15 - Visualização dos resultados do sistema de medição e painel de controlo

Assim, seria útil a aplicação de uma ferramenta que permitisse analisar todos os valores da altura dos pinos, não só de um componente, mas de uma série de componentes anteriores e detetar tendências que se desviem da média do processo. Desta forma, seria possível atuar nos parâmetros da máquina, como força, deslocamento, velocidade e aceleração do cilindro, para corrigir a origem dos problemas antes de chegar ao ponto de produzir peças não conformes com as especificações. Este ajuste pode ser feito numa fase inicial pelo fornecedor da máquina ou pela equipa de manutenção e posteriormente por um sinal digital automático enviado em função dos dados medidos.

Considerando que existe sempre alguma variabilidade associada a praticamente todos os processos industriais, esta ferramenta seria particularmente útil no caso de, por exemplo, entrar um lote de “PCBA’s” com o valor do diâmetro dos furos para os pinos próximos de um dos limites das especificações e um lote de conectores com o valor da largura dos pinos próximo do limite contrário. Seria possível ajustar os parâmetros da máquina para compensar estes desvios, no entanto o *setup* da máquina não envolve qualquer ajuste nos seus parâmetros de entrada, apenas a troca de ferramentas. Ou, numa outra hipótese, poderia haver algum desvio nos parâmetros da máquina que necessite de ajuste. Nestes casos, isto poderia ser detetado logo nas primeiras peças, ajustando-se os parâmetros da máquina em conformidade. Assim prevê-se que a quantidade de componentes rejeitados possa ser reduzida quando se iniciar a produção em série.

3.3 Validação do instrumento de medição no *press fit*

Para compreender melhor quais poderão ser as origens de eventuais erros de medição, efetuou-se um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade “GR&R”. O objetivo é verificar se as medições se mantêm constantes para as mesmas condições e qual a ordem de grandeza da variabilidade introduzida pela utilização de 4 ninhos semelhantes. Mediram-se 5 peças, 3 vezes em cada ninho, retirando e reintroduzindo a peça na máquina entre medições.

No **ANEXO C: Validação do sistema de medição** apresentam-se detalhadamente os resultados dos testes efetuados em detalhe. Observando estes gráficos, a medição parece ter uma boa repetibilidade para o mesmo ninho. No entanto aparenta existir, para algumas condições, uma diferença significativa entre ninhos. Isto quando o valor real da medição está próximo de um dos limites pode levar a que algumas peças sejam rejeitadas erradamente ou que algumas peças não conformes com as especificações sejam aceites erradamente.

4 Desenho de um sistema de controlo estatístico de processo

No sentido de possibilitar o controlo estatístico de processo em tempo real, a solução proposta passa por montar na linha de produção um sistema com capacidade de processamento e visualização que permita analisar os dados em tempo real, bem como a visualização num ecrã de um histórico de dados. Assim será possível ter mais indicadores que permitam analisar tendências e assim compreender melhor o processo e eventuais alterações.

Na Figura 16 é apresentado um esquema do sistema de controlo estatístico criado. Existem na máquina sensores de força e deslocamento que enviam dados em formato de texto. A partir daqui foi desenvolvido um programa para transformar esses dados numa tabela, utilizando o *software* RapidMiner. Com isso, foi desenvolvida uma aplicação para visualização gráfica e análise estatística utilizando o *software* Qlik e um computador montado na linha de produção. No **ANEXO D: Programas usados para tratamento e análise de dados** são apresentados com mais detalhe os programas utilizados e as razões da sua escolha.

Para desenvolvimentos futuros do sistema se os dados forem disponibilizados diretamente numa tabela única para todas as peças, num formato .xls ou .csv, por exemplo, seria dispensável a utilização do RapidMiner. Outra aplicação interessante seria integrar conceitos de *machine learning* de modo a ajustar automaticamente os parâmetros de entrada em função dos resultados das medições, o RapidMiner seria uma boa ferramenta para esta aplicação.

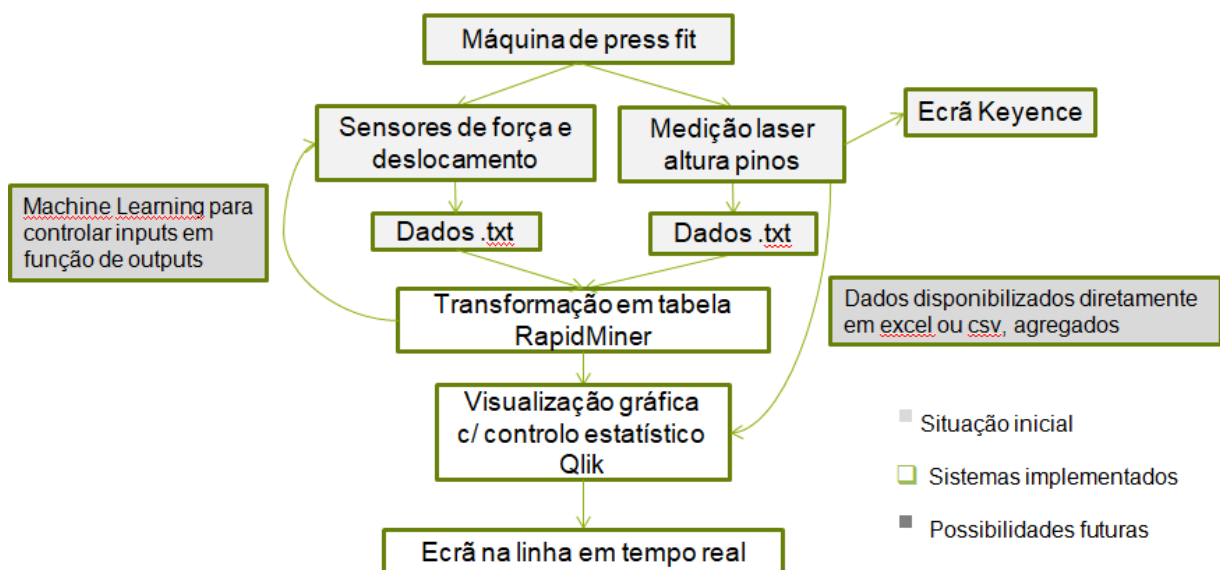


Figura 16 - Diagrama de funcionamento do sistema de CEP

4.1 Recolha de dados

Na Figura 17 apresenta-se um exemplo representativo do ficheiro onde os dados de cada peça são obtidos automaticamente na máquina de *press fit*, num formato que foi definido com o fornecedor da mesma.

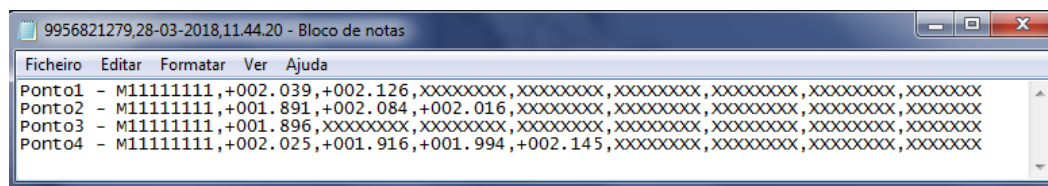


Figura 17 - Exemplo de dados a recolher na máquina

4.2 Tratamento de dados em RapidMiner

Utilizando o processo desenhado em RapidMiner, do qual se apresentam duas vistas exemplificativas na Figura 18 e Figura 19, é possível transformar os ficheiros de texto com os dados de entrada numa tabela com os valores em cada coluna, ordenados por ordem cronológica de medição. Além disso essa tabela é gravada num ficheiro .qvx, formato específico para leitura em Qlik. A tabela resultante do processo é apresentada na Figura 20.

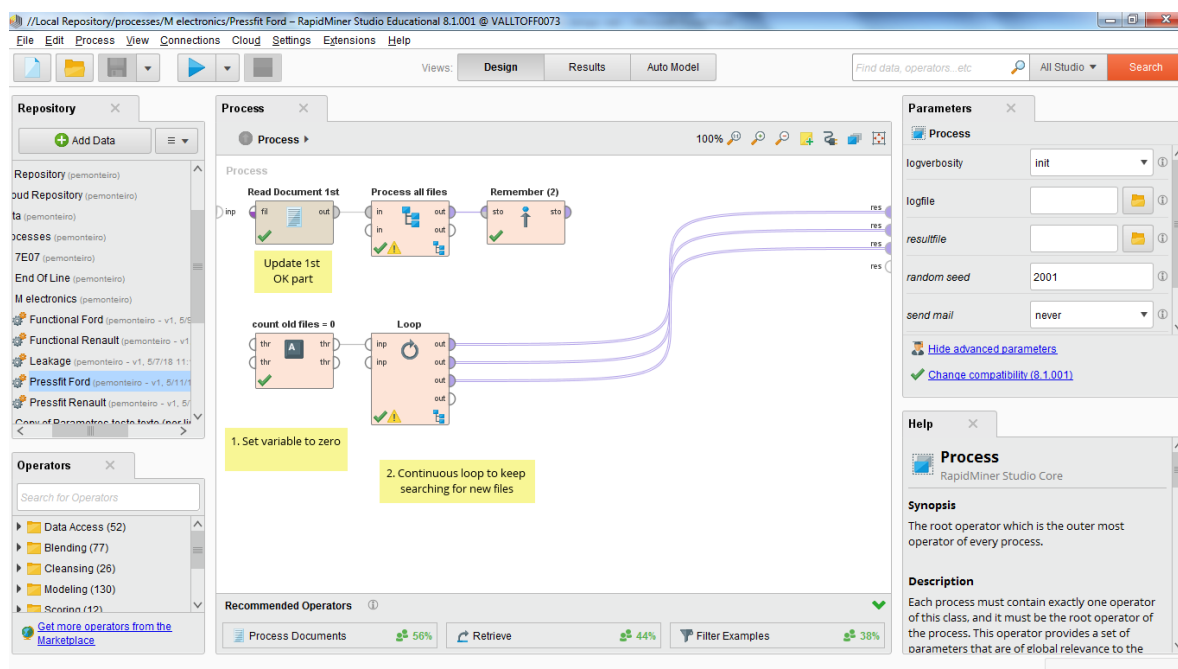


Figura 18 - Vista geral do processo usado para atualizar dados (RapidMiner Studio 8.1)

Desenho de um sistema de controlo estatístico num processo de cravação de componentes eletrónicos

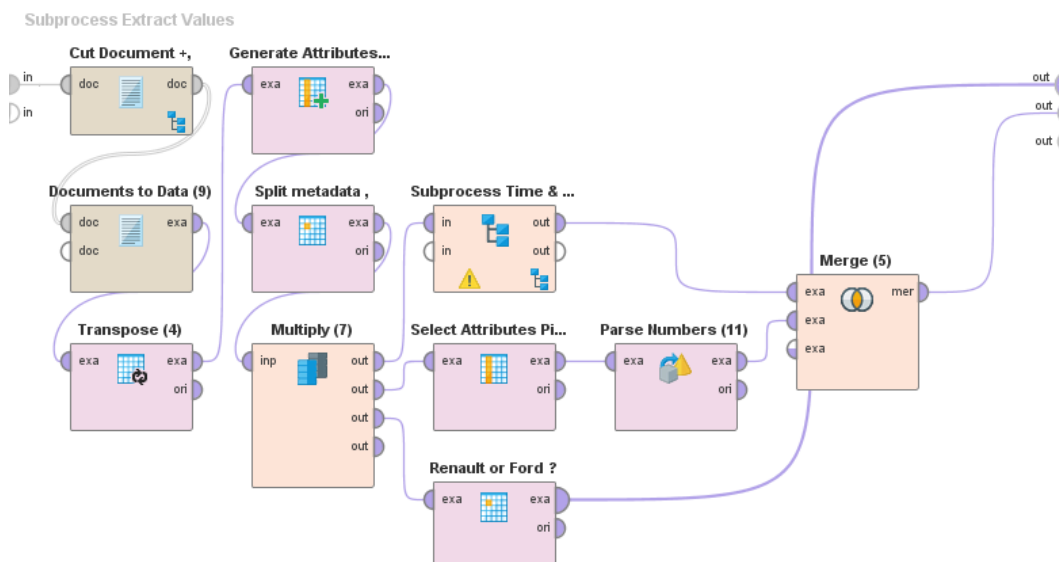


Figura 19 – Subprocesso para transformação de texto em tabela (RapidMiner Studio 8.1)

ExampleSet (189 examples, 1 special attribute, 14 regular attributes)

Filter (189 / 189 examples): all

Row No.	DMC	Deslocamen...	Força	Renault.Time	Renault.P1	Renault.P2	Renault.P3	Renault.P4	Renault.P5	Renault.P6	Renault.P7
1	0019604878	1.880	1274	May 9, 2018 8...	1.788	1.876	1.848	1.938	1.803	1.794	1.835
2	0019604871	1.840	1264.200	May 9, 2018 8...	1.930	2.017	1.910	1.998	1.916	1.889	1.947
3	0019604877	1.820	1283.800	May 9, 2018 8...	1.820	1.909	1.845	1.892	1.836	1.814	1.931
4	0019604874	1.830	1332.800	May 9, 2018 8...	1.823	1.844	1.832	1.951	1.828	1.793	1.824
5	0020877546	1.870	1254.400	May 9, 2018 8...	1.877	1.908	1.888	1.977	2.047	1.845	1.923
6	0020877542	1.830	1293.600	May 9, 2018 8...	1.751	1.890	1.876	1.941	1.835	1.911	1.831
7	0019606837	1.860	1274	May 9, 2018 8...	1.767	1.857	1.786	1.827	1.906	1.811	1.855
8	0019606834	1.890	1244.600	May 9, 2018 8...	1.809	1.922	1.889	1.999	1.799	1.856	1.872
9	0019606835	1.850	1225	May 9, 2018 7...	1.789	1.889	1.858	1.841	1.850	1.888	1.903
10	0019606849	1.840	1244.600	May 9, 2018 7...	1.808	1.899	1.801	1.828	1.881	1.847	1.820
11	0019606843	1.840	1176	May 9, 2018 7...	1.836	1.912	1.865	1.940	1.916	1.878	1.898
12	0019606846	1.890	1225	May 9, 2018 7...	1.774	1.923	1.834	1.845	1.904	1.839	1.809
13	0019606831	1.880	1225	May 9, 2018 7...	1.874	1.992	1.934	1.971	1.983	1.931	1.920
14	0019606842	1.870	1205.400	May 9, 2018 7...	1.801	1.891	1.859	1.939	1.889	1.885	1.868
15	0019606180	1.810	1225	May 9, 2018 7...	1.896	1.924	1.847	1.941	1.948	1.857	1.898
16	0019606164	1.800	1205.400	May 9, 2018 7...	1.848	1.955	1.872	1.902	1.803	1.829	1.864

Figura 20 - Tabela com os dados resultantes da medição (RapidMiner Studio 8.1)

4.3 Desenho de cartas de controlo

Como a medição é feita a todas as peças produzidas de forma automática, a carta mais apropriada é a I-AM que analisa valores individuais e amplitude móvel, como referido no capítulo 2.1 *Cartas de controlo*.

Na definição de limites de controlo é preciso ter em conta a possibilidade de ocorrência de erros tipo I e II e as suas consequências. No caso do processo de *press fit*, um erro do tipo I (considerar o processo fora de controlo erradamente) implica a paragem da máquina para realizar ajustes nos seus parâmetros de entrada quando na realidade isso não seria necessário. Por outro lado, um erro do tipo II (considerar o processo em controlo erradamente) pode levar à produção de peças não conformes com as especificações sem nenhuma ação preventiva. Perante este cenário pode parecer que é mais crítico o erro tipo I, já que a paragem da máquina com um tempo de ciclo na ordem dos 14 segundos leva a perda de produção de várias peças, o que é mais crítico do que a produção de poucas peças para sucata, decorrente do erro tipo II. No entanto um erro tipo II pode levar à produção de sucata e além disso pode ser necessário um ajuste da máquina o que leva à sua paragem, de forma semelhante ao erro tipo I. Considerando isto, seria mais crítico um erro tipo II.

Uma forma de reduzir significativamente o impacto de um erro tipo I e de erros tipo II em casos menos graves (leia-se com a produção de menos do que 3 peças consecutivas para sucata) é o ajuste automático de parâmetros de entrada na máquina. Isto permite que possam ser corrigidos desvios no processo sem a necessidade de paragem da máquina.

4.4 Visualização de dados em Qlik

A partir da tabela criada em RapidMiner, é possível através do Qlik criar um sistema de visualização gráfica. Como na Figura 21 foi criado um ecrã com 13 gráficos, para monitorizar a altura de cada pino, a força aplicada e o deslocamento, agrupados por peça e ordenados cronologicamente. Além disso são mostrados dois indicadores de estado para ver se o processo está em controlo e se todas as peças estão dentro de especificação e, caso não estejam, é indicado qual o pino que provocou a alteração de estado.

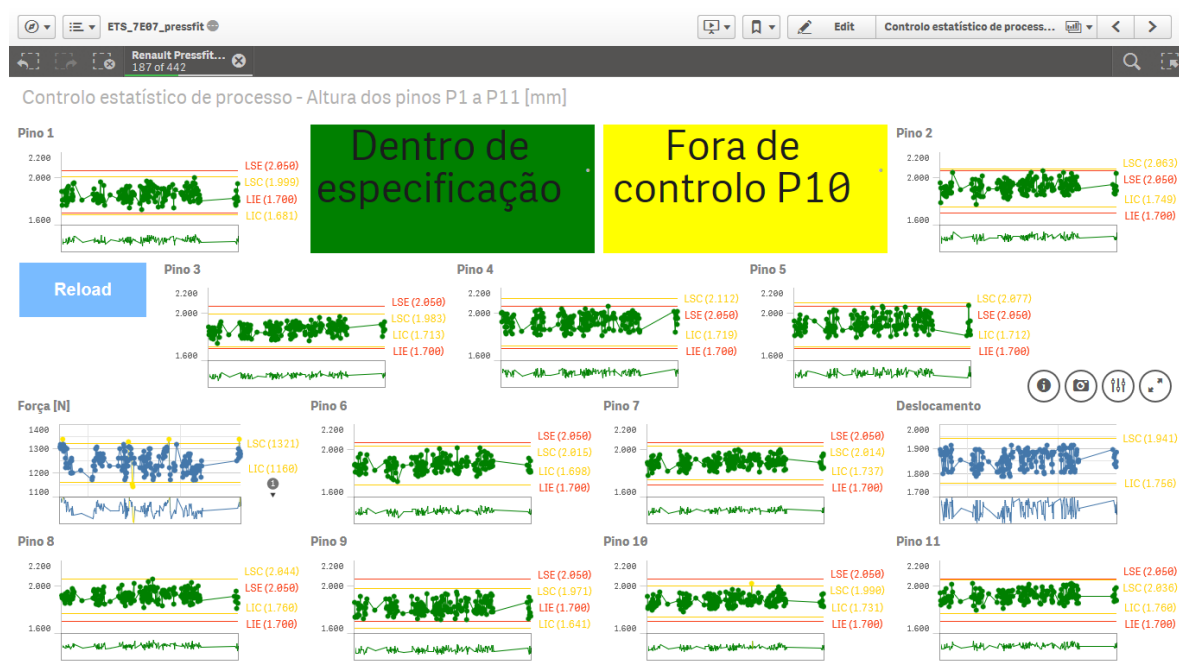


Figura 21 - Visualização de dados (Qlik Sense)

Foi adicionado um ecrã na linha para visualização do sistema de controlo estatístico, como pode ser observado na Figura 22.

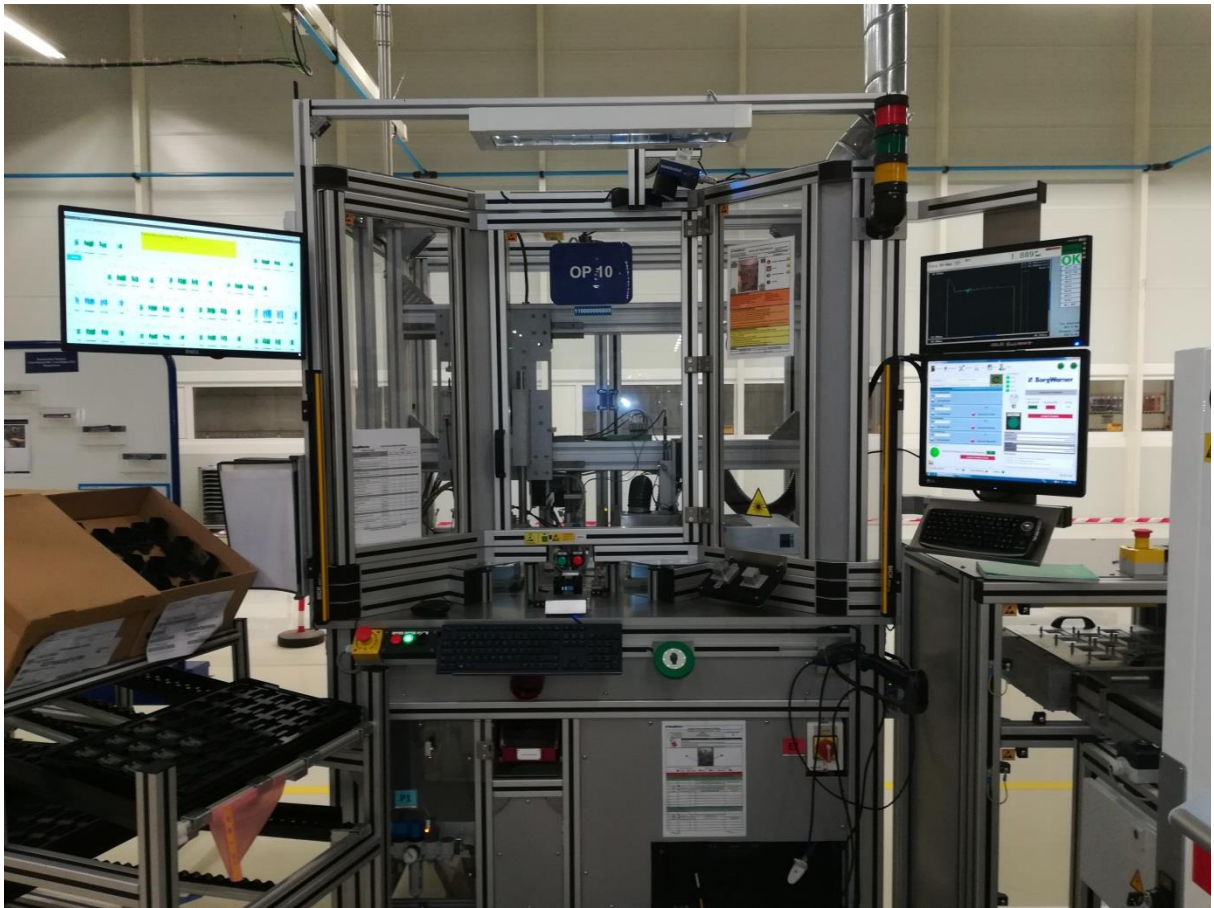


Figura 22 - Máquina de press fit com sistema de controlo estatístico

No **ANEXO E: Documentação do sistema de controlo estatístico de processo** é possível consultar um documento que explica o funcionamento e construção do sistema.

5 Soluções propostas e implementadas

Neste capítulo é feita uma análise de capacidade de processo no estado inicial do processo de *press fit*. Com uma melhor compreensão dos dados recolhidos foram detetados alguns problemas e levantaram-se causas possíveis. Daí foram sugeridas e implementadas algumas melhorias no processo, nomeadamente no sentido da redução da variabilidade que leva a uma melhor capacidade de processo e uma redução no tempo de ciclo.

5.1 Análise de capacidade de processo de *press fit*

No sentido de perceber a situação inicial do processo de *press fit* e respetiva capacidade de processo, registaram-se as medidas da altura dos pinos para uma amostra de componentes provenientes deste processo. Seguidamente analisaram-se estes dados através do software *Minitab*.

Foi feita uma análise separadamente para componentes (GPCMs) da Ford e da Renault. E para cada um foi feita inicialmente uma análise de capacidade global do processo, seguida de uma análise mais detalhada por linhas de medição.

Os gráficos e explicações mais detalhadas podem ser observados no **Anexo F: Análise da capacidade de processo inicial**. Resumidamente o principal problema é retratado na carta I-AM por linhas na Figura 23. É importante relembrar que os limites de especificação para a altura dos pinos seriam de acordo com o desenho de projeto da peça 1,75 mm a 2,05 mm, no entanto estes foram alargados temporariamente para 1,65 mm a 2,15 mm.

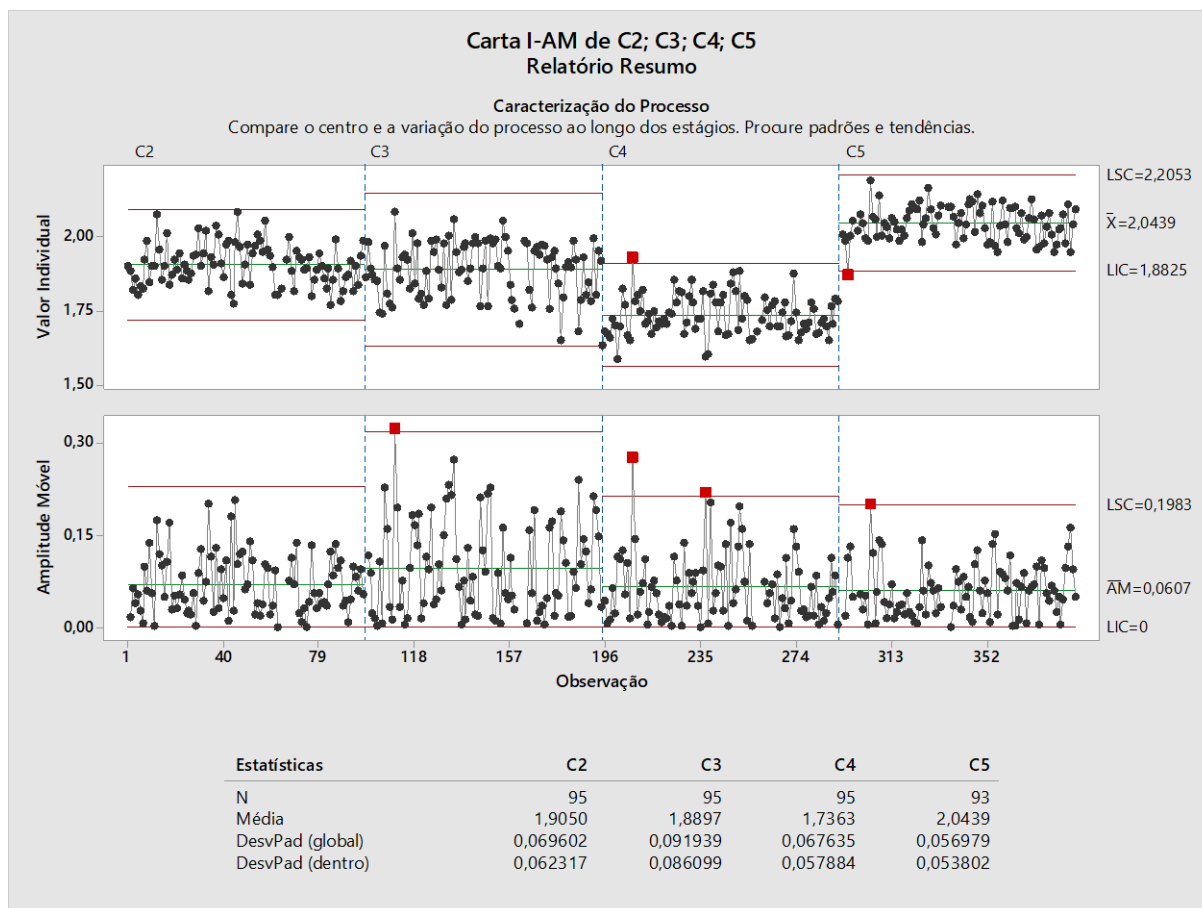


Figura 23 – Cartas de controlo por linhas (Ford) (Minitab 17)

Os gráficos da Figura 23 mostram a altura dos pinos, no gráfico superior com valores individuais e no inferior com a respetiva amplitude móvel. Os intervalos C2 a C5 representam cada uma das quatro linhas de medição. São também apresentados os limites de controlo para cada linha de medição e os pontos fora de controlo têm cor vermelha.

Assim verifica-se que o processo tem uma dispersão demasiado grande para os limites de especificação pretendidos. Além disso, existem diferenças significativas entre as várias linhas de medição, e para algumas linhas de medição a dispersão não está controlada.

Na Figura 24 é apresentado um histograma que ilustra a distribuição da altura dos pinos por linha de medição, onde é possível as diferenças entre estas e a não conformidade com os limites de especificação pretendidos.

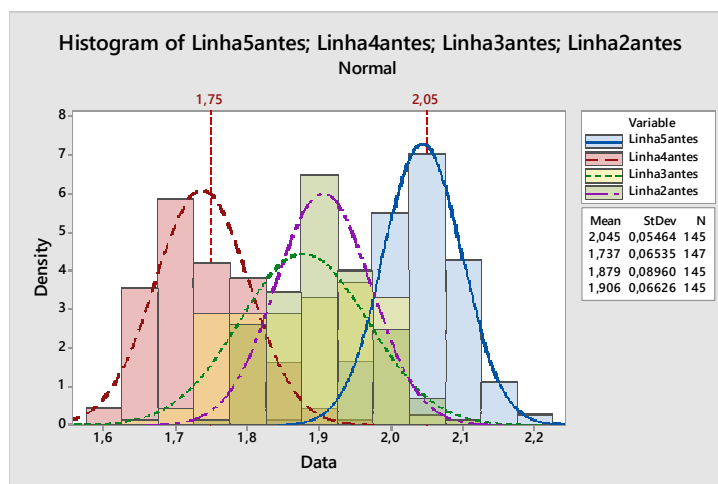


Figura 24 - Distribuição da altura dos pinos por linhas de medição

5.2 Problemas detetados e possíveis causas

Perante os dados anteriormente apresentados, verifica-se a existência de uma variação da altura dos pinos entre as diferentes linhas. Além disso as linhas centrais tendem a ter valores de altura menores e as linhas externas tendem a ter valores maiores. Na Figura 25 apresenta-se um diagrama causa efeito com potenciais causas que resultem numa altura dos pinos fora dos limites de especificação.



Figura 25 - Diagrama causa efeito para altura dos pinos não conforme (Minitab 17)

Algumas causas possíveis podem passar pelo sistema de medição. O laser é bastante preciso para as especificações pretendidas, no entanto este precisa de estar apontado no sítio certo e os pinos não têm uma área de medição muito ampla, o que pode dificultar a medição. Assim uma origem de variação poderiam ser os diferentes ninhos, pela análise GR&R esta variação parecia plausível. No entanto os ninhos foram retificados e não se verificaram melhorias significativas. Outra variação poderá vir da vibração da máquina, para solucionar isto pode reduzir-se a aceleração no movimento do cilindro do *press fit*, já que este movimento produz vibrações simultaneamente ao processo de medição.

Podem ainda ter alguma influência no processo fatores ambientais como a temperatura e humidade que farão variar ligeiramente as dimensões dos pinos e, por sua vez, o atrito no processo de cravação e assim será necessária uma força do cilindro diferente. Serão, no entanto, necessários testes para perceber qual a dimensão do impacto destes fatores.

Outro fator de variação possível é a flexão do plástico devido à falta de apoio inferior no centro do conector. Na Figura 26 apresenta-se o desenho de uma das peças produzidas, aqui a força para cravação é aplicada de cima para baixo e apenas existe suporte no sentido contrário da área periférica do conector. Assim sendo, a parte central, onde estão os pinos, não tem um suporte uniforme e estável. Isto poderá levar a que as linhas centrais de pinos fiquem menos cravadas. Uma solução poderá passar por introduzir nos ninhos um suporte metálico que contrarie essa flexão.

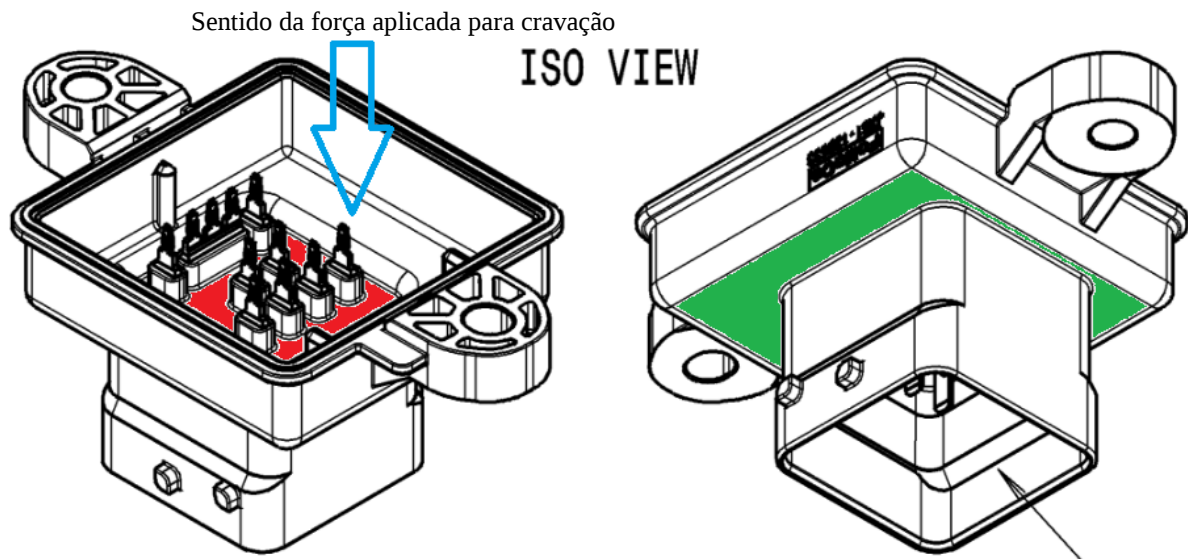


Figura 26 - Desenho de um GPCM com zonas de suporte e sem suporte

5.3 Melhorias no funcionamento da linha

Com um conhecimento detalhado sobre o funcionamento da linha foi possível detetar alguns pontos que poderiam ser melhorados, e sugeriu-se algumas alterações, que foram implementadas e evidenciam-se os resultados obtidos.

5.3.1 Alteração do desenho dos ninhos

Analisando os dados do capítulo 5.1 observa-se que uma grande parte da dispersão da altura dos pinos deriva de uma variação assinalável entre linhas de medição. Seguindo as causas possíveis do capítulo 5.2, o fator falta de suporte inferior na peça é o que mais provavelmente introduz diferenças consistentes entre linhas de medição. As restantes causas terão uma maior tendência a influenciar a altura de todos os pinos igualmente ou introduzir variações mais aleatórias.

Portanto, no sentido de eliminar esta causa, foi feita uma alteração no desenho dos ninhos com o objetivo de reduzir a variabilidade entre linhas na medição da altura dos pinos. Para isso foi adicionado um suporte metálico no centro para contrariar a flexão do plástico do conector. Foi também colocado um pino metálico com suporte para reduzir a movimentação da peça. Na Figura 27 mostram-se as alterações efetuadas.

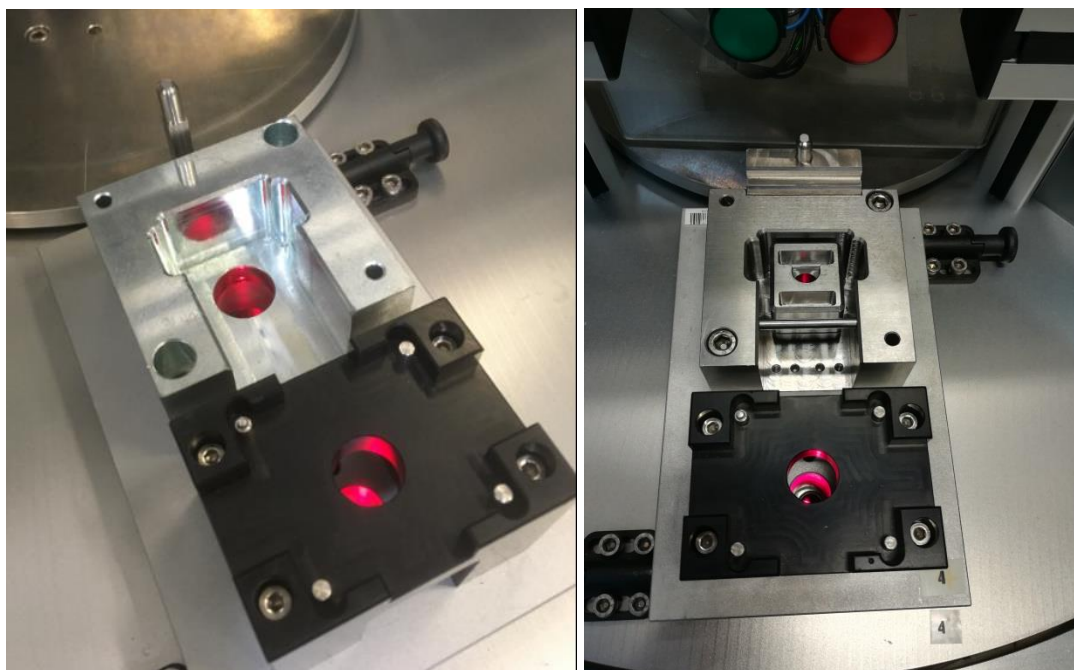


Figura 27 - Ninhos do *press fit* antes (esquerda) e depois (direita) da alteração

Na Figura 28 verifica-se uma redução significativa da variabilidade. Além disso, com os ninhos originais em 149 peças produzidas 13 foram rejeitadas e, além dessas, 21 peças necessitaram de remedições (no máximo três por peça). Já com os novos ninhos em 95 peças nenhuma foi rejeitada e 4 peças passaram por uma única remedição cada.

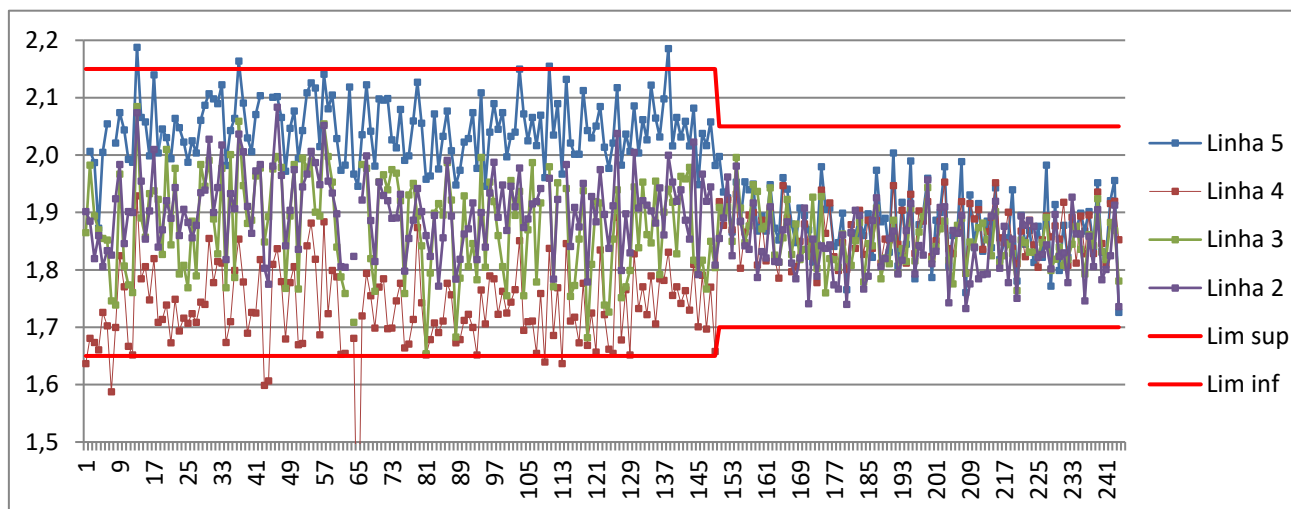


Figura 28 - Comparação da altura dos pinos antes e depois dos novos ninhos (Microsoft Excel 2010)

Na Figura 29 e Figura 30 são apresentados histogramas com uma visão global do posicionamento da altura dos pinos. Aqui pode verificar-se que a diferença entre ninhos foi bastante reduzida e a centralidade global da distribuição melhorou significativamente.

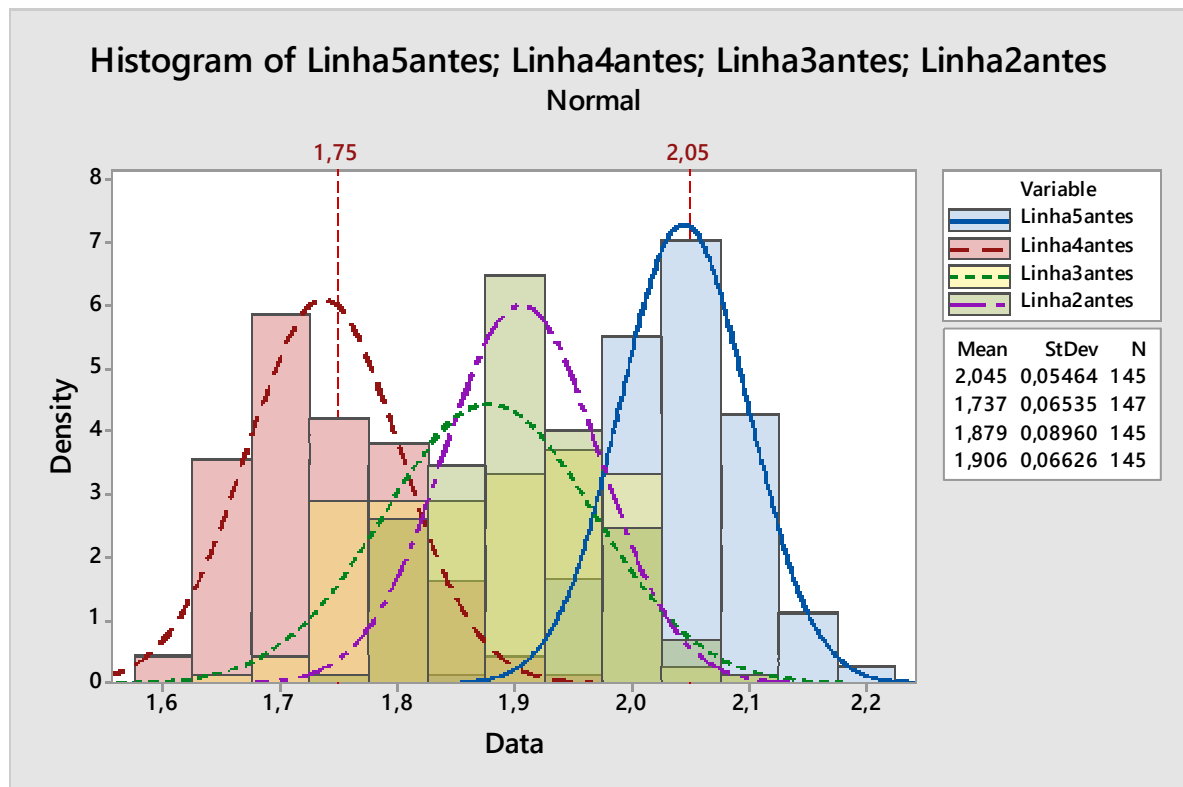


Figura 29 - Histograma global antes do suporte central (Minitab 17)

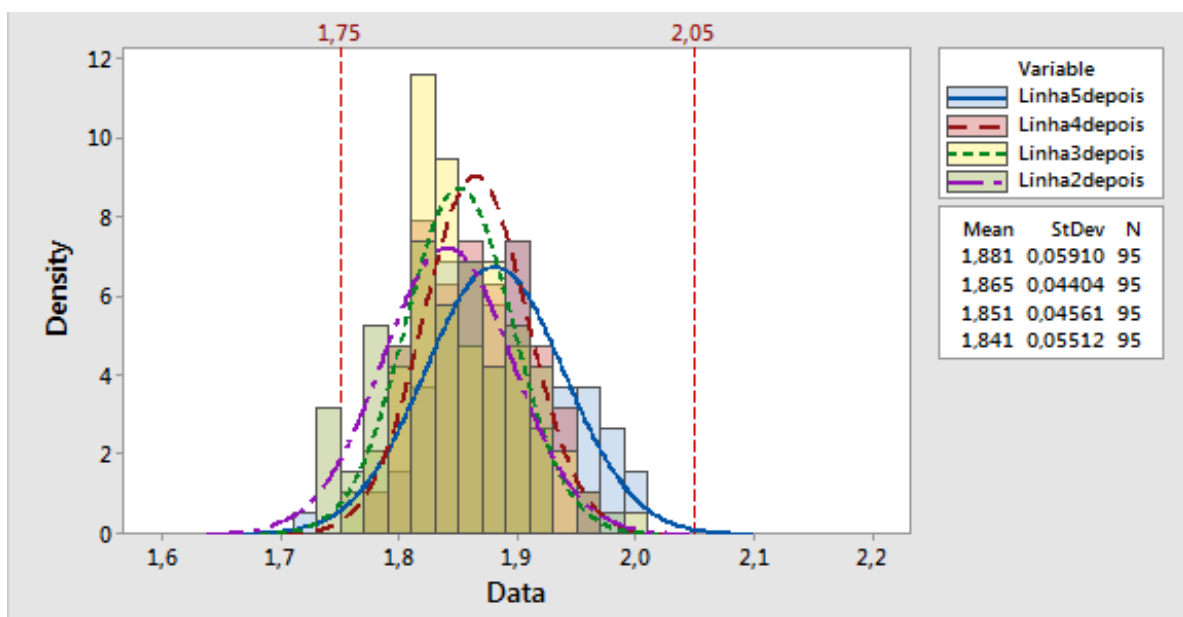


Figura 30 - Histograma global depois do suporte central (Minitab 17)

Na Figura 31 e Figura 32 é feita uma análise de capacidade de processo por linhas de medição. Aqui pode-se verificar que geralmente os dados estão mais próximos do alvo e com menor variabilidade. Isto é comprovado por valores geralmente mais elevados de Cpk.

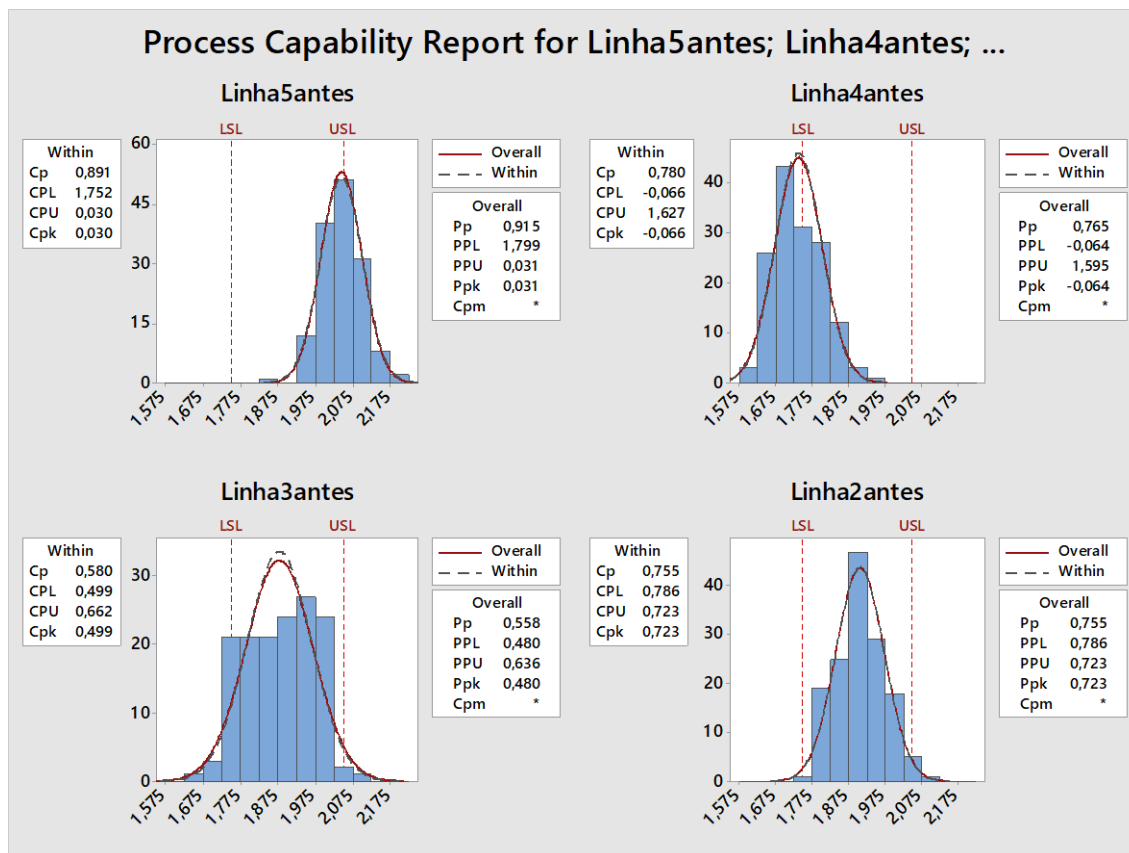


Figura 31 - Análise de capacidade de processo no *press fit* antes do suporte central nos ninhos (Minitab 17)

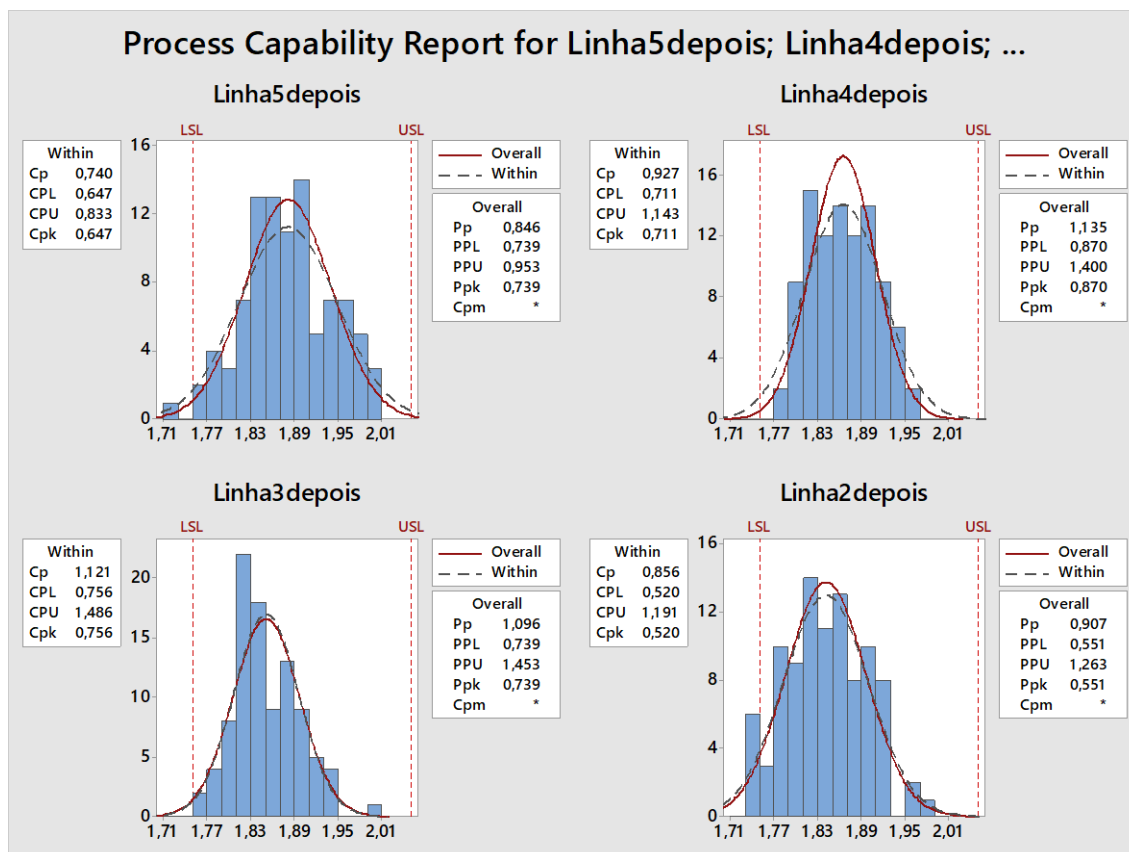


Figura 32 - Análise de capacidade de processo no *press fit* depois do suporte central nos ninhos (Minitab 17)

Existem ainda algumas peças com a medição inferior a 1.750 mm, que é a especificação pretendida. Por isto, o limite inferior ficou estabelecido em 1,700 mm, o que é uma oportunidade para melhoria. A média de todas as linhas de medição é inferior ao valor alvo pretendido, por isso uma possível solução passa por corrigir este desvio, através do ajuste do deslocamento definido para o cilindro hidráulico, aumentando assim a altura dos pinos. É necessário, no entanto, ter atenção para que não se ultrapasse o limite superior de especificação.

Na linha 2 o valor do Cpk diminuiu, uma causa desta variação poderá ser uma aresta fina no novo suporte metálico central aplicado, visível na Figura 33. Isto exerce uma pressão elevada naquela zona do conector plástico, o que provoca deformação elástica resultando numa altura menor depois da cravação, para um determinado deslocamento do cilindro hidráulico. Esta recomendação será aplicada na construção de suportes semelhantes para peças da Renault.

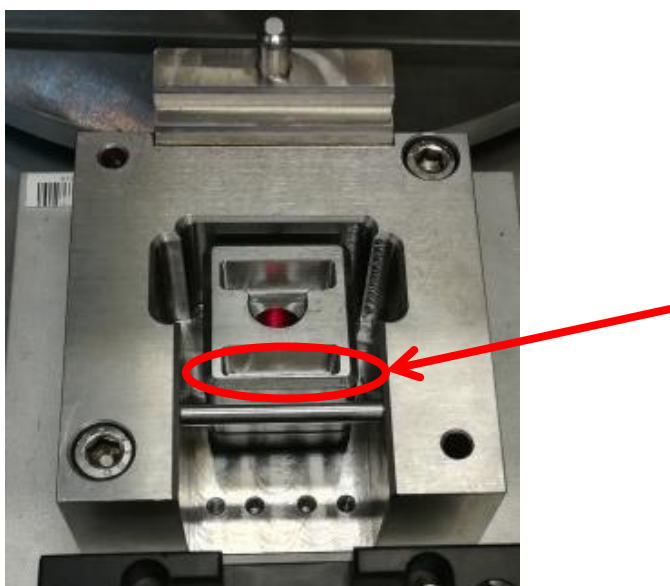


Figura 33 - Sugestão de melhoria no suporte central

5.3.2 Redução de tempo de ciclo no *press fit*

Na medição laser, ilustrada na Figura 34, o sensor move-se linearmente, medindo cada perfil com uma linha de pinos. Inicialmente nas peças Renault o ponto de repouso do sensor correspondia à última linha medida. Isto fazia com que se perdesse tempo de ciclo no início da peça seguinte com a movimentação do sensor para a posição correspondente à primeira linha de medição. Foi feita uma sugestão ao fornecedor da máquina, R&D, e a sequência foi mudada de forma que a posição de repouso do sensor passou a coincidir com a primeira linha de medição. Deste modo o laser regressa à posição inicial simultaneamente à rotação do prato para troca de peças.

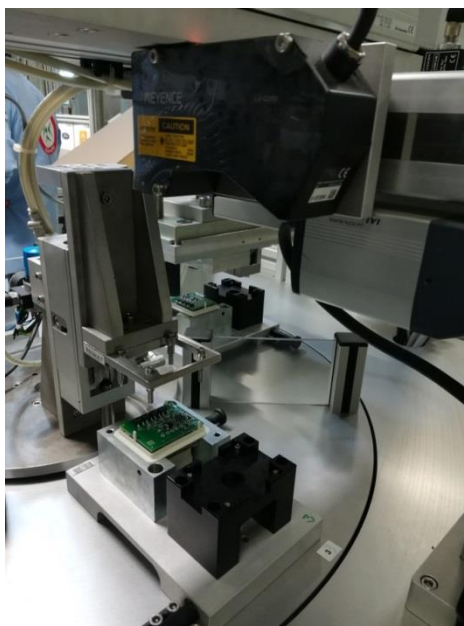


Figura 34 - Sistema de medição

No caso dos componentes da Ford o sensor movimentava-se em dois sentidos, não existindo uma sequência de medição otimizada. A ordem das linhas medidas era 1, 2, 3, 4 e 5, de acordo com a Figura 35. Foi feita uma sugestão à R&D e o movimento do sensor passou a ir desde a primeira linha do PCBA para a linha imediatamente mais próxima, num único sentido. A nova ordem de medição passou a ser 1, 5, 4, 3 e 2.

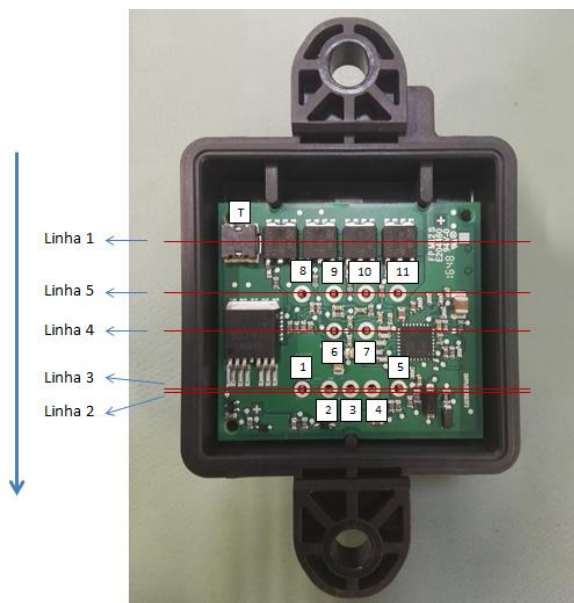


Figura 35 - Linhas de medição laser

No movimento do cilindro no processo de *press fit*, mostrado na Figura 36, a sua posição de repouso entre a troca de peças era muito alta, existindo um grande espaço livre entre a ferramenta e a peça. Isto leva a um tempo desnecessário na movimentação do cilindro. Assim foi alterada a posição de repouso para uma altura mais baixa, permitindo assim reduzir o tempo de ciclo em algumas décimas de segundo a cada ciclo (cerca de 14 segundos).



Figura 36 - Processo de cravação do PCBA no conector (*press fit*)

5.4 Outras análises de capacidade de processo

Com a recolha e compilação de dados automatizada torna-se mais fácil gerar análises de capacidade de processo. O *Minitab 17* é um software com bastantes funcionalidades nesta área e é também regularmente usado na empresa. Por isso, foram criadas algumas macros que permitem criar análises de capacidade de processo completas com um único clique num botão, a partir dos dados anteriormente gerados. Os resultados desta funcionalidade podem ser vistos em detalhe no **ANEXO G: Análise de capacidade de processo no *press fit* depois da alteração nos ninhos.**

Partindo deste sistema e com o conhecimento adquirido na sua conceção foi feita também uma análise de capacidade de processo para o posto de fim de linha. Em alguns testes verificou-se uma diferença significativa entre os diferentes ninhos da máquina. Os resultados podem ser vistos em mais detalhe no **ANEXO H: Análise de capacidade de processo no fim de linha.** Sabendo isto, é possível fazer ajustes ou manutenções de modo a centrar a distribuição dos resultados relativamente aos limites de especificação, reduzindo a repetição de testes e a sucata produzida. Assim são produzidas mais peças por unidade de tempo, reduz-se custos e aumenta-se a eficiência e rentabilidade de investimentos também para este posto.

Esta análise é particularmente útil no posto de fim de linha porque normalmente aqui é onde está o gargalo da linha de produção e onde é detetada a maior parte da sucata, por vezes erradamente. Como este posto já gera dados automaticamente, apenas foi necessário agregar esses dados com o RapidMiner e criar a macro no minitab. Isto resulta numa boa relação custo / benefício e confirma o potencial de escalabilidade do trabalho desenvolvido nesta linha.

5.5 Outras causas de variação

Para perceber quais as variáveis com maior influência na altura dos pinos após o *press fit*, foi estudada a correlação entre estas, a força e o deslocamento. Este estudo indica que estas variáveis não são as mais influentes. Uma análise mais detalhada é apresentada no **ANEXO I: Correlação entre altura dos pinos, força e deslocamento.**

6 Conclusões e perspetivas de trabalho futuro

Os objetivos inicialmente propostos foram alcançados e excedidos com a implementação do sistema de controlo estatístico na linha, melhoria do processo e ainda outros estudos. Assim, comprovou-se que um sistema de controlo estatístico de processo permite compreender melhor um processo e as causas da variação existentes. Assim é mais fácil focar nos problemas reais e implementar melhorias eficazes. Esta análise resulta melhor se for apresentada visualmente.

A análise estatística permitiu concluir que no processo de *press fit* de um GPCM a falta de um suporte apropriado leva a uma grande variabilidade na altura dos pinos resultantes, principalmente com diferenças assinaláveis entre os vários pinos. Com um suporte na parte inferior que apoia a parte de plástico do conector obteve-se resultados bastante mais estáveis. Assim a capacidade de processo foi melhorada significativamente, o que resulta numa redução da quantidade de peças produzidas não conformes com as especificações de 92% para 4%.

Em relação aos softwares utilizados, o RapidMiner através da programação por blocos facilita o processamento de dados exigindo apenas um conhecimento básico de conceitos de programação, além disso disponibiliza vários algoritmos de *machine learning*. O Qlik Sense permite visualizar dados de várias formas, é flexível e intuitivo, é ainda possível incluir a programação de alguns parâmetros e ligação a bases de dados. O Minitab tem uma ampla capacidade de cálculos estatísticos normalizados.

Para além disto, este sistema de controlo estatístico introduz o conceito de indústria 4.0 neste processo e assim abre o caminho para a implementação de um controlo de qualidade preventivo e preditivo. No futuro, dando seguimento ao trabalho até aqui desenvolvido, seria interessante desenvolver um programa que, integrando conceitos de *machine learning*, permita ajustar os parâmetros de entrada da máquina de *press fit*, nomeadamente a força e o deslocamento, automaticamente em função de um histórico de valores de altura dos pinos anteriormente obtidos e eventualmente em função de outras variáveis.

Com os dados analisados conclui-se que não existe uma forte correlação entre a altura dos pinos no *press fit* e o deslocamento nem a força aplicada. Por isso, no sentido de perceber quais as variáveis que influenciam a altura dos pinos, seria interessante fazer testes com diferentes temperaturas e humidade, ou variando o deslocamento e a força aplicados pelo cilindro hidráulico, por exemplo.

Na linha 2 piorou a capacidade de processo, possivelmente devido a uma aresta fina no suporte metálico, e será útil explorar esse ponto de forma a reduzir a variabilidade.

Este sistema de controlo estatístico pode ser aplicado de forma semelhante a outros processos, nomeadamente outras máquinas na empresa com medições automáticas.

Referências

2016. "Unbiasing constants $d2()$, $d3()$, and $d4()$ ". Acedido em 17 de Maio de 2018. <http://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/control-charts/how-to/variables-data-in-subgroups/xbar-r-chart/methods-and-formulas/unbiasing-constants-d2-d3-and-d4/>.
- Automotive Industry Action Group. 2005. *Statistical Process Control (SPC) Reference Manual*. 2º.
- BorgWarner Inc. 2018. Acedido em 12 de Fevereiro de 2018. www.borgwarner.com.
- FEUP. 1988. "NP-418 Resumos analíticos para publicações e documentação."
- Gejdoš, Pavol. 2015. "Continuous Quality Improvement by Statistical Process Control." *Procedia Economics and Finance* (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221256711501669X) 34: 565-572.
- Lettiere, Daniel. 2012. Junho. Acedido em Fevereiro de 2018. https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-053112-163739/unrestricted/Lettiere_MQP_SYS-SYS7_Final_Report.pdf.
- Montgomery, Douglas, C. 2009. *Introduction to Statistical Quality Control*. 6º. John Wiley & Sons, Inc.
- Sundholm. 2015. 6 de Novembro. Acedido em 15 de Fevereiro de 2018. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:875132/FULLTEXT01.pdf>.
- Wheatley, Marilyn. 2015. "How Is Cpk Calculated When the Subgroup Size Is 1?" *The Minitab Blog*. 15 de Junho. Acedido em 17 de Maio de 2018. <http://blog.minitab.com/blog/marilyn-wheatleys-blog/how-is-cpk-calculated-when-the-subgroup-size-is-1>.

ANEXO A: Tabela de valores de d_2

Tabela 2 - Valores de d_2

N	$d_2(N)$	N	$d_2(N)$
2	1.128	26	3.964
3	1.693	27	3.997
4	2.059	28	4.027
5	2.326	29	4.057
6	2.534	30	4.086
7	2.704	31	4.113
8	2.847	32	4.139
9	2.970	33	4.165
10	3.078	34	4.189
11	3.173	35	4.213
12	3.258	36	4.236
13	3.336	37	4.259
14	3.407	38	4.280
15	3.472	39	4.301
16	3.532	40	4.322
17	3.588	41	4.341
18	3.640	42	4.361
19	3.689	43	4.379
20	3.735	44	4.398
21	3.778	45	4.415
22	3.819	46	4.433
23	3.858	47	4.450
24	3.895	48	4.466
25	3.931	49	4.482
		50	4.498

ANEXO B: Soma cumulativa e média móvel exponencialmente ponderada

As cartas de controlo de Shewhart tradicionais são úteis na fase inicial de um novo processo produtivo, onde é previsto que existam mais causas assinaláveis que por sua vez provocam grandes desvios nos valores medidos. No entanto, ao longo do desenvolvimento normal de um processo produtivo, estas causas assinaláveis de variação vão sendo eliminadas ou reduzidas. Assim as variações no processo passam a ser mais reduzidas e as cartas de controlo de Shewhart têm dificuldade em detetar variações inferiores a cerca de 1,5 vezes o desvio padrão.

Cusum - Cumulative sum

A carta de controlo *cumulative sum* (soma cumulativa) consegue detetar mais facilmente variações pequenas num processo, porque combina medidas de várias amostras. É particularmente eficaz no caso de tamanho de amostra $n=1$, sendo particularmente útil para processos produtivos com medição automática de todas as peças e um sistema de monitorização em tempo real instalado na linha. Estas cartas analisam a diferença cumulativa entre a média de cada subgrupo e o valor esperado. O valor de soma cumulativa visualizada para cada amostra é calculado pela expressão:

$$C_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \mu_0) \quad (6.1)$$

Onde:

- C_i é a soma cumulativa calculada
- x_j é o valor médio da amostra j , e
- μ_0 é o alvo para a média do processo

A Figura 37 e a Figura 38 ilustram a diferença entre uma carta de Shewhart e uma carta “Cusum” para o exemplo de um processo que sofre um desvio da sua média nos últimos 10 valores.

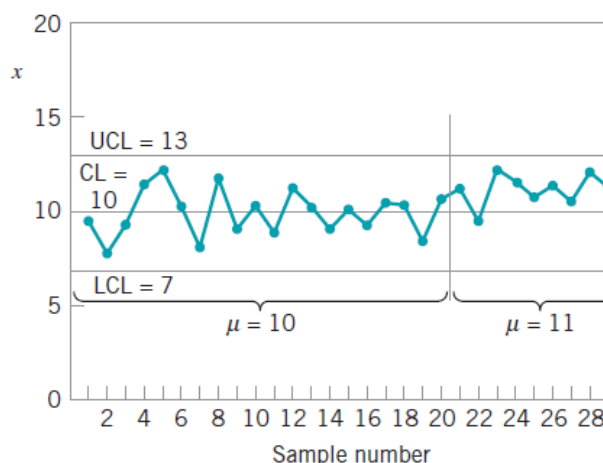


Figura 37 - Carta de controlo de Shewhart (Montgomery 2009)

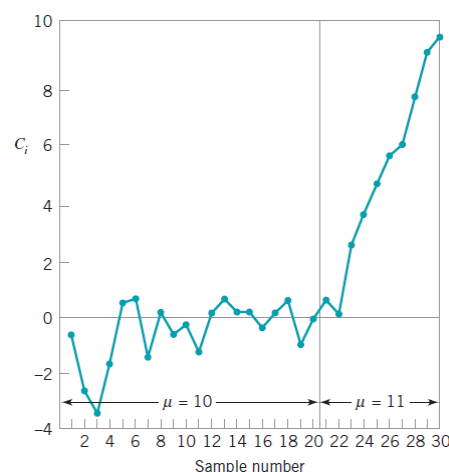


Figura 38 - Carta de controlo “Cusum” (Montgomery 2009)

Uma alternativa à carta “Cusum” seria manter o uso das cartas de Shewhart mas, para além de detetar os pontos fora dos limites de controlo, aplicar mais regras no sentido de detetar outras situações não esperadas que possam indicar a presença de causas assinaláveis. Uma desvantagem é a redução na simplicidade da análise de resultados, enquanto que a carta de controlo “Cusum” consegue manter uma deteção de anomalias simples e visual. (Montgomery 2009)

EWMA - Exponentially Weighted Moving Average

A carta de controlo “EWMA” (*Exponentially Weighted Moving Average*) ou média móvel exponencialmente ponderada atribui mais peso às medições mais recentes e atualiza a média com cada nova amostra. Além disso, é pouco sensível à assunção de normalidade. Por isso, esta é uma alternativa particularmente útil para a monitorização de valores individuais em tempo real em processos com grande estabilidade. Neste caso, cada valor é calculado pela expressão:

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)z_{i-1} \quad (6.2)$$

Onde:

- z_i . é o valor da média móvel
- λ . é uma constante de ponderação e $0 \leq \lambda \leq 1$
- x_i . é a medição atual e
- $\mu_0 = z_0$

(Montgomery 2009)

Na Figura 39 é apresentado um exemplo de uma regressão por média móvel e na Figura 40 uma carta EWMA.

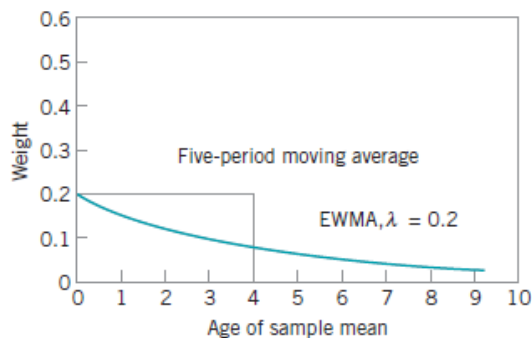


Figura 39 - Peso da média em função da idade da amostra para 5 períodos (Montgomery 2009)

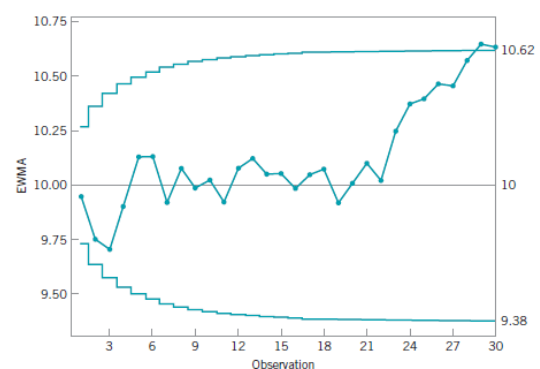


Figura 40 - Carta de controlo EWMA (Montgomery 2009)

ANEXO C: Validação do sistema de medição

No sentido de verificar a repetibilidade do sistema de medição e a sua reprodutibilidade entre ninhos, foram medidas cinco peças, três vezes em cada um dos quatro ninhos do prato rotativo da máquina de press fit. Nos gráficos da Figura 41 a Figura 50 apresentam-se os resultados obtidos, agrupados por peça, ninho e repetição a cor azul. Os pontos a cor vermelha representam para cada peça a medição registada em produção corrente e a medição feita em laboratório, o ponto vermelho mais à esquerda e mais à direita, respetivamente.

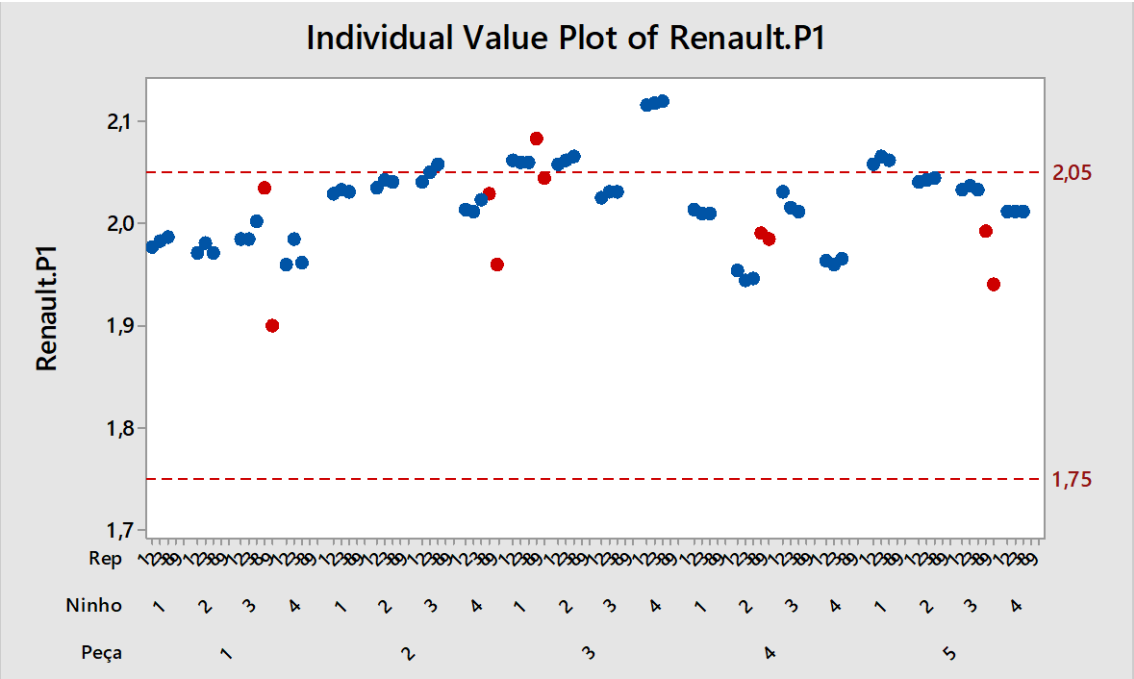


Figura 41 - Teste de repetibilidade pino 1

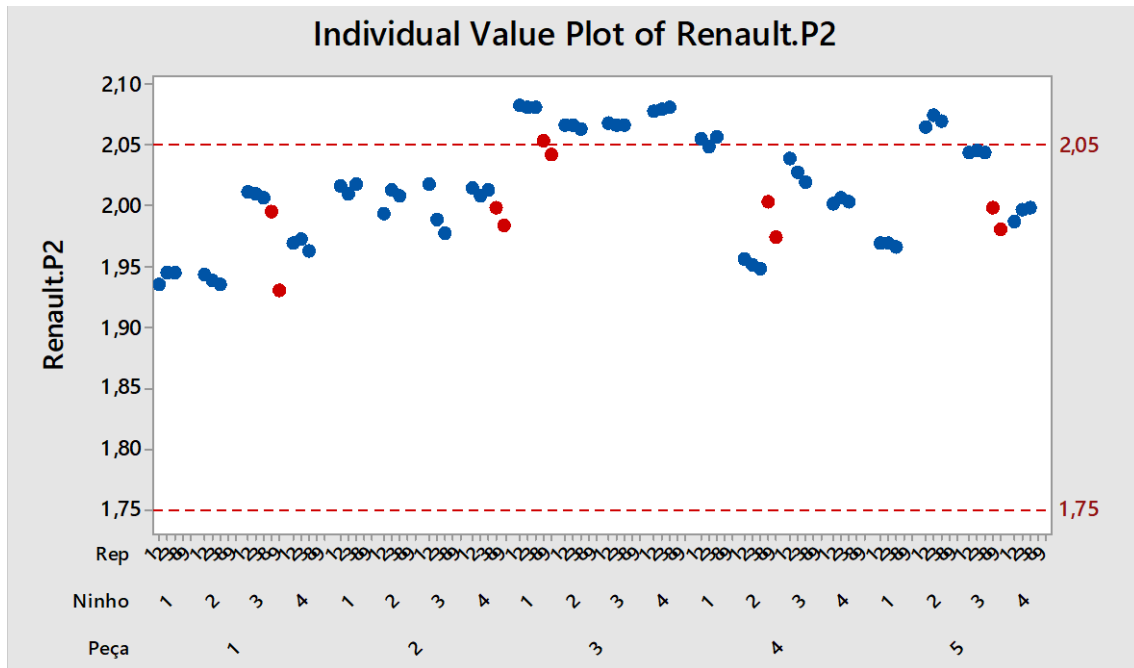


Figura 42 - Teste de repetibilidade pino 2

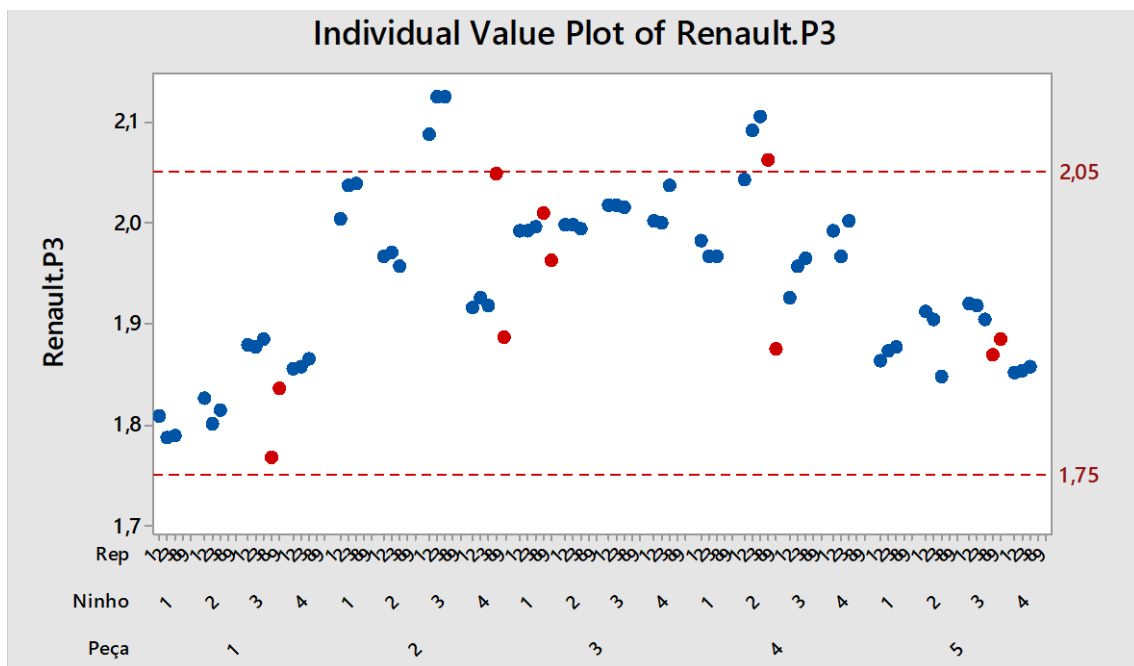


Figura 43 - Teste de repetibilidade pino 3

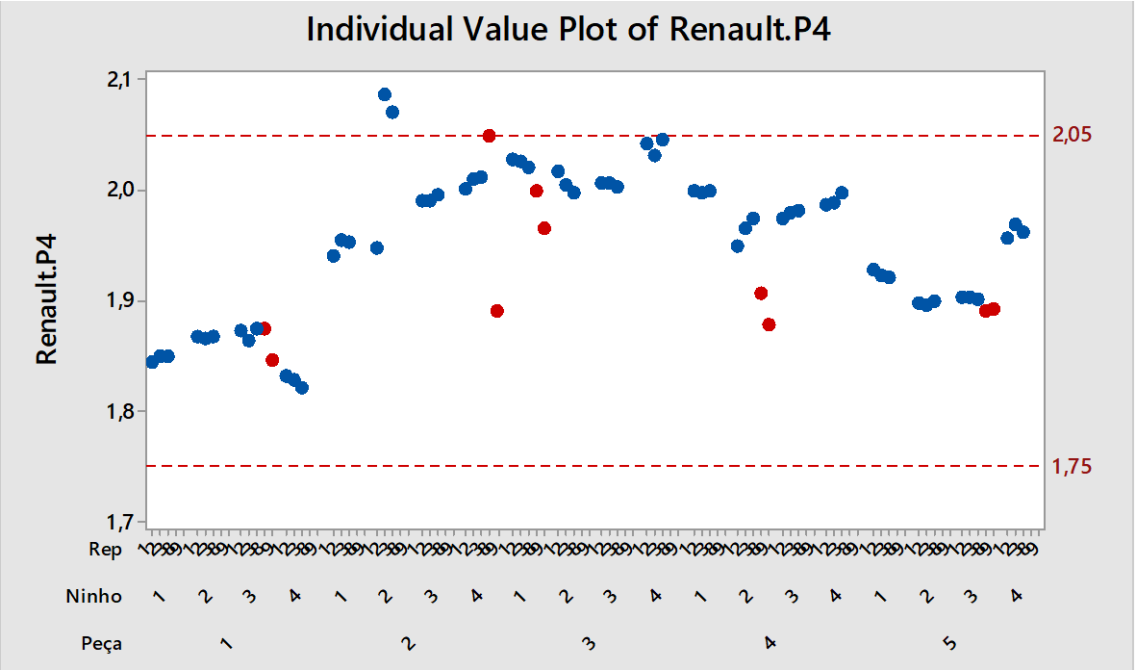


Figura 44 - Teste de repetibilidade pino 4

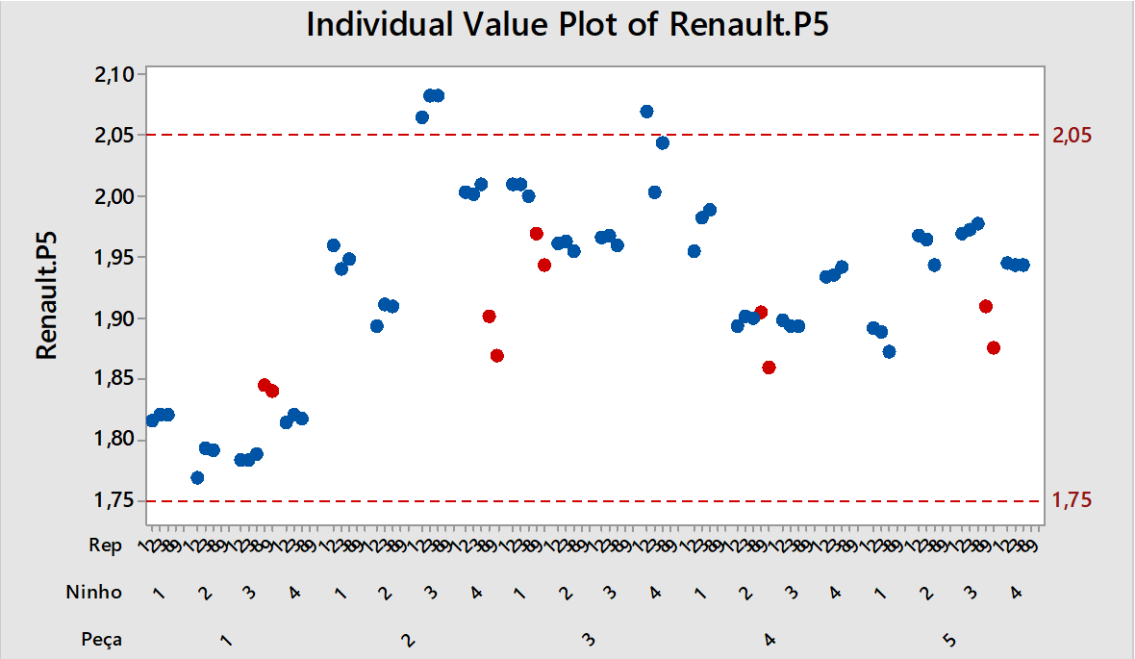
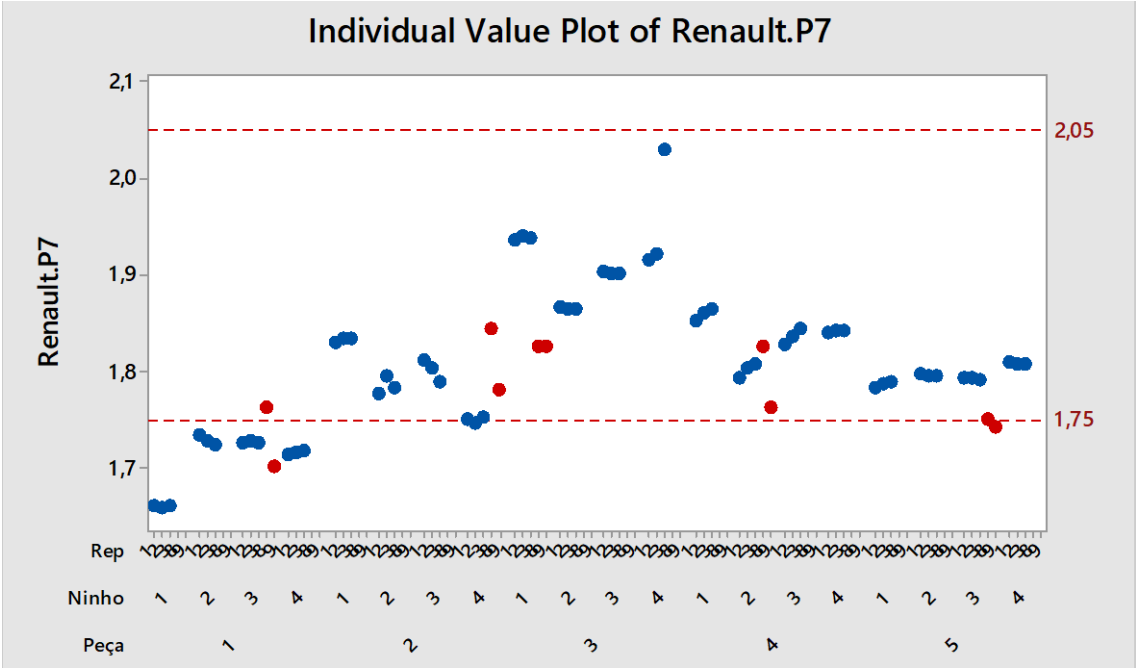


Figura 45 - Teste de repetibilidade pino 5



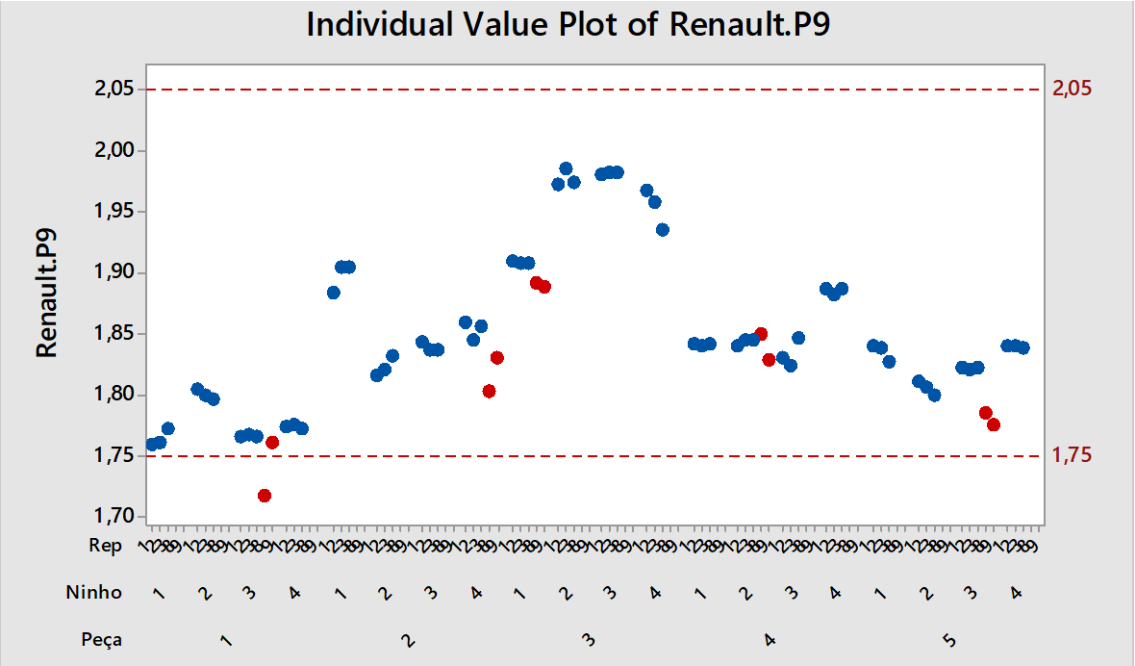


Figura 48 - Teste de repetibilidade pino 9

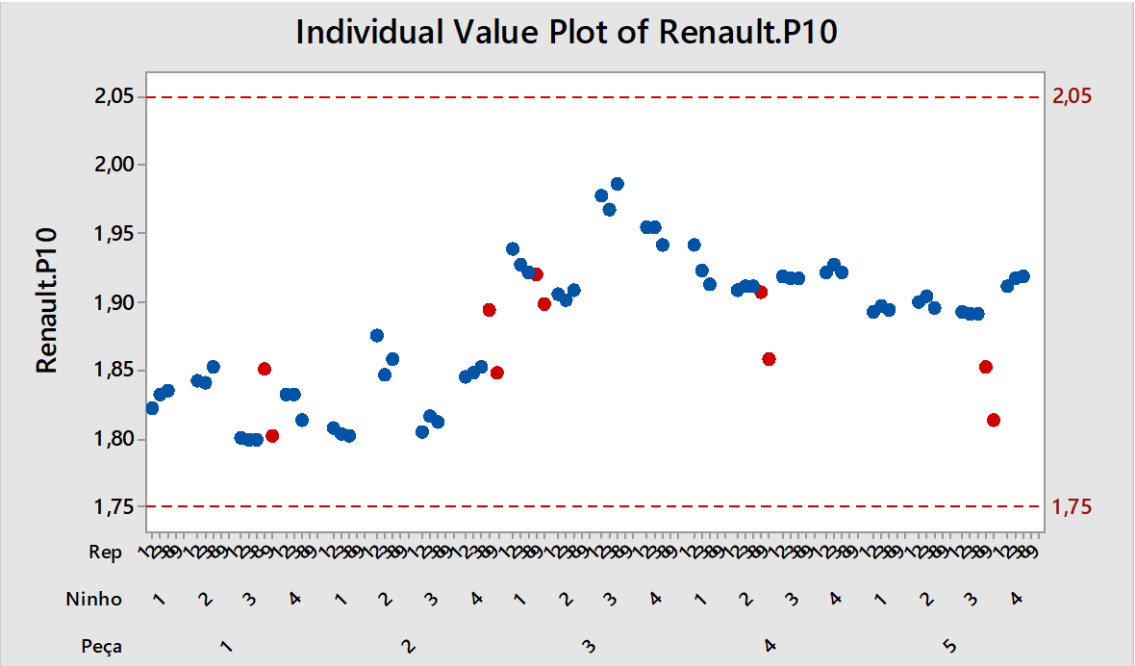
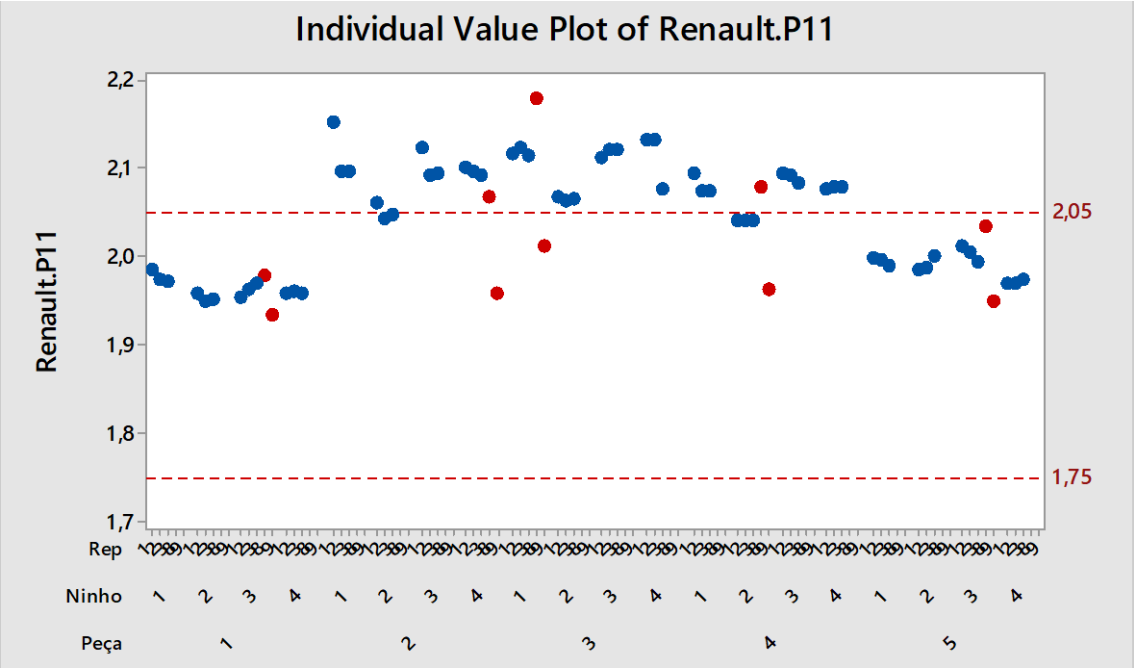


Figura 49 - Teste de repetibilidade pino 10



ANEXO D: Programas usados para tratamento e análise de dados

Esta secção tem como objetivo introduzir os principais programas utilizados na implementação do sistema de controlo estatístico em tempo real. Para isto apresenta-se um *software* de tratamento de dados e um *software* de visualização de dados, ambos com possibilidade de funcionamento em tempo real. Além disso é usado um *software* de análise estatística.

RapidMiner

O RapidMiner é um *software* dedicado a processamento de dados que funciona através de blocos funcionais. Uma das grandes vantagens desta ferramenta é a possibilidade de criar programas sem exigir grandes conhecimentos de programação com linhas de código. Além disso tem várias funções dedicadas à inteligência artificial que permitem construir modelos preditivos. Existe também a possibilidade de funcionamento em tempo real. Existe ainda uma ferramenta para visualização em gráficos dos resultados.

As funções dos blocos (*operators*) vão desde funções de ler e escrever em vários formatos de ficheiros, mudar o tipo de dados, acrescentar, remover ou alterar dados (*examples*), colunas (*attributes*), ou tabelas (*example sets*), até modelos preditivos e de agregação inteligente que permitem prever comportamentos futuros com base em dados passados. Na Figura 51 é apresentado o aspeto da interface gráfica do RapidMiner, com um processo exemplificativo.

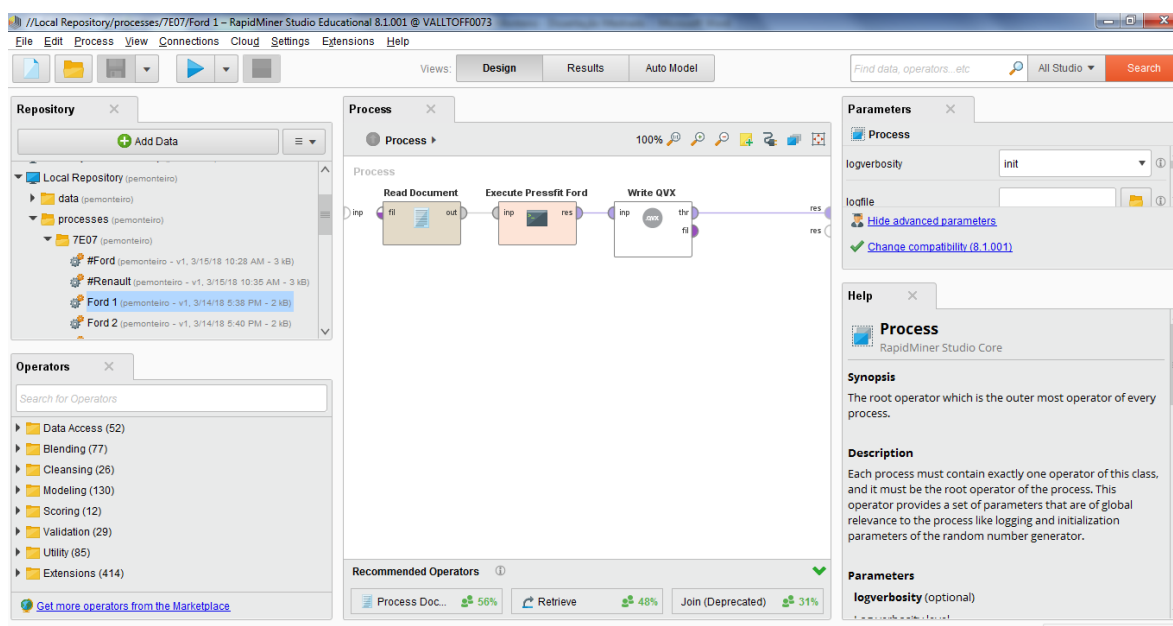


Figura 51 - Aspeto do ambiente do RapidMiner (RapidMiner Studio 8.1)

Para o sistema de controlo estatístico pretendido, este software possibilita a transformação de um ficheiro de texto em formato .txt (registado na máquina de *press fit*) numa tabela de dados numéricos em formato .qvx para posterior análise em Qlik, com funcionamento em tempo real sincronizado com a produção de uma máquina e medição das peças resultantes.

Caso seja considerado útil pela empresa para projetos futuros, nomeadamente no âmbito da indústria 4.0, este software permitirá também controlar, autonomamente, alguns parâmetros de uma máquina em função de um algoritmo que, sabendo o comportamento desta até um determinado momento, consegue prever o comportamento futuro e assim otimizar a sua atuação. A aquisição de dados seria feita através de sensores e os dados obtidos guardados numa base de dados, estes dados seriam processados continuamente e seria apresentado um sistema de visualização para monitorização por parte das pessoas responsáveis, enviando alertas em situações críticas.

Existe uma versão experimental grátis e ainda uma licença para estudantes, o que facilita a exploração desde software. Além disso, o Rapid Miner está a ser usado noutros projetos dentro da empresa.

Qlik

O Qlik é um *software* dedicado à visualização gráfica de dados. Possibilita a leitura de vários formatos de ficheiros, incluindo alguns próprios como .qvx ou .qvd. Existe uma versão desktop (Qlik View) e uma versão online num browser (Qlik Sense). Permite a sincronização de dados em tempo real. Além disso, é possível definir vários elementos como linhas de referência e mudar cores de pontos em função dos valores de entrada automaticamente.

Foi escolhido este software porque a empresa possui uma licença, bem como uma equipa de suporte interna, o que facilita a sua implementação, para além de evitar custos adicionais no projeto. Na Figura 52 é apresentado um exemplo de um sistema de visualização gráfico implementado em Qlik.

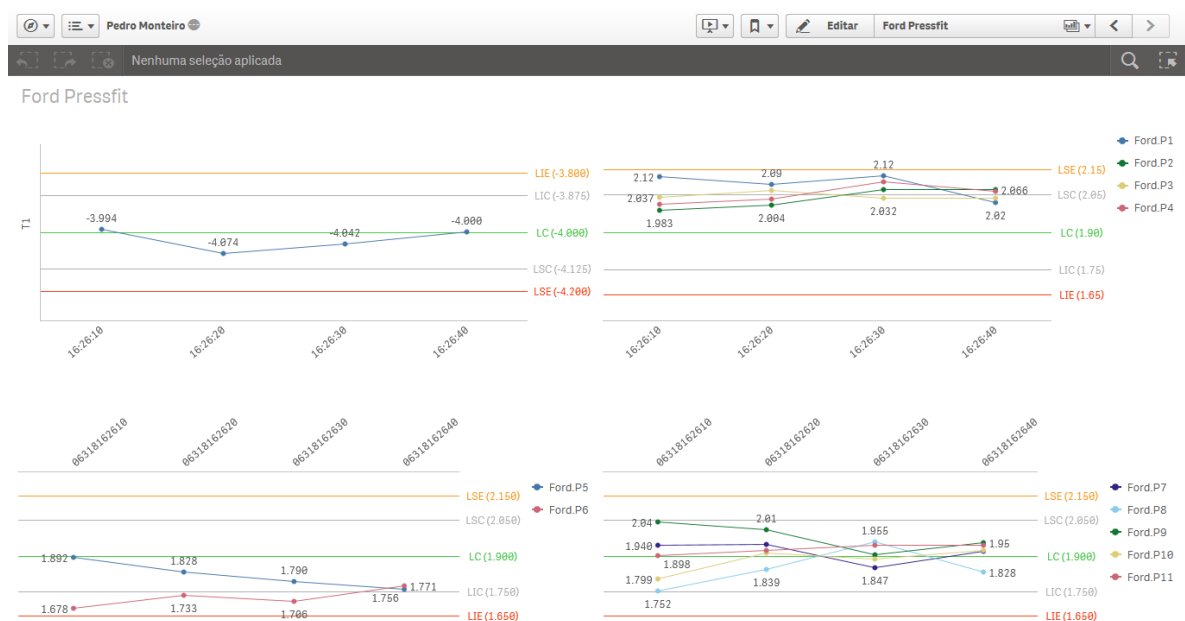


Figura 52 - Exemplo de sistema de visualização gráfica (Qlik Sense)

Minitab

O *Minitab 17* é um *software* de análise estatística que permite rapidamente usar ferramentas como cartas de controlo, análises de capacidade de processo, testes de hipótese, diagramas causa efeito, entre outros. Este será usado para compreender o estado inicial do processo e analisar o efeito das alterações implementadas. Foi escolhido o *Minitab 17* por já ter sido usado durante o percurso académico e também por ser utilizado na empresa. Na Figura 53 pode ver-se o ambiente de trabalho base deste software.

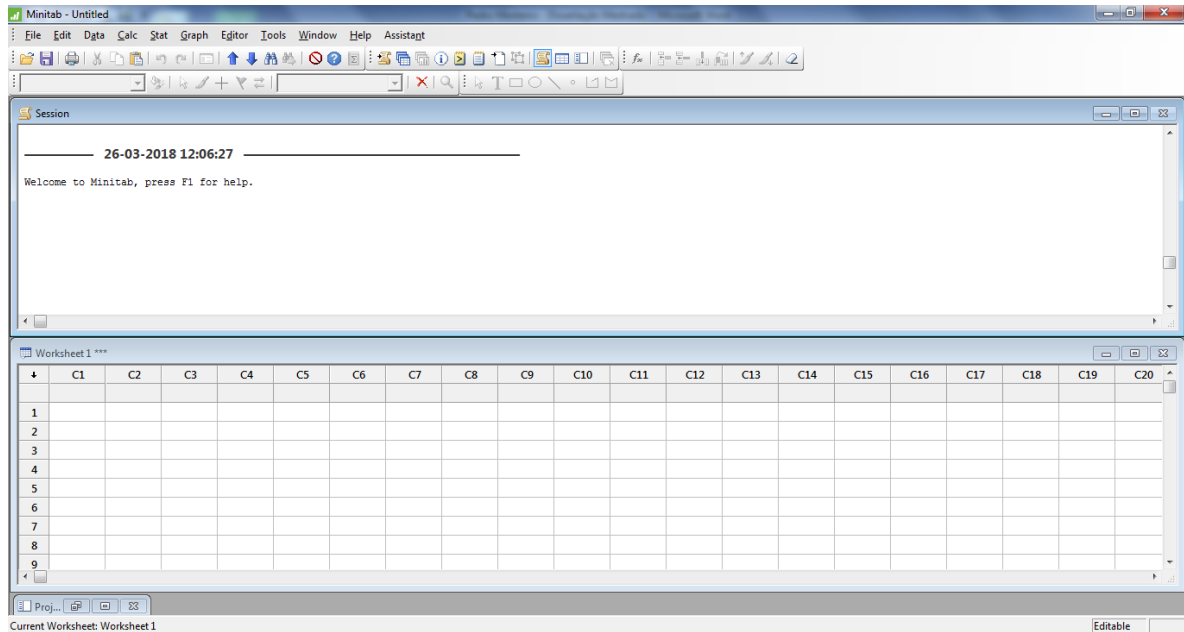


Figura 53 - Ambiente do Minitab 17 (Minitab 17)

Pode ser usado o assistente do Minitab, observado na Figura 54, para escolher a carta de controlo mais apropriada para cada caso.

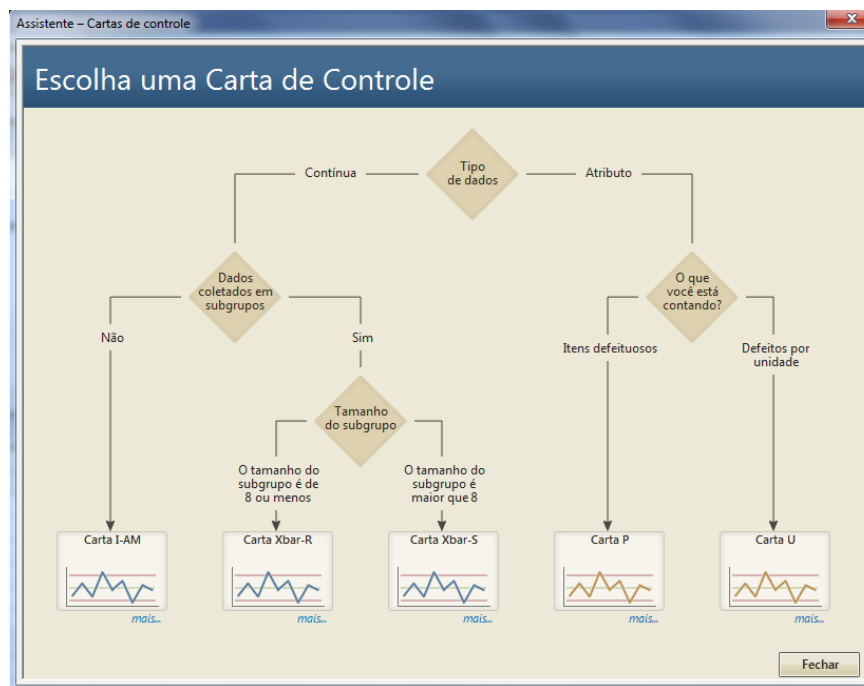


Figura 54 - Assistente do minitab para escolha de cartas de controlo (Minitab 17)

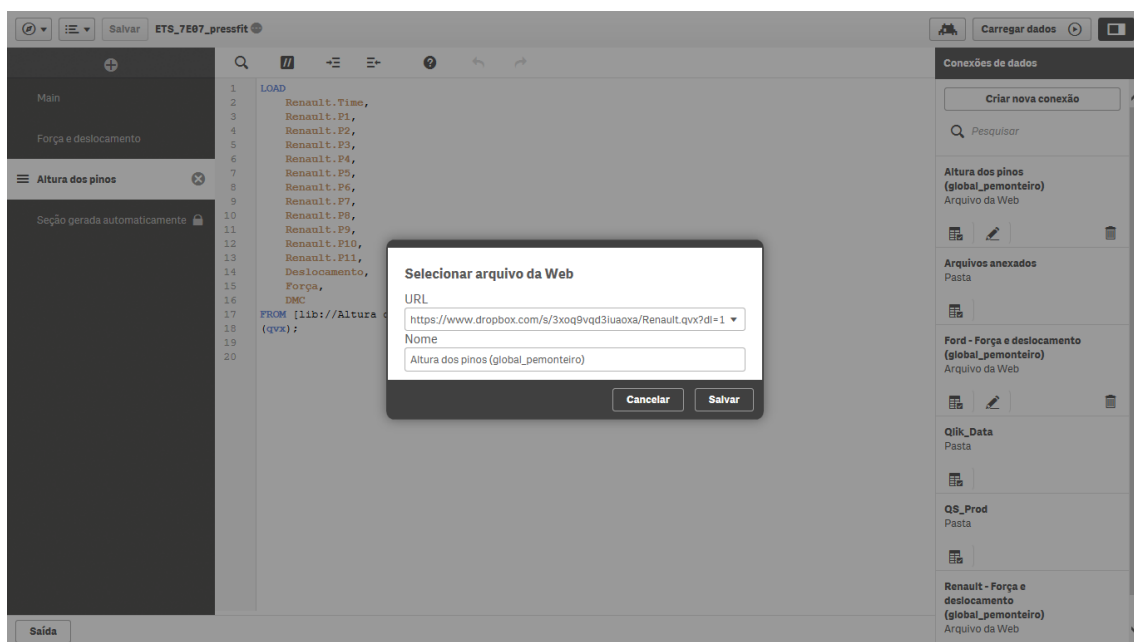
ANEXO E: Documentação do sistema de controlo estatístico de processo

Este documento tem como objetivo explicar resumidamente o funcionamento do sistema de controlo estatístico de processo (CEP) implementado na BorgWarner Viana, na linha 7E07 de produção de Glow Plug Control Module (GPCM) para motores da Ford DVNeo e Renault K9K, na estação de *press fit*. Este sistema surgiu da necessidade de ter um controlo estatístico do processo de *press fit*, para que seja possível detetar desvios ou tendências nos resultados e prever, com um elevado grau de confiança, a capacidade de processo. Com isto é possível reduzir a quantidade de peças rejeitadas através da garantia que estas se mantêm dentro dos limites de controlo. As dimensões a ser controladas são as alturas entre o topo de cada pino e o plano base do PCB, medidas com um sensor laser.

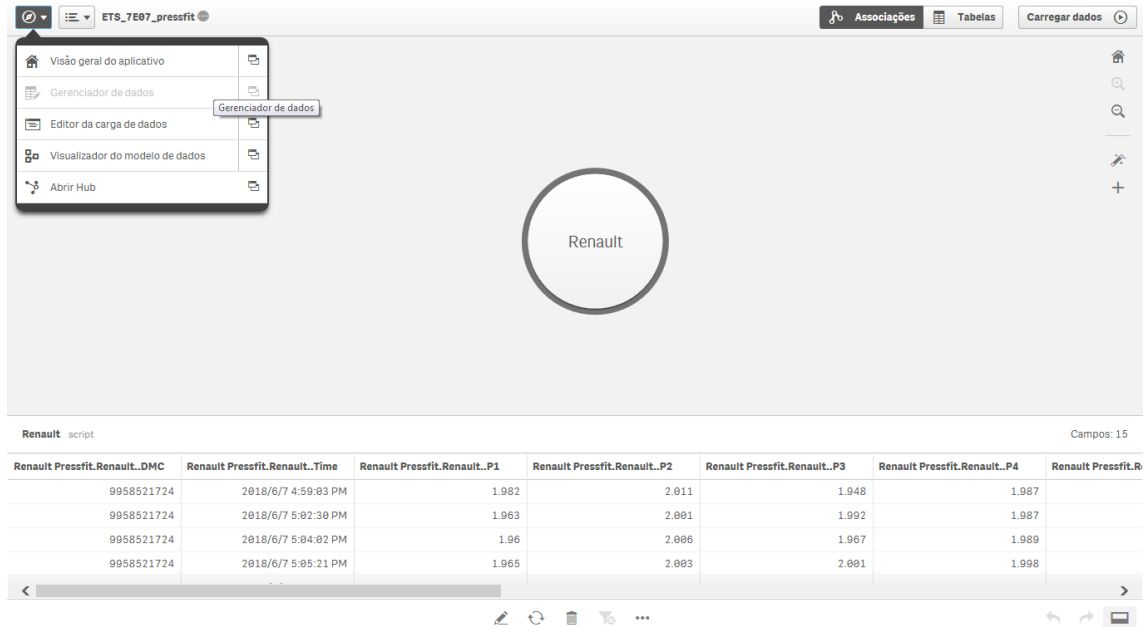
Conexão de dados em Qlik

Para o desenho do sistema de controlo estatístico foi utilizado o software Qlik Sense, que serve para visualização de dados. A BorgWarner tem uma licença a nível global para a utilização da versão cloud que corre num servidor global e o acesso é feito por internet, através de um browser, no URL: <https://dev.qlik.borgwarner.net>. Para ter acesso o computador deve estar ligado à rede de empresa borgwarner.net.

Como fonte de dados foi feita uma conexão a um arquivo da web através da nuvem dropbox. Assim os dados são atualizados automaticamente conforme são enviados pelo RapidMiner, neste caso.

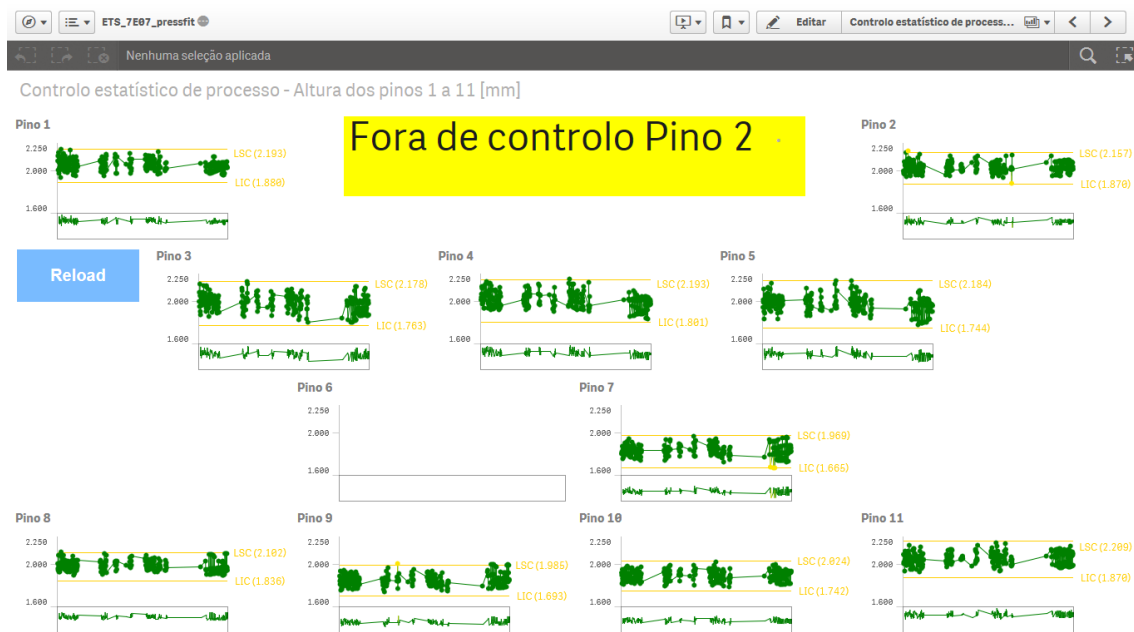


Na página “Gerenciador de carga de dados” pode verificar-se a tabela com os dados carregados. Neste caso as dimensões introduzidas são o código DMC da peça, a data e o tempo da medição, a força aplicada pelo cilindro, o deslocamento medido pelo sensor respetivo e a altura dos 11 pinos. Sendo que, no caso da Renault existe menos um pino, portanto o valor do pino 6 não é registado.



Aplicação desenvolvida em Qlik

Entrando depois na pasta “Controlo estatístico de processo – Altura dos pinos 1 a 11 [mm]” é possível ver o sistema desenhado:



Neste sistema cada um dos gráficos Pino 1 a Pino 11 mostra os valores da altura dos pinos ao longo do tempo, por ordem cronológica. A disposição dos gráficos na folha é semelhante à disposição física dos pinos na peça para facilitar a leitura e interpretação dos resultados. Além disso foi incluído um indicador de estado de conformidade com os

Desenho de um sistema de controlo estatístico num processo de cravação de componentes eletrónicos

limites de controlo. O botão “Reload” permite fazer uma atualização manual de dados. As séries temporais são criadas usando a opção “Gráfico de linhas”:



Dimensões

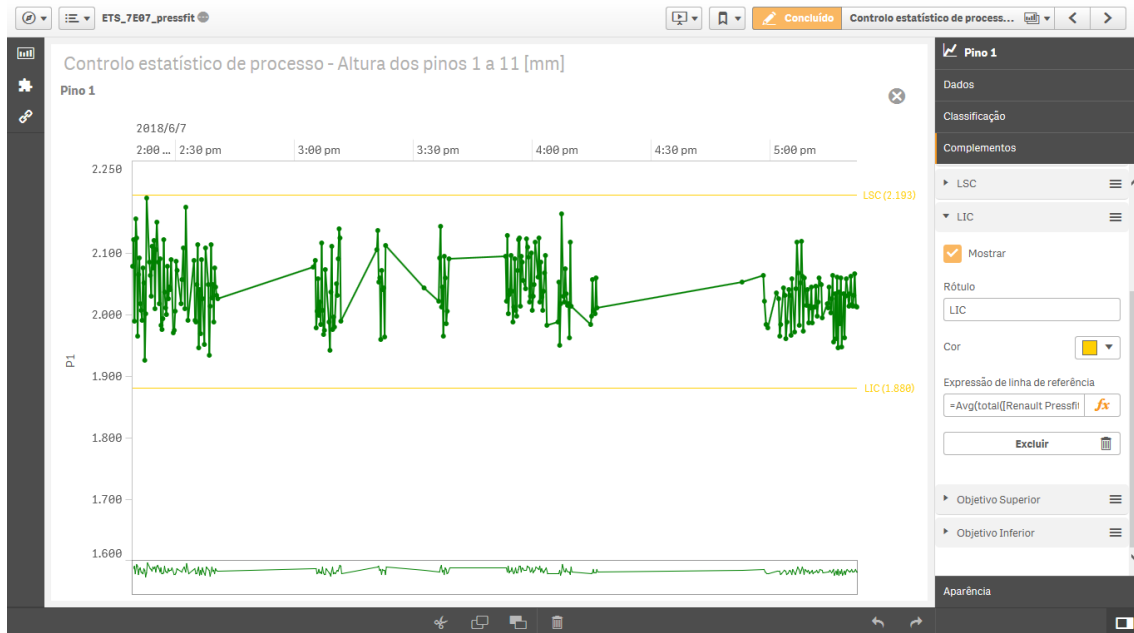
Para cada gráfico foram definidas como dimensão principal o tempo, como dimensão alternativa o DMC e para medidas as alturas dos pinos.



Limites

Foram criadas duas linhas de referência:

- LSC e LIC – Limites definidos em função da variabilidade do processo ($\text{média} \pm 3 \times \text{amplitude móvel}$).



Para calcular os limites de controlo foram usadas as seguintes expressões:

Editar expressão

```
1 =Avg(total([Renault Pressfit].[Time]),[Renault Pressfit].[Time])/1.128  
2 below([Renault Pressfit].[Time]),[Renault Pressfit].[Time])/1.128
```

Campos

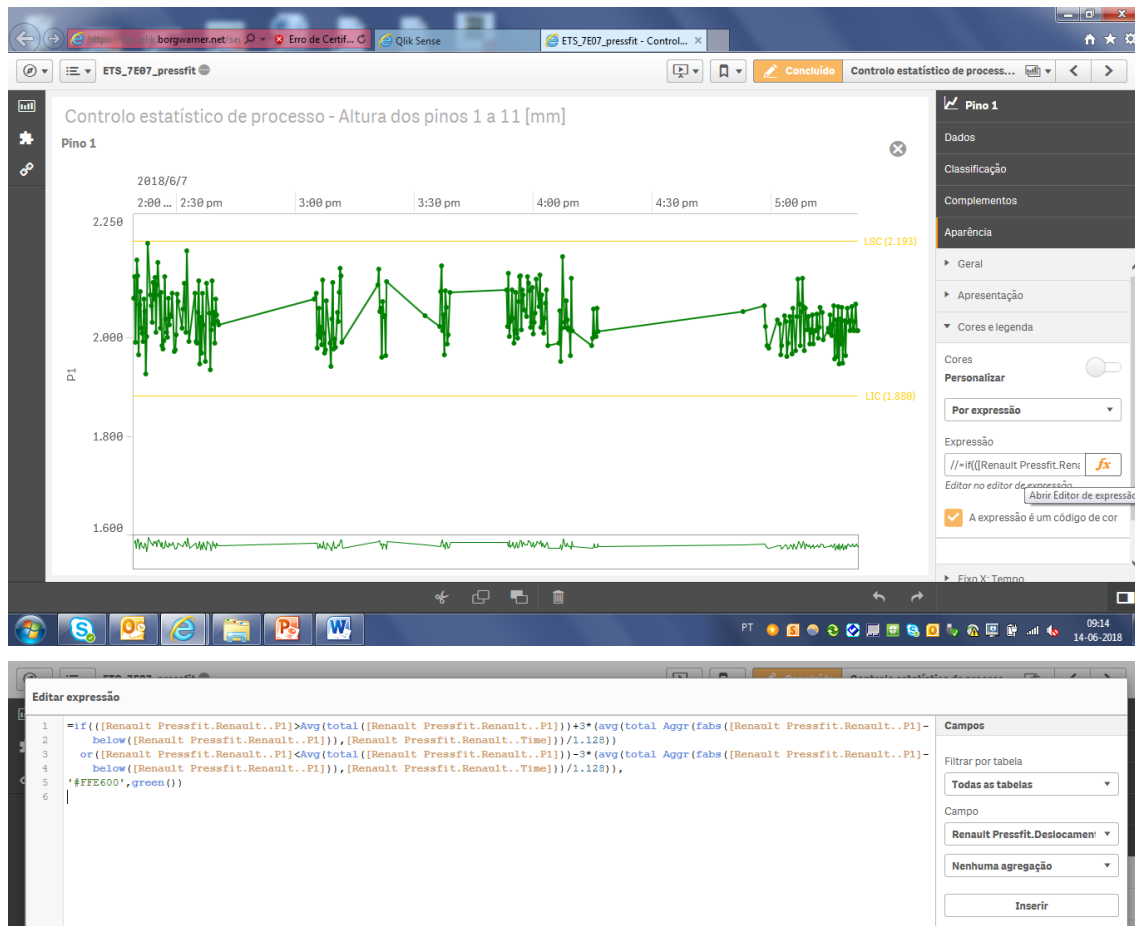
Filtrar por tabela
Todas as tabelas

Campo
Renault Pressfit.Deslocamen

Nenhuma agregação

Inserir

A cor dos pontos varia conforme o seu valor está conforme com as especificações e em controlo ou não:



Indicador de estado

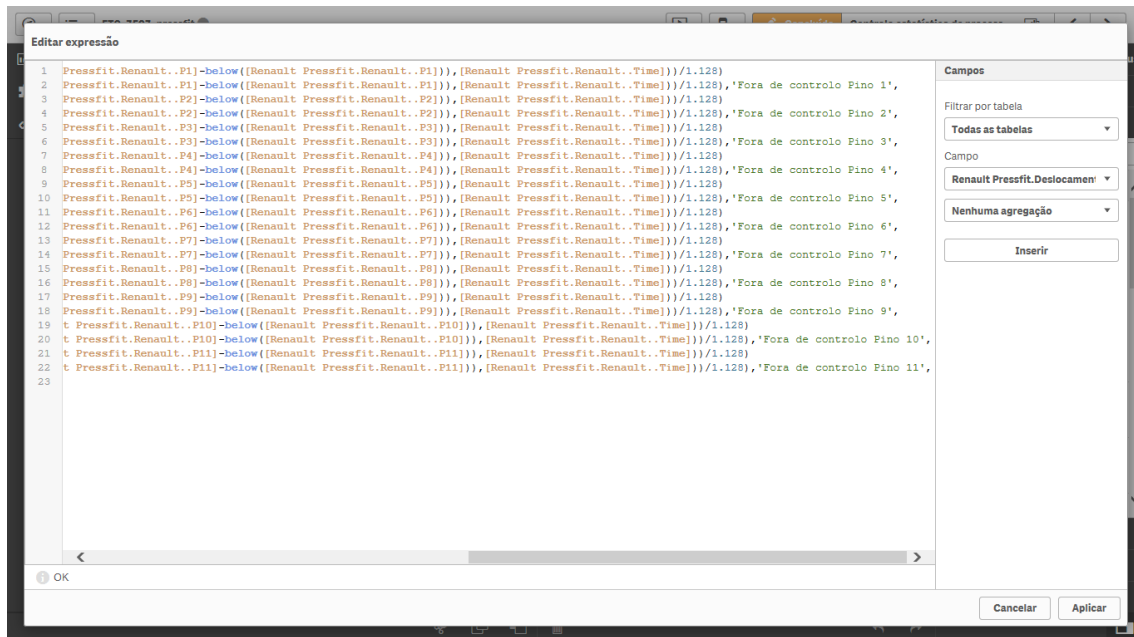
Foi adicionado um “Simple KPI” para mostrar o estado de controlo estatístico do processo, assim se algum ponto sair dos limites de controlo o indicador passa de verde para amarelo, indicando qual o pino que disparou o alerta:



Para isto foi criada uma medida em formato de texto para descrever o estado do processo:



Desenho de um sistema de controlo estatístico num processo de cravação de componentes eletrónicos



A cor de fundo também varia consoante o estado do processo esteja dentro ou fora de controlo:



Através da expressão:

Desenho de um sistema de controlo estatístico num processo de cravação de componentes eletrónicos

Editar expressão

```

1 =if((max((Renault Pressfit.Renault..P1))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P1)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
2 or(min((Renault Pressfit.Renault..P1)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P1)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
3 if((max((Renault Pressfit.Renault..P2))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P2)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
4 or(min((Renault Pressfit.Renault..P2)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P2)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
5 if((max((Renault Pressfit.Renault..P3))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P3)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
6 or(min((Renault Pressfit.Renault..P3)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P3)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
7 if((max((Renault Pressfit.Renault..P4))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P4)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
8 or(min((Renault Pressfit.Renault..P4)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P4)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
9 if((max((Renault Pressfit.Renault..P5))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P5)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
10 or(min((Renault Pressfit.Renault..P5)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P5)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
11 if((max((Renault Pressfit.Renault..P6))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P6)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
12 or(min((Renault Pressfit.Renault..P6)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P6)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
13 if((max((Renault Pressfit.Renault..P7))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P7)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
14 or(min((Renault Pressfit.Renault..P7)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P7)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
15 if((max((Renault Pressfit.Renault..P8))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P8)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
16 or(min((Renault Pressfit.Renault..P8)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P8)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
17 if((max((Renault Pressfit.Renault..P9))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P9)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
18 or(min((Renault Pressfit.Renault..P9)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P9)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
19 if((max((Renault Pressfit.Renault..P10))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P10)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
20 or(min((Renault Pressfit.Renault..P10)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P10)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
21 if((max((Renault Pressfit.Renault..P11))>avg(total((Renault Pressfit.Renault..P11)))+3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
22 or(min((Renault Pressfit.Renault..P11)<avg(total((Renault Pressfit.Renault..P11)))-3*avg(total Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P
23 Green())))))))))))

```

Campos

Filtrar por tabela

Todas as tabelas

Campo

Renault Pressfit.Deslocamen

Nenhuma agregação

Inserir

OK

Cancelar

Aplicar

Editar expressão

```

1 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P1)-below((Renault Pressfit.Renault..P1)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
2 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P1)-below((Renault Pressfit.Renault..P1)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
3 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P2)-below((Renault Pressfit.Renault..P2)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
4 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P2)-below((Renault Pressfit.Renault..P2)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
5 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P3)-below((Renault Pressfit.Renault..P3)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
6 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P3)-below((Renault Pressfit.Renault..P3)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
7 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P4)-below((Renault Pressfit.Renault..P4)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
8 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P4)-below((Renault Pressfit.Renault..P4)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
9 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P5)-below((Renault Pressfit.Renault..P5)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
10 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P5)-below((Renault Pressfit.Renault..P5)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
11 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P6)-below((Renault Pressfit.Renault..P6)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
12 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P6)-below((Renault Pressfit.Renault..P6)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
13 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P7)-below((Renault Pressfit.Renault..P7)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
14 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P7)-below((Renault Pressfit.Renault..P7)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
15 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P8)-below((Renault Pressfit.Renault..P8)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
16 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P8)-below((Renault Pressfit.Renault..P8)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
17 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P9)-below((Renault Pressfit.Renault..P9)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
18 qgr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P9)-below((Renault Pressfit.Renault..P9)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
19 Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P10)-below((Renault Pressfit.Renault..P10)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
20 Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P10)-below((Renault Pressfit.Renault..P10)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
21 Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P11)-below((Renault Pressfit.Renault..P11)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128)
22 Aggr(fabs((Renault Pressfit.Renault..P11)-below((Renault Pressfit.Renault..P11)),(Renault Pressfit.Renault..Time)))/1.128),Yellow(),
23

```

Campos

Filtrar por tabela

Todas as tabelas

Campo

Renault Pressfit.Deslocamen

Nenhuma agregação

Inserir

OK

Cancelar

Aplicar

59

Visualização por linhas

Uma única página com cartas para 11 pode tornar a visualização difícil, por isso foi criada uma visualização alternativa em que é apresentada uma linha de medição em cada página com os respetivos pinos e os indicadores de estado para todos os pinos.

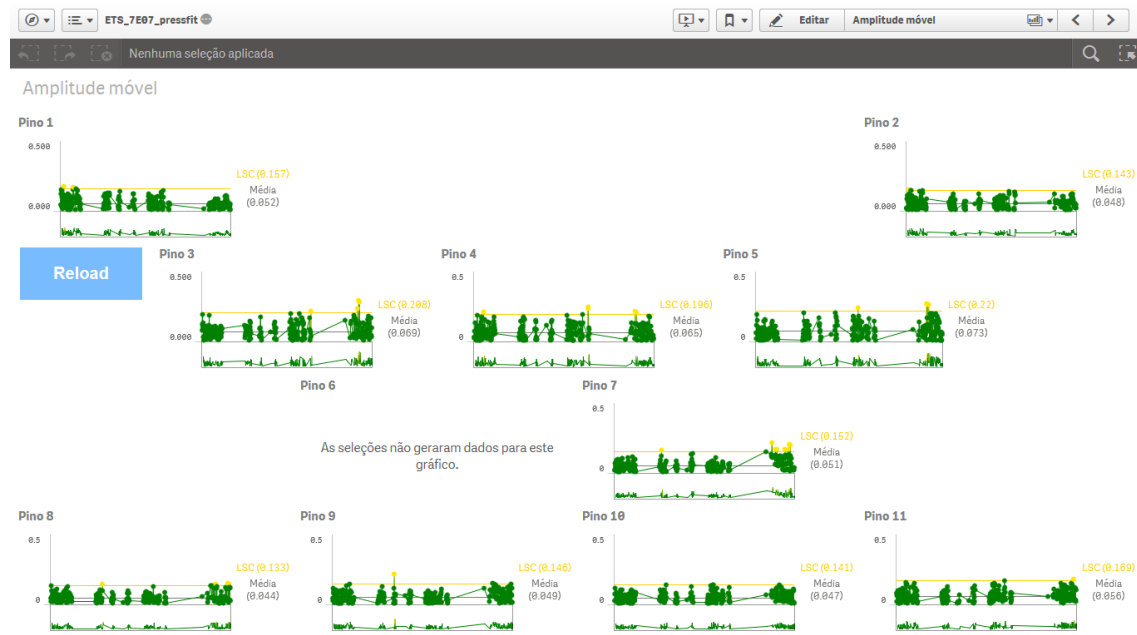


Desenho de um sistema de controlo estatístico num processo de cravação de componentes eletrónicos



Amplitude móvel

No seguimento das cartas de controlo de valores individuais criadas anteriormente, foi acrescentada uma página que permite visualizar a amplitude móvel.



A expressão usada para calcular cada amplitude móvel foi:

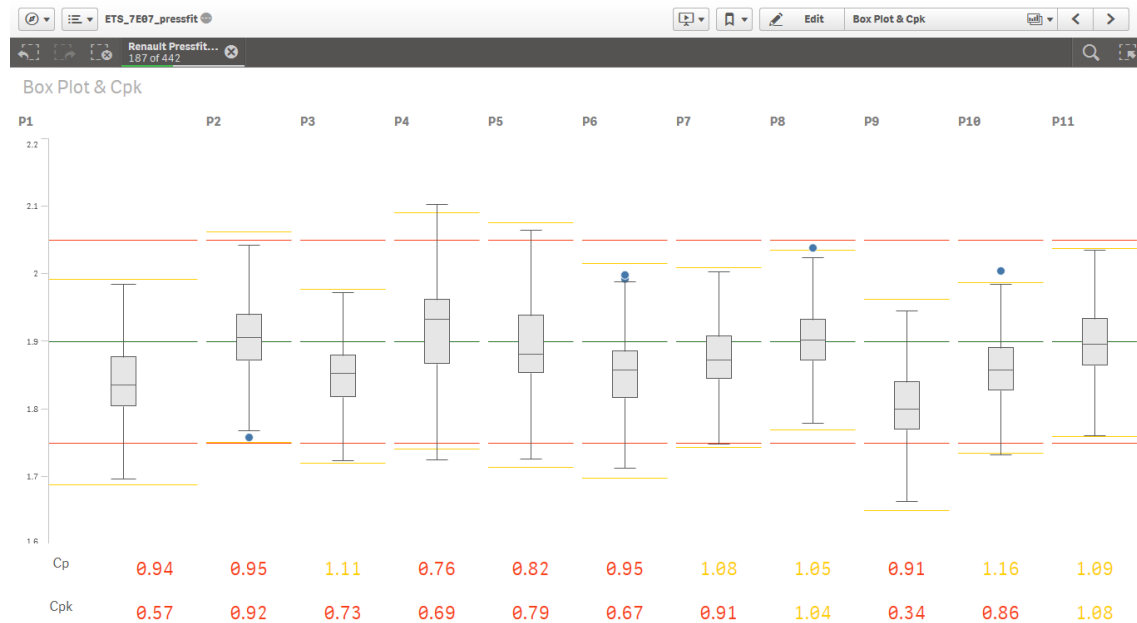


E para o limite superior de controlo da amplitude móvel média:



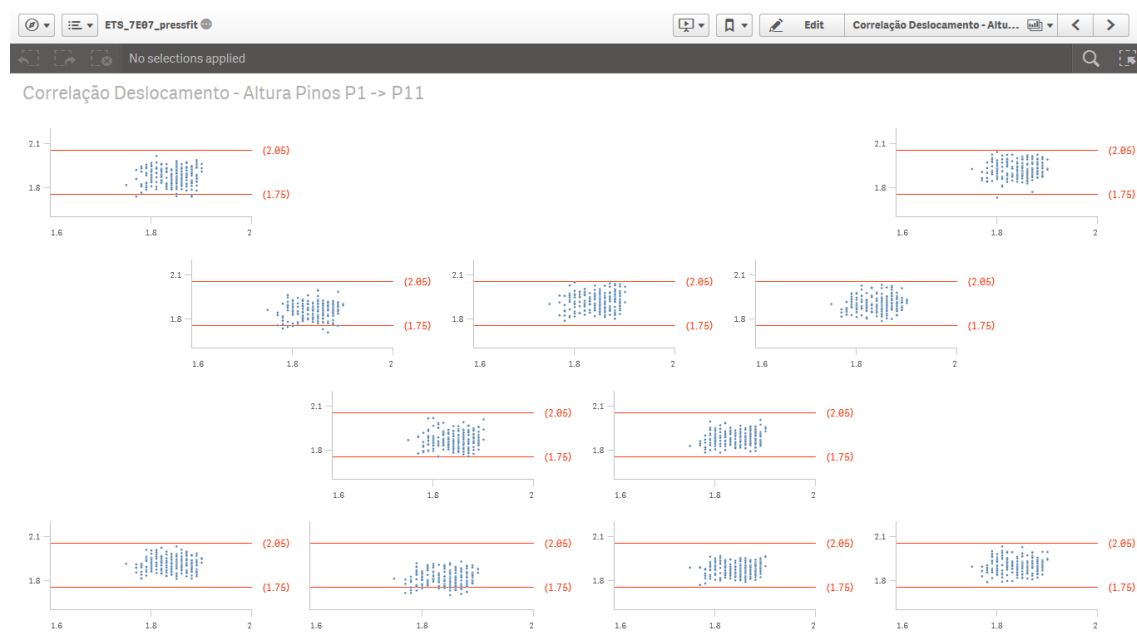
Box Plot

Foi criada outra folha onde se pode observar os mesmos dados das cartas de controlo em Box Plot e são calculados os índices de capacidade de processo Cp e Cpk. Isto permite analisar mais facilmente a distribuição dos resultados e diferenças entre as alturas dos vários pinos, quer na sua centralidade, quer na variabilidade.

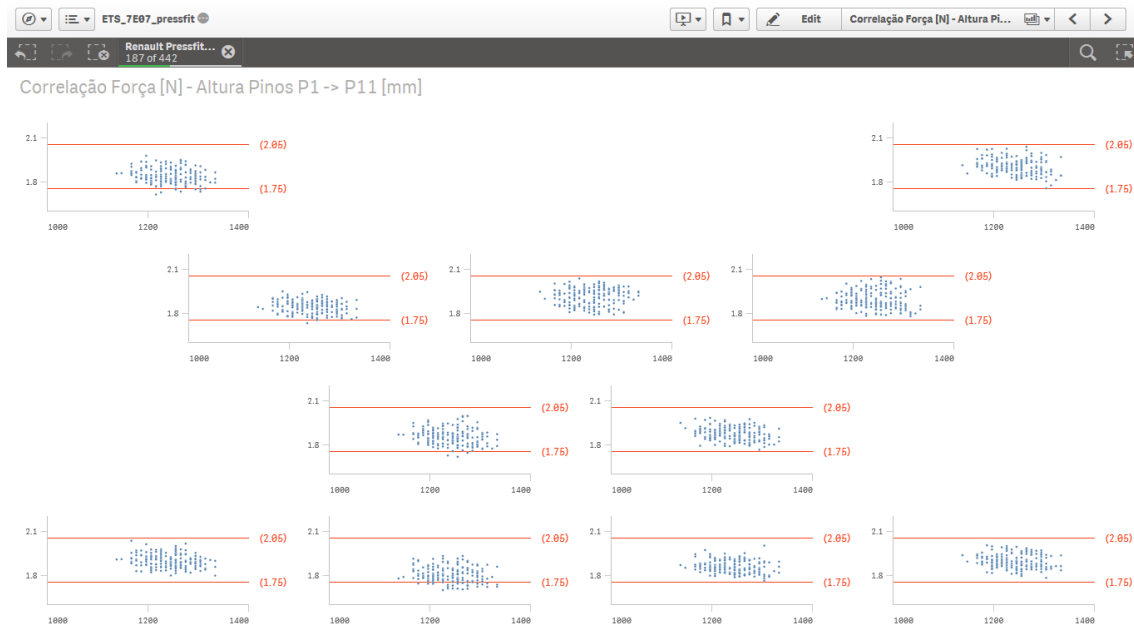


Deslocamento – Altura Pinos

Nesta folha é possível analisar a correlação entre o deslocamento percorrido pelo cilindro hidráulico e a altura dos pinos resultante. Analisando os dados parece não existir uma relação significativa entre estas variáveis, contrariamente ao que seria expectável.

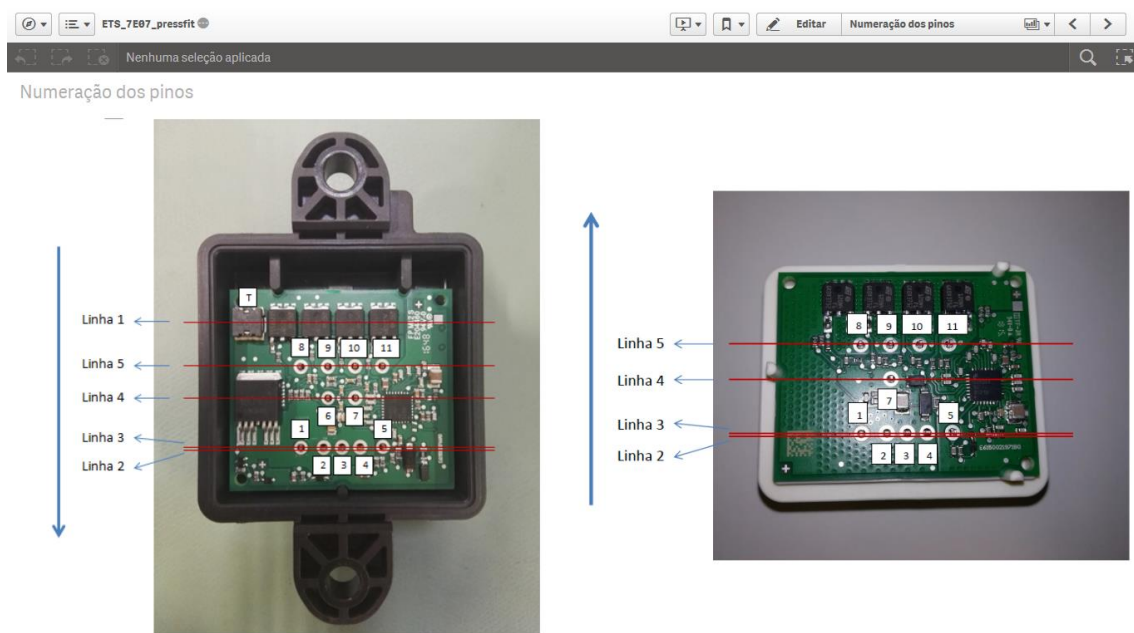


Foi feita uma análise semelhante para a relação entre a força aplicada pelo cilindro e a altura dos pinos resultante e os resultados são semelhantes.



Sequência de medição e numeração dos pinos

A numeração dos pinos é apresentada em baixo e a ordem de medição é indicada pelas setas verticais a azul.



ANEXO F: Análise da capacidade de processo inicial

No seguimento do capítulo 5.1 *Análise de capacidade de processo de press fit*, neste anexo faz-se uma análise de capacidade de processo, para mais informações ver o capítulo 2.2.

Renault

Testes de normalidade Renault

Para garantir que se obtém uma análise de capacidade de processo válida é necessário garantir que os dados seguem uma distribuição normal. Para isto aplicou-se o teste de normalidade no minitab a cada uma das linhas de medição, que pode ser visto nas Figura 55 a Figura 58. Estabelecendo-se um grau de confiança de 95%, se o P-Value for superior a 5% pode-se assumir a hipótese nula, isto é, os dados seguem uma distribuição normal.

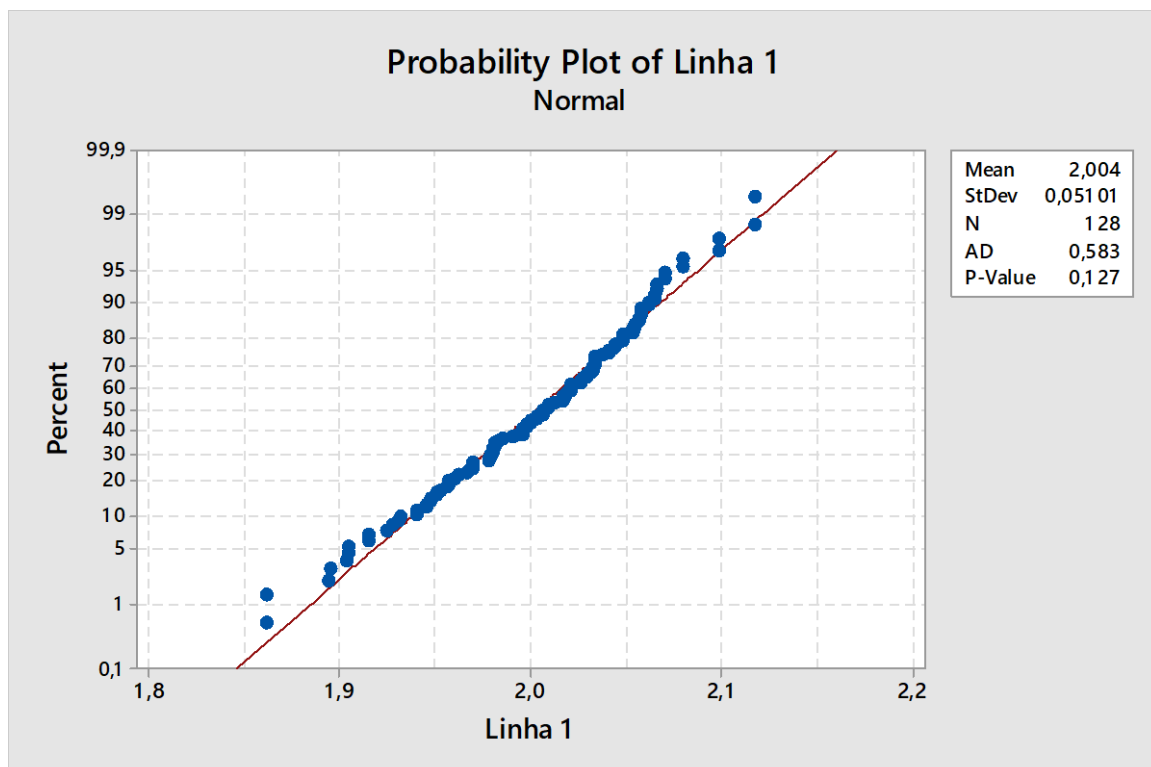


Figura 55 - Teste de normalidade à linha 1 da Renault (Minitab 17)

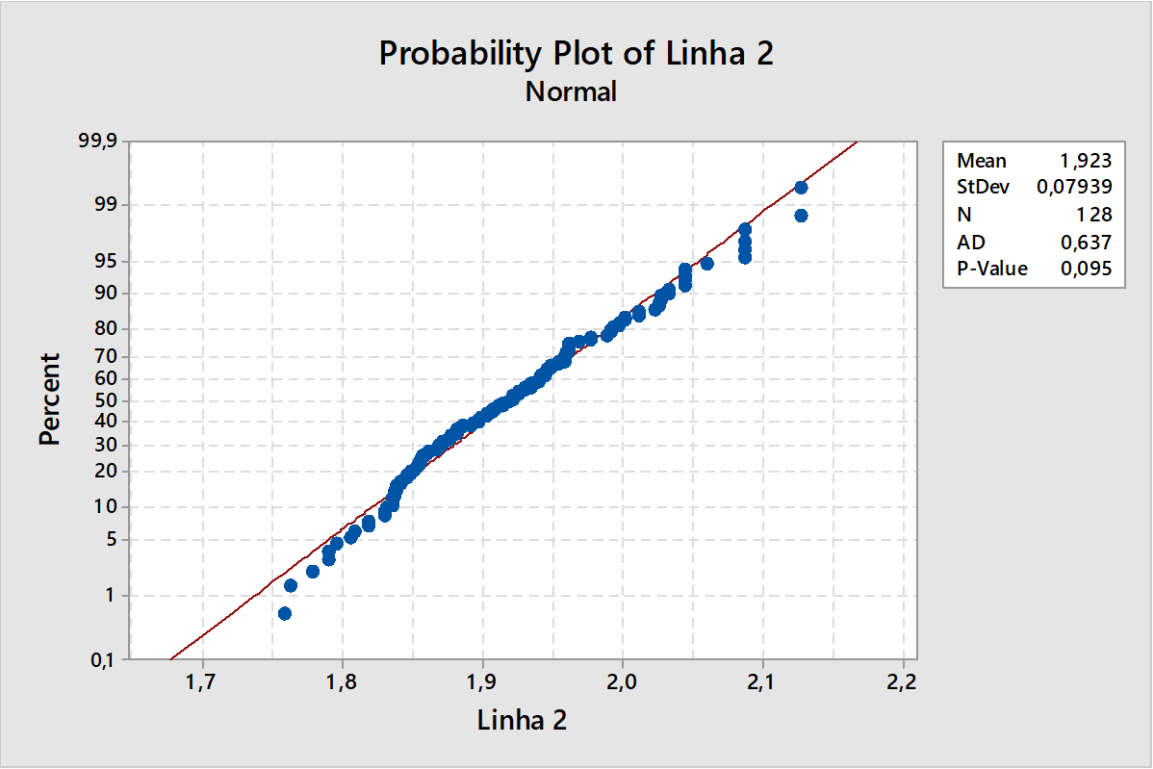


Figura 56 - Teste de normalidade à linha 2 da Renault (Minitab 17)

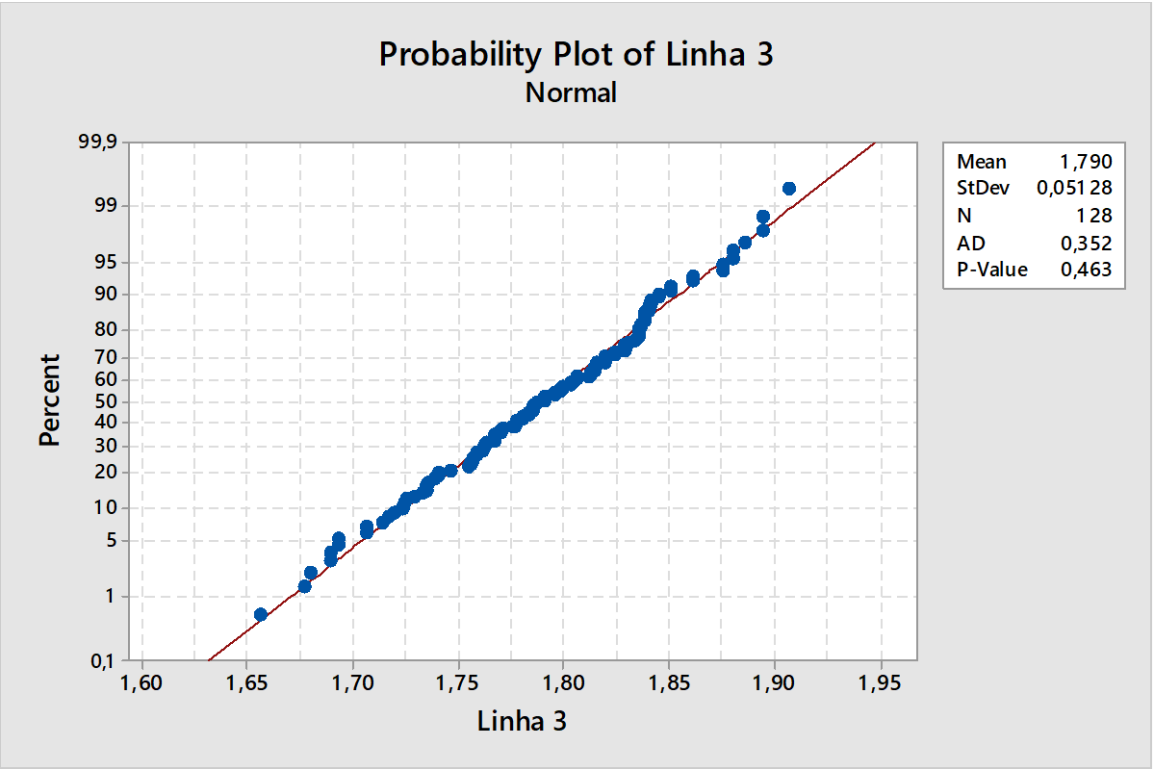


Figura 57 - Teste de normalidade à linha 3 da Renault (Minitab 17)

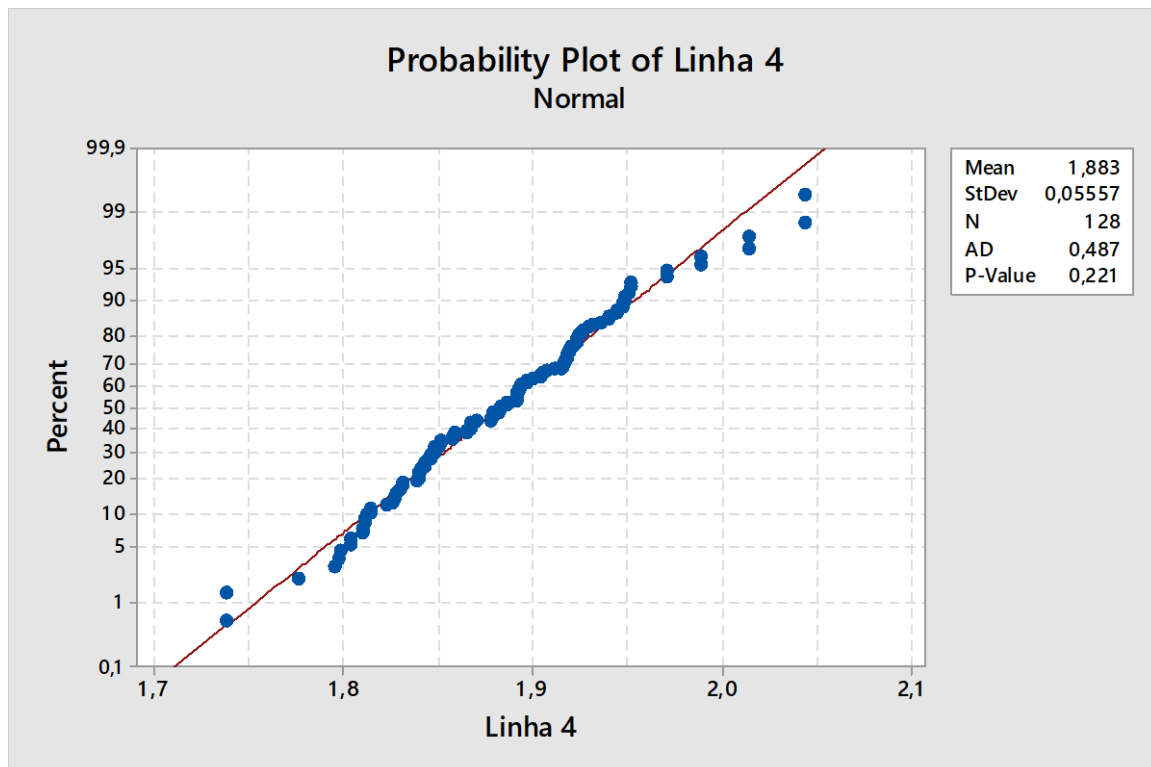


Figura 58 - Teste de normalidade à linha 4 da Renault (Minitab 17)

Todas as linhas apresentam um P-value superior a 5%, logo assume-se que os dados seguem uma distribuição normal.

Análise de capacidade de processo global Renault

O relatório de capacidade de processo apresentado na Figura 59 demonstra valores de C_p , C_{pk} , P_p e P_{pk} inferiores a 1 e muito próximos entre si. Isto revela que os dados medidos estão centrados no alvo, no entanto existe uma grande variação entre subgrupos (linhas de medição). Um PPM de 14146 prevê uma quantidade elevada de sucata a ser produzida.

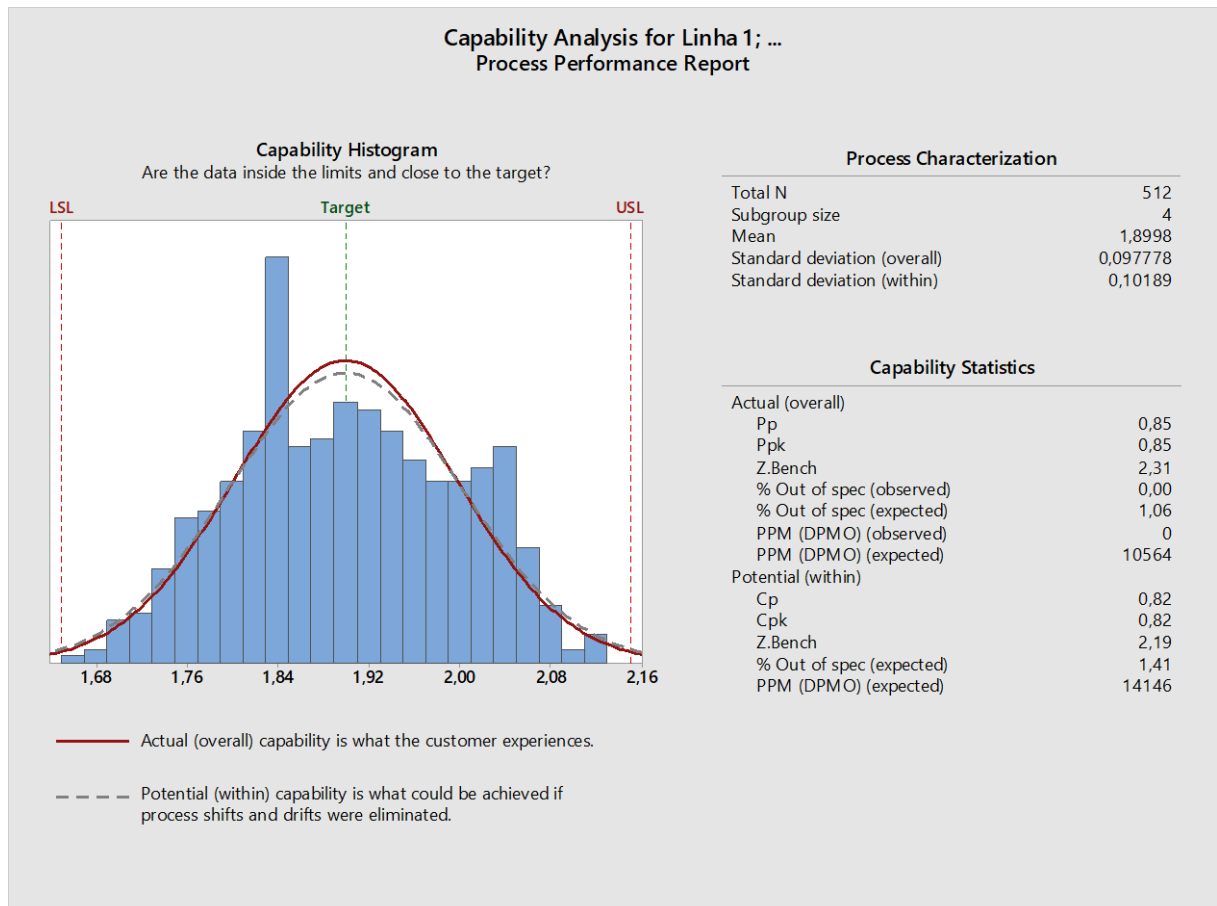


Figura 59 - Gráfico de capacidade de processo global do *press fit* Renault (Minitab 17)

Assim, torna-se importante realizar uma análise a cada linha individualmente. A medição da altura dos pinos é apresentada através do valor de um pino por cada linha e esta medição é feita automaticamente a todas as peças. Assim, considerando as recomendações referidas no final do capítulo 2.1 *Cartas de controlo*, realizou-se uma análise através de uma carta de controlo I-AM, presente na Figura 60. Daqui parece existir uma diferença assinalável entre as várias linhas.

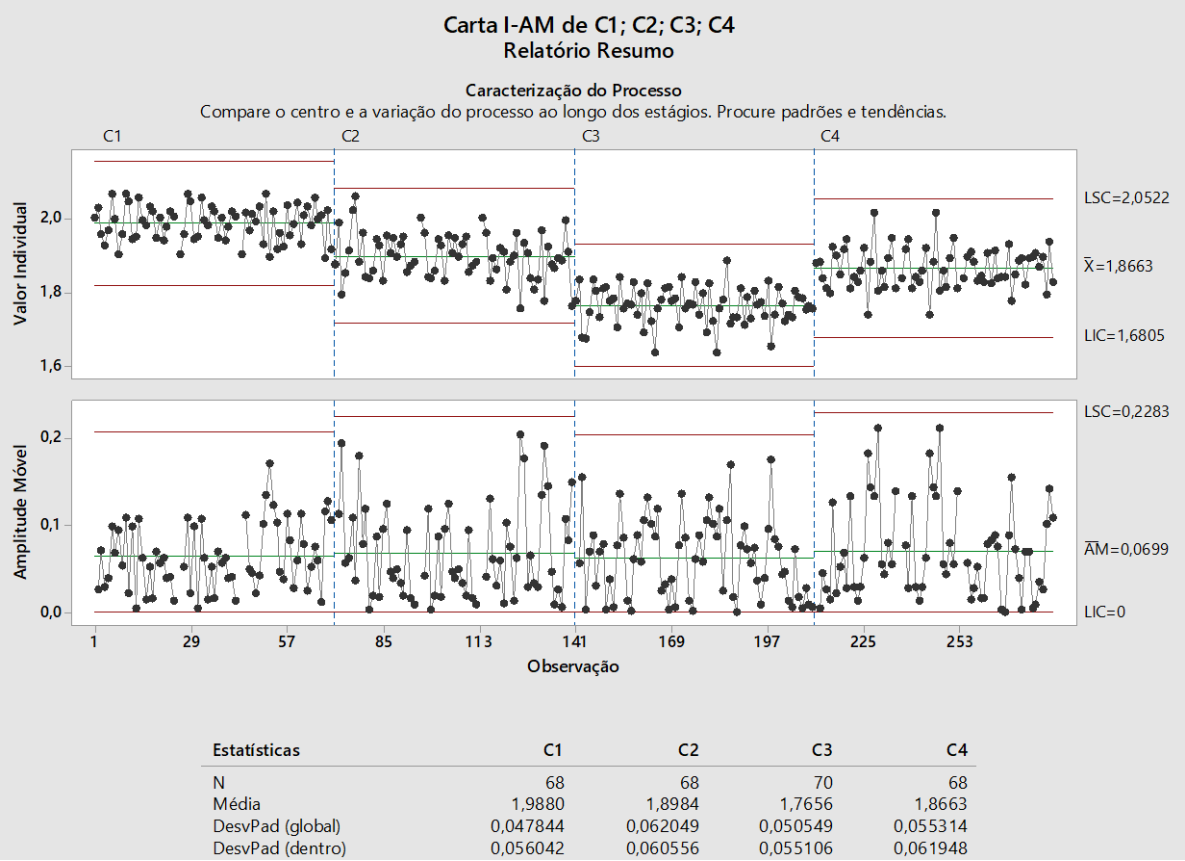


Figura 60 - Carta I-AM para análise de valor individual (em cima) e amplitude móvel (em baixo) por linha de medição (Renault) (Minitab 17)

Análise da capacidade de processo por linha de medição Renault

Seguiu-se, portanto, para uma análise de capacidade de processo a cada linha separadamente, que pode ser observada nas Figura 61 a Figura 64.

A linha 1 aparenta ter um ligeiro desvio em direção ao limite superior de especificação (LSE) com uma variabilidade controlada e com alguma folga para os limites. O valor de Cp e Pp próximos indica que não há grande diferença entre os subgrupos. Um Cp de 1,62 indica que o processo é estável e não tem muita variação. Já o valor de Cpk de 0,95 revela um desvio significativo em relação ao alvo.

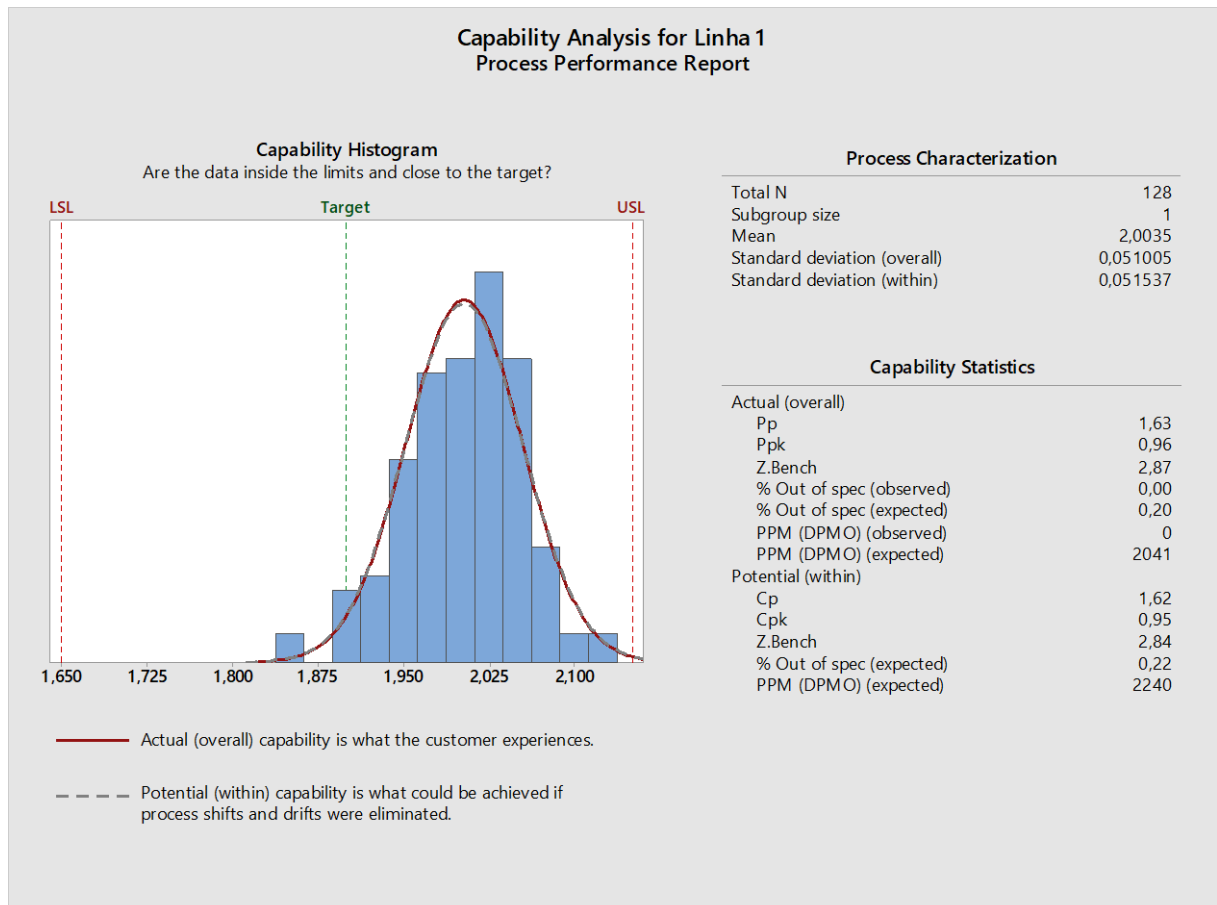


Figura 61 - Análise de capacidade de processo à linha 1 Renault (Minitab 17)

A linha 2 aparenta ter a média próxima do valor esperado, embora com alguma variabilidade e uma curta folga para os limites. Os valores de Pp e Cp próximos indicam pouca diferença entre subgrupos. A proximidade entre Cp e Cpk revela boa centralidade dos dados. Já o Cpk de 0,93 indica que a variabilidade deve ser reduzida.

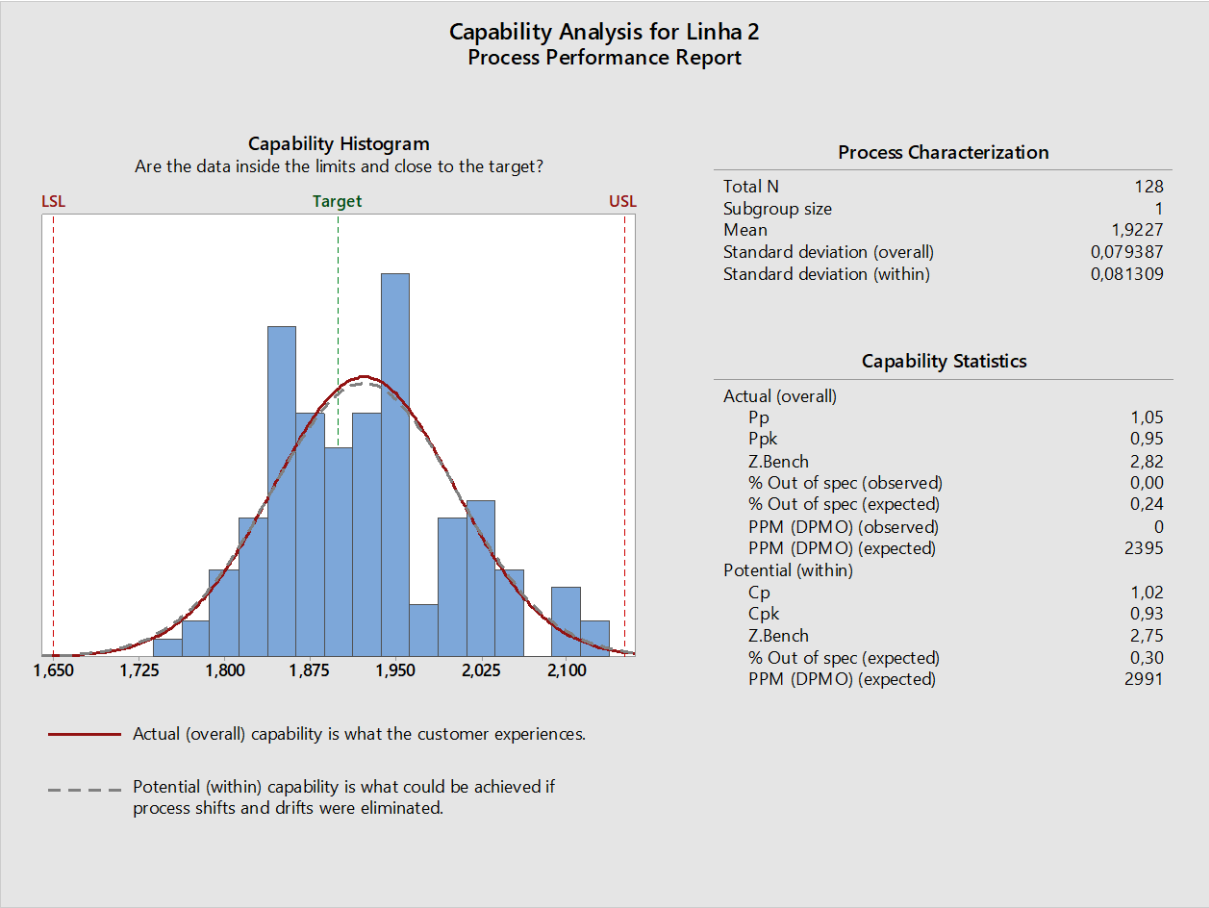


Figura 62 - Análise de capacidade de processo à linha 2 Renault (Minitab 17)

A linha 3 parece ser a mais crítica pois apresenta um grande desvio da média no sentido do LIE e alguma variabilidade associada que origina valores muito próximos deste limite, saindo por vezes do intervalo requerido. Aqui o C_p de 1,70 indica um bom controlo de variabilidade, já o C_{pk} de 0,95 revela um desvio do alvo grave. Um PPM de 3205 indica um valor esperado de peças rejeitadas algo elevado.

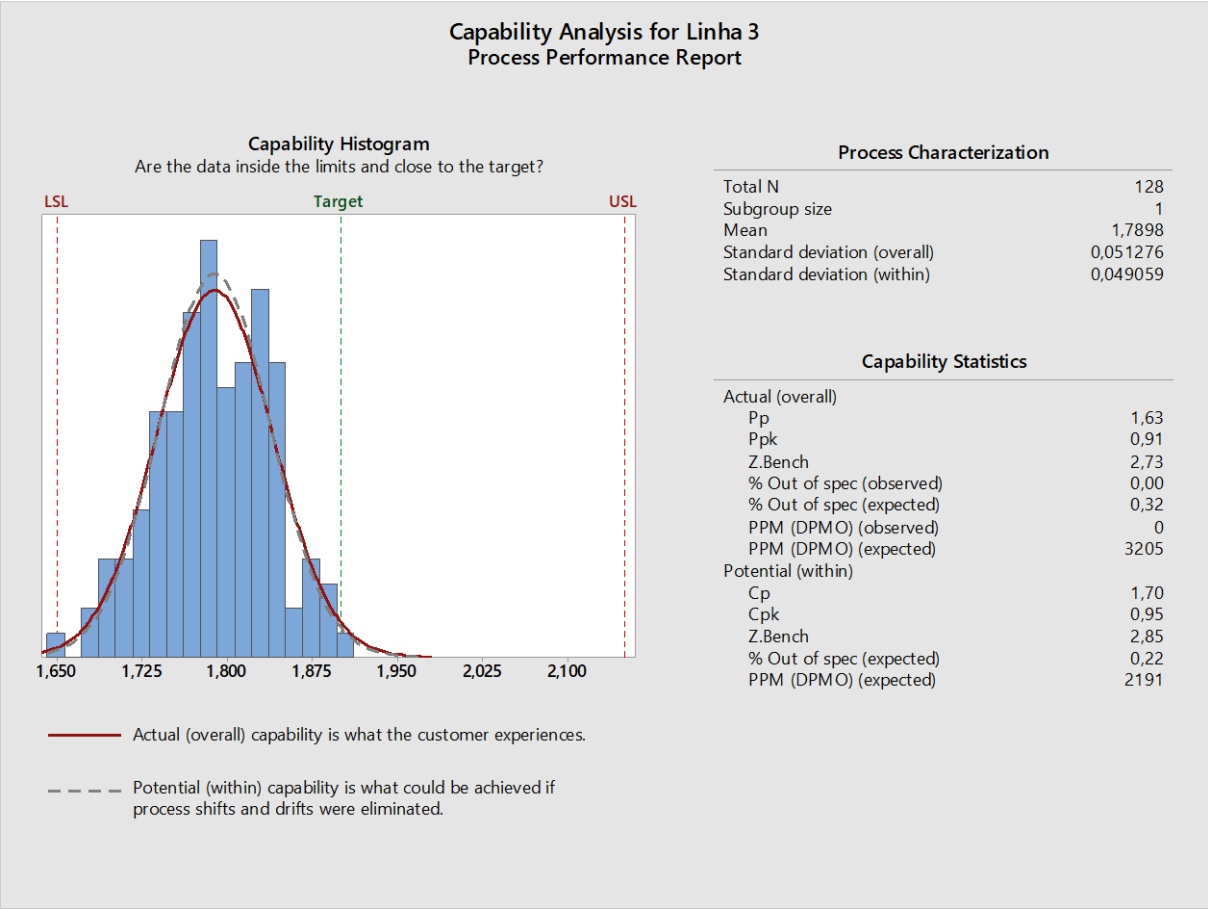


Figura 63 - Análise de capacidade de processo à linha 3 Renault (Minitab 17)

A linha 4 poderá ter um ligeiro desvio da média no sentido do LIE e a variabilidade aparenta estar controlada, sem se aproximar dos limites. O Cp e Cpk indicam que pode ser melhorada ligeiramente a variabilidade e o desvio do alvo.

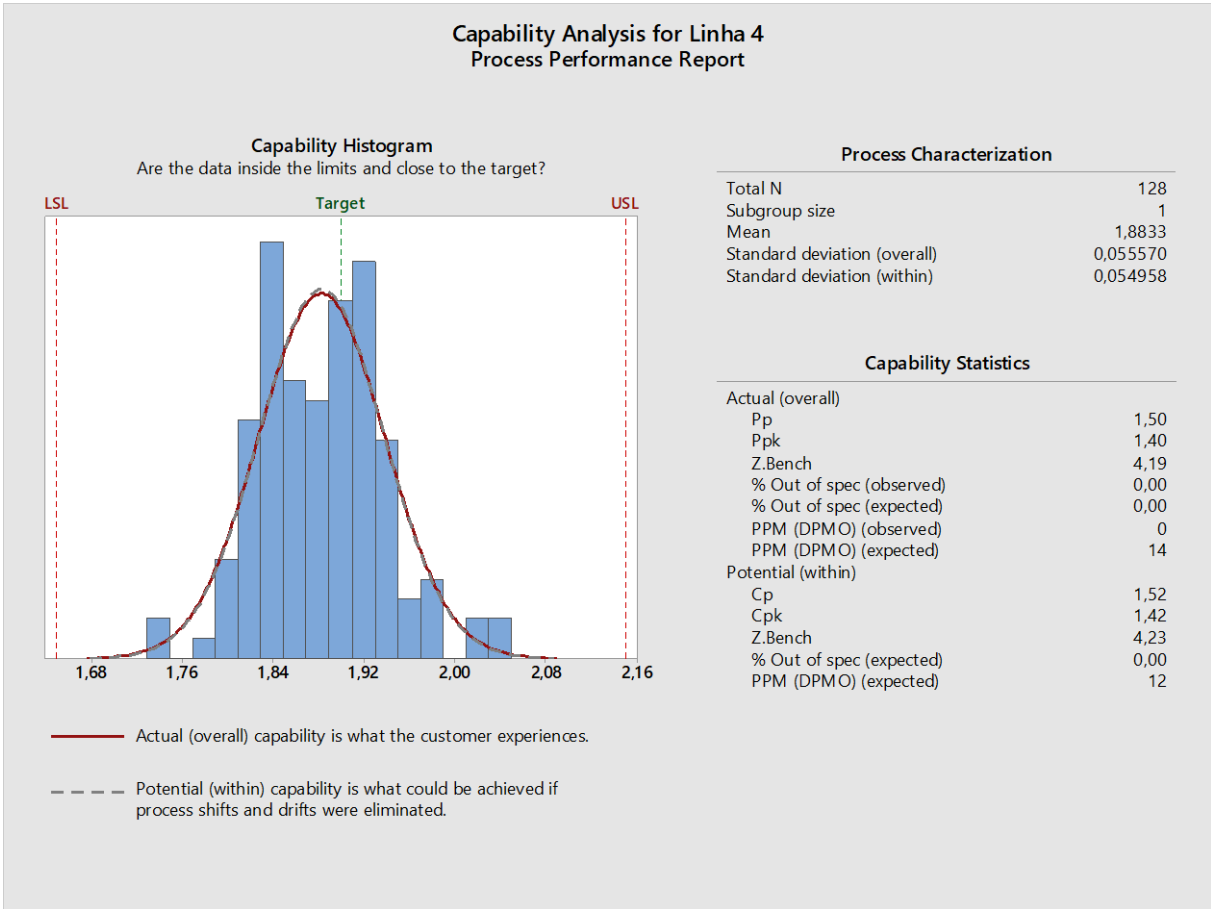


Figura 64 - Análise de capacidade de processo à linha 4 Renault (Minitab 17)

Com esta análise verifica-se que o processo tem a estabilidade necessária em cada linha, não existindo causas comuns de variação muito significativas. No entanto existem variações significativas entre as várias linhas, pelo que devem ser investigadas possíveis causas de variação assinaláveis.

Ford

Testes de normalidade Ford

Efetuuou-se para a Ford testes de normalidade, à semelhança dos realizados para a Renault, igualmente com grau de confiança 95% e P-Value 5%, nas Figura 65 a Figura 69.

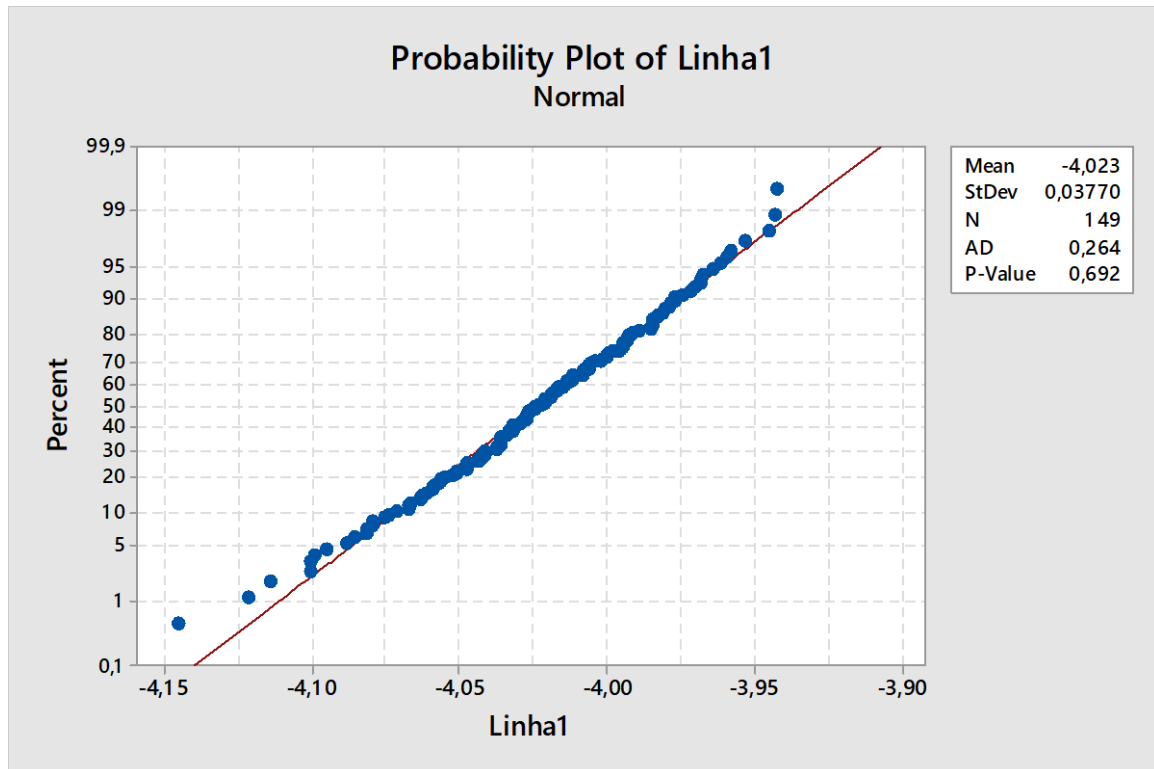


Figura 65 - Teste de normalidade à linha 1 da Ford (Minitab 17)

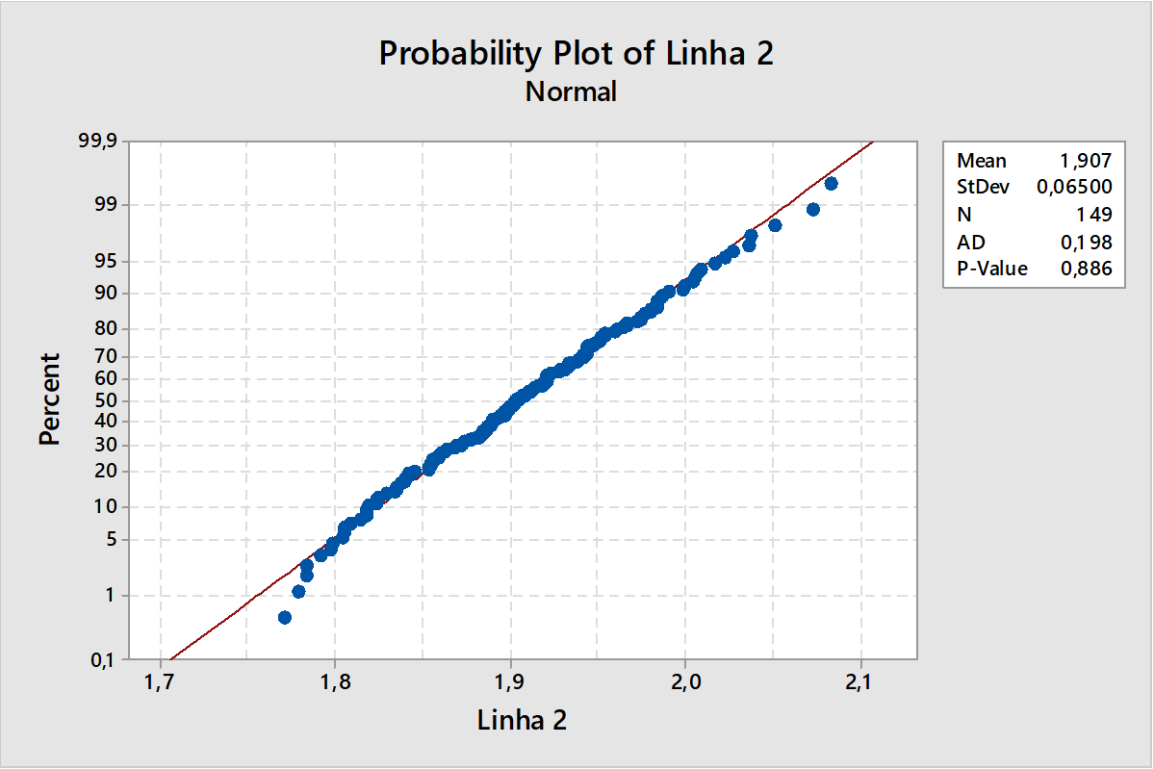


Figura 66 - Teste de normalidade à linha 2 da Ford (Minitab 17)

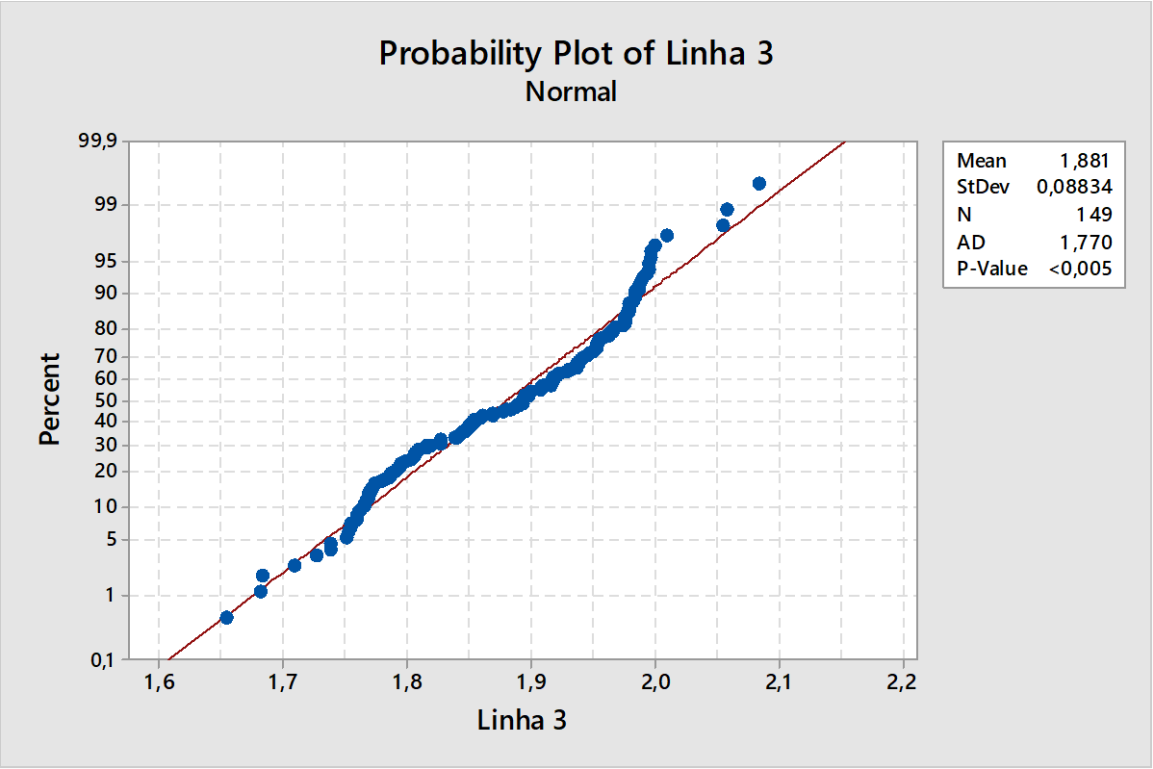


Figura 67 - Teste de normalidade à linha 3 da Ford (Minitab 17)

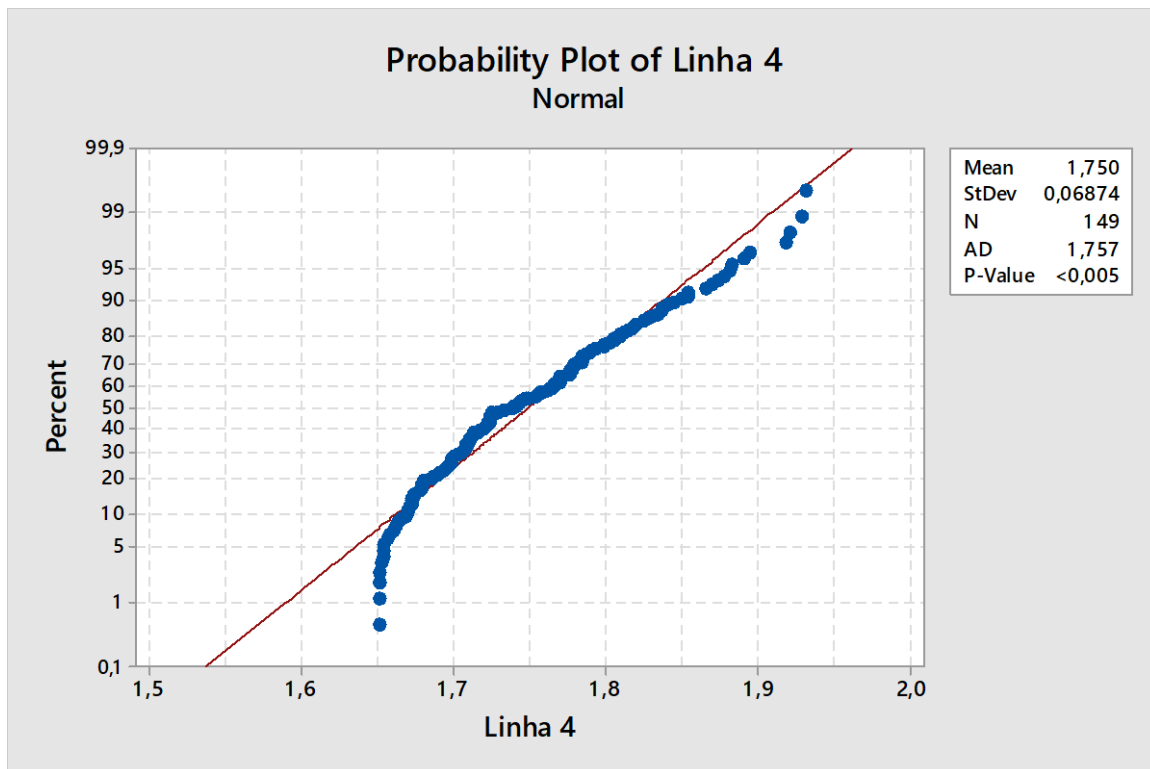


Figura 68 - Teste de normalidade à linha 4 da Ford (Minitab 17)

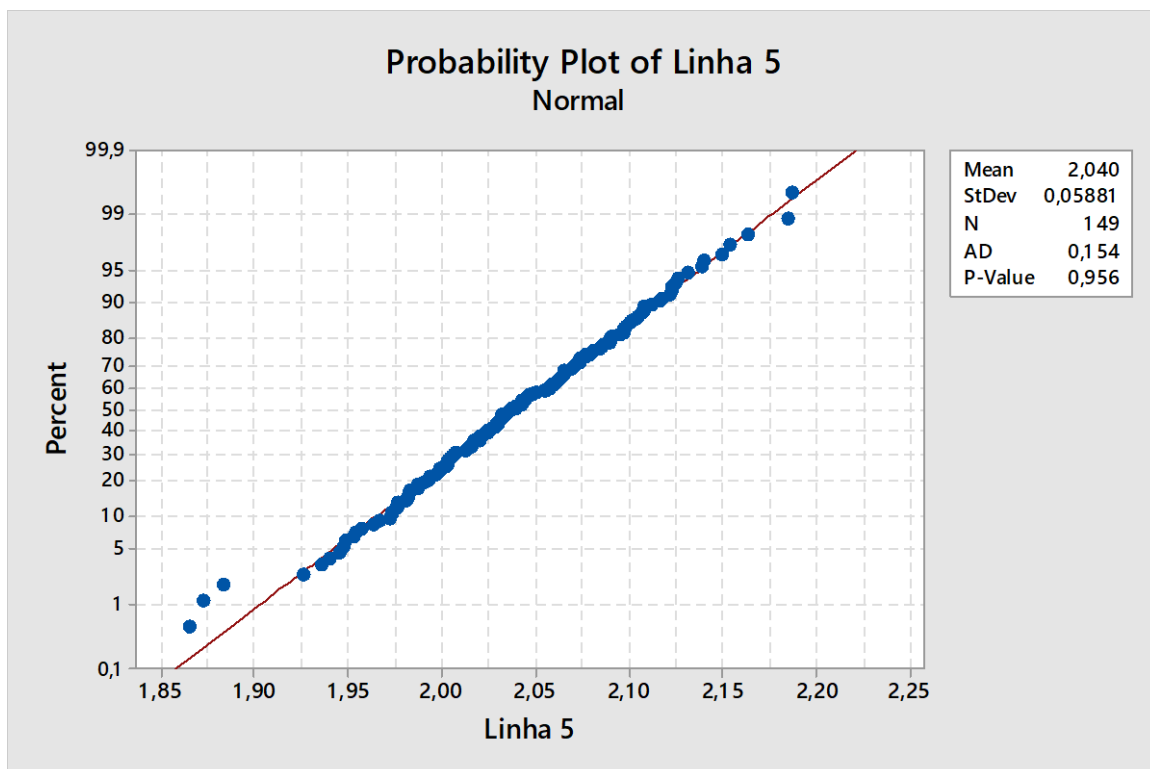


Figura 69 - Teste de normalidade à linha 5 da Ford (Minitab 17)

Daqui se conclui que se pode assumir que as linhas 1, 2 e 5 seguem uma distribuição normal, mas as linhas 3 e 4 verifica-se que não seguem uma distribuição normal.

Análise da capacidade de processo global do processo Ford

Fez-se uma análise semelhante à anterior, desta vez para as peças da Ford. Começou-se por uma análise da capacidade global do processo, usando uma transformação *Box-Cox power transformation* no minitab uma vez que não se assumiu a normalidade dos dados. No gráfico da Figura 70 verifica-se que a média dos dados está centrada no alvo, mas há uma grande variabilidade que leva à produção de alguns componentes fora de especificação que são sucata. Os indicadores de capacidade de processo comprovam isto, por exemplo um Cpk de 0,64 indica uma variabilidade muito elevada para as especificações requeridas.

Além disto, se de uma linha que não seja a última a ser medida (linha 2) resultar um valor “não ok”, não são efetuadas mais medições nessa peça para não aumentar o tempo de ciclo com sucata e, portanto, os valores dessas peças não são aqui considerados. Assim a quantidade de peças rejeitadas em PPM observado será significativamente superior à apresentada e os indicadores de capacidade de processo deverão ser ligeiramente inferiores.

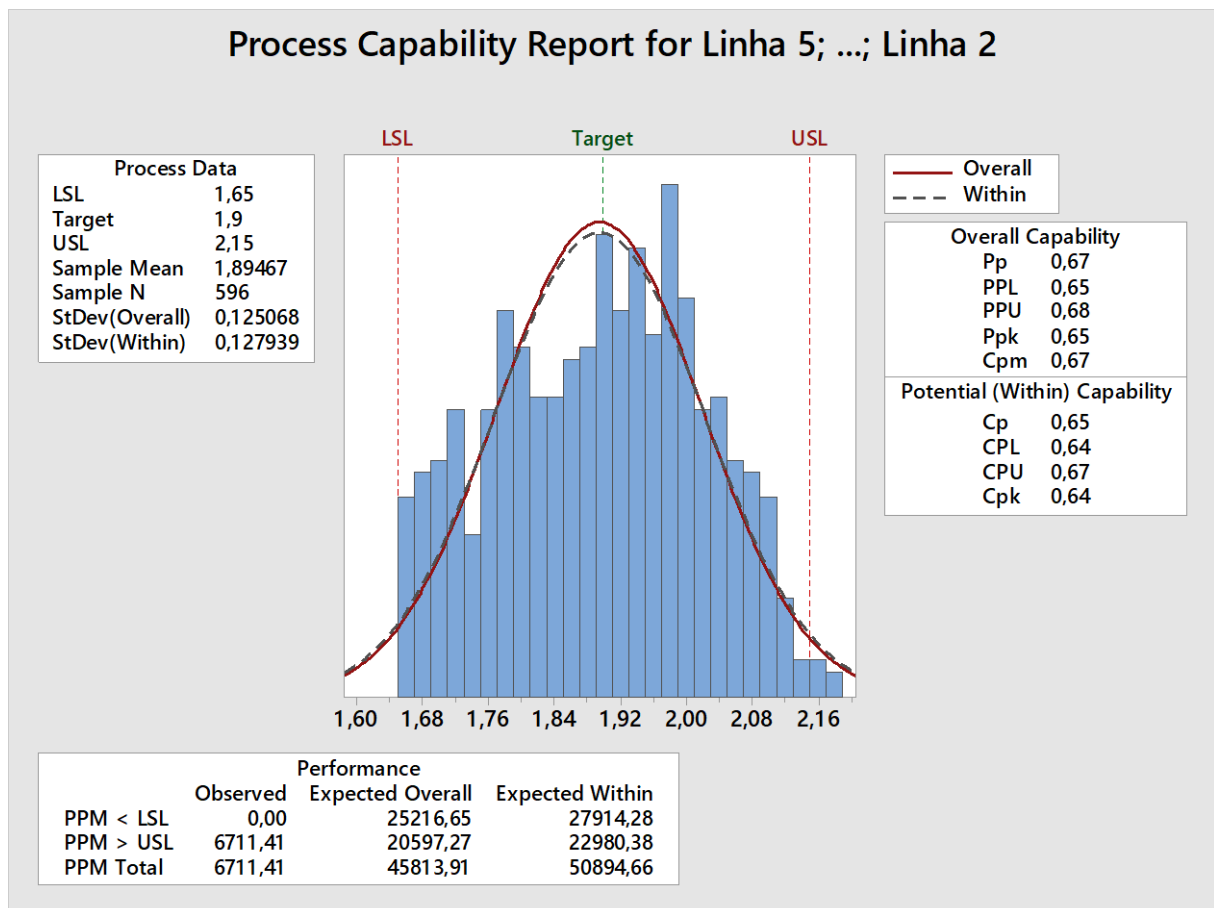


Figura 70 - Gráfico de capacidade de processo global do *press fit* Ford (Minitab 17)

Analisando-se agora cada linha de medição separadamente, na Figura 71, parece existir uma grande diferença entre as várias linhas. Deve-se ter mais atenção nomeadamente à linha 4 porque tem valores muito baixos, à linha 5 porque tem valores muito altos e à linha 3 por apresentar uma variabilidade muito grande comparando com os limites estabelecidos.

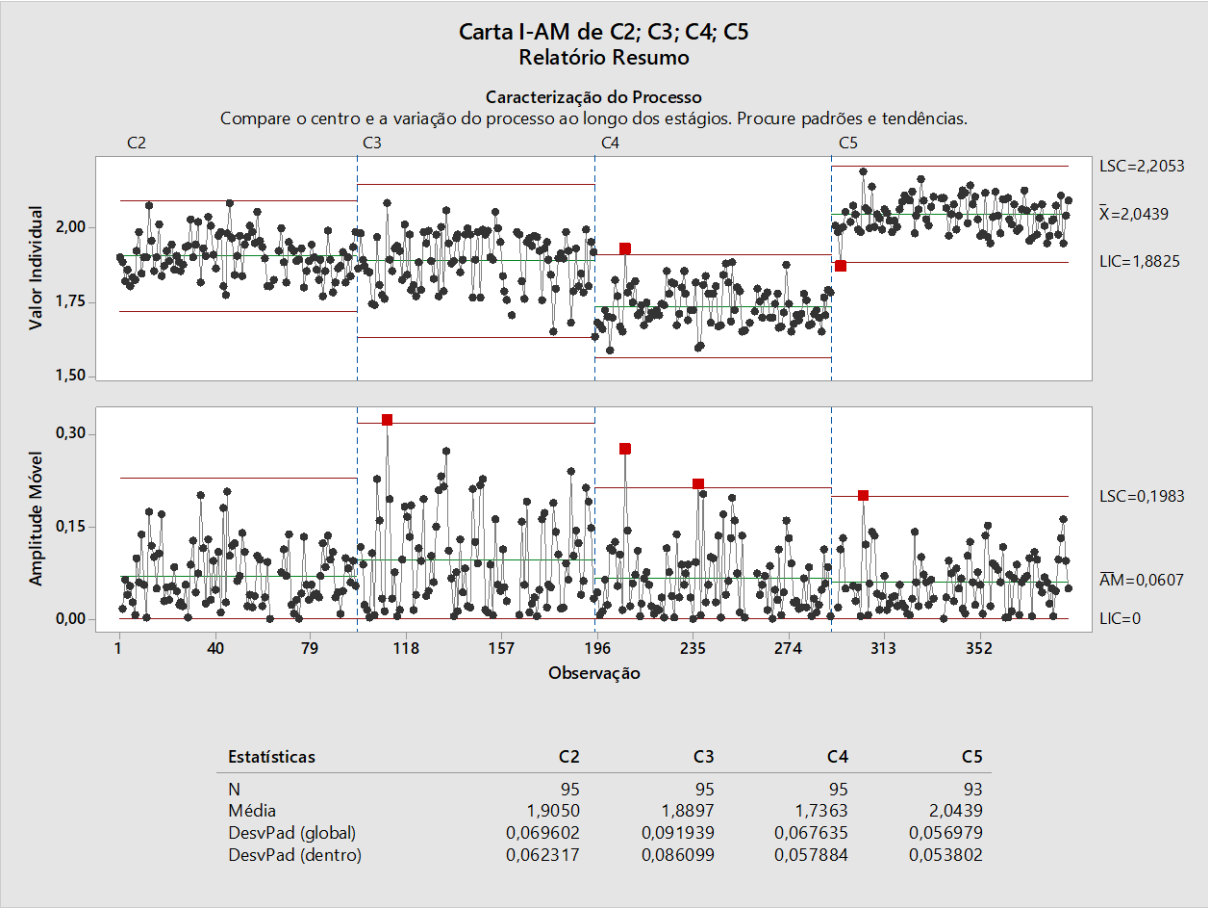


Figura 71 - Carta I-AM para análise de valor individual (em cima) e amplitude móvel (em baixo) por linha de medição (Ford) (Minitab 17)

Análise da capacidade de processo por linha de medição Ford

À semelhança da análise feita às peças da Renault, efetuou-se para as peças da Ford uma análise de capacidade de processo por linha de medição no minitab, Figura 72 a Figura 76.

Na linha 1 existe um ligeiro desvio na direção do LIE, de resto a variabilidade está controlada, o que se verifica pelo Cp de 1,75.

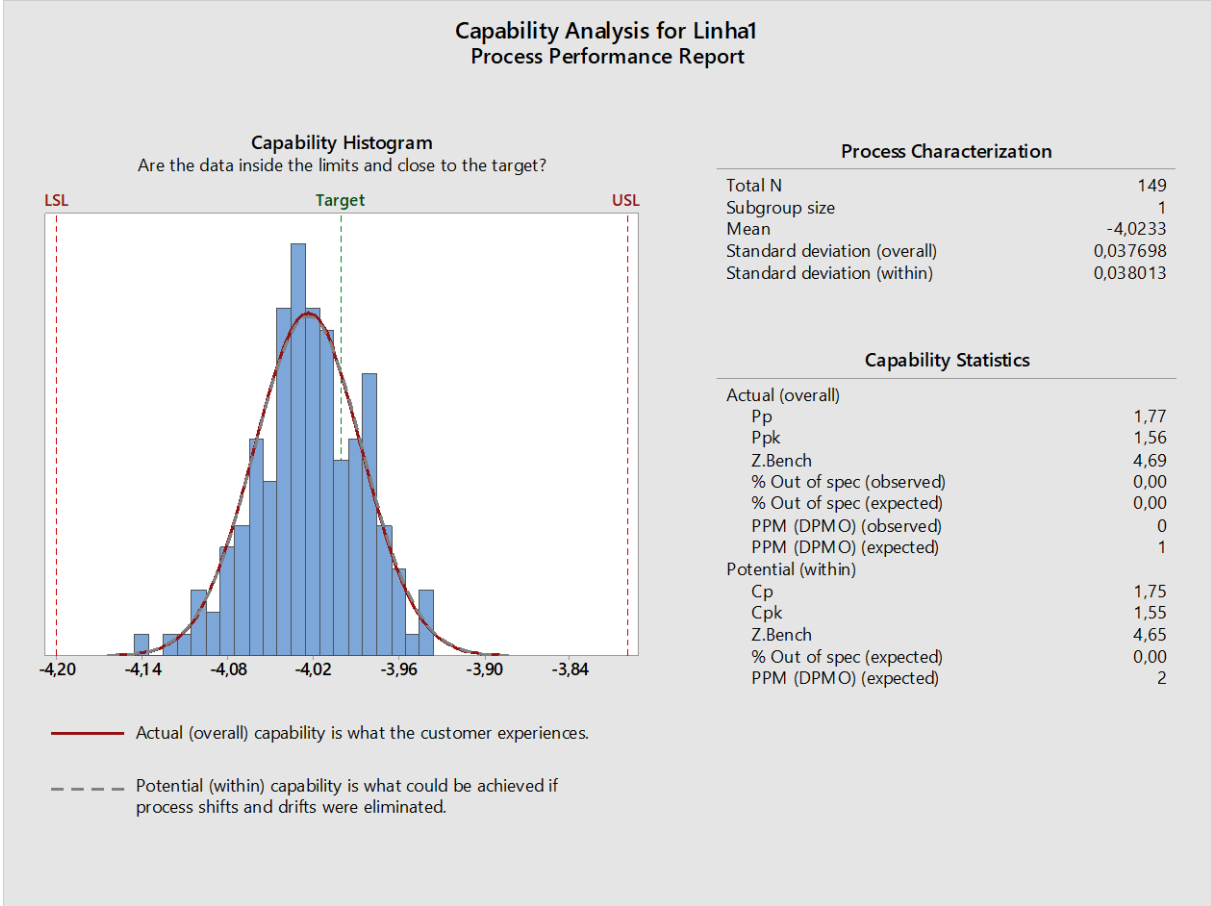


Figura 72 - Análise de capacidade de processo à linha 1 Ford (Minitab 17)

Na linha 5 existe um desvio significativo do alvo na direção do LSE, o que se verifica pela diferença entre um Pp de 1,42 e um Ppk de 0,62. Além disso, existe uma grande variabilidade natural entre peças comprovada por um Pp algo inferior ao Cp de 1,61. Isto leva a sucata prevista de 30874 PPM com o processo atual, o que é bastante superior aos 5000 PPM pretendidos pela empresa para 2018.

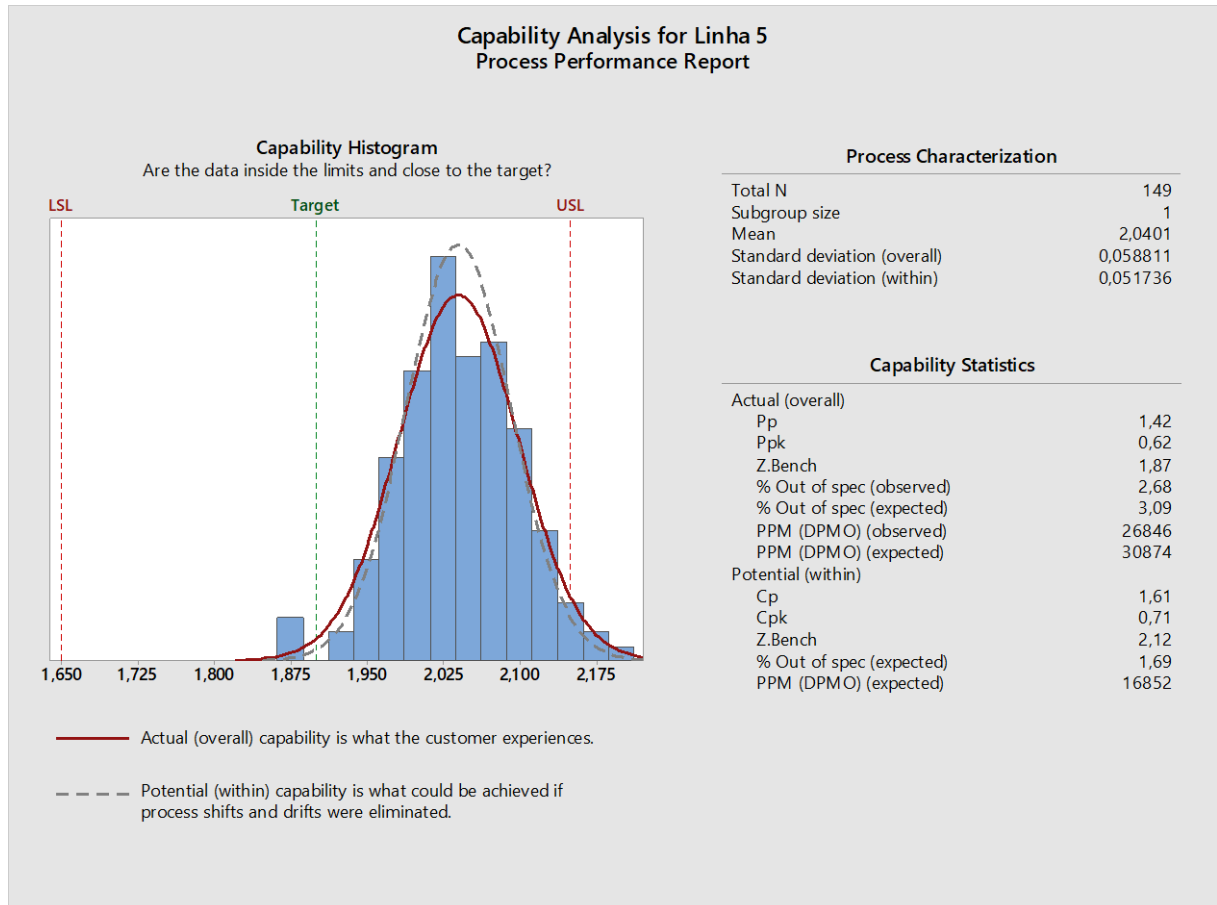


Figura 73 - Análise de capacidade de processo à linha 5 Ford (Minitab 17)

Na linha 4 nem mesmo com a transformação Box-Cox foi possível passar no teste de normalidade assim os valores de capacidade de processo não são de grande confiança. Mesmo assim é claro que existe um desvio grave do alvo e uma grande variabilidade que levam a previsões de sucata muito elevadas de 72549 PPM, o que pode comprometer a rentabilidade do processo.

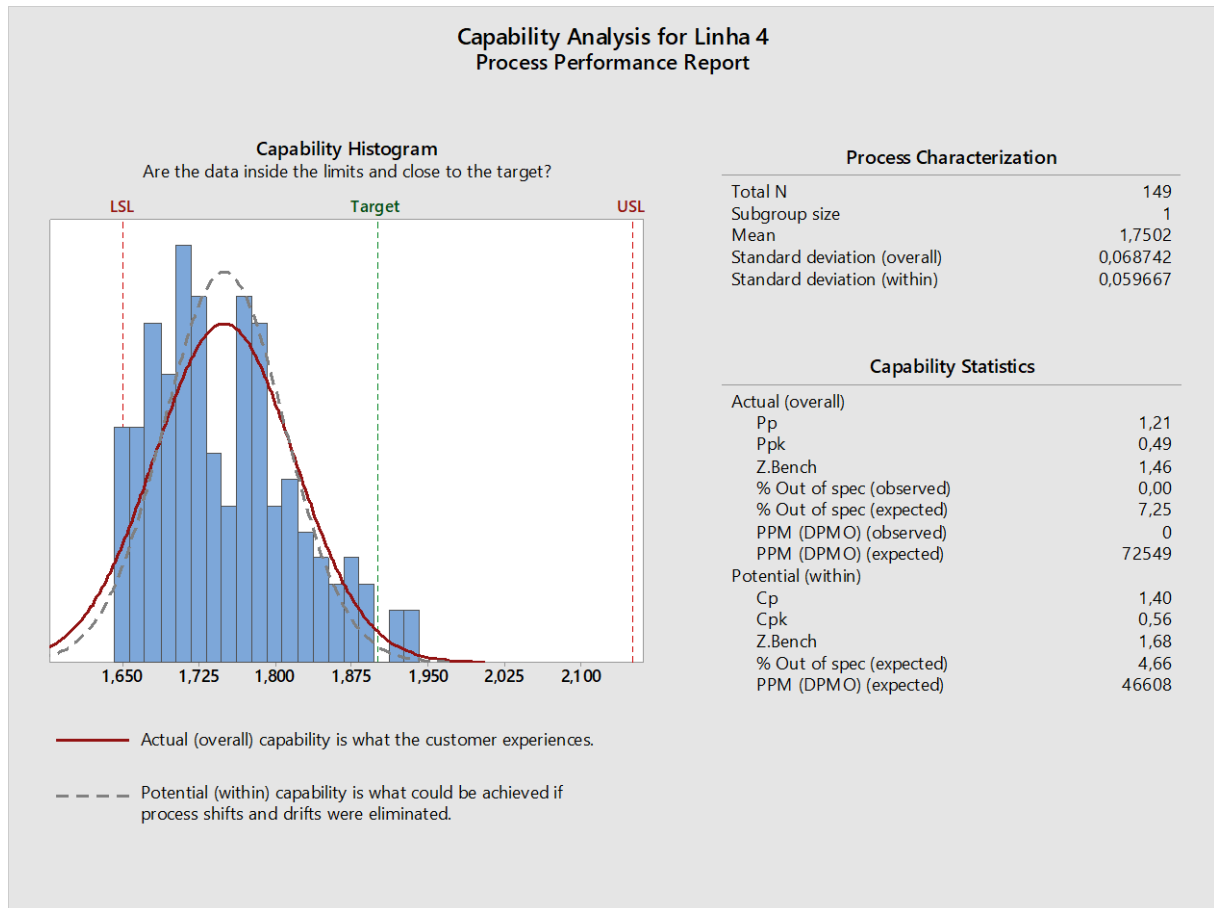


Figura 74 - Análise de capacidade de processo à linha 4 Ford (Minitab 17)

A linha 3 também não passa o teste de normalidade, considerando isto os dados parecem centrados embora com grande variabilidade.

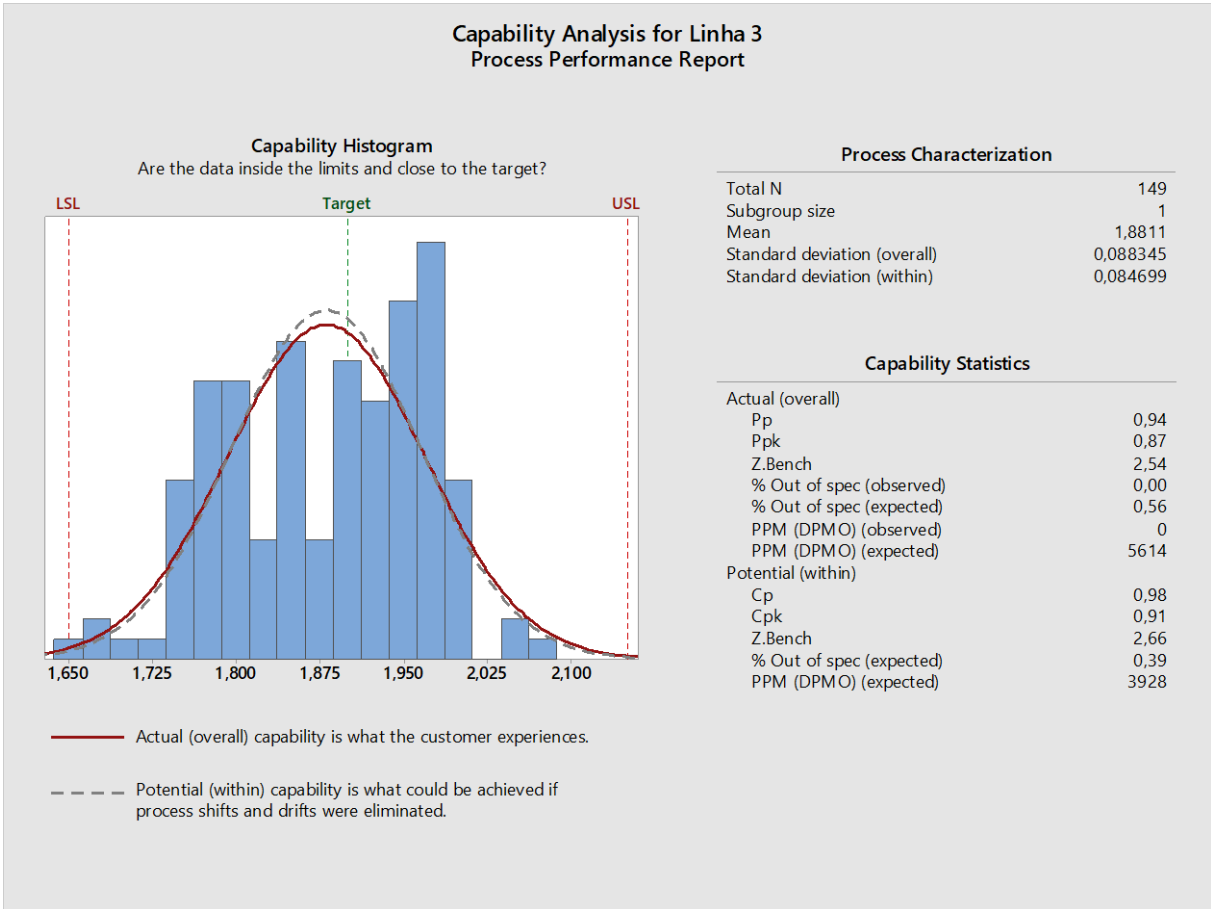


Figura 75 - Análise de capacidade de processo à linha 3 Ford (Minitab 17)

A linha 2 está bem centrada, o que se verifica pela proximidade entre o Pp de 1,28 e o Ppk de 1,24, no entanto estes valores são algo inferiores a 1,67 logo a variabilidade pode ser reduzida.

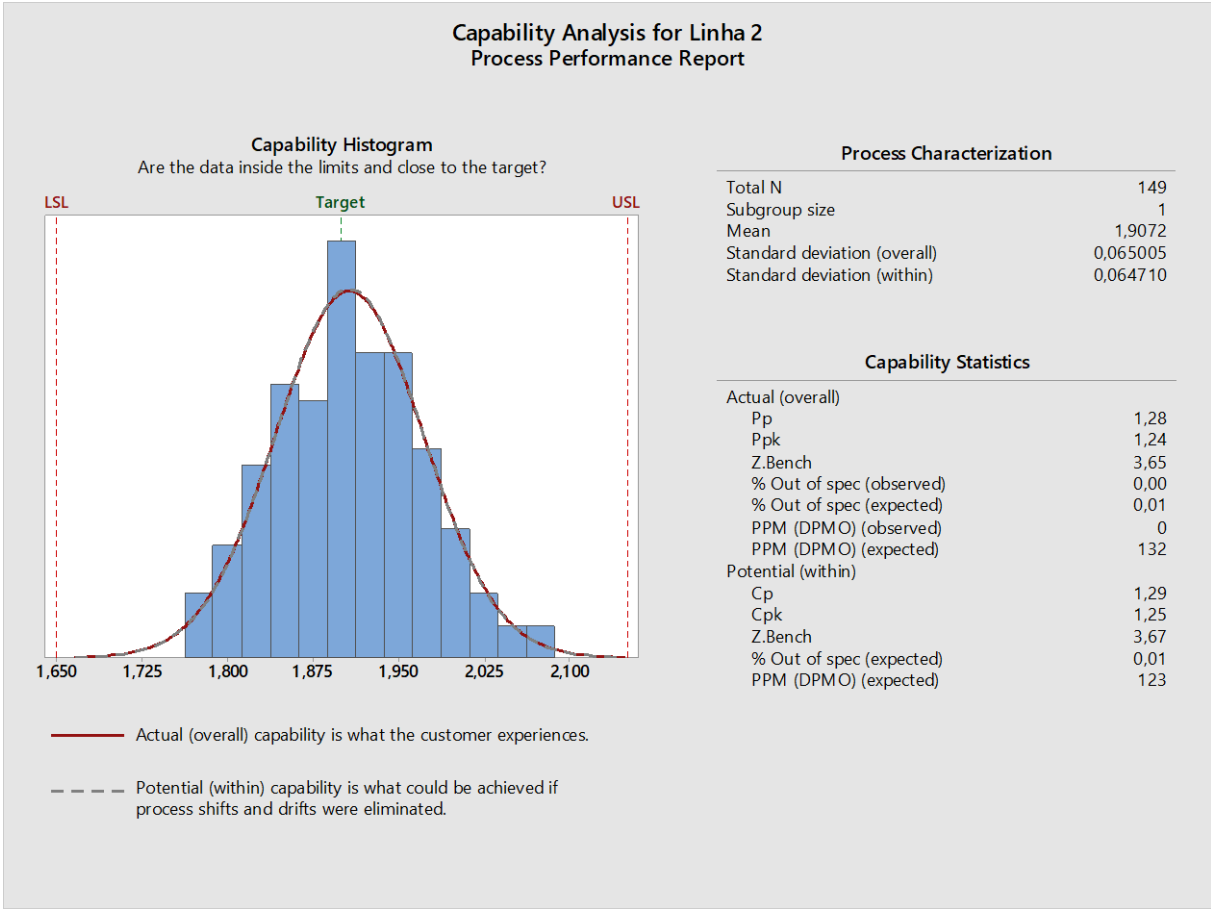


Figura 76 - Análise de capacidade de processo à linha 2 Ford (Minitab 17)

ANEXO G: Análise de capacidade de processo depois da alteração nos ninhos

Na continuação do capítulo 5.4 *Outras análises de capacidade de processo*, neste anexo é apresentada uma análise de capacidade de processo no *press fit* depois da alteração dos ninhos com a integração do suporte central e com o processamento automático dos dados da medição.

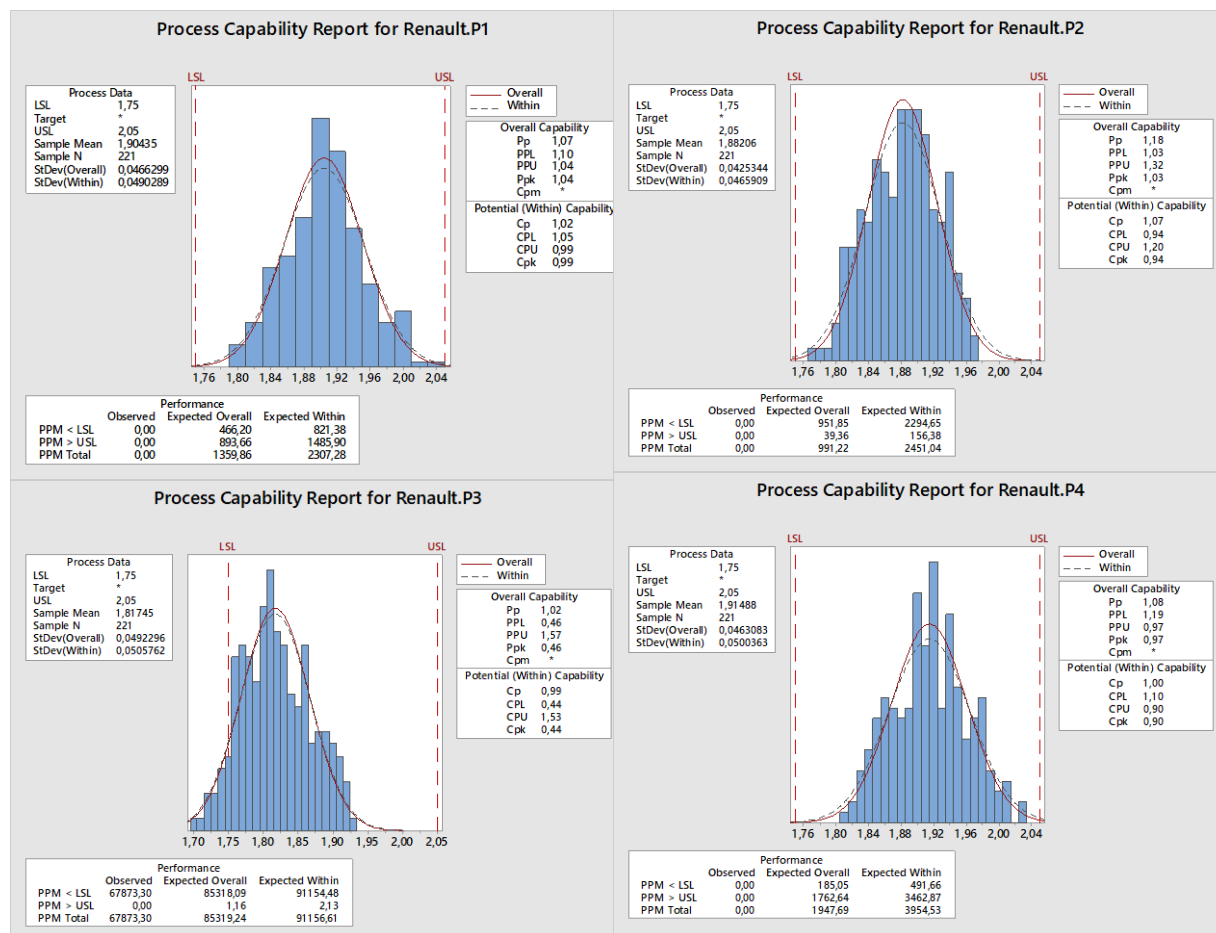


Figura 77 - Análise de capacidade de processo no *press fit* (Pinos 1 a 4) para Ford em 2018.05.07 (Minitab 17)

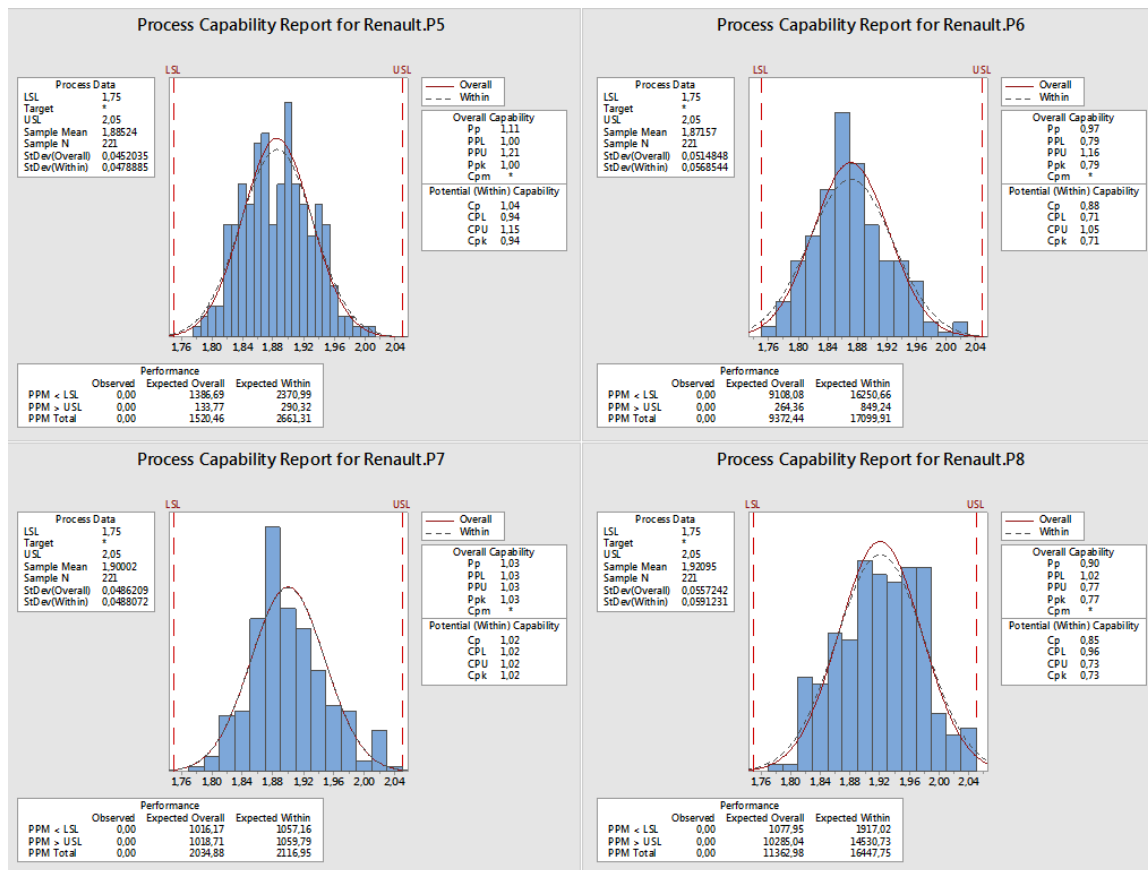


Figura 78 - Análise de capacidade de processo no *press fit* (Pinos 5 a 8) para Ford em 2018.05.07 (Minitab 17)

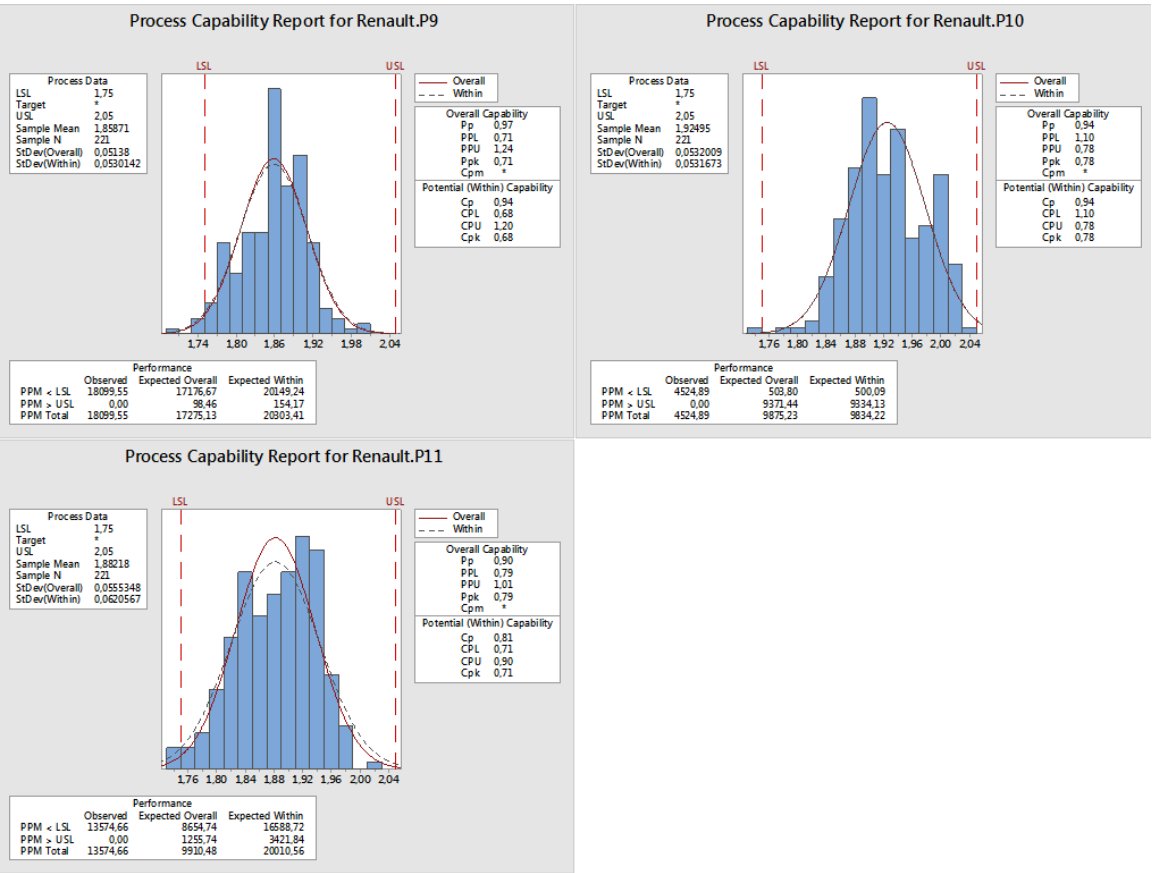


Figura 79 - Análise de capacidade de processo no *press fit* (Pinos 9 a 11) para Ford em 2018.05.07 (Minitab 17)

ANEXO H: Análise de capacidade de processo no fim de linha

Neste anexo pode ver-se o exemplo de dois testes funcionais onde seria expectável que para o mesmo teste a distribuição de resultados seguisse uma distribuição normal semelhante para todos os ninhos. No entanto verificam-se diferenças claras.

Na Figura 80 vê-se o resultado de um teste onde é medido valor de corrente em μA . Neste teste os resultados caem consistentemente em dois pontos, sendo que o ninho 1 e 2 estão frequentemente próximos do limite inferior e superior, já os ninhos 3 e 4 estão constantemente próximos do limite superior.

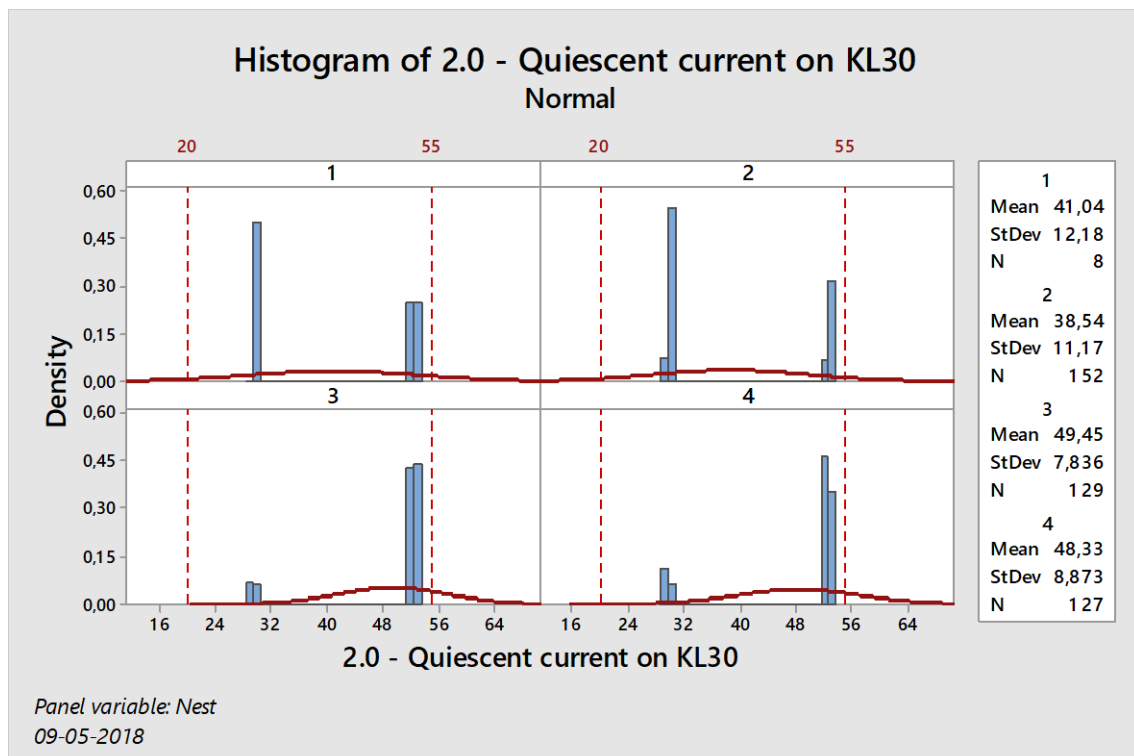


Figura 80 - Histogramas para comparação entre ninhos no teste funcional 2.0 (Minitab 17)

Na Figura 81 o teste mede a tensão em V. Também aqui os ninhos 1 e 2 apresentam consistentemente dois valores centrados, já os ninhos 3 e 4 estão quase sempre próximos do limite superior. Isto poderá indicar um desgaste de algum dos componentes da máquina de teste que necessite de manutenção.

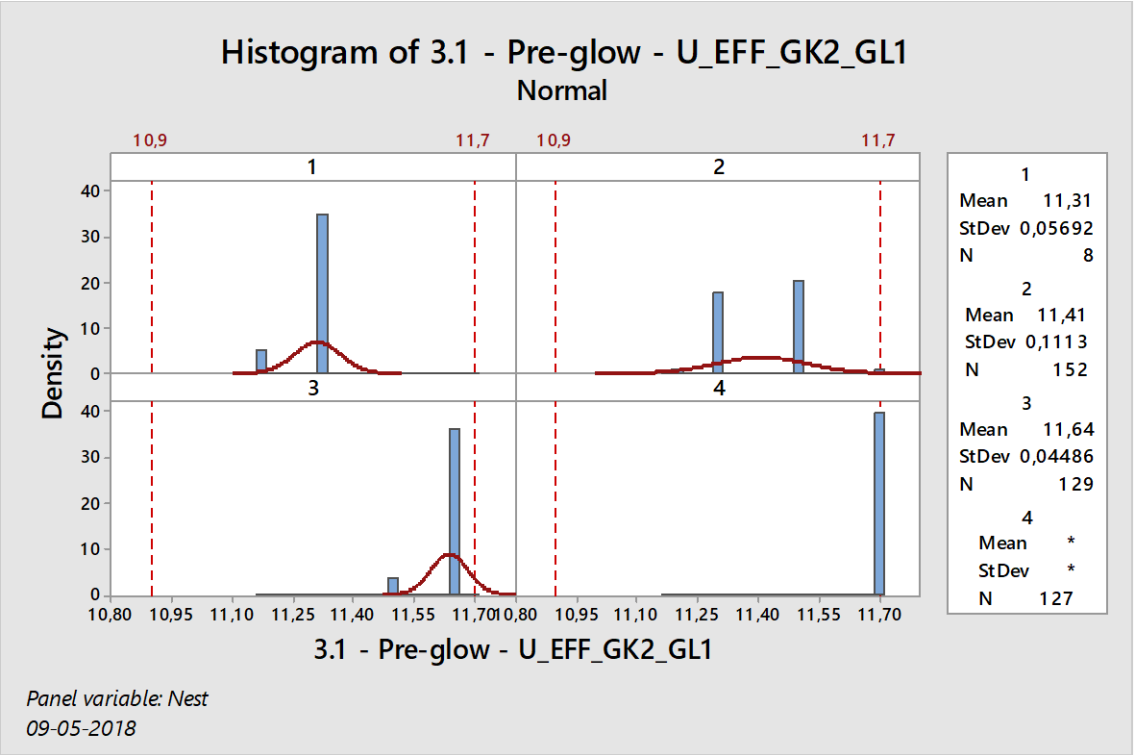


Figura 81 - Histogramas para comparação entre ninhos no teste funcional 3.1 (Minitab 17)

ANEXO I: Correlação entre altura dos pinos, força e deslocamento

Na Figura 82 são apresentados gráficos que permitem compreender melhor a correlação entre o deslocamento do cilindro hidráulico (medido por um sensor de deslocamento por contacto) e a altura de cada pino. Os resultados indicam que os pinos são bastante dependentes entre si, o que se verifica pela semelhança da variabilidade dos vários gráficos. Isto seria esperado porque existe uma única ferramenta para todos os pinos.

Por outro lado, seria expectável que um deslocamento maior levasse a uma altura dos pinos maior. No entanto esta relação não se verifica, o que indica que existirão outras variáveis com maior influência. Por exemplo, a variação das dimensões dos componentes fornecidos à linha que leva a uma necessidade de maior ou menor deslocamento. Outra causa de variação poderá ser uma precisão insuficiente do sistema hidráulico.

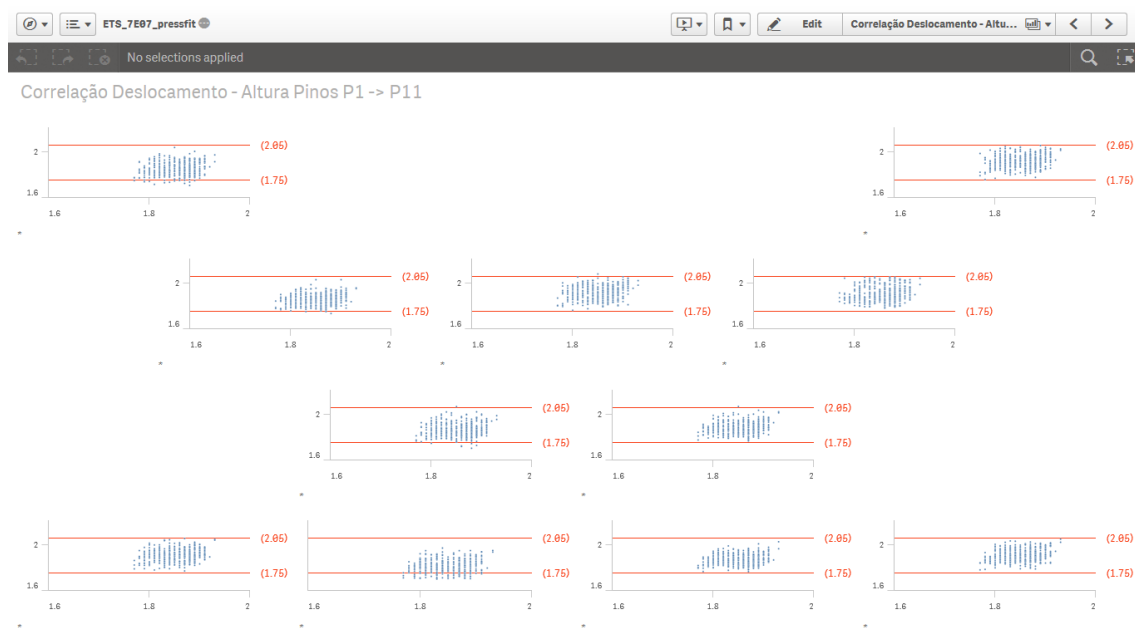


Figura 82 - Correlação entre o deslocamento do cilindro e a altura dos pinos (Qlik Sense)

Na Figura 83 é feita uma análise semelhante entre a força aplicada pelo cilindro (medida com uma célula de carga) e a altura dos pinos. De forma semelhante ao deslocamento, aqui seria expectável que quanto maior fosse a força aplicada maior seria a altura dos pinos resultante. No entanto esta relação não se verifica, o que indica que existirão outras variáveis com maior influência.

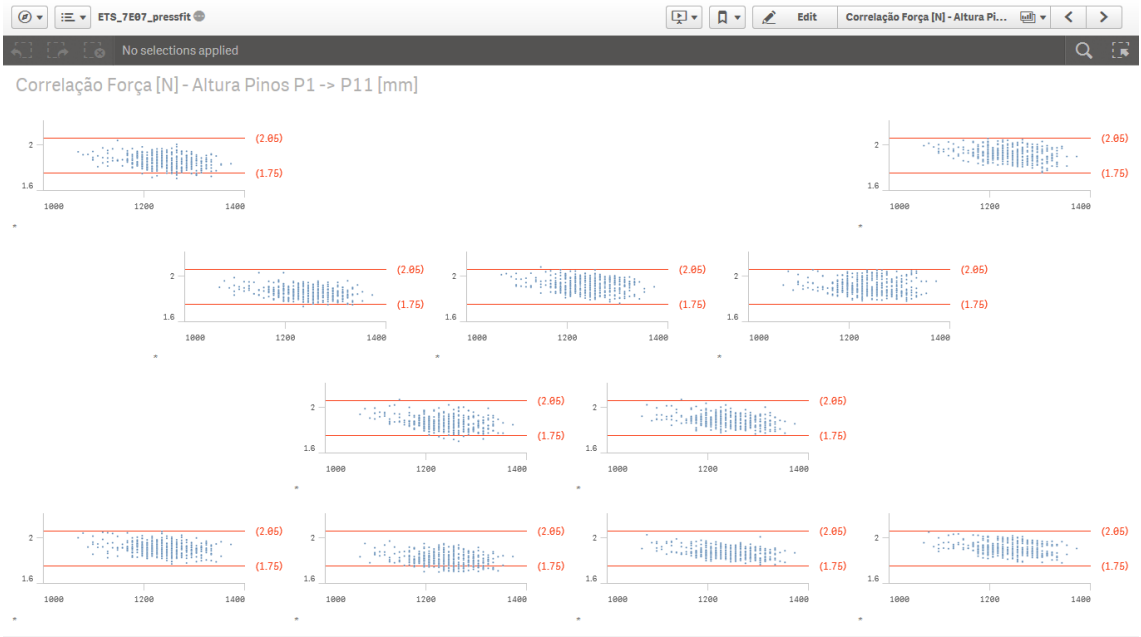


Figura 83 - Correlação entre a força do cilindro e a altura dos pinos (Qlik Sense)