

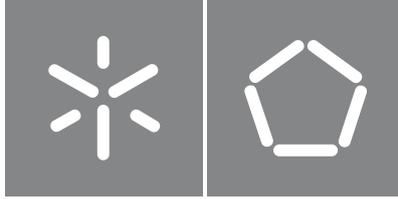


Pedro Miguel Carneiro Martins

**Controlo estatístico de processos de
moldação por injeção otimizados pela
moldação científica**

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Pedro Miguel Carneiro Martins

**Controlo estatístico de processos de
moldação por injeção otimizados pela
moldação científica**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de

Engenheiro Carlos Filipe Machado Bacelar Cardoso

Professor Dr. Júlio César Machado Viana

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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



Atribuição
CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Agradecimentos

A realização deste projeto e a conclusão desta etapa não seria possível sem um vasto número de pessoas e entidades a quem estou bastante grato.

Em primeiro lugar agradecer aos meus orientadores, Júlio Viana e Filipe Cardoso, por todo o auxílio, suporte e tempo dedicado para a realização e desenvolvimento deste projeto.

Agradecer à CS Plastic e a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha adaptação à empresa e ao ambiente industrial, em especial ao Samuel Almeida, Marta Silva, Pelin Gören, Luís Filipe, Juliana Ribeiro, Otávio Rodrigues e Luís Queirós.

Também gostava de agradecer a todos os meus amigos que sempre estiveram nos melhores e nos piores momentos. Aos da universidade, agradecer a todos aqueles com quem partilhei grandes momentos, desde caloiros a engenheiros, ao padrinho Renato e à madrinha Ana Luísa, aos meus 4 afilhados e, em especial, ao grupo Glassware e aos meus irmãozinhos, por todos os grandes momentos e apoio dado ao longo destes 5 anos. Aos de Monte Córdova, agradecer por todo o carinho e ajuda nos bons e nos maus momentos e por todas as aventuras que partilhamos.

Por último, deixar um grande e especial agradecimento à minha família, em especial à minha irmã Helena e sobretudo aos meus pais Zélia e José António, pois sem eles e sem todo o apoio e sacrifícios que fizeram por mim nada disto seria possível.

Declaração de integridade

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

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

Resumo

Controlo estatístico de processo de moldação por injeção otimizados pela moldação científica

Para esta dissertação de conclusão de estudos do Mestrado Integrado em engenharia de Polímeros, foi desenvolvido um projeto na área da moldação por injeção na empresa CS Plastic, em Santo Tirso.

O principal objetivo deste projeto, passa pela aplicação da moldação científica como ferramenta de otimização de processos na tentativa de os tornar mais robustos e consistentes, aliado ao controlo estatístico e ao estudo da capacidade de processo, como forma de tentativa de validação da abordagem científica da moldação por injeção, onde também se pretende o uso do *Design of Experiments* (DOE) como um complemento a esta análise, de modo a contruir uma janela dimensional através do comportamento dimensional da peça ao efetuar este estudo

Numa primeira fase, fez-se uma pesquisa de modo a estudar a temática da moldação científica, bem como do planeamento experimental e do controlo estatístico. Assim foi possível o estabelecimento de um método experimental lógico para a aplicação de todas as etapas deste projeto. De seguida, foi selecionado o processo onde se iria aplicar este método experimental, que permitiu também que se estabelecesse a matriz para a aplicação do DOE experimentalmente, definindo-se o número de variáveis que mais influenciariam o processo, que neste caso, foram a 2ª pressão, tempo de arrefecimento e temperatura do molde. Através disto e da definição dos níveis que se iriam variar em cada parâmetro obteve-se uma matriz com o número de experiências a efetuar. Depois de tudo bem definido, passou-se ao trabalho em máquina, onde se efetuou um primeiro estudo do controlo estatístico ao processo, para depois se aplicar o método científico de moldação por injeção e o DOE experimental, terminando com um último estudo estatístico do processo. Por último, foram tecidas as respetivas conclusões relativas aos parâmetros obtidos com a moldação científica em conjunto com o que se obteve através o DOE, comparando, em paralelo, os resultados dos estudos da capacidade do processo antes e após a abordagem científica, numa tentativa de validação da mesma.

Palavras-chave: Controlo estatístico, Estudos, Moldação científica, Robustez

Abstract

Statistical control of injection molding processes optimized by scientific molding

For this dissertation for the conclusions of the Master Degreeed in Polymer Engineering, a project was developed in injection molding area in collaboration with CS Plastic, based in Santo Tirso.

The main goal of this project was the application of the scientific molding as a tool for optimizing processes in an attempt to make them more robust and consistent, combined with the statistical control and the study of process capability, as an attempt to validate the scientific approach to injection molding, where it was also used the Design of Experiments (DOE) as a complement to this analysis, with the purpose of building a dimensional window based on the dimensional behavior of the part when performing this study.

First, research was made in order to study the scientific molding theme, as well as the design of experiments and statistical control. Thus, it was possible to establish a logical experimental method for the application of all stages of this project. Next, the process where this experimental method would be applied was selected, which also allowed the matrix of the experimental DOE to be established, where it was defined the number of variables that would most influence the process dimensionally, which in this case were the 2nd pressure, cooling time and mold temperature, Through this and the definition of the levels that would be varied in each parameter, a matrix was obtained with the number of experiments to be performed. After everything was well defined, was started the machine work, where a first statistical control study of the process was performed, and then the scientific method of injection molding and experimental DOE were applied, ending with a last statistical study of the process. Finally, the respective conclusions were drawn regarding the parameters obtained with the scientific molding, alongside with what was obtained in the DOE study, comparing, in parallel, the results of the process capability studies before and after the scientific approach, in an attempt to validate it.

Keywords: Robustness, Scientific molding, Statistical control, Studies

Índice

Agradecimentos.....	iv
Declaração de integridade.....	v
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de abreviaturas e siglas	xi
Índice de Figuras	xii
Índice de Tabelas	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Organização da dissertação	2
1.3. Apresentação da empresa	3
2. Conceitos teóricos.....	4
2.1. Moldação por injeção	4
2.1.1. Ciclo de moldação por injeção	4
2.1.2. Consistência em processos de moldação por injeção	6
2.1.3. Robustez em processos de injeção e os 5 pilares da moldação por injeção	9
2.2. Definição da moldação por injeção científica	11
2.2.1. Etapas do <i>Scientific Injection Moulding</i>	11
2.3. O controlo estatístico do processo (SPC)	13
2.3.1. Variabilidade de processos.....	14
3. Metodologias.....	15
3.1. Estudos da otimização do processo	15
3.1.1. Estudo da curva de viscosidade.....	15
3.1.2. Estudo balanceamento das cavidades	16
3.1.3. Estudo da queda de pressão.....	17
3.1.4. Estudo da janela de processo.....	19

3.1.5.	Estudo da determinação do tempo de solidificação do ataque	20
3.1.6.	Estudo tempo de arrefecimento	21
3.2.	Cartas de controlo	23
3.2.1.	Regras para deteção de padrões não-aleatórios	23
3.2.2.	Tipos de carta de controlo.....	25
3.3.	Capacidade do processo.....	26
3.4.	Planeamento de experiências	27
3.4.1.	Método de Taguchi	28
4.	Característica da peça e materiais	31
4.1.	Características da peça	Erro! Marcador não definido.
4.1.1.	Matéria-prima	31
4.1.2.	Dimensões	32
4.2.	Molde.....	35
4.2.1.	Lado da injeção	36
4.2.2.	Lado da extração	38
4.2.3.	Sistema de arrefecimento	39
4.2.4.	Injeção	42
4.3.	Máquina.....	44
4.4.	Ferramentas de medição.....	45
5.	Métodos experimentais.....	47
5.1.	Controlo estatístico do processo	47
5.1.1.	Cartas de controlo da Média e da Amplitude	47
5.1.2.	Cartas de controlo de Observações Individuais e Amplitudes Móveis.....	49
5.2.	Aplicação dos estudos de otimização do processo.....	49
5.3.	Estudo da capacidade do processo	52
5.4.	Aplicação do DOE.....	53

5.4.1.	Definição de variáveis	53
5.4.2.	Planeamento de experiências.....	55
5.5.	<i>Minitab</i>	56
5.6.	<i>Design Expert</i>	57
6.	Análise de resultados	58
6.1.	Análise do estudo da capacidade de processo pré- <i>scientific molding</i>	58
6.2.	Resultados dos estudos do <i>scientific molding</i>	62
6.2.1.	Queda de pressão.....	62
6.2.2.	Curva de viscosidade	63
6.2.3.	Janela de processo	64
6.2.4.	Balanceamento de cavidades.....	65
6.2.5.	Tempo de solidificação do ataque	66
6.2.6.	Tempo de arrefecimento	67
6.3.	Análise do estudo da capacidade de processo pós- <i>scientific molding</i>	69
6.4.	Obtenção da janela dimensional de processamento para as cotas críticas	82
6.4.1.	Análise ANOVA	82
6.4.2.	Janela dimensional.....	86
7.	Conclusão.....	89
8.	Bibliografia.....	91
9.	Anexos.....	93
	ANEXO I –Ficha técnica PP CAPILENE R 50.....	93
	ANEXO II- Constantes para cartas de controlo	94
	ANEXO III- Análises estatísticas pré- <i>scientific molding</i>	95
	ANEXO IV- Análises estatísticas pós- <i>scientific molding</i>	105
	ANEXO V- Máquina de injeção.....	116

Lista de abreviaturas e siglas

DOE *Design of Experiments*

PP Polipropileno

SPC *Statistical Process Control*

LSC Limite superior de Controlo

LIC Limite Inferior de Controlo

LC Limite Central

Índice de Figuras

Figura 1- Ciclo de moldação por injeção	6
Figura 2- Consistência cavidade para cavidade	7
Figura 3- Consistência injeção por injeção	7
Figura 4- Consistência processo para processo	8
Figura 5- Os 5 pilares de moldação por injeção	10
Figura 6- Variação da viscosidade com a velocidade de injeção e orientação molecular correspondente	15
Figura 7- Exemplo de variabilidade entre cavidades	17
Figura 8- Queda de pressão	18
Figura 9- Exemplo de uma janela de processamento	20
Figura 10- Variação do peso de peça com o tempo de 2ª pressão	21
Figura 11- Variação dimensional com o tempo de arrefecimento	22
Figura 12- Exemplo de cartas de controlo.....	23
Figura 13- Padrões não-aleatórios	24
Figura 14- Etapas do planeamento de experiências; adaptado de	28
Figura 15- Peça em análise.....	31
Figura 16- Desenho técnico geral da peça.....	33
Figura 17- Conjunto montado com a peça a analisar	34
Figura 18- Cota crítica no encaixe da peça	34
Figura 19- Espessura crítica na peça.....	35
Figura 20- Representação em Solidworks do molde.....	36
Figura 21- Postiço lado da cavidade	36
Figura 22- Em cima: postiços colocados para os datadores; Em baixo: Aço com a gravação do datador	37
Figura 23- Sistema de extração	38
Figura 24- Postiço lado da extração.....	39
Figura 25- Sistema de refrigeração lado da injeção.....	40
Figura 26- Esquema de ligações de água lado da injeção	40
Figura 27- Sistema de refrigeração nos postiços das gravações	41
Figura 28- Sistema de refrigeração lado da extração.....	42
Figura 29- Esquema de ligações de águas lado da extração.....	42

Figura 30- Canais de injeção no postigo do lado da injeção	43
Figura 31- Representação de um ponto de ataque submarino.....	43
Figura 32- Balança de precisão utilizada	45
Figura 33- Paquímetro utilizado nas medições.....	46
Figura 34- Planeamento experimental Scientific Molding.....	52
Figura 35- Dashboard Minitab	56
Figura 36- Análise estatística no dia 1 às 14h.....	58
Figura 37- Análise estatística no dia 3 às 14h.....	59
Figura 38- Análise estatística no dia 1 às 10h.....	60
Figura 39- Análise estatística no dia 3 às 14h.....	60
Figura 40- Análise estatística para as médias dos valores de cada dia	61
Figura 41- Queda de pressão do processo.....	63
Figura 42- Curva de viscosidade.....	64
Figura 43- Janela do processo	65
Figura 44- Gráfico do balanceamento de cavidades	66
Figura 45- Gráfico do tempo de solidificação do ataque	67
Figura 46- Variação da cota A por cavidade	68
Figura 47- Variação da cota B por cavidade.....	69
Figura 48- Análise estatística dia 1 às 12h	70
Figura 49- Análise estatística dia 1 às 10h	71
Figura 50- Análise estatística dia 1 às 16h	71
Figura 51- Análise estatística dia 2 às 10h	72
Figura 52- Análise estatística dia 2 às 16h	73
Figura 53- Análise estatística dia 3 às 10h	74
Figura 54- Análise estatística dia 3 às 12h	74
Figura 55- Análise estatística dia 3 às 16h	75
Figura 56- Análise estatística dia 4 às 14h	75
Figura 57- Análise estatística dia 5 às 16h	76
Figura 58- Análise estatística dia 4 às 16h	76
Figura 59- Análise estatística dia 5 às 14h	77
Figura 60- Análise estatística dia 4 às 12h	77
Figura 61- Análise estatística dia 5 às 12h	78

Figura 62- Análise estatística para as médias dos valores de cada dia	79
Figura 63- Variação da cota A com a 2ª pressão	84
Figura 64- Janela dimensiona cota A.....	87

Índice de Tabelas

Tabela 1- Regras de detenção de padrões não-aleatórios; adaptado de [16].....	24
Tabela 2- Tipos de cartas de controlo	25
Tabela 3- Intervalos capacidade do processo.....	27
Tabela 4- Exemplo de um DOE.....	30
Tabela 5- Características da máquina de injeção	32
Tabela 6- Características da injetora.....	44
Tabela 7- Variáveis DOE.....	55
Tabela 8- DOE matriz <i>L8</i>	56
Tabela 9- Dosagem e ponto de comutação das zonas analisadas.....	62
Tabela 10- Tempos de arrefecimento e cotas obtidas para cota A.....	68
Tabela 11- Tempos de arrefecimento e cotas obtidas para cota B.....	68
Tabela 12- Parâmetros obtidos através da moldação científica	69
Tabela 13- <i>Cpk</i> ao longo da análise	80
Tabela 14- Valores da cota A obtidos no DOE	83
Tabela 15- Tabela ANOVA para a cota A.....	83
Tabela 16- Valores da cota B obtidos no DOE.....	85
Tabela 17- Tabela ANOVA para a cota B.....	85
Tabela 18- Fatores da equação para obtenção da janela dimensional	86

1. Introdução

Desde o surgimento do processo de moldação por injeção que há a necessidade constante de evolução e melhoramento do modo de produção de peças. Por ser um dos processos mais utilizados e relevantes a nível de transformação de plásticos, as exigências de mercado têm aumentado, tendo as empresas de procurar soluções inovadoras para se destacarem da restante concorrência.

Como é do conhecimento geral, o processo de moldação por injeção é um processo simples e eficiente de produção de peças complexas, onde o material entra numa tremonha, sendo depois fundido e injetado para um molde, onde ser-lhe-á conferida um formato, e por fim arrefecido e extraído como uma peça completa. Apesar de parecer simples e facilmente controlável, existem vários fatores que devem ser devidamente ponderados e analisados de modo a tornar o processo o mais otimizado possível.

Quando se fala num processo de injeção, pretende-se que este seja o mais consistente e robusto possível, duas características que são extremamente importantes para este processo. Consistente na medida em que este não possua grande variação no que toca à qualidade da peça, mantendo ao longo de uma produção a mesma consistência visual e dimensional nos produtos obtidos. Robustez no que diz respeito aos limites dos parâmetros de processo, isto é, quanto maiores forem os limites dos parâmetros de processamento sem afetarem a qualidade das peças produzidas, mais capacidade terá o processo de sustentar fenómenos que afetem os seus parâmetros, ou seja, mais robusto será o processo e conseqüentemente, mais consistência este terá.

Assim surge a necessidade da criação de métodos e abordagens que têm como objetivo a otimização do processo de moldação por injeção. Desde sempre que a abordagem da “tentativa-erro” é utilizada, baseada na testagem e observação de modo a verificar a necessidade ou não de alterar os parâmetros. Contudo, apesar de funcionar e de se obterem resultados, os desperdícios e o tempo de otimização associado são elevados. Deste modo começaram a surgir metodologias mais científicas, que tal como o nome indica, são baseadas em métodos científicos de aplicação de experiências devidamente definidas de modo a tentar eliminar os desperdícios e a reduzir os tempos de otimização das metodologias mais tradicionais.

Assim, este projeto passa pela validação de uma metodologia mais científica, de modo a verificar a sua aplicabilidade a nível industrial e se realmente esta traz vantagens ou melhoramentos relativamente às metodologias desde sempre utilizadas pela indústria atual.

1.1. Objetivos

Como já referido anteriormente, este projeto tem como principal objetivo a validação da abordagem científica de otimização de processos de moldação por injeção, recorrendo a ferramentas de análise estatística de modo a tentar verificar de que modo a abordagem influencia a produtividade do processo. Assim é essencial que para além do conhecimento da influência das variáveis no processo, também é importante conhecer as ferramentas estatísticas utilizadas para analisar os mesmos. Assim os objetivos destes projetos podem ser descritos da seguinte forma:

- Compreensão da metodologia do *Scientific Injection Molding*;
- Aplicação do controlo estatístico do processo e da capacidade do processo de modo a fazer uma primeira análise ao estado atual do processo e para depois verificar de que modo o *Scientific Injection Molding* influenciou o processo;
- Aplicação do DOE de modo a verificar as condições de processamento que mais influenciam a peça a nível dimensional;
- Comparação de resultados obtidos nos estudos da capacidade de processo e dos testes experimentais relativos aos *Scientific Injection Molding*;
- Retirar conclusões acerca da influência desta abordagem nos processos produtivos.

1.2. Organização da dissertação

Para a presente dissertação, é feita a introdução deste projeto e da temática a estudar ao longo do mesmo. De seguida são apresentados os conceitos teóricos que estão na base deste projeto, como é o caso da moldação por injeção e com mais pormenor, o *Scientific Injection Molding*.

Depois são apresentadas as metodologias, ou seja, as bases teóricas que fundamentam os métodos a serem utilizados experimentalmente.

No tópico das características da peça, como o nome indica, é apresentada a peça e respetivas dimensões, tal como o molde e ferramentas usadas para produzir a mesma

De seguida são apresentados os métodos experimentais a serem aplicados em máquina e de onde se irão retirar resultados que posteriormente serão devidamente analisados.

Por último seguem as conclusões finais, onde são retiradas as devidas conclusões relativamente a todas as temáticas deste projeto e que aplicabilidade este poderá ter e próximos passos que se poderão efetuar

1.3. Apresentação da empresa

Fundada em setembro de 2010, a CS Plastic é uma empresa situada em Santo Tirso, com cerca de 30 colaboradores, sendo especializada na área de injeção de plásticos de elevada precisão. É uma empresa direcionada para trabalhar em diversas vertentes do nosso dia-a-dia, tais como a médica, alimentar, desportiva, industrial, eletrónica, entre outras. A CS Plastic, para além da injeção de peças, também se destaca em vários tipos de serviços, nomeadamente a gestão de projetos e desenvolvimento do produto, a prototipagem e o desenvolvimento de peças e moldes.

É uma entidade que se presa pela qualidade, competência e experiência, sendo que se destaca também pela facilidade de comunicação em vários idiomas. Tudo isso se traduz na conquista da confiança de importantes empresas nacionais e internacionais, seguindo sempre os mais elevados standards da indústria, que são continuamente monitorizados e melhorados. O desenvolvimento e a produção de componentes termoplásticos da empresa dispõem de um Sistema de Gestão da Qualidade reconhecido e compatível com a norma UNE-EN ISO 9001:2008. [1]

2. Conceitos teóricos

2.1. Moldação por injeção

O processo de moldação por injeção é uma das técnicas mais usadas a nível de manufatura de materiais plásticos. Este surgiu em 1872, quando foi criada e patenteada a primeira máquina de injeção e desde então que o processo vem evoluindo não só a nível de equipamentos e ferramentas, mas também quanto à sua eficácia e desempenho.[2]

Este processo pode ser definido como um conjunto de etapas que permitem a transformação de plástico em peças moldadas, ou seja, é o processo onde há a transformação de grânulos de polímero, que são aquecidos até atingirem o estado fundido e depois são injetados em moldes, tomando a forma do mesmo após o arrefecimento. Este processo, pela sua simplicidade de conceito, eficiência e possibilidade de obter peças complexas, tornam-no num dos mais rentáveis ao nível da produção de peças em plástico. Através deste processo também é possível obtenção de um elevado volume de produção e de peças com excelentes acabamentos superficiais, garantindo também tolerâncias dimensionais rigorosas. [3]

As etapas do ciclo de injeção estão incluídas no próximo tópico. Todas elas têm uma grande importância relativamente à qualidade e a eficácia do processo e cada uma delas depende da anterior, sendo que é de extrema importância que o processo esteja sempre estabilizado e bem calibrado para que este seja eficaz na produção de um produto final apropriado.

2.1.1. Ciclo de moldação por injeção

O ciclo de moldação por injeção envolve o conjunto de etapas cíclicas que se efetuam numa máquina de injeção durante a produção de duas peças consecutivas. Todas as etapas deste ciclo são importantes e devem ser bem conhecidas e controladas de modo que haja uma produção de peças de alta qualidade no menor tempo possível.

Este ciclo é dividido em 6 etapas:

1. Fecho e trancamento do molde

A primeira fase do ciclo dá-se quando há o fecho e trancamento do molde. Esta deve ser realizada o mais rapidamente possível, tendo sempre em conta que a velocidade de fecho do molde deve ser ajustada de maneira que o encosto entre as duas partes do molde seja suave, de modo a evitar danificações na superfície do mesmo. Também o desempenho da máquina e as características do molde terão uma dependência direta na duração desta etapa.

2. Injeção

A fase de injeção dá-se quando a unidade de plasticização avança e o bico de injeção encosta no molde. De seguida, o parafuso é empurrado para a frente, empurrando, deste modo, o fluido para o interior da cavidade do molde. Deve-se ter em atenção ao valor inserido para a velocidade de injeção, que deve não só deve ser capaz de preencher a cavidade do molde com rapidez, mas ao mesmo tempo deve permitir a replicação dos contornos do molde.

3. Pressurização/ Compactação

Finalizada a fase de injeção, é necessário continuar a exercer pressão no fundido, com o objetivo de diminuir o efeito da contração do material e evitar que este volte para o cilindro novamente. Para isso é que existe a aplicação da 2ª pressão, que minimiza estes efeitos. Estes valores de pressão não devem ser demasiado elevados para evitar danificações na peça e problemas na extração. Esta fase termina quando o jito e/ou a peça estão solidificados.

4. Arrefecimento

Assim que a matéria-prima é injetada para o interior da cavidade e esta entra em contacto com a cavidade, inicia-se o arrefecimento da peça. Nesta fase começa o movimento de rotação do fuso, iniciando a plasticização de mais material, sendo que este é obrigado a recuar sob o efeito da pressão criada pelo mesmo fundido e, ao mesmo tempo, continua o arrefecimento no interior do molde. Quando a plasticização está concluída, este movimento de rotação para, ou seja, foi doseado o volume pretendido de material. O arrefecimento termina quando a moldação atinge uma temperatura que permita a extração correta do material, sendo que este tempo depende muito das dimensões da peça e respetivas características.

5. Abertura e extração

Terminadas as fases de plasticização e arrefecimento, pode ocorrer a extração da peça do molde. Esta dá-se com a abertura do molde, que deve ser suficiente para que a peça seja removida da cavidade. A velocidade e o curso de abertura devem ser selecionados consoante as dimensões da peça e do molde.

6. Tempo morto

É chamado de tempo morto ao período que vai desde que a peça está pronta a ser extraída até ao início de um novo ciclo. A duração desta etapa depende de vários fatores, como por exemplo da maneira como a peça é extraída do molde, que pode ser manualmente ou automaticamente, sendo que no primeiro, o tempo de extração é bastante mais longo e no automático, que é

praticamente instantâneo. Um dos grandes objetivos da moldação por injeção passa por tentar reduzir este tempo, já que quanto maiores forem os tempos mortos, menor a reprodutibilidade do processo. [3][4]

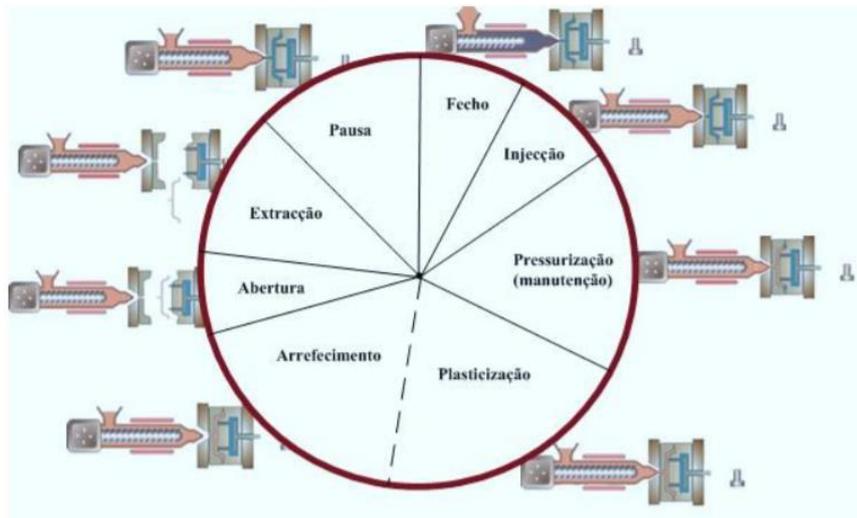


Figura 1- Ciclo de moldação por injeção [4]

2.1.2. Consistência em processos de moldação por injeção

No desenvolvimento de um processo de moldação por injeção o principal objetivo é que este seja projetado de modo que seja um processo robusto e consistente. Considera-se que um processo é robusto quando alguma alteração provocada nos parâmetros do processo que foram definidos tem efeitos mínimos sobre a qualidade da peça. Deste modo existirá uma maior rentabilização do processo, já que há uma redução de desperdícios de material.

Um processo consistente origina peças estruturalmente consistentes. Assim, atinge-se uma maior eficiência produtiva, que significa que não serão necessárias alterações no processo pois este não será sensível a variações inevitáveis. Deste modo, o objetivo quando se desenvolve um processo de moldação será que este seja consistente possível, de modo que este esteja o mais otimizado possível de modo que seja o mais rentável possível.[5]

Existem 3 tipos de consistência que os processos de injeção que devem normalmente ser característicos do processo de moldação por injeção.

A consistência cavidade para cavidade é importante quando se fala em molde, multicavidade, já que, sendo que é necessário atingir o mesmo nível de qualidade em cada uma das cavidades.

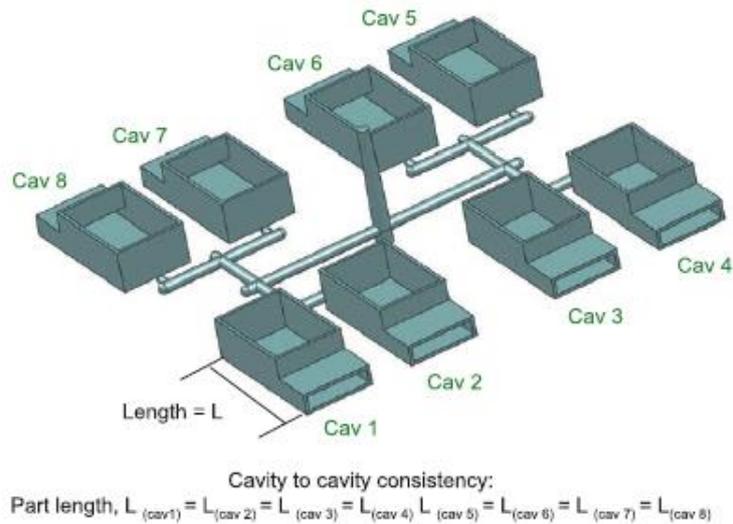


Figura 2- Consistência cavidade para cavidade [6]

Quando se fala em consistência de injeção para injeção, significa que os *shots* efetuados em cada injeção devem ser idênticos, ou seja, que os parâmetros de processamento devem permanecer as mesmas durante toda a produção.

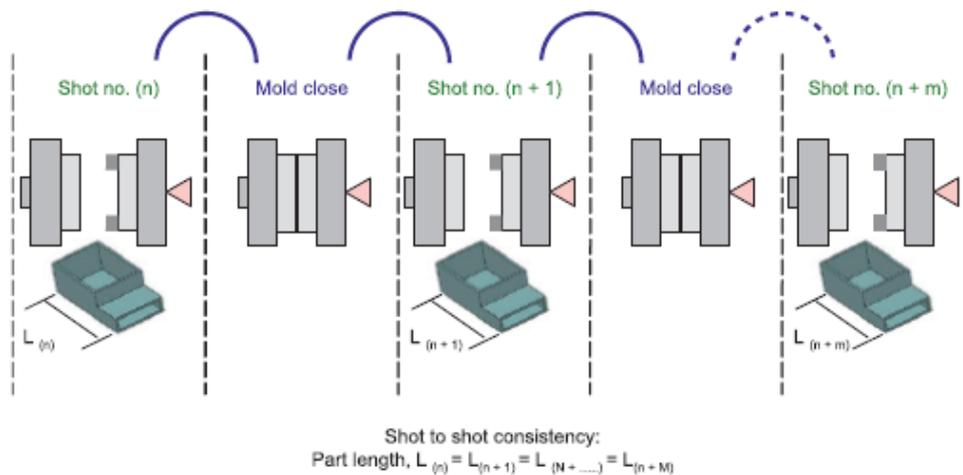


Figura 3- Consistência injeção por injeção [6]

Por último, existe a consistência processo para processo, que é atingida quando processos distintos são definidos pelas mesmas condições de processamento, sendo apenas efetuar a troca de molde na máquina onde estes serão inseridos.

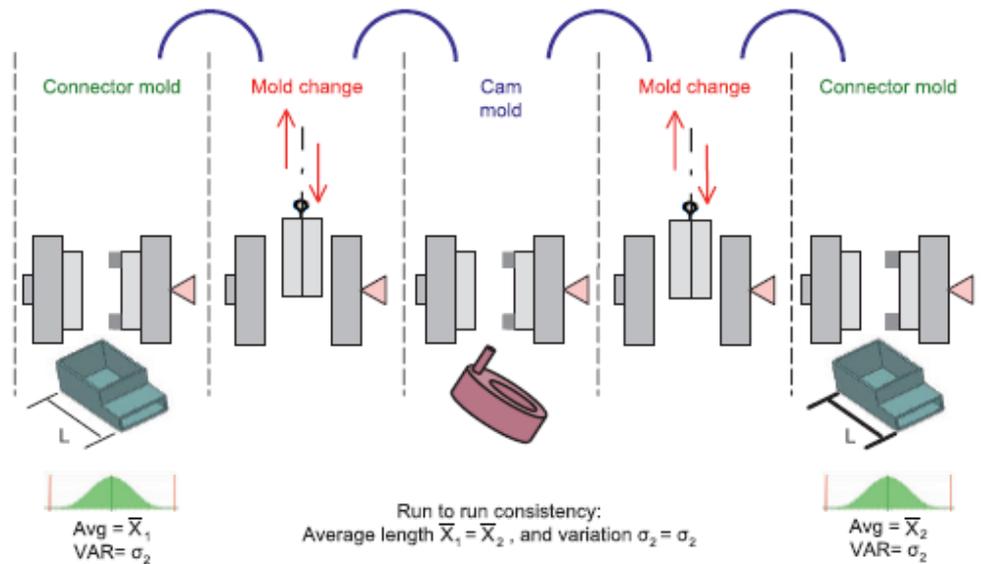


Figura 4- Consistência processo para processo [6]

É importante que um processo de moldação que os processos apresentem estes tipos de consistência, o que naturalmente significará que estes se encontram devidamente otimizados. Contudo existem várias razões que podem impedir que o que se descreveu não seja alcançado. Uma inconsistência cavidade para cavidade pode ser causada por defeitos aquando da conceção do molde, como o facto de o tamanho do ataque e dos canais de alimentação serem diferentes para cada cavidade, ou porque a ventilação é insuficiente ou irregular e o arrefecimento ser diferente em cada cavidade. Quanto a inconsistências injeção para injeção, estas podem acontecer quando o processo não está otimizado, quer a nível de parâmetros de processamento, quer a nível de design da peça e do molde. Também podem acontecer porque a injetora não estar a transportar material fundido de forma consistente. Já a consistência processo para processo pode não ser alcançada pela falta de consistência ou de calibração da máquina de injeção ou por não haver forma de reproduzir os parâmetros de moldação por estes não terem sido devidamente registados.[6]

2.1.3. Robustez em processos de injeção e os 5 pilares da moldação por injeção

Quando se fala em processos de moldação por injeção ou em moldação científica, uns dos termos associados a estas definições é a robustez. Isto é, pretende-se sempre que um processo de moldação por injeção seja o mais robusto possível, onde a moldação científica poderá ser uma ferramenta importante de modo a alcançar esta característica.

Considera-se um processo robusto quando alterações efetuadas nos parâmetros de processamento têm efeitos mínimos na qualidade da peça, quando estas não são induzidas propositadamente de forma ponderada. Isto ignifica que se terão gamas de valores que poderão ser inseridos que não irão influenciar negativamente o processo.[6]

Deste modo, um processo robusto também irá produzir sempre peças de qualidade consistente, já que há pouca variabilidade no processo, ou então um elevado intervalo de valores que não comprometerão a robustez do mesmo. [5]

Ao longo deste projeto, vai-se estudar a robustez de um processo de injeção e serão implementadas metodologias de modo a verificar de que forma se pode tornar um processo o mais consistente e robusto possível.

Por isso quando falamos em robustez do processo de injeção, deve-se compreender pilares essenciais que são característicos do processo de injeção e que todas as empresas lutam para atingirem de modo a obterem processos mais robusto e, conseqüentemente mais rentáveis:

1. Design da peça

Este é o primeiro passo de quando se projeta um molde para produção. A peça deve ter um design apropriado para o processo de moldação por injeção. Ou seja, estas devem ser otimizadas e dimensionadas de modo a evitarem qualquer tipo de defeito de injeção tendo em conta os princípios da moldação por injeção e do projeto de peça e de moldes.

2. Seleção de material

Baseado no design da peça e das características e especificações que esta tem, deve-se selecionar uma matéria-prima corretamente, sendo que o formato da peça ainda pode exigir algum tipo de aditivo ou material específico de modo a auxiliar na injeção da mesma. Outro pormenor importante é que o material selecionado deve ser compatível com o equipamento de processamento, neste caso, uma injetora.

3. Design e construção do molde

Depois de completas as etapas anteriormente, é possível avançar para o design e construção do molde. Este deve ser robusto, de modo a suportar o processo de injeção, com amplos intervalos de parâmetros de processamento e, ao mesmo tempo, deve suportar o próprio material plástico. Outro pormenor importante é o desgaste do molde, que deve ser tido em conta já que a escolha do material que constitui o molde afeta o tempo de vida do mesmo, mesmo que haja uma manutenção constante do mesmo.

4. Máquina de injeção

A seleção da máquina de injeção adequada é bastante importante, na medida em que a capacidade da mesma deve ser proporcional ao volume da zona moldante do molde, de modo que não afete a consistência das peças obtidas. Ao mesmo tempo, os moldes devem ser colocados em máquinas com tonelagem adequada às suas dimensões, ou seja, a sua tonelagem não deve ser muito superior à admitida pelo molde de modo a não danificar o mesmo devido a força de fecho excessiva.

5. Processo de injeção

Só após o desenvolvimento de todos os passos anteriormente descritos é que se pode passar à otimização do processo de injeção. Neste caso pretende-se sempre a obtenção de um processo o mais robusto e consistente possível. Para isso é importante que as etapas anteriores tenham sido todas corretamente desenvolvidas, sendo que o molde não deve possuir imperfeições e deve cumprir com os requisitos que lhe foram propostos e o material não deve apresentar contaminações que podem influenciar a eficiência do processo. [6][7]

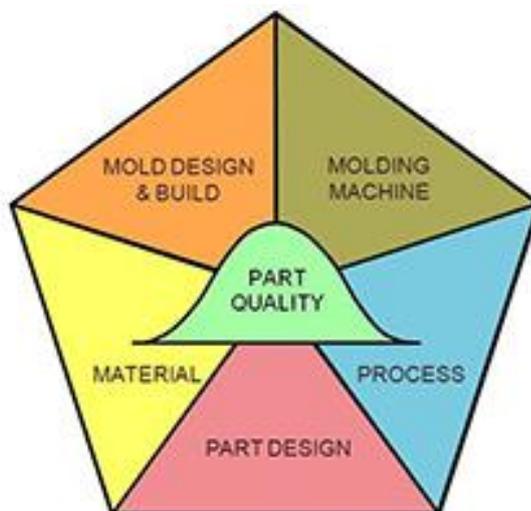


Figura 5- Os 5 pilares de moldação por injeção [7]

2.2. Definição da moldação por injeção científica

Existem vários parâmetros que influenciam a eficiência de um processo de moldação por injeção, tais como velocidades, pressões, tempos e temperaturas de injeção. De facto, é essencial se conhecer devidamente todas as etapas do processo produtivo, bem como do efeito que cada variável tem no mesmo, a fim de ser possível controlá-lo da melhor forma possível, sempre com o intuito da obtenção de melhores produtos finais. Outras etapas como o armazenamento, secagem ou contração do material também são importantes na qualidade e na obtenção de um processo mais robusto. Como já referido anteriormente, objetivo de se obter um processo robusto é que este seja capaz de manter a qualidade das peças produzidas mesmo que haja variações naturais no mesmo ou pequenas alterações que possam ser induzidas nas suas variáveis. Também se diz que um processo é robusto quando este proporciona uma redução ou até mesmo eliminação de ajustes de variáveis, redução de ocorrências de falhas sempre com o intuito da obtenção de uma boa consistência dimensional das peças. [6]

Como forma de atuar sobre estes ajustes de variáveis surge o método da moldação científica (*Scientific Injection Molding*). Desenvolvida por John Bozelli e Rod Groleau, trata-se de uma abordagem sistemática ao processo de moldação por injeção, baseando-se nos princípios do método científico, tendo como principal objetivo a otimização dos parâmetros do processo de injeção para a obtenção de um processo robusto e estável. [8]

Este método científico consiste no desenvolvimento de princípios científicos do comportamento dos plásticos combinados com as variáveis operatórias controláveis do processo, onde são testadas hipóteses através de várias experiências e de onde são retiradas conclusões através dos resultados obtidos com o intuito de melhorar os processos sem comprometer a robustez do mesmo. Para essa recolha são utilizadas técnicas específicas e abrangentes de recolha de resultados para documentar especificações e passos necessários de modo a criar um processo reprodutível e controlável. Posto isto, o *scientific molding* lida e estuda todas as etapas que incorporam a produção de uma peça, desde a entrada do material que a constitui em forma de granulado na máquina até a saída da mesma como produto final. [9]

2.2.1. Etapas do *Scientific Injection Moulding*

Este método também possui uma vertente de estudos de modo a assegurar que os parâmetros do processo são meticulosamente estabelecidos e são rigorosamente documentados tais como

estudos reológicos, estudos de variação de temperaturas e pressões, entre outros. Contudo podemos dividir o *Scientific Injection Injection* em 6 etapas:

- Análise do projeto e recomendação do uso do *scientific moulding*

Em primeiro lugar é feita a revisão da peça analisando o seu desenho e avaliando a sua complexidade e, se apropriado, é recomendado o uso dos princípios do *scientific moulding*. Para aplicar estes princípios científicos é necessário ter conhecimentos e ser-se especializados na área dos polímeros.

- Design da peça e ferramentas

O *scientific moulding* está diretamente dependente dos dados recolhidos. Para a obtenção desses dados é necessário que a peça e todas as ferramentas produtivas sejam projetadas de modo a possuírem sensores específicos da moldação científica, como é exemplo a máquina de injeção, que deve ser capaz de mostrar dados relativos as pressões, temperaturas, tempos, entre outros.

- Ferramenta de produção

Após a conclusão do projeto da peça e do molde e aprovadas as especificações iniciais, é construído o primeiro modelo do molde. Esta ferramenta é testada rigorosamente com o objetivo de detetar erros funcionais preliminares para se fazerem refinamentos e ajustes necessários.

- Estabelecimento da janela de produção

Testar a ferramenta é uma etapa importante da moldação científica. São realizados um conjunto de hipóteses e testes, conhecidos como os DOE (*Design of Experiments*) para determinar alguns parâmetros-chave que influenciam o processo (temperaturas de molde, temperatura de fusão, tempo de arrefecimento, entre outras). Por sua vez estes irão produzir resultados ótimos de moldação por injeção quando são aplicados a uma produção em série com as devidas especificações de produto.

- Produção e monitorização

Depois de estabelecida a janela do processo, são feitos ajuste dimensionais finais e, deste modo, a produção em grande escala pode começar. A janela do processo deve ser monitorizada de perto e permanece contante durante a produção.

- Manutenção

É importante que seja sempre feita a manutenção e limpeza da máquina de injeção e respectivas ferramentas, o que prolonga a vida da ferramenta, assegurando que os ajustes são mínimos, sendo também fundamental para evitar tempos de paragens ou peças defeituosas. [2][10]

2.3.O controlo estatístico do processo (SPC)

A qualidade de qualquer produto está diretamente dependente com o desempenho da etapa de produção do mesmo, onde poderão surgir eventuais variações que advêm do processo, quer seja relativamente às suas dimensões e respetivas cotas, quer seja relativamente a defeitos ou características estéticas que a peça deve ou não possuir. Assim surge a necessidade de estudar estas variações de modo a tentar obter um melhor controlo de processo a nível produtivo. [11]

O controlo estatístico de processo (ou SPC- *Statistical Process Control*) é definido como um conjunto de instrumentos que são usados para resolução de problemas relacionados com a melhoria da capacidade do processo e da estabilidade do mesmo, através da redução da variabilidade. Esta variabilidade inerente aos processos produtivos pode ter origem várias fontes, podendo esta advir de várias fontes como equipamentos, matérias-primas, mão de obra, metodologias, entre outras. [12]

Ou seja, esta abordagem usa dados estatísticos de modo a compreender melhor o processo de modo a detetar problemas ações que podem causa problemas a nível da concessão do produto para que depois estas possam ser analisadas e devidamente corrigidas, sendo que para isso é necessário que previamente sejam selecionadas características que se pretendem controlar.

Existem várias ferramentas que são usadas para aplicar o controlo estatístico do processo, tais como: Diagramas de causa efeito, histogramas, folhas de registo e verificação, diagrama de dispersão e cartas de controlo. Todas elas têm a sua importância e cada uma compreende os seus próprios aspetos técnicos. Destas ferramentas, as cartas de controlo são as mais sofisticadas e as que apresentam mais informações quanto à variância e à estabilidade do processo. [13]

2.3.1. Variabilidade de processos

É inevitável que qualquer processo apresente variabilidade, que pode advir de vários fatores que os rodeiam. Esta variação deve ser devidamente monitorizada, de modo que os processos se apresentem robusto e consistente, de modo a serem obtidas peças de qualidade e características semelhantes.

Quando se fala de variação, esta pode ser dividida em dois tipos.

- Causas de variação comum, que representam a variação do processo que acontece de forma natural, ou seja, que irão existir mesmo que o processo se encontre estatisticamente em controlo, não afetando diretamente a qualidade dos produtos produzidos.
- Causas especiais de variação, que são causas não aleatórias, ou seja, são exteriores ao processo, que causam variação assinalável e devem-se a uma razão específica. Estas são as causas que devem ser devidamente identificadas e estudadas de modo que se possa compreender de que modo proceder para a sua eliminação.

O principal objetivo do SPC passa pela eliminação de variações de causas especiais nos processos de modo que depois sejam implementadas ações que permitam a eliminação desse tipo de variação. Ou seja, os processos devem apenas estar sujeitos a variações provocadas por causas comuns, sendo que estas devem ser também minimizadas o máximo possível e qualquer causa especial que o processo apresente deve ser devidamente solucionada, de modo a não comprometer a eficiência do mesmo. [14][15]

3. Metodologias

3.1. Estudos da otimização do processo

Como referido anteriormente, base da moldação científica é o método científico, em que através de experiências devidamente planeados, são testadas hipóteses de onde se irão retirar conclusões acerca do comportamento dos plásticos para aquele processo, de modo a não comprometerem a consistência do processo.

Para a recolha de dados, serão realizados estudos de otimização do processo que serão descritos neste tópico, que posteriormente serão organizados e ordenados, de modo a criarem uma sequência lógica de ideias para que não seja necessária uma grande interrupção do processo produtivo.

3.1.1. Estudo da curva de viscosidade

Como é do conhecimento geral, os materiais poliméricos apresentam um comportamento viscoelástico no estado fundido, ou seja, a sua viscosidade varia em determinadas taxas de corte. Isto significa que a baixas taxas de corte, são raramente encontradas no processo de injeção, o plástico é newtoniano, isto é, comporta-se como um sólido. À medida que as taxas de corte aumentam, estes tendem a comportar-se como um fluido. [8]

Na figura 6 denotam-se esses comportamentos, onde a elevadas taxas de corte, as moléculas de polímero tendem a alinhar-se entre si, formando estruturas orientadas, não provocando resistência ao fluxo. [6]

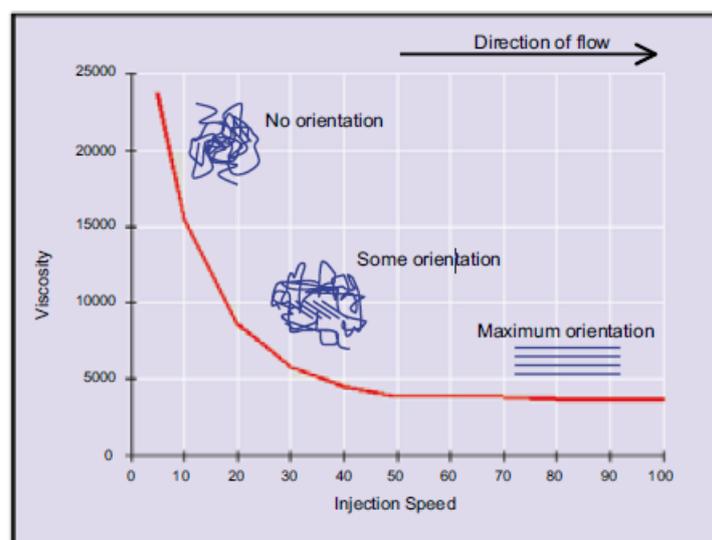


Figura 6- Variação da viscosidade com a velocidade de injeção e orientação molecular correspondente [6]

Através da aplicação deste estudo vai-se verificar qual a velocidade ótima de injeção através da obtenção de uma curva de viscosidade, onde se verificam as flutuações que o material possui a nível de viscosidade, variando a velocidade de injeção. Através da curva vai-se verificar para que velocidades de injeção a variação da viscosidade é menor.

Procedimento para o estudo da curva da viscosidade

1. Definir a temperatura de processamento de acordo com a ficha técnica do material;
2. Retirar a 2ª pressão;
3. Definir a pressão de injeção para o valor máximo permitido pela máquina;
4. Definir um tempo de arrefecimento para a correta extração da peça;
5. Injetar velocidades baixas (5% em todos os patamares) e observar a moldação produzida. Moldação deve ser incompleta para que mesmo aumentado as velocidades, a peça se mantenha incompleta;
6. Aumentar a velocidade de injeção, sempre garantindo peças incompletas;
7. Injetar uma peça perto da velocidade de injeção máxima, garantindo que esta é incompleta. Se sim, injetar nova peça com velocidade de injeção quase no máximo e registar valor de pressão máxima de injeção atingido e o tempo de enchimento. Se não for incompleta, antes deste passo deve-se aumentar o ponto de comutação até que a peça atinja aproximadamente 95% do seu peso e esteja incompleta;
8. Diminuir velocidade de injeção em aproximadamente 10% da velocidade anterior e registar o tempo de enchimento e a pressão máxima de injeção;
9. Repetir o passo anterior, de modo a obter aproximadamente 10 medições;

3.1.2. Estudo balanceamento das cavidades

No processo de injeção é comum que a maior parte dos moldes usados sejam multicavidade, daí ser de extrema importância que se garanta um enchimento uniforme de todas as cavidades de modo a produzir peças completas em todas as cavidades. Neste tipo de moldes, há uma grande probabilidade de o enchimento não ser uniforme de cavidade para cavidade, daí ser importante o estudo do balanceamento das cavidades de forma a tornar o processo mais consistente. [2]

Com este estudo, verifica-se o balanço de enchimento entre todas as cavidades através do peso de cada moldação para avaliar o enchimento de cada cavidade e retirar as devidas conclusões relativas à eficiência do processo.

Procedimentos para estudo do balanceamento de cavidades

1. Definir 2ª pressão e respetivo tempo para 0;
2. Definir um atraso na plasticização (dosagem) igual ao tempo estimado para a pressão de compactação. Exemplo: se o tempo de pressão de compactação estimado for de 10s, atrasar também a dosagem em 10s;
3. Definir a velocidade de injeção consoante os resultados do estudo da curva reológica;
4. Usando os restantes parâmetros de injeção iguais à primeira etapa, retirar peças quase completas;
5. Esperar que o processo estabilize e retirar amostras, pesando-as individualmente;
6. Registrar os valores obtidos como no gráfico da figura 7.

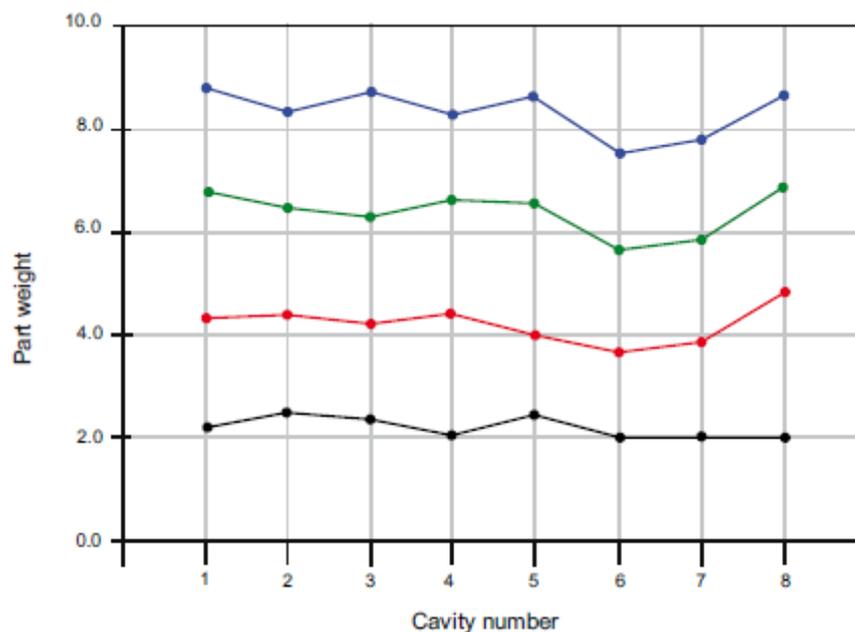


Figura 7- Exemplo de variabilidade entre cavidades [6]

3.1.3. Estudo da queda de pressão

No processo de injeção, o plástico flui através de diversas secções, desde o bico até ao molde. Por isso, a frente de fundido irá perder pressão à medida que se dá o fluxo de material. Isto acontece devido à fricção e ao arrastamento que este sofre. Para além disso, à medida que o fundido entra em contacto com o molde, inicia-se o arrefecimento. Isto irá traduzir-se num aumento da viscosidade do mesmo, pelo que será necessária uma pressão adicional para que a cavidade do molde seja totalmente preenchida a um caudal constante. [8]

Nas máquinas de injeção, existe um limite de pressão disponível para empurrar o fuso à velocidade de injeção definida, dependendo da capacidade da bomba da máquina, sendo que a pressão máxima para que isto aconteça nunca deve ser superior à capacidade da máquina.

Ao analisarmos a queda de pressão em cada secção que o material flui, tem-se uma noção da queda de pressão geral do processo, assim como em que zonas se verificam quedas de pressão mais elevadas. Isto poderá ser útil a nível de melhoramento do processo, como por exemplo, no sistema de canais do molde, que pode ser modificado caso haja uma queda de pressão demasiado elevada de modo a obter um fluxo mais consistente. [2]

Procedimento para o estudo da queda de pressão

1. Definir pressão de injeção para o máximo admissível;
2. Purgar máquina e registar pico de pressão de injeção;
3. Injetar um *shot* de forma a encher apenas o mínimo possível a peça/jito e registar o pico de pressão de injeção;
4. Injetar um *shot* de modo a moldar o jito curto (antes à zona do ataque) e registar o pico de pressão de injeção;
5. Injetar uma moldação completa e registar o pico de pressão de injeção.

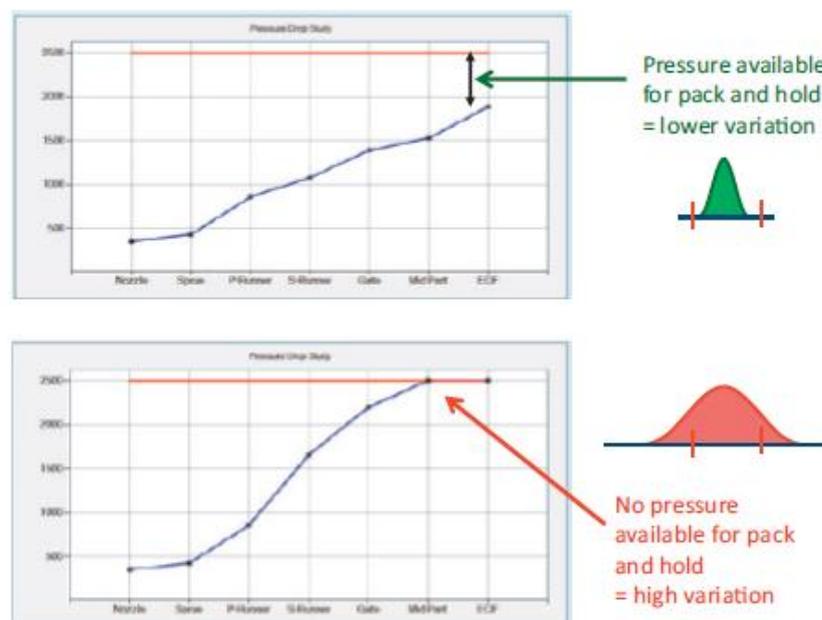


Figura 8- Queda de pressão [6]

3.1.4. Estudo da janela de processo

O estudo da janela de processo é um estudo determinante para o desenvolvimento de um processo robusto. A determinação da janela de processo ajuda-nos a perceber até onde se podem variar certas variáveis do processo de modo que as características finais da peça não sejam afetadas e quanto maior for esta janela, mais alta é a probabilidade de se obter um processo robusto

Já se mencionou que há uma fase do ciclo em que é necessária a entrada de mais materiais plásticos de modo a compensar possíveis perdas na peça devido à contração, e por isso existem variáveis que devem ser controladas nesta fase como 2ª pressão, contrapressão, tempo de compactação. [6]

Este processo também é conhecido como o diagrama da área moldada, que é a área onde a peça será esteticamente aceitável. Posto isto, este estudo fornece informações importantes acerca da capacidade que o molde tem para produzir peças esteticamente aceitáveis e consistentes. [2]

Procedimento para o estudo da janela de processo

1. Definir temperatura do molde através da ficha técnica do material (iniciar valor mais baixo);
2. Definir temperatura do cilindro através da ficha técnica do material (iniciar valor mais baixo);
3. Colocar valor de velocidade obtido na experiência da curva de viscosidade;
4. Colocar valores de tempo e 2ª pressão a 0;
5. Colocar um valor de tempo de arrefecimento maior que o tipicamente necessário (cerca de +10s)
6. Começar a injetar e ajustar ponto de comutação para um valor que garanta que a peça encha entre 45%-98%;
7. Deixar o processo estabilizar ao fim de 5-8 shots;
8. Colocar valor do tempo de 2ª pressão que garanta ataque solidificado;
9. Aumentar o valor de 2ª pressão em pequenos incrementos até que se obtenha uma peça aceitável e anotar “Baixa temperatura-Baixa pressão”;
10. Aumentar o valor de 2ª pressão em pequenos incrementos e anotar pressão onde ocorre um defeito e anotar “Baixa temperatura-Alta pressão”;
11. Repetir passos 9 e 10, mas com temperatura de cilindro no máximo da ficha técnica e anotar “Alta temperatura-Baixa pressão/ Alta temperatura-Alta pressão”;

12. Juntando os 4 pontos gera-se a janela do processo;
13. Definir o processo para o centro da janela.

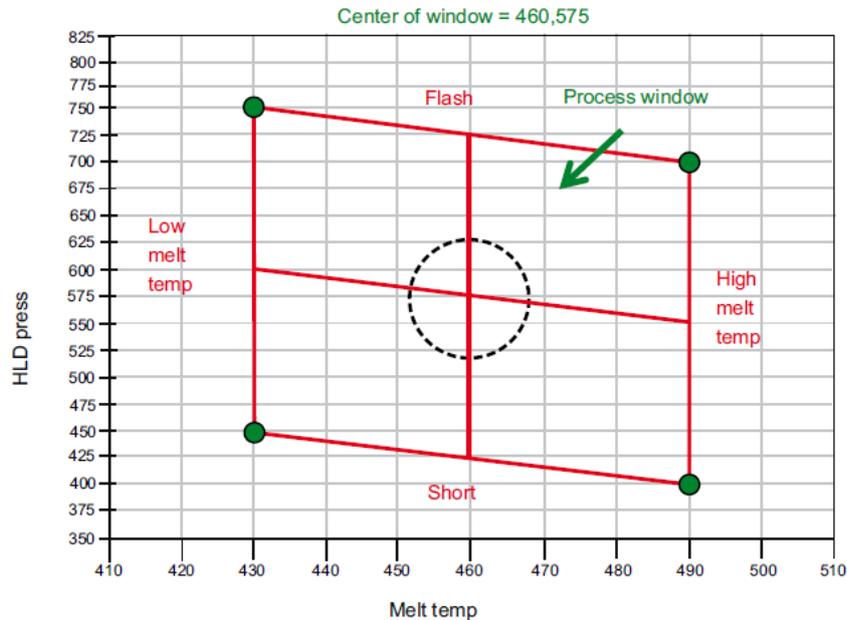


Figura 9- Exemplo de uma janela de processamento [6]

3.1.5. Estudo da determinação do tempo de solidificação do ataque

O plástico fundido entra no molde através do ataque. O enchimento do mesmo é uma fase dinâmica, já que durante esta fase a temperatura de fusão, a pressão e a velocidade de fluxo estão a mudar ao longo do tempo. Após a fase de entrada de material dá-se o enchimento da cavidade e quando esta está quase cheia, começa a fase do empacotamento e da espera. À medida que a velocidade de fluxo diminui, verifica-se uma diminuição da temperatura e consequentemente, um aumento da viscosidade do fundido. Quando este valor de viscosidade chega a um ponto em que não há mais fluxo no ataque, diz-se que este está congelado, sendo que o tempo que este demora a congelar é denominado de tempo de solidificação do ataque. [6]

Este estudo permite avaliar e melhorar a consistência de injeção para injeção, onde irão ser produzidas peças e pesadas peças variando o tempo de 2ª pressão do processo, sendo que o tempo onde começa a estabilização do peso das peças será considerado o tempo ideal de 2ª pressão, que corresponderá ao tempo que o ataque demorará a congelar.

Procedimento para o estudo da solidificação do ataque:

1. Definir velocidade para valor obtido na curva da viscosidade;
2. Definir processo para os valores correspondente ao centro da janela de processo obtido anteriormente;
3. Definir tempo de arrefecimento para um valor que garante que a peça está arrefecida antes da extração;
4. Definir tempo 2ª pressão para 0 e injetar. Efetuar cerca de 5-8 injeções;
5. Aumentar tempo de 2ª pressão para 1s e efetuar moldação;
6. Aumentar tempo de 2ª pressão para 2s e efetuar moldação;
7. Aumentar de 1 e 1s e efetuar injeções;
8. Pesar peças e efetuar gráfico de variação peso-tempo;
9. Determinar a partir de que momento o peso estabiliza, que será o tempo que o ataque demora a solidificar e considerar o tempo de 2ª pressão 1 segundo acima do anterior.

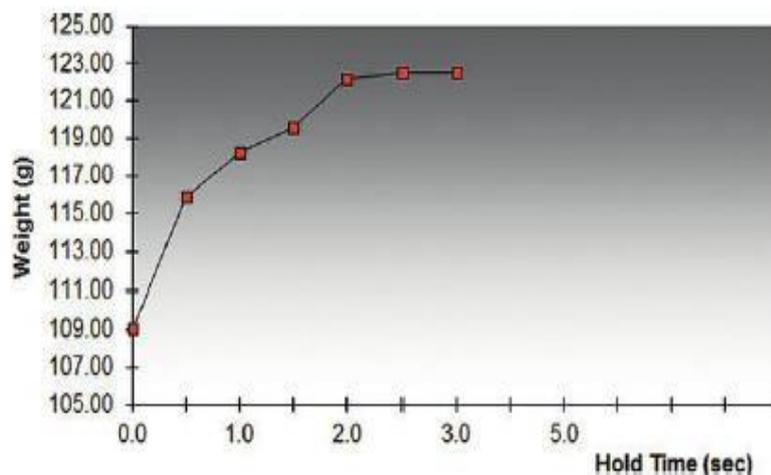


Figura 10- Variação do peso de peça com o tempo de 2ª pressão [5]

3.1.6. Estudo tempo de arrefecimento

O arrefecimento do fundido começa a partir do momento em que este atinge as paredes do molde. Finda a fase de empacotamento e o tempo de 2ª pressão, começa-se então a contar o tempo de arrefecimento. Quando termina o tempo de arrefecimento e a peça atinge a temperatura de extração correta, então esta pode ser ejetada do molde. Se a peça for extraída antes de se atingir o tempo de arrefecimento correto, pode haver deformação da mesma porque o material encontra-se mole por não estar bem solidificado. Não obstante, caso o tempo de arrefecimento definido seja excessivo há perda de tempo desnecessário, que pode resultar em prejuízos no processo. [6]

O tempo de arrefecimento é extremamente importante para a eficiência de um processo de injeção e também que se obtenham peças consistente. Este parâmetro deve ser bem estudado, que é o propósito deste estudo, que visa a determinação de um tempo de arrefecimento ideal, através da injeção de peças a diferentes tempos de arrefecimento e analisando as moldações obtidas a nível dimensional.

Procedimento para o estudo do tempo de arrefecimento

1. Definir valores do processo para as condições determinadas na obtenção da curva de viscosidade, janela de processo, arrefecimento, ataque;
2. Começar a injetar e quando o processo estabilizar realizar 3 injeções;
3. Baixar tempo de arrefecimento em 1 ou 2s e efetuar mais 3 injeções;
4. Continuar a baixar tempo de arrefecimento ao longo das injeções;
5. Medir as dimensões das peças ao longo das injeções;
6. Desenhar o gráfico da variação das dimensões em função do tempo de arrefecimento;
7. Selecionar tempo de arrefecimento que permita obtenção da peça com melhor qualidade;
8. Efetuar 30 moldações com tempo de injeção selecionado e fazer análise estatística para determinar capacidade de processo com este tempo de arrefecimento.

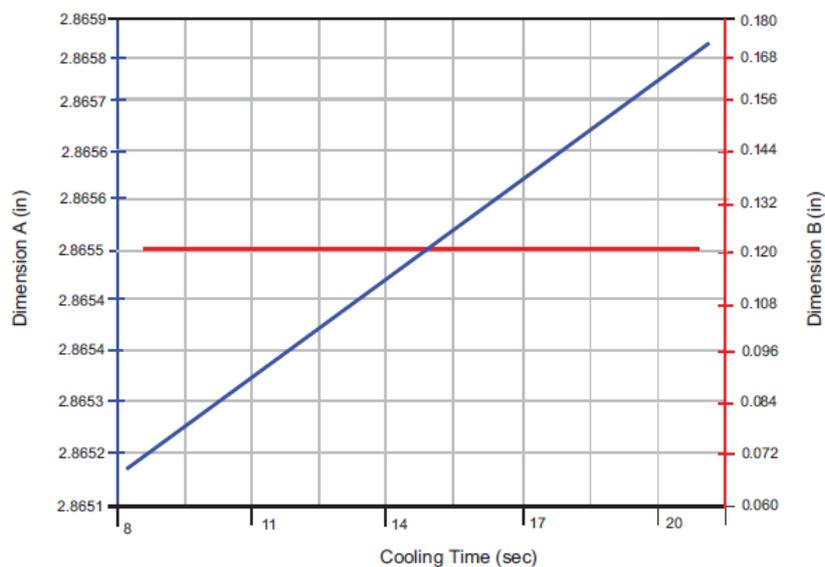


Figura 11- Variação dimensional com o tempo de arrefecimento [6]

3.2. Cartas de controlo

Como referido anteriormente, as cartas de controlo são uma ferramenta mais desenvolvida e sofisticada para monitorizar a variação existente num processo. Desenvolvidas por Stewart em 1931, estas são aplicadas para verificar a estabilidade de um processo ao longo do tempo, ou seja, é a representação gráfica de uma característica que foi medida ou calculada através de uma amostra. [13]

Estas cartas de controlo apresentam no eixo das ordenadas os valores observados que dependem da característica que está a ser analisada e no eixo das abcissas o instante ou número que é relativo à amostra ou subgrupo correspondente. Para além disso estas também apresentam limites de especificação, que são denominados de limite superior de controlo (LSC), limite inferior de controlo (LIC) e linha central (LC). A figura 12 representa um exemplo de carta de controlo. [15]

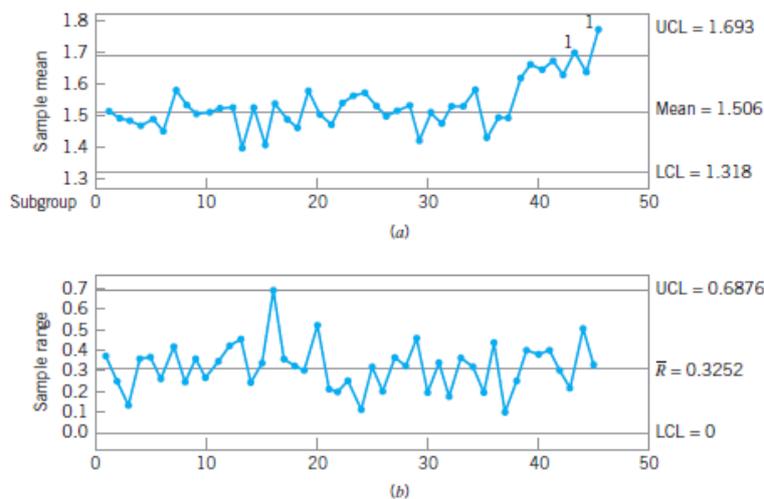


Figura 12- Exemplo de cartas de controlo [13]

3.2.1. Regras para deteção de padrões não-aleatórios

O facto de um ponto se encontrar fora dos limites de controlo evidencia que há a ocorrência de uma causa especial de variação, já que se trata de um comportamento não aleatório do processo.

Existem razões que podem influenciar o facto de um ponto não se enquadrar dentro dos limites de controlo, como o facto dos limites de controlo estarem incorretamente calculados, ou pelo facto de o sistema de medição ter sido alterado, ou porque a variabilidade entre ou dentro de cada subgrupo ter aumentado significativamente, entre outras.[16]

Contudo, uma causa especial de variação também pode ser um padrão não aleatório dentro dos intervalos definidos pelos limites de controlo, isto é, o facto de não existirem pontos fora dos limites de controlo que o processo se vai encontrar estável.

Assim, com o objetivo de aumentar a sensibilidade das cartas de controlo, foram desenvolvidas regras de deteção de causas especiais de variação. Para isso, são definidas 6 zonas simétricas cada uma de largura $1\sigma_\omega$, como observado na figura 13. Essas regras estão definidas na tabela 1 e exemplificadas na figura 13.

Tabela 1- Regras de deteção de padrões não-aleatórios; adaptado de [16]

Regras para a deteção de padrões não aleatórios do processo
Regra 1: Um qualquer ponto fora dos limites de controlo
Regra 2: Nove pontos consecutivos na zona C ou para além da zona C, do mesmo lado da linha central
Regra 3: Seis pontos consecutivos no sentido ascendente ou descendente
Regra 4: Catorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente
Regra 5: Dois de três pontos consecutivos na zona A ou para além da zona A, do mesmo lado da linha central
Regra 6: Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A ou além desta zona, do mesmo lado da linha central
Regra 7: Quinze pontos consecutivos na zona C acima e abaixo da linha central
Regra 8: Oito pontos consecutivos de ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C

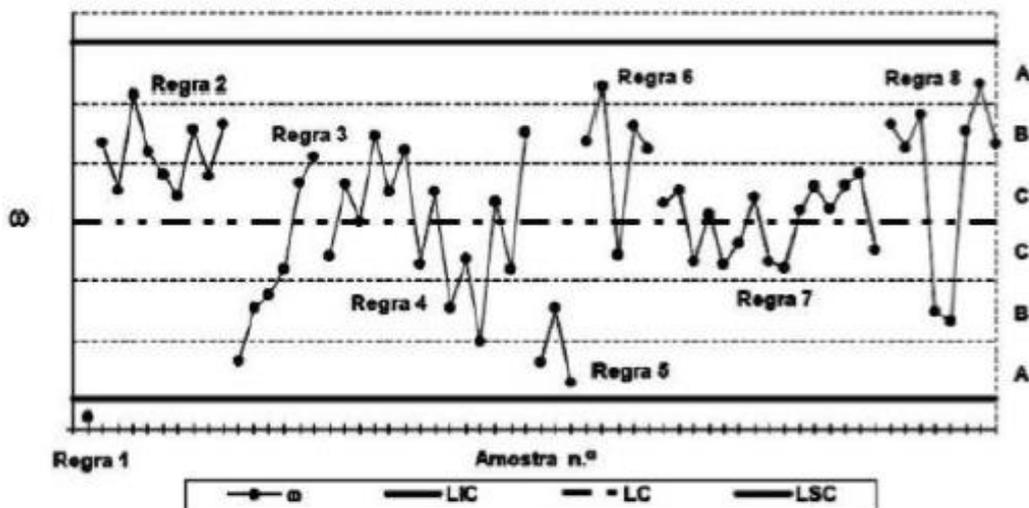


Figura 13- Padrões não-aleatórios [16]

3.2.2. Tipos de carta de controlo

Existem 2 tipos de cartas de controlo, sendo estas a cartas de controlo para variáveis e as cartas de controlo para atributos.

O primeiro são cartas de controlo que são usadas quando a característica em estudo pode ser medida e expressa numa escala continua (como dimensões, pesos) sendo que para este tipo devem ser construídas duas cartas, uma que controla localização e outra para controlar a dispersão da população.

A segunda trata-se de cartas de controlo para atributos, ou seja, são aplicadas quando a característica assume valores discretos (p.e. número de defeitos ou número de peças não OK).

Para cada carta existem vários tipos de cartas a serem aplicadas, que dependem do tipo de análise que se pretende fazer e também da característica e tipo de dados a recolher. Na tabela seguinte encontram-se as cartas de controlo estatísticos, para atributos e variáveis, sendo que no presente projeto serão utilizadas as cartas de controlo de variáveis, nomeadamente, de observações individuais e amplitudes e as cartas de media e variância. [14]

Tabela 2- Tipos de cartas de controlo

Cartas de controlo	Tipos de cartas
Variáveis	Média: carta \bar{X} ; Amplitude: carta R
	Média: carta \bar{X} ; Desvio padrão: carta S
	Média: carta \bar{X} ; Variância: carta S^2
	Mediana: carta \bar{X} ; Amplitude: carta R
	Observações individuais: carta \bar{X} ; Amplitudes móveis: carta MR
Atributos	Proporção de unidades não conformes: carta p
	Número de unidades não conformes: carta np
	Número de defeitos: carta c
	Número de defeitos por unidade: carta u

3.3. Capacidade do processo

Com a variabilidade inerente dos processos, surge a questão de garantir a qualidade constante dos produtos obtidos ao longo do processo. Para isso é importante que este cumpra certas especificações que devem ser monitorizadas para que o processo atue de forma consistente.

Uma ferramenta da qualidade que pode ser usada neste sentido é o estudo da capacidade do processo. Depois de usadas as cartas de controlo e verificada a estabilidade do mesmo, recorre-se então à capacidade do processo de modo a verificar, com o processo em controlo estatístico, se este é capaz, ou seja, se consegue produzir o produto dentro de especificações previamente definidas. [14]

O estudo da capacidade é normalmente usado para medir parâmetros funcionais (p.e. dimensões, peso) ou então defeitos na peça. Neste estudo é importante o controlo da recolha de dados de modo a conhecer a sequencia temporal da recolha de dados, com o intuito de se inferir relativamente à estabilidade do processo ao longo do tempo.

Para a aplicação deste estudo, tem de se garantir que o processo está estatisticamente controlado, daí que antes da aplicação da capacidade do processo se deva realizar um estudo de controlo estatístico do processo. Caso isto não aconteça, pode-se obter uma previsão errada relativamente à capacidade que o processo terá de produzir peças dentro das especificações em estudo.

Quando se fala em capacidade do processo, existem dois índices usados para quantificar a probabilidade de uma especificação ser produzida dentro dos limites de especificação, sendo estes o C_p e C_{pk} . O C_p , ou Capacidade do Processo, é uma variável onde o seu cálculo é independente de a média ser coincidente com o valor alvo da especificação, ou seja, este apenas avalia se a variabilidade do processo é adequada à amplitude do processo, não fornecendo informações acerca da localização do processo. [17]

Por sua vez, o C_{pk} tem em conta não só a variabilidade do processo, mas também a localização da média, nomeadamente da sua distância para o limite de especificação mais próximo. [17]

Estas duas constantes permitem-nos analisar o comportamento do processo no presente e dá-nos uma perspetiva de como o processo se irá comportar no futuro. Deste modo pretende-se que valores de C_p e C_{pk} obtidos sejam os mais altos possíveis. Ou seja, quanto maior forem estes valores, maior será a capacidade do processo de obter valores da especificação dentro dos limites pré-definidos. [18]

Existem valores de C_p e C_{pk} mínimos com o intuito de estabelecer limites para valores ideais destas constantes de modo a avaliar a capacidade do processo, sendo que esses limites estão estabelecidos na tabela abaixo.

Tabela 3- Intervalos capacidade do processo

Intervalos de valores	C_p	C_{pk}
<1	Processo incapaz	Processo incapaz
$1 < x < 1.33$	Processo satisfatório	Processo satisfatório
>1,33	Processo ideal e com segurança	Processo ideal

3.4. Planeamento de experiências

Nos 6 estudos de otimização apresentados anteriormente, esta trata-se de uma primeira fase de desenvolvimento do processo, onde os limites do processo serão explorados, sendo que serão estabelecidos valores e intervalos ideais de processamento. Contudo não está considerada a qualidade da peça em si, nomeadamente a nível dimensional. De facto, quando maiores forem os intervalos ideais de processamento obtidos nas experiências anteriores, maior será a probabilidade do processo de ser robusto a nível dimensional. No estabelecimento das condições ideais de processamento apenas se tem em conta as dimensões da peça porque antes de se verificar se a peça se encontra dimensionalmente aceitável, esta deve ser esteticamente aceitável. Por isso é que uma forma de complementar os 6 passos do *scientific molding* é o estabelecimento de uma janela de processo cosmética, onde se obtêm intervalos ideais de determinadas condições de processamento onde a peça estará dimensionalmente aceitável, sendo que para isso se recorre ao planeamento de experiência (DOE) para se obter este tipo de gráficos.

O DOE (*Design of Experiences*), trata-se de uma metodologia de planeamento de experiências de modo a estabelecer objetivos. Centrado no uso do método científico, o DOE é aplicado para o planeamento, análise e interpretação de dados de experiências controladas, de modo a avaliar as interações entre variáveis pré-estabelecidas de um processo de modo a avaliar a sua influência nos *outputs* do mesmo. [19]

A figura 14 demonstra sequência de etapas para a realização de um DOE, onde em primeiro lugar será definido um objetivo, onde serão escolhidas as características que influenciam o processo, onde depois serão selecionados os respetivos níveis e fatores para as características selecionadas.

De seguida pode-se começar a efetuar o planeamento das experiências através da combinação das variáveis através de matrizes. Assim as experiências já podem ser aplicadas no processo e após isso os resultados podem ser analisados para se retirarem conclusões relativamente ao processo produtivo.[20]



Figura 14- Etapas do planeamento de experiências; adaptado de [20]

3.4.1. Método de Taguchi

O planeamento experimental é uma metodologia que deve ser cuidadosamente usada, em que todas as experiências devem ser devidamente planeadas e os resultados devem ser corretamente analisados. Para isso existem métodos de aplicação de DOE onde foram padronizados métodos para etapas de aplicação do DOE, como é o caso da metodologia desenvolvida por Genechi Taguchi que atualmente é a mais utilizadas na engenharia pela sua simplicidade e facilidade de aplicação.

Este é um método, para ter o objetivo do planeamento de experiências, é uma metodologia que produz uma melhoria de qualidade relativamente a técnicas de planeamento experimentais. Ele é

classificado como sendo um método “off-line”, ou seja, é utilizado exteriormente à linha de produção, ao contrário dos métodos conhecidos como “on-line” que são efetuados durante a fase de produção. [21]

O objetivo principal deste método é minimizar a variabilidade do produto, identificando maneiras de lhe conferir robustez durante o processo de fabrico. Esta metodologia permite:

- **Redução de custos**

Como apenas serão efetuadas as experiências necessárias tendo em conta os fatores a analisar, haverá uma consequente redução de custos relativamente aos métodos experimentais.

- **Redução de fontes de “ruído”**

“Ruído” ou fatores de perturbação são fatores que causam variabilidade ao produto e que não podem ser controlados. Existem 2 tipos de ruídos, os internos, que são alterações no produto quando se deteriora durante o armazenamento e os externos, que são fatores ambientais que podem prejudicar as funções do produto.

- **Atingir robustez**

As experiências devem ser planeadas de modo que os fatores a serem estudados tenham influência significativa no processo e nos produtos finais obtidos pelo mesmo.[22]

Para aplicação do método de Taguchi, o primeiro passo passa pela identificação do problema ou qual o objetivo que se pretende com a aplicação do método. De seguida segue-se a determinação dos fatores a analisar no processo, onde já devem ser previstas possíveis interações entre as variáveis a analisar. De seguida procede-se à seleção da matriz ortogonal tendo em conta o número de fatores estabelecidos para os parâmetros em análise e respetivos níveis. A tabela x mostra um exemplo de uma matriz ortogonal, onde se tem 2 parâmetros com 2 níveis para se analisar. De seguida calcula-se o número de experiências através da fórmula:

$$n = l^f$$

Sendo n o número de experiências, l o número de níveis e f o número de fatores. Para este caso o número de experiências a realizar será de 4, que corresponde a uma matriz L_4 .

Tabela 4- Exemplo de um DOE

Exp.	A	B
1	-	-
2	-	+
3	+	-
4	+	+

Após a realização da matriz, efetuam-se os ensaios tendo em conta a mesma, onde serão registados os respetivos resultados para depois serem devidamente analisados e de onde se devem retirar as devidas conclusões de modo a verificar a interação das variáveis no processo. [2]

4. Característica da peça

A peça em análise insere-se num conjunto com outras 3 peças que formará um determinado produto, sendo este tem como propósito ser um elemento de ligação entre cada uma das restantes peças, formando então um produto a ser posteriormente usado para aplicar na indústria das telecomunicações. Na figura 15 apresenta um desenho CAD da peça. Esta possui uma cor preta que lhe é conferido através do uso de um *mastebatch* específico para o polímero que a constitui, neste caso o polipropileno. Apesar de ser uma peça não visível aquando da sua utilização, para além de possuir algumas cotas críticas, é que esta não deve possuir muitos defeitos superficiais, como rebarbas, chupados ou qualquer defeito relacionado com fluxo de material ou miscibilidade da mistura.

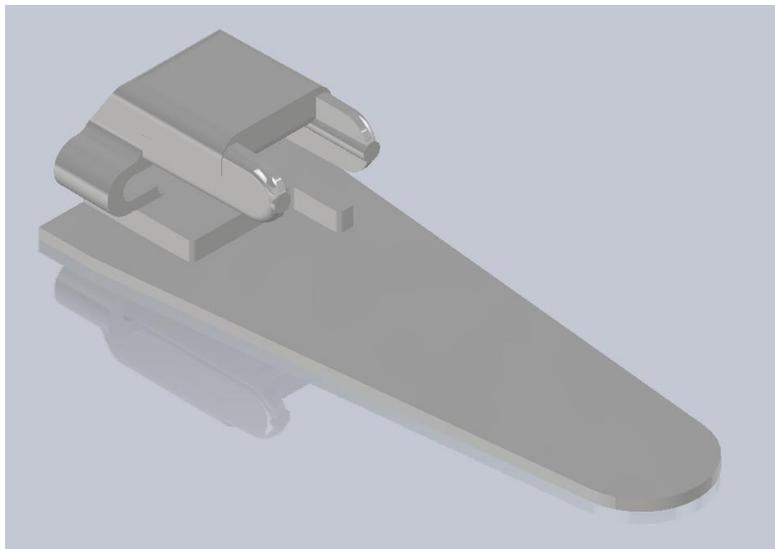


Figura 15- Peça em análise

4.1. Matéria-prima

A peça a ser estudada é feita em polipropileno, com a referência CAPILENE PP HOMO R50, que é um polipropileno homopolímero usado para aplicações de uso geral.

Este é um material com duas das suas características principais o facto de ser reciclável e não-tóxico. É um produto insolúvel em água, sendo adequado para artigos de uso doméstico, caixas e caixotes, entre outros produtos produzidos por moldação por injeção.

As suas condições de processamento estão apresentadas na tabela 5, que foram retiradas da ficha técnica do material (Anexo I).

Tabela 5- Características da máquina de injeção

Parâmetros	Valor	Unidades
Índice de fluidez	12	g/10 min
Resistência à tração	32	MPa
Tensão de tração	11	%
Módulo de flexão	1400	MPa
Resistência ao impacto de Izod	3	kJ/m ²
Temperatura de amolecimento Vicat	153	°C
Temperatura de deflexão térmica	90	°C

4.2. Dimensões

Esta é uma peça de dimensões relativamente pequenas, como se verificou na figura 15. Esta vem num conjunto com outras 3 peças, sendo que servirá como elemento de ligação entre cada uma das restantes 3 peças, formando então um conjunto que será usado na indústria das telecomunicações.

A figura 16 está parte do desenho técnico da peça em estudo, tendo esta como dimensões gerais 51x19 mm, tendo uma espessura variável ao longo da peça, sendo que a espessura mínima de 1mm e máxima de 1.92mm, sendo então que se uma peça de pequenas dimensões com medidas e espessuras aceitáveis a nível de injeção.

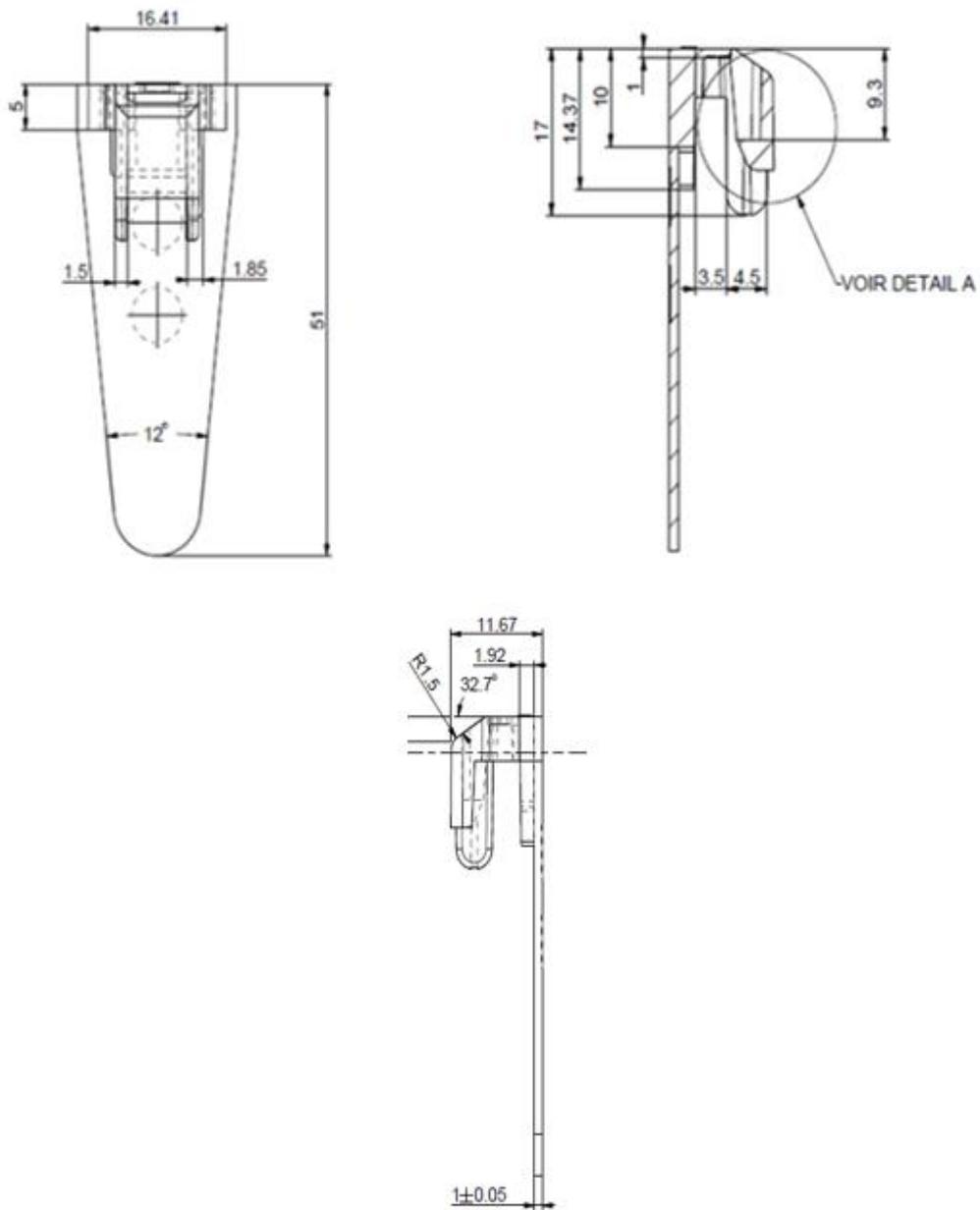


Figura 16- Desenho técnico geral da peça

Esta é uma peça que não está completamente visível para o consumidor, estando encaixada em três outras peças, como se pode observar na figura 17 assinalado a vermelho, onde se denota que a parte superior da peça em análise, que serve de encaixe de modo a interligar as restantes três peças



Figura 17- Conjunto montado com a peça a analisar

Esta peça possui 2 zonas que devem ser controladas a nível dimensional para que as peças produzidas sejam aprovadas pelo controlo de qualidade, que são as duas cotas presentes na figura 18 e 19. Estas duas cotas são consideradas então críticas para a qualidade da peça, sendo que o processo deve estar controlado de modo que estas cotas não sejam excedidas.

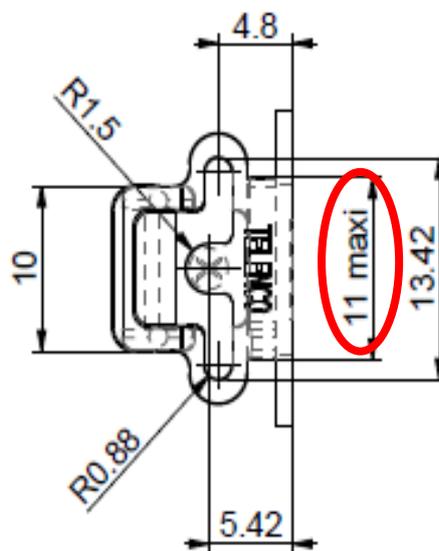


Figura 18- Cota crítica no encaixe da peça

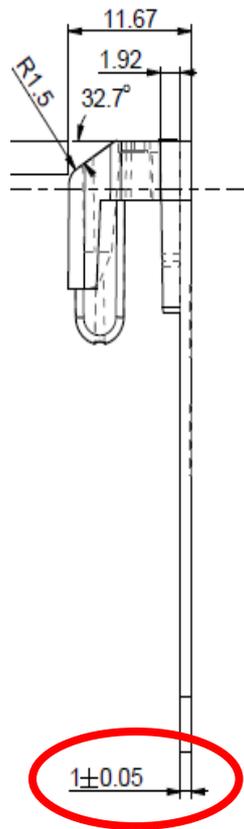


Figura 19- Espessura crítica na peça

De um modo geral, esta é uma peça esteticamente e geometricamente simples, pelo que para além das cotas críticas referidas anteriormente apenas se deve ter em atenção que a peça não possua defeitos visuais muito notórios, como rebarba ou chupados, de modo que não afete a peça funcionalmente e esteticamente.

4.3. Molde

O molde é uma ferramenta que permite a formação de uma peça plástica através da enformação de material injetado numa zona moldante, sendo que também permite o arrefecimento e a devida extração da mesma. De forma geral, os moldes são constituídos por duas zonas, a parte fixa e parte móvel, que contêm respetivamente a cavidade e a bucha, divididas por uma linha de partição, que irão definir posteriormente a peça que se pretende obter.

O molde desta peça trata-se de um molde de 2 placas de canais frios em aço temperado, com 8 cavidades.

Na figura 20 temos uma representação geral do molde de injeção.

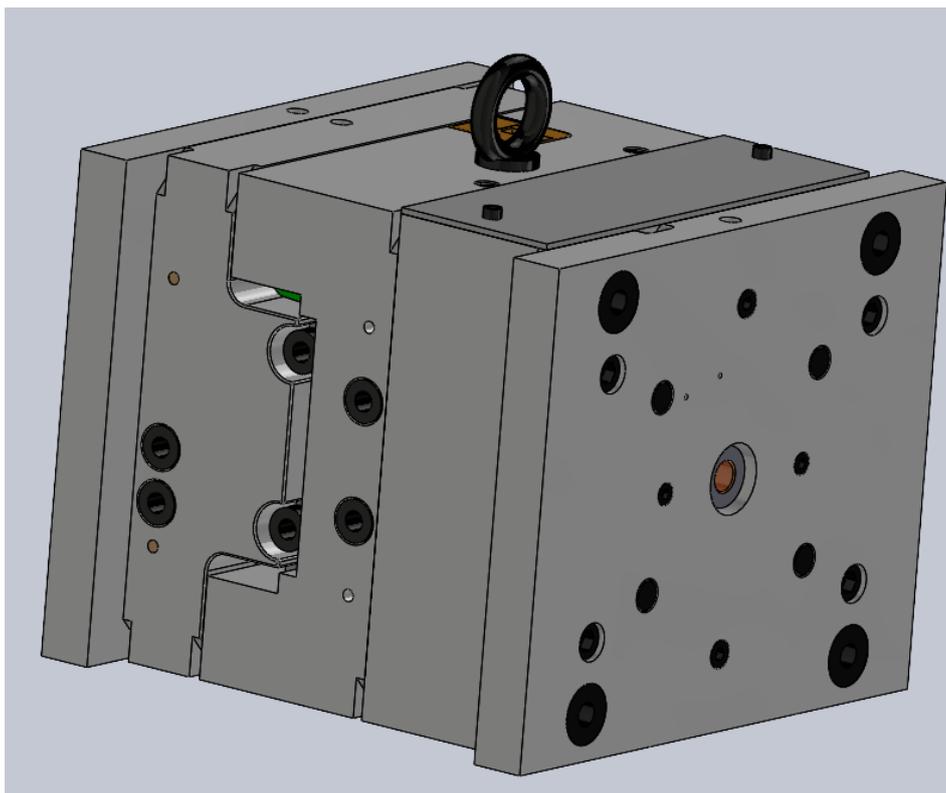


Figura 20- Representação em Solidworks do molde

4.3.1. Lado da injeção

O lado da injeção possui 3 posições. O posição na figura 21 é onde se encontram as cavidades de moldação, onde está presente a zona do ponto de ataque para as 8 cavidades. Contudo, verifica-se que neste posição apenas uma parte da peça se encontra presente. Isto acontece porque a injeção dá-se em conjunto com o lado da extração, onde se encontra um quarto posição que auxilia na injeção e onde será moldada a restante peça

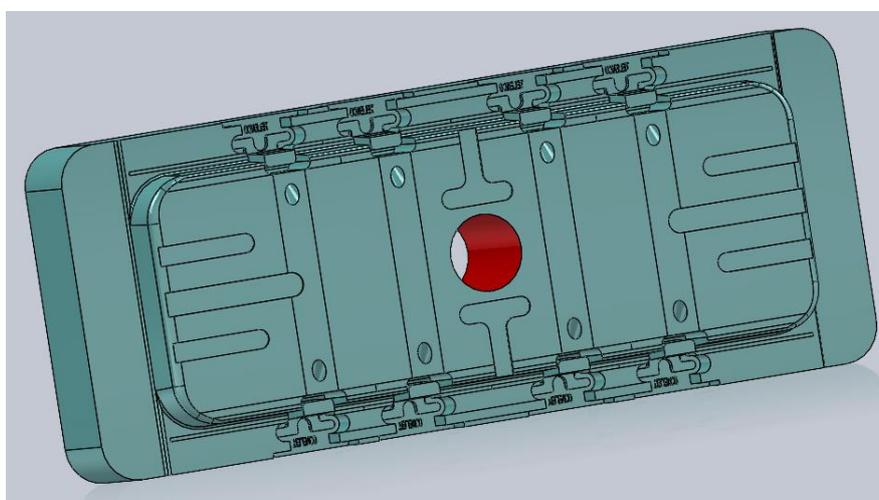


Figura 21- Posição lado da cavidade

Os outros 2 postigos possuem a mesma função e estão posicionados em cada uma das partes laterais do postigo das cavidades, ou seja, por cima de cada um do lado que possuem cavidades. Isto porque se observamos a parte inferior destes postigos (figura 22) existem 8 buracos dispostos aos pares, que se encontraram na parte superior de cada cavidade. Dentro destes orifícios existem aços que estão fixos aos mesmo e que incluem uma gravação que será gravado na peça aquando da injeção. Neste caso, as gravações a incluir, para além do número de cada cavidade tratam-se de datadores. Um datador é uma gravação que costuma estar presente em muitas peças de injeção que indica a data de manufatura da peça em causa, normalmente o mês e o ano, tal como acontece nesta peça.

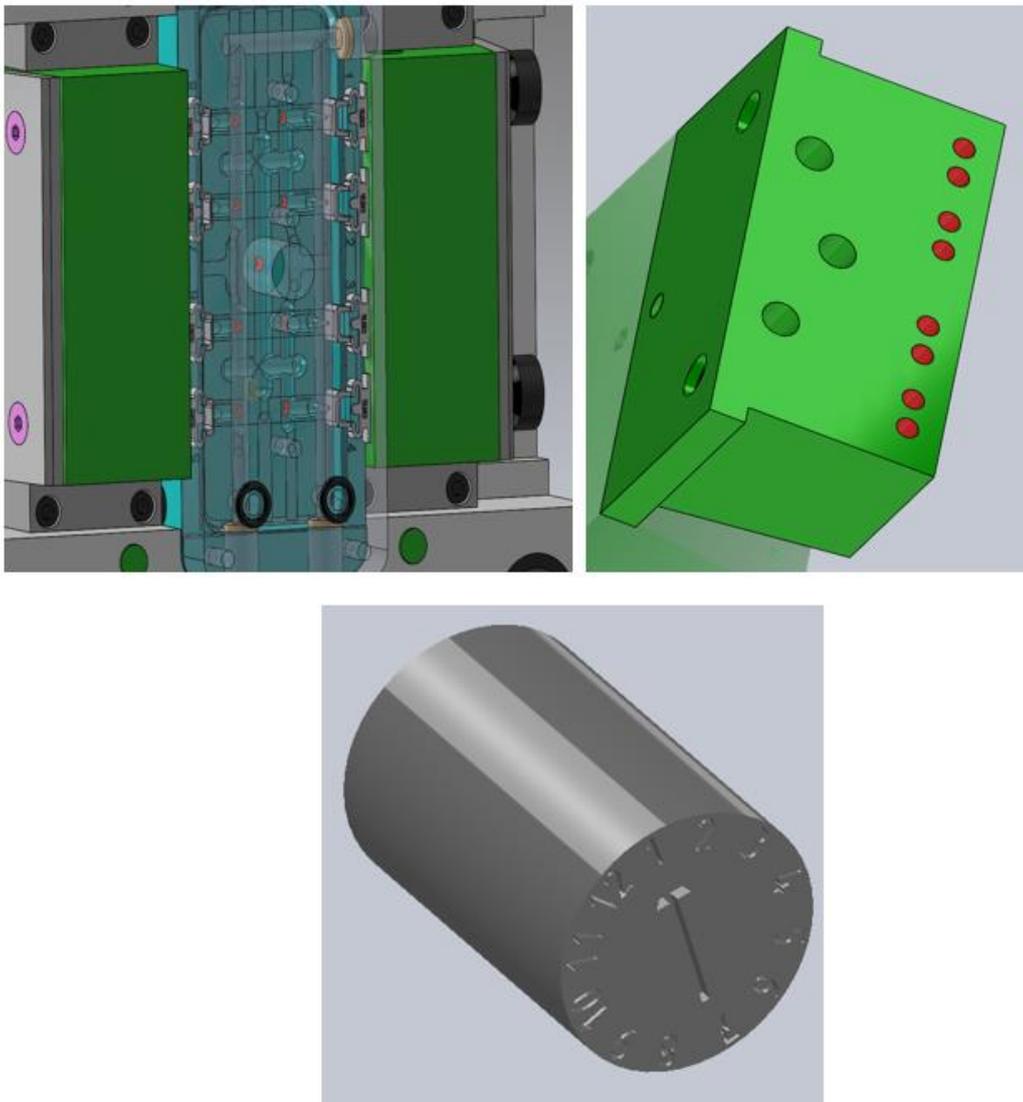


Figura 22- Em cima: postigos colocados para os datadores; Em baixo: Aço com a gravação do datador

4.3.2. Lado da extração

O lado da extração, como o nome indica, caracteriza-se por tratar da extração, neste caso recorrendo apenas ao uso de extratores comuns, denominados de extratores circulares. Neste caso, este tipo de extração é suficiente já que a peça não exige muitos cuidados no que toca à extração, que pode ser o caso em peças com acabamentos mais sensíveis. Como é possível observar na figura 23 assinalado a vermelho, são utilizados 4 extratores para auxiliar a remoção sendo que irão bater na parte superior da peça de cada cavidade e 10 extratores que tratarão da remoção do gito, representados na parte central do posticho do lado da extração, como observado na figura 23, assinalado a amarelo.

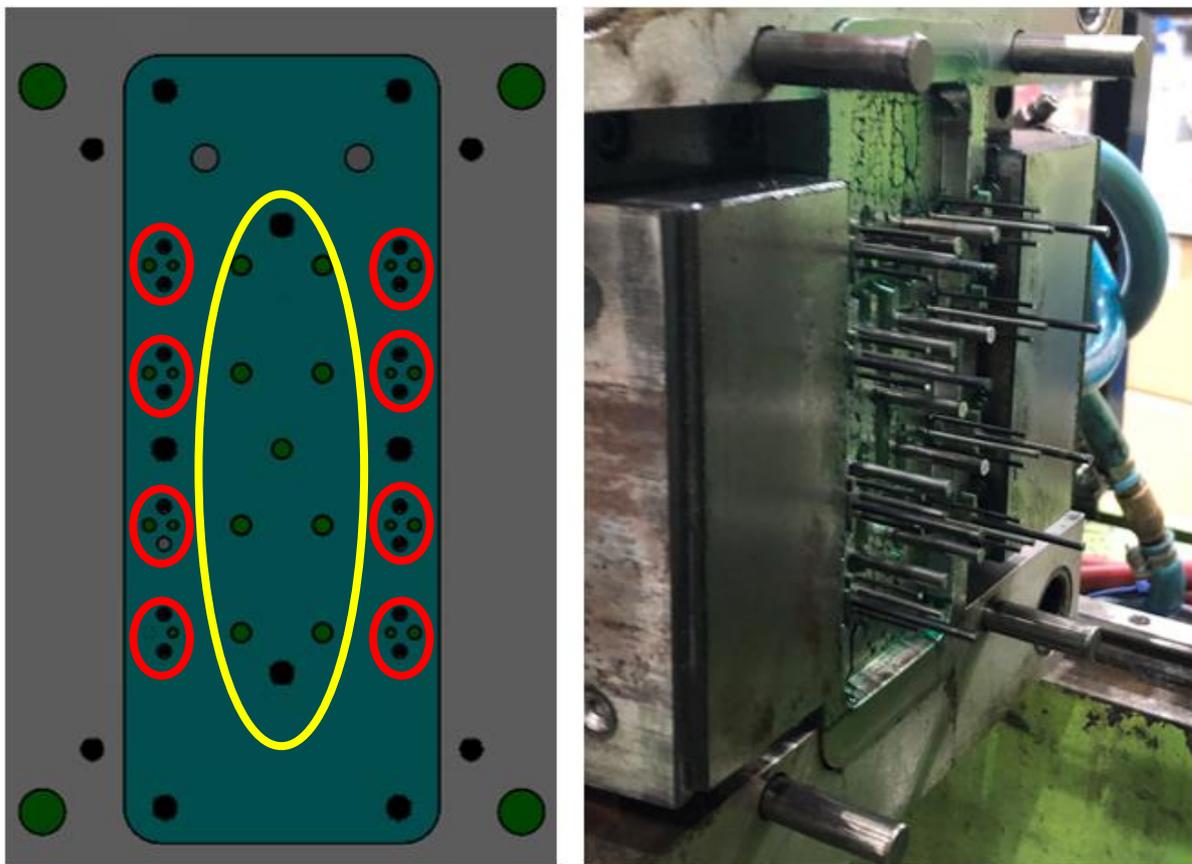


Figura 23- Sistema de extração

Como referido anteriormente, o posticho do lado da extração, vai auxiliar na injeção, como se verifica na figura 24. Nesse posticho observa-se o esquema de injeção, que representa o percurso que o material percorre, culminando nos pontos de ataque de cada cavidade, presentes no posticho da cavidade. Também é posticho da extração que se molda a restante peça. Na parte lateral do posticho, ser-lhe-á conferida espessura na zona plana da peça, pelo que quando o molde fecha, a junção dos dois postichos resulta na peça completamente moldada.

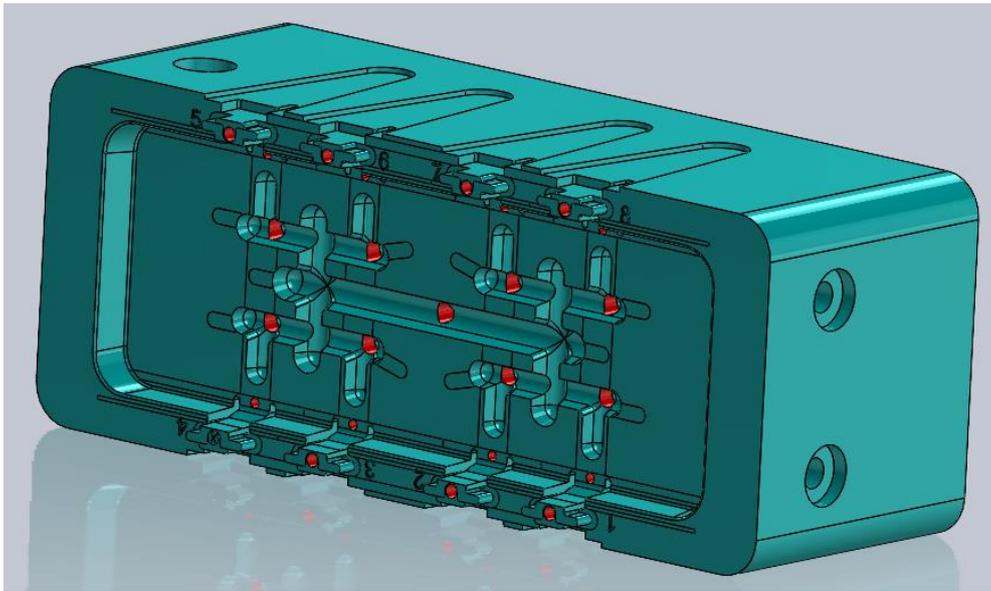


Figura 24- Posição lado da extração

4.3.3. Sistema de arrefecimento

Já foi referido que as cavidades do molde estão presentes em posições de modo a facilitar a injeção das 8 cavidade, pelo que sistema de arrefecimento deve ter em conta esse tipo de estrutura.

Na placa da zona de injeção (figura 25 à esquerda) encontra-se um circuito e com o formato de canais de arrefecimento relativamente simples, em que tanto a entrada e a saída se encontram lado a lado relativamente perto do centro da placa de injeção. Contudo este sistema tem uma particularidade. No canal de arrefecimento localizado ao lado dos *raccords* (estrutura onde se ligam as mangueiras de água) existem 2 buracos assinalados a verde separados por um tampão. Isto existe para que no primeiro furo a água entre pelo posição da cavidade e percorra um segundo sistema de arrefecimento presente no mesmo, como representado na figura 25 à direita, onde a água apenas percorre 3 canais, entrando pelo canal do lado direito da figura 25 (lado direito) e saindo pelo lado esquerdo, regressando aos canais de arrefecimento da placa de injeção, percorrendo o restante circuito até ao *raccord* de saída e água.

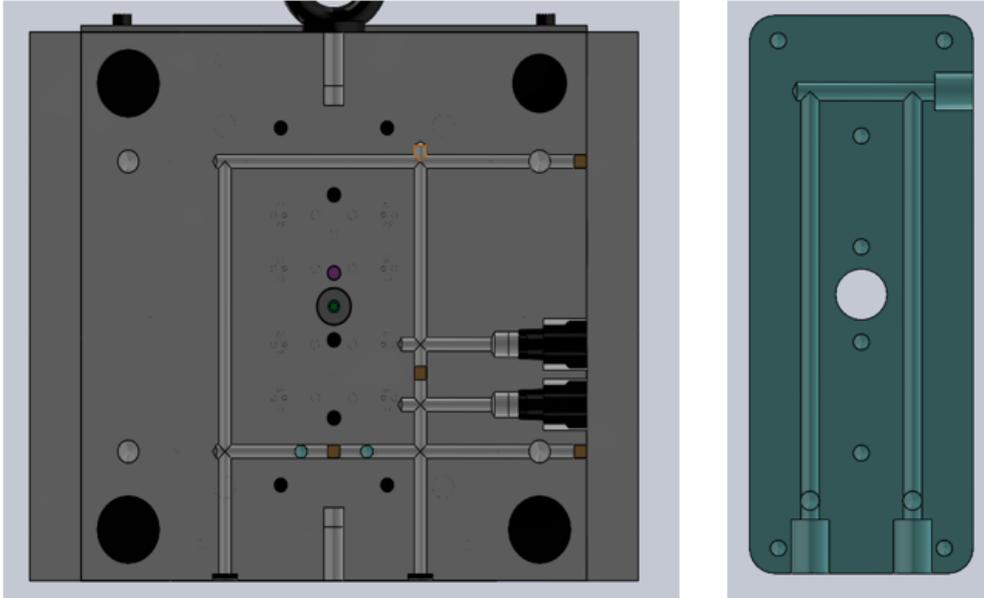


Figura 25- Sistema de refrigeração lado da injeção

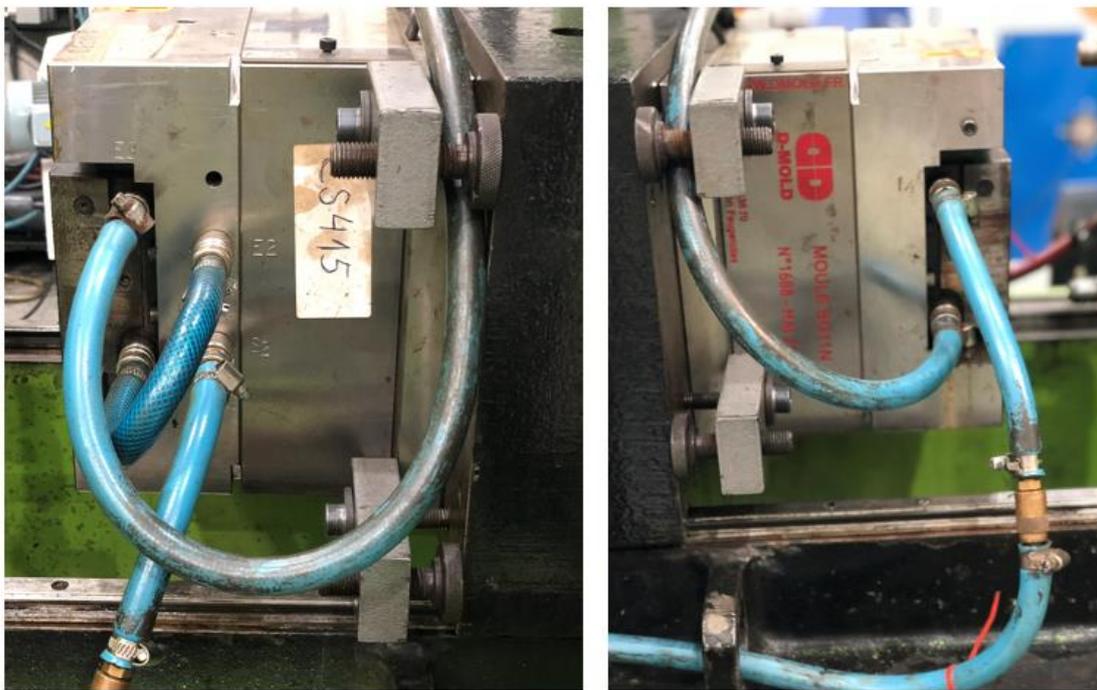


Figura 26- Esquema de ligações de água lado da injeção

Como é possível observar no esquema de ligações no molde (figura 26), este ainda possui mais 4 ligações de água (2 de cada lado da placa das cavidades) na direção dos postigos que têm o propósito de colocar as gravações dos datadores nas peças produzidas. Isto porque esses postigos também possuem um sistema de arrefecimento muito simples, em que a água entra pelos *raccords* superiores de ambos os lados percorrendo um pequeno canal de arrefecimento (figura

27 à esquerda). Após percorrer esse canal, as águas serão levadas para um outro canal de arrefecimento localização mais acima no posticho, percorrendo esse canal na totalidade, sendo que no fim irá voltar para um pequeno canal de arrefecimento idêntico ao de entrada de água. Este é mais um sistema de arrefecimento que vai auxiliar no processo de arrefecimento das peças produzidas.

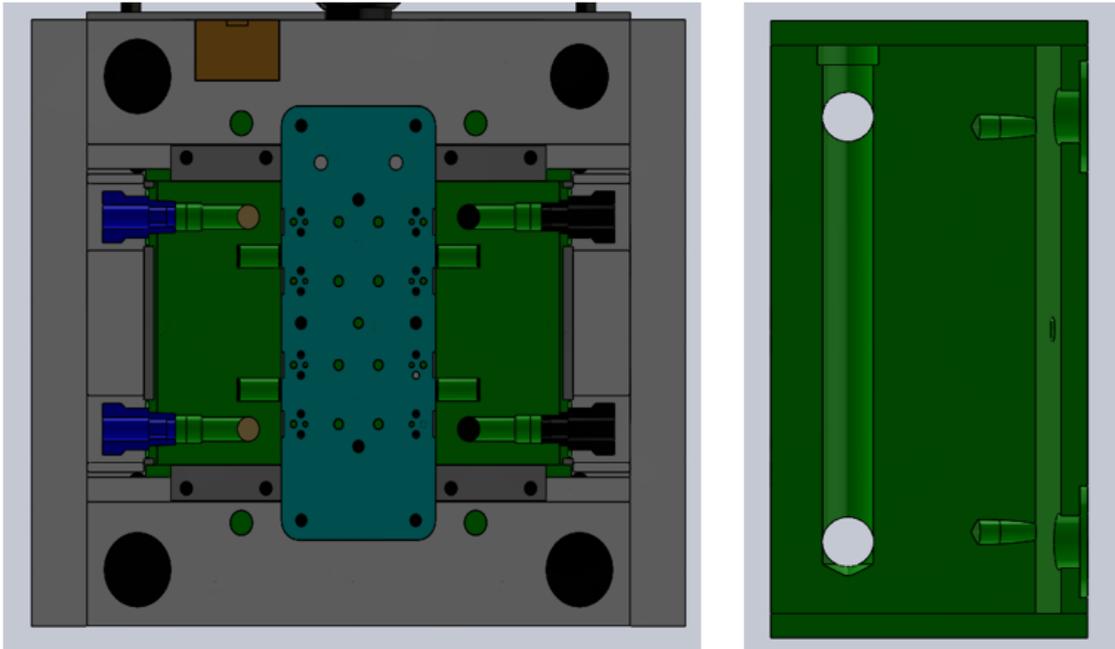


Figura 27- Sistema de refrigeração nos postichos das gravações

No lado da extração, os sistemas de arrefecimento apesar da ideia a nível de circuito ser a mesma verificam-se algumas diferenças relativamente ao sistema de arrefecimento do lado da injeção. Neste caso, e ao contrário do que se verifica no lado da injeção já não se verifica que a entrada e a saída de água são separadas por um tampão entre um canal de arrefecimento que liga ambas, a entrada e saída de água possuem canais distintos que se irão ligar a cada um dos canais de arrefecimento horizontais, como se observa na figura 28 (à esquerda). Também se verifica que a distância entre os canais de arrefecimento verticais é um pouco maior, isto porque o sistema de extração assim o obriga, de modo que não haja qualquer tipo de interceção entre ambos.

Apesar destas diferenças, o circuito de água acaba por ser semelhante ao do lado de injeção, em que a água entra pelo *racoord* de entrada de água (*raccord* de cima da figura 28 à esquerda) posicionado do lado esquerdo) sendo que ao encontrar o primeiro buraco a verde presente no canal, as águas irão entrar no posticho, percorrendo o mesmo trajeto que no posticho do lado da injeção, acabando por sair novamente para a placa de injeção e percorrendo o restante circuito.

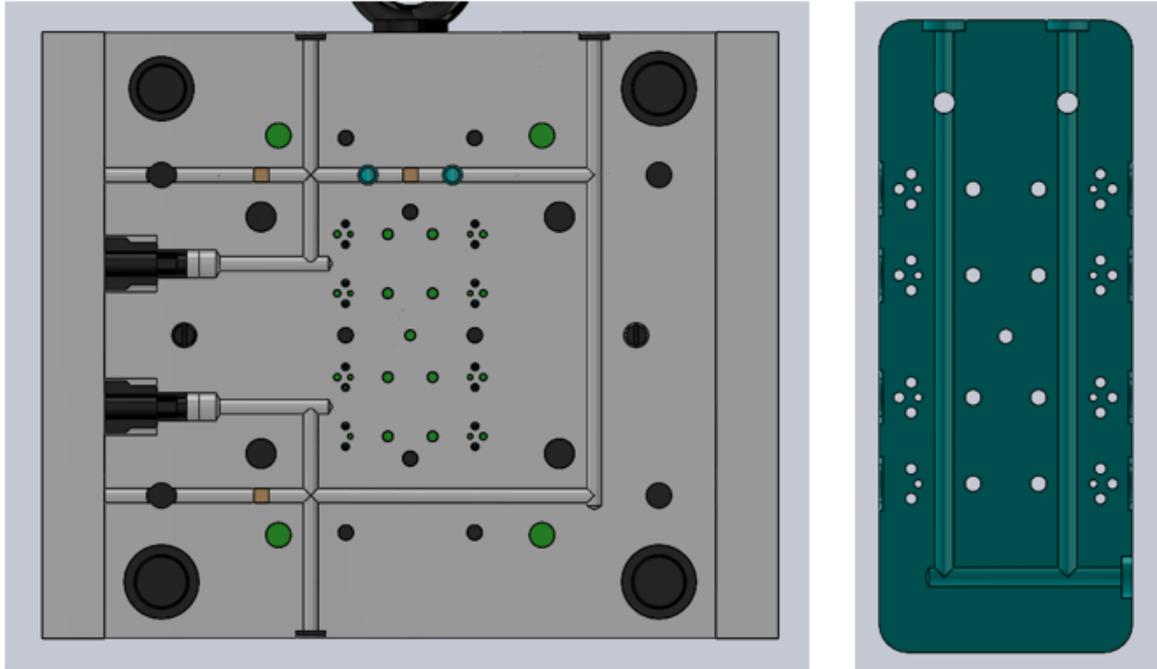


Figura 28- Sistema de refrigeração lado da extração



Figura 29- Esquema de ligações de águas lado da extração

4.3.4. Injeção

A nível de injeção, como já foi mencionado, as 8 cavidades são posicionadas em posições de modo a facilitar a injeção em 8 cavidades, sendo que existem 2 posições tanto no lado de injeção como

de extração, sendo que ambos irão auxiliar no processo de injeção. Como se pode ver na figura 30, no posição do lado da extração está representado o sistema de alimentação, onde se verifica o percurso que o material percorre até chegar a cada cavidade.

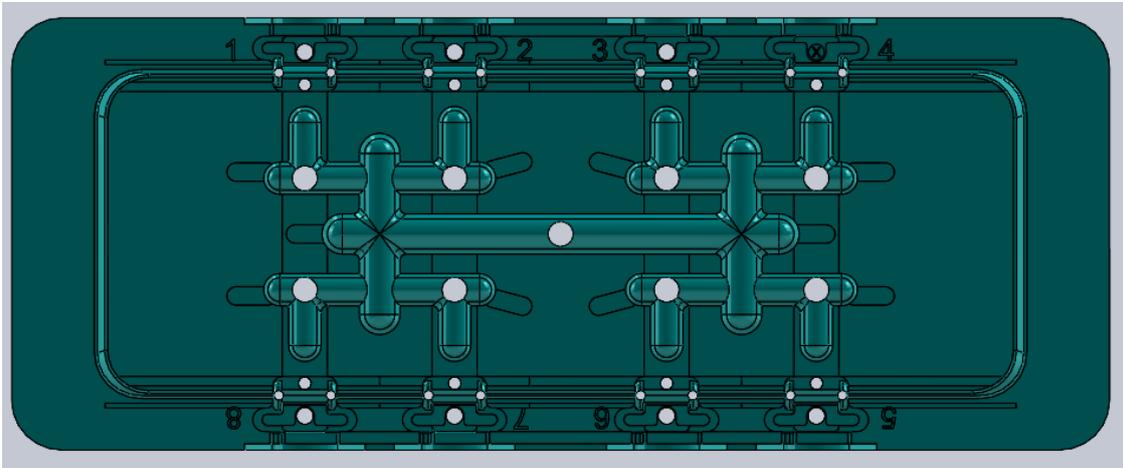


Figura 30- Canais de injeção no posição do lado da injeção

Deste modo, estes canais vão formar um sistema de alimentação, sendo que cada cavidade possui um ponto de ataque, totalizando 8 pontos de ataque. Assim esta peça irá formar um gito que depois tem de ser separado de cada uma das cavidades para ser removido. O que facilita esse processo é os pontos de ataque serem do tipo submarino (figura 31). Este é um ataque em forma circular, neste caso de 0,4mm de raio que tem como principal característica facilitar a separação gito/peça, sendo que tem a particularidade de deixar uma marca na peça, neste caso, que se irá localizar na parte inferior lisa da peça.[23]

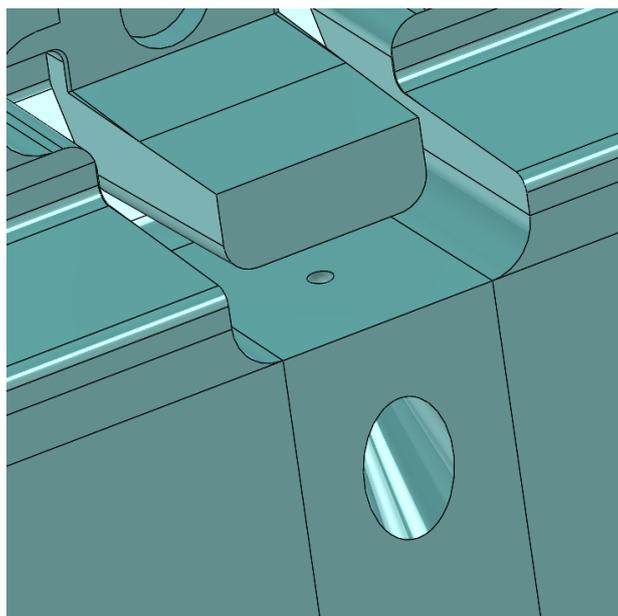


Figura 31- Representação de um ponto de ataque submarino

4.4. Máquina

Quanto à máquina de injeção onde foram feitos todos os ensaios foi a ENGEL ES 80/20, sendo que as suas características gerais estão presentes na tabela 6 e no Anexo V podemos observar uma fotografia da mesma.

Tabela 6- Características da injetora

Característica da máquina	Unidades	Valor
Força de fecho	ton	20
Abertura do molde	mm	330
Dimensões dos pratos	mm	470x280
Altura mínima do molde	mm	100
Altura máxima do molde	mm	480
Diâmetro do fuso	mm	22
Máximo de injeção	g	34

4.5. Ferramentas de medição

Durante a realização dos ensaios experimentais, foram utilizados vários tipos de equipamentos de modo a auxiliarem no processo experimental e na análise de resultados.

Para alguns ensaios da moldação científica, bem como a nível das análises da capacidade do processo, foi necessário efetuar pesagens constantes e para isso utilizou-se uma balança digital de precisão, sendo que esta deve estar sempre devidamente calibrada e posicionada, pois como se trata de uma balança de precisão, não pode sofrer qualquer tipo de variação que influencie a obtenção do peso correto e, conseqüentemente, a análise de resultados.



Figura 32- Balança de precisão utilizada

Também foi necessário realizar medições para a moldação científica e especialmente para o DOE que se efetuou, usou-se um paquímetro de modo a retirar cotas necessárias para análises de resultados. De referir que em todas as dimensões usadas, primeiramente deixou-se a peça estabilizar durante 24 horas, de modo que se deixe a peça contrair por completo devido ao arrefecimento, e só depois se tiraram as dimensões necessárias. Também é essencial que este equipamento esteja calibrado e deve ser muito cuidadoso na forma como se retira as dimensões com o mesmo, principalmente no posicionamento do mesmo para fazer a medição, para o erro associado à medição seja o menor possível.



Figura 33- Paquímetro utilizado nas medições

5. Métodos experimentais

Com o intuito de verificar a influência do *scientific molding* em processo de moldação por injeção e também de modo a validar esta abordagem como uma metodologia de otimização de processos de injeção, este projeto foca-se na aplicação da moldação científica num processo da empresa CS Plastic, onde se vai usar o controlo estatístico do processo de modo a verificar a influencia desta abordagem no processo produtivo em análise. Nesta secção do capítulo explicam-se todas as etapas do procedimento experimental realizado. Para além de explicar as metodologias usadas para aplicar o *scientific molding*, será descrito os procedimentos utilizados para aplicação do SPC no processo.

5.1. Controlo estatístico do processo

Em primeiro lugar, fez-se um primeiro estudo do controlo estatístico ao processo no seu estado atual, para que se possa analisar o estado do processo. Nesta análise, o parâmetro a medir é o peso de uma das cavidades da peça, neste caso, a cavidade nº 12 (cavidades numeradas de 5 a 12), pelo que objetivo neste projeto foi de observar o controlo estatístico no peso dessa cavidade. Foram realizadas 20 recolhas de 30 peças em 4 horários diferentes do dia (10h, 12h, 14h, 16h) durante 5 dias seguidos. O objetivo desta etapa centrou-se na monitorização do processo no seu estado atual, com o objetivo de posteriormente serem tecidas comparações com uma futura análise ao controlo estatístico do processo após a aplicação do *scientific molding*, que se realizou com os mesmos procedimentos explicitados para o primeiro estudo do controlo estatístico do processo. Através do uso deste tipo de estudo pretende-se verificar a influência da moldação científica nos processos a nível de qualidade e consistência das peças produzidas.

Para este estudo, recorreu-se ao uso das cartas de controlo de modo a obter-se a variação do peso das peças ao longo do processo. O modo de recolha de amostras foi escolhido tendo em conta o tipo de cartas selecionadas. Neste projeto, as cartas de controlo utilizadas foram as cartas de controlo da Média e da Amplitude e as cartas de controlo de Observações Individuais e Amplitudes Móveis. No próximo tópico serão explicitados de que modo se obtêm cada tipo de carta de controlo.

5.1.1. Cartas de controlo da Média e da Amplitude

Antes de se proceder à elaboração destas cartas, em primeiro lugar é necessário escolher que características da peça que devem ser estudadas, que devem ter tido em conta antes da seleção das cartas de controlo a utilizar. Para este projeto, fez-se o controlo estatístico deste processo em relação ao peso de uma das cavidades da moldação.

Passando agora à construção das cartas de controlo, é necessário que nas recolhas efetuadas, a dimensão n das amostras seja sempre igual ao longo do tempo. Em primeiro lugar é necessário calcular a média e amplitude de cada amostra, sendo que o cálculo de cada um destes parâmetros representam-se pelas seguintes equações:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n}$$

$$R_i = X_{máx} - X_{mín}$$

De modo a calcular os limites de controlo, e tendo já obtido resultados às equações anteriores relativamente às m amostras recolhidas, sendo que iremos agora calcular a média global (médias das médias amostrais) e a amplitude média, como representado nas equações abaixo:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{X}_i}{m}$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^m R_i}{m}$$

Assim podemos obter os limites de controlo, que são calculados da seguinte forma:

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$$

$$LC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}}$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$$

$$LSC_{\bar{R}} = D_4 \bar{R}$$

$$LC_{\bar{R}} = \bar{R}$$

$$LIC_{\bar{R}} = D_3 \bar{R}$$

Os termos, A_2 , D_3 e D_4 são constantes tabeladas, dependente do número de amostras que se recolheu (Anexo II).

Efetuados todos os cálculos pode-se proceder à construção deste tipo de cartas de controlo, onde se poderá observar a variação do peso das diferentes amostras de peças.[13], [14]

5.1.2. Cartas de controlo de Observações Individuais e Amplitudes Móveis

Quando apenas se pretende a recolha de observações individuais e não de grupos de observações, utiliza-se a carta de observações individuais e das amplitudes móveis. Neste tipo de cartas, os resultados obtidos serão relativos a observações registadas nesse instante.

Em primeiro lugar calcula-se as amplitudes de duas observações consecutivas, neste caso para a construção da carta das amplitudes móveis, através da seguinte equação:

$$MR_i = |X_i - X_{i-1}|$$

Depois passamos ao cálculo da média das observações e das amplitudes médias, através das seguintes expressões:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m}$$

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} MR_i}{m - 1}$$

Assim pode-se proceder ao cálculo dos limites de controlo utilizando as seguintes equações:

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{X} + \frac{3 \overline{MR}}{d_2}$$

$$LC_{\bar{X}} = \bar{X}$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{X} - \frac{3 \overline{MR}}{d_2}$$

$$LSC_{\bar{R}} = D_4 \overline{MR}$$

$$LC_{\bar{R}} = \overline{MR}$$

$$LSC_{\bar{R}} = D_3 \overline{MR}$$

Tal como nos cálculos anteriores, os valores dos termos d_2 , A_2 , D_3 e D_4 estão tabelados e presentes no Anexo II. [13], [14]

5.2. Aplicação dos estudos de otimização do processo

O objetivo principal deste projeto é a aplicação do *scientific molding*, que, como já foi descrito anteriormente, possui essencialmente 6 estudos de otimização do processo para sua aplicação. Deste modo, os 6 passos foram organizados de modo a seguirem uma ordem lógica, de acordo com os passos para cada estudo, isto é, estes foram organizados de modo que a abordagem seja

o mais eficiente possível de modo que nem seja necessário interromper o processo produtivo durante muito tempo, não se traduzindo em grandes desperdícios para o processo em causa.

Nesta fase do projeto foram então realizados os estudos de otimização do processo sendo que foi realizado um procedimento experimental tendo em conta esses estudos, que será descrito neste tópico.

1. Definir as temperaturas do processo:

O primeiro passo a ser realizado foi a definição das temperaturas do processo. Esta etapa é feita consultando a ficha técnica do material.

Desde modo, todas as temperaturas devem estar dentro destes intervalos, sendo que para qualquer estudo que se realizar para esta abordagem, deve-se sempre começar com temperaturas nos valores mais baixo e ir aumentando quando for necessário, pois é mais fácil e rentável aquecer o cilindro da máquina do que aguardar que este arrefeça depois de ter sido estabelecido para temperaturas mais elevadas.

2. Definir queda de pressão

Como referenciado anteriormente, existe uma pressão disponível para empurrar o fuso a uma velocidade de injeção definida. De modo a analisar a queda de pressão nas diferentes secções onde o material flui, verificou-se que pressão disponível existe para este processo produtivo, sendo que para que um processo seja robusto esta queda de pressão deve ser elevada o suficiente de modo que a pressão possa ser alterada em caso de aparecimento de peças com defeitos

3. Definir velocidades e pressões de injeção:

Estudar a velocidade de injeção de um processo é de extrema importância para a eficácia do processo, uma vez que o material deve ser injetado no molde com um caudal adequado, já que este não deve ser demasiado baixo pois pode não injetar material suficiente para preencher a cavidade do molde, mas também não deve ser demasiado elevado para não danificar a peça. Para definição das velocidades de injeção recorre-se ao estudo de otimização de processo onde se obterá a curva de viscosidade. Para isso devem ser seguidos os passos explicados no tópico que explica o estudo da curva da viscosidade e retirar os dados necessários para a obtenção da mesma. Neste passo também conseguiremos definir as pressões ideais de injeção pois para o cálculo das velocidades de injeção já que para os cálculos da viscosidade relativa necessitamos dos valores de pressão de injeção correspondentes às velocidades de injeção definidas.

4. Definição da janela de processo para a temperatura do fuso e 2ª pressão

Com este estudo serão estabelecidos intervalos de valores ideais de 2ª pressão e de temperaturas do fuso que produzem peças aceitáveis. Assim, este estudo é determinante para a obtenção de um processo consistente e robusto, sendo que para isso é importante que se obtenha uma janela de processo ampla. Para obtermos a janela de processo foram seguidos os passos do estudo da janela de processo, sendo que depois é possível obter um gráfico que define os intervalos da janela de processo.

5. Balanceamento das cavidades

Este estudo permite avaliar o modo como as cavidades do molde enchem. Através do peso das peças a determinadas condições de processamento, saberemos se o enchimento é uniforme, ou seja, se enchem ao mesmo tempo e com a mesma quantidade de material em todas as cavidades, ou não. Aqui, para além de serem seguidas as diretrizes do estudo do balanceamento das cavidades, serão usadas peças completas obtidas de estudos anteriores, já que esses estudos apresentam passos em comum com o estudo do balanceamento de cavidades sendo assim possível usar amostras de estudos anteriores, tornando esta abordagem ao *scientific moulding* mais eficiente.

6. Definição do tempo de 2ª pressão

Saber o tempo de 2ª pressão é importante na medida em que, e como foi explicado anteriormente, irá ser possível relacioná-lo com o tempo de solidificação do ataque, o que poderá ajudar na melhoria da consistência de injeção para injeção do processo. Assim, vai-se perceber quanto tempo o ataque demora a solidificar, que irá corresponder ao valor de 2ª pressão para o qual o peso das peças moldadas começa a estabilizar. Por isso para determinar o tempo de 2ª pressão e ao mesmo tempo verificar quanto tempo o ataque demora a solidificar, realizou-se o estudo do tempo da solidificação do ataque explicado anteriormente. [24]

7. Definição do tempo de arrefecimento

Finalizados todos os testes realizados anteriormente, será feito um estudo do tempo de arrefecimento onde já serão usados valores ideais estudados nas experiências anteriores. Esta experiência consiste em variar o tempo de arrefecimento e medir dimensões pré-definidas para verificar a variação desta consoante o tempo de arrefecimento. Para este estudo devem ser seguidos os passos do estudo do tempo de arrefecimento anteriormente descritos.

Para melhor compreender esta sequência experimental, a figura 34 apresenta um fluxograma com todos os passos devidamente ordenados para aplicação da moldação científica

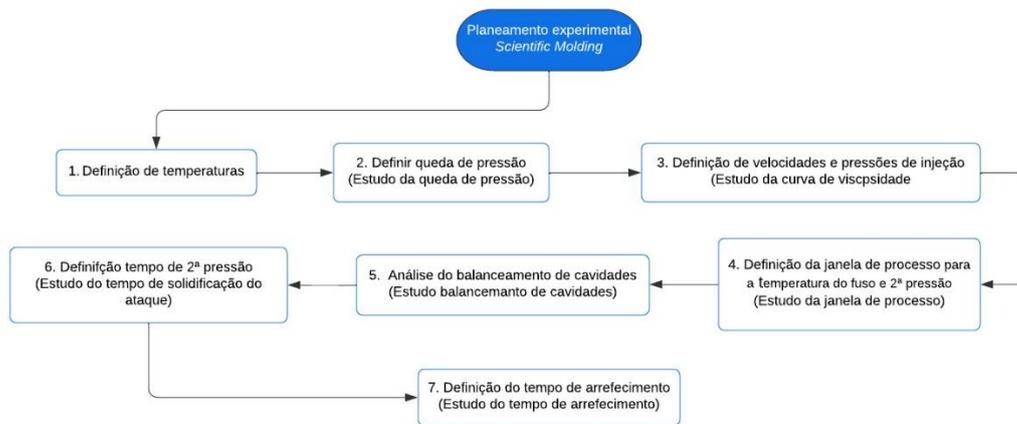


Figura 34- Planeamento experimental Scientific Molding

5.3. Estudo da capacidade do processo

Para o estudo de capacidade do processo, é usual seguir uma dispersão 6 Sigma na distribuição da característica da qualidade do produto a ser medida. Ou seja, e pressupondo que estes dados seguem uma distribuição normal, isto significa que 99,73% dos valores estão compreendidos entre $\mu + 3\sigma$ e $\mu - 3\sigma$, que correspondem aos limites de especificação (LSE e LIE) onde μ é a média e σ o desvio padrão do processo, cuja fórmula é:

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Sendo que \bar{R} a média das amplitudes e d_2 uma constante tabelada tendo em conta o tamanho da amostra ($n=2$) (Ver Anexo II)

Após calculados todos os limites de especificação, pode proceder-se ao cálculo dos índices de capacidade do processo. Para o cálculo do C_p , tendo em conta que este não tem em conta a localização do processo dentro das especificações, podemos calculá-lo da seguinte forma:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

No cálculo do C_{pk} , que tem a conta a variabilidade e localização da média, ou seja, para qual dos limites de especificação esta se encontra mais próxima, este será o valor mínimo entre os C_{pk} obtidos através dos limites calculados anteriormente, como exemplificado pelos cálculos abaixo

$$C_{pk} = \min [C_{pk_{min}}; C_{pk_{máx}}]$$

Onde:

$$C_{pk_{min}} = \frac{\mu - LIE}{6\sigma} \qquad C_{pk_{máx}} = \frac{LSE - \mu}{6\sigma}$$

Através dos valores de C_p e C_{pk} obtidos serão retiradas conclusões relativamente à capacidade do processo tendo em conta a tabela 3 apresentada anteriormente.[11], [16]

5.4. Aplicação do DOE

5.4.1. Definição de variáveis

Para o estabelecimento de uma janela de processo dimensional através do DOE, em primeiro lugar é necessário estabelecer que condições de processamento serão analisadas, ou seja, que parâmetros do processo influenciam mais uma peça a nível dimensional.

São vários os parâmetros que afetam diretamente o plástico, ou seja, que influenciam a qualidade de uma peça plástica. A lista representada abaixo apresenta esses mesmo parâmetros: [6]

- Velocidade de injeção;
- Pressão de injeção;
- 2ª pressão;
- Tempo de 2ª pressão;
- Temperatura de fundido;
- Temperatura do molde;
- Tamanho e posição do *shot*;
- Contrapressão;
- Velocidade de rotação do parafuso;
- Tempo de arrefecimento.

Como é notório, existem parâmetros que não têm tanta influencia numa peça a nível dimensional, mas sim mais a nível estético, sendo que algumas dessas serão analisadas nos 6 estudos do *scientific molding* descritos anteriormente. Da listagem anterior, são 4 os parâmetros que são mais usualmente utilizados como fatores para DOE's. Os parâmetros são os seguintes:

2ª Pressão: a 2ª pressão é um dos fatores mais importantes neste tipo de análises. De facto, a aplicação de 2ª pressão no fundido vai afetar dimensionalmente a peça, já que esta tem influência no volume específico da peça, pelo que este é um dos fatores comumente usado em DOE's deste género.

Tempo de arrefecimento: o tempo de arrefecimento é outra variável que pode ter influência nas dimensões da peça, porque o tempo de permanência no molde pode afetar a peça, nomeadamente na contração da mesma. Deste modo, se a quantidade de tempo de residência da peça no molde muda, a temperatura a que a peça se encontrará ao sair do molde será diferente, o que poderá influenciar na taxa de contração da mesma, pelo que é importante analisar o tempo de arrefecimento nesta fase.

Temperatura do fundido: Esta temperatura é responsável por fazer com que o material atinja a viscosidade necessária para ser injetado. Em materiais amorfos, o intervalo recomendado de temperaturas que o fundido deve ter é mais amplo, o que poderá afetar a contração da peça. Assim é interessante analisar no DOE para este tipo de materiais. Por sua vez, os materiais semicristalinos, o intervalo de temperaturas de fundido é mais estreito, o que não irá influenciar significativamente a contração, pelo que não se considera um fator importante a nível dimensional para este tipo de materiais.

Temperatura do molde: A temperatura do molde, para além de ser um auxílio na fase de arrefecimento, também é responsável por manter o fluxo de fundido até ao fim do enchimento da cavidade, influenciando deste modo a temperatura em que a peça sai do molde. Isto acontece quer para materiais semicristalinos quer para amorfos. No caso dos materiais semicristalinos estes apresentam uma característica específica. Como a formação de cristalinidade exige uma certa temperatura, uma parte dessa temperatura é fornecida pelo molde, que terá influência na velocidade de arrefecimento da peça, ou seja, vai influenciar a cristalinidade do material, daí que o molde deve estar a uma temperatura dentro de valores recomendados, sendo, para este tipo de

materiais, uma característica importante para analisar em DOE. Portanto deve ser sempre usada a temperatura de molde mais baixa desde que se atinja qualidade estética pelo que para materiais amorfos não seja um fator de peso a analisar.[6]

Na maioria dos casos, 3 fatores com 2 níveis são suficientes para a realização de um DOE, pelo que, tendo em conta a morfologia do polímero em causa, apenas serão escolhidos 3 das 4 características descritas anteriormente. sabendo que o material da peça em análise é um polipropileno (semicristalino), seria de maior interesse analisar a temperatura do molde em relação à temperatura do fundido, pelo fator de cristalinidade que este material apresenta, pelo que os outros fatores serão a 2ª pressão e o tempo de arrefecimento.[6]

5.4.2. Planeamento de experiências

Selecionadas as variáveis a analisar pode-se proceder ao planeamento das experiências a efetuar em máquina, que será feito através do método de Taguchi que foi descrito anteriormente.

Como também já foi referido, serão usados no planeamento experimental 2 fatores para as 3 variáveis selecionadas. Na tabela 7 estão apresentados as condições de processamento e os respetivos níveis. Estes foram definidas tendo em conta os resultados obtidos nas 6 experiências do *scientific molding* e os parâmetros que estavam a ser utilizados antes da aplicação da moldação científica.

Tabela 7- Variáveis DOE

Variáveis	Nível 1	Nível 2	Unidades
2ª Pressão	25	30	bar
Temperatura do molde	Injeção/Extração: 40/30	Injeção/Extração: 50/40	°C
Tempo de arrefecimento	6	12	s

Tendo em conta estes fatores, o número de experiências a realizar é calculado através da fórmula descrita anteriormente, ou seja:

$$n = 2^3 = 8 \text{ experiências}$$

Deste modo foi construída uma matriz de modo a planear as experiências a realizar em máquina, que neste caso trata-se de uma matriz L_8 .

Tabela 8- DOE matriz L_8

Nº experiência	2ª Pressão	Tempo de arrefecimento	Temperatura do molde
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

5.5. Minitab

Para a elaboração das cartas de controlo e realização do estudo da capacidade do processo que foram descritos anteriormente, recorreu-se ao uso do software *Minitab*. Este que é utilizado para desenvolver análises estatísticas principalmente a nível industrial.

Este é muito usado para controlo de processos a nível industrial de qualquer setor, principalmente para quem utiliza metodologias como o *Lean Six Sigma* para melhoria contínua de processos. O software utiliza ferramentas estatísticas de qualquer nível de modo a realizar derivadas análises e possibilitar uma ampla gama de interpretações e aplicações. Com ele podemos examinar dados atuais de modo a tentar prever futuros padrões, relacionar variáveis, identificar que fatores são importante numa iteração de modo a solucionar vários tipos de problemas.[25][26]

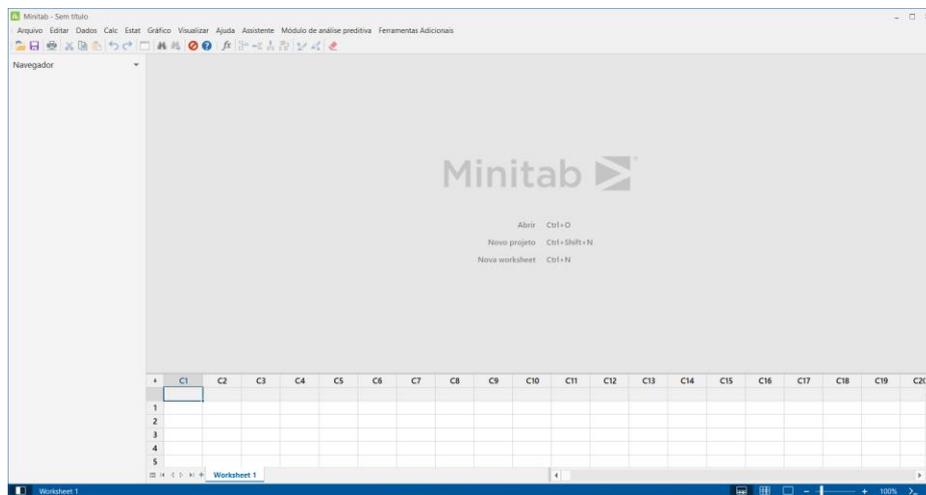


Figura 35- Dashboard Minitab

5.6. *Design Expert*

Para a análise de resultados do DOE experimental efetuado, recorreu-se a um outro software para esse efeito, denominado de *Design Expert*. Este é um programa que utiliza ferramentas de modo a analisar o processo efetuando também realiza misturas ou combinações de fatores e componentes.

Este software ajuda a observar se algo é estatisticamente significativo e como modelar e trata resultados com mais precisão, oferecendo uma vasta seleção de gráficos e derivados tipos de análises que ajudam a observar efeitos que determinadas variáveis possam ter em processos que estejam a ser analisados.[27]

6. Análise de resultados

6.1. Análise do estudo da capacidade de processo *pré-scientific molding*

Através dos dados recolhidos relativamente ao peso de uma das cavidades da peça (cavidade 12), foram construídas cartas de controlo para cada horário do qual se recolheram peças para pesar. Deste modo foram contruídas 21 cartas de controlo através do programa *Minitab*, onde 20 cartas são de Observações Individuais e Amplitudes Móveis relativas a cada horário onde foi realizada uma recolha e onde também se calculou o C_{pk} para cada amostra, de modo a avaliar o estado atual do processo, e 1 carta que é a da Média e Amplitude utilizando as 20 recolhas efetuadas, de modo a efetuar uma análise a longo prazo ao processo.

Analisando as cartas de controlo de observações individuais e respetivas análises da capacidade durante os 4 dias de recolha, verifica-se uma variabilidade a nível dos resultados obtidos. Isto é, existem fases em que o processo se encontra em controlo estatístico, ou seja, com todas as pesagens se encontrarem dentro dos limites de especificação definidos e com C_{pk} com valores acima do valor onde se considera o processo bom, como se pode verificar nas figuras 36, do dia 1 pelas 14h, e figura 37, do dia 3 pelas 14h.

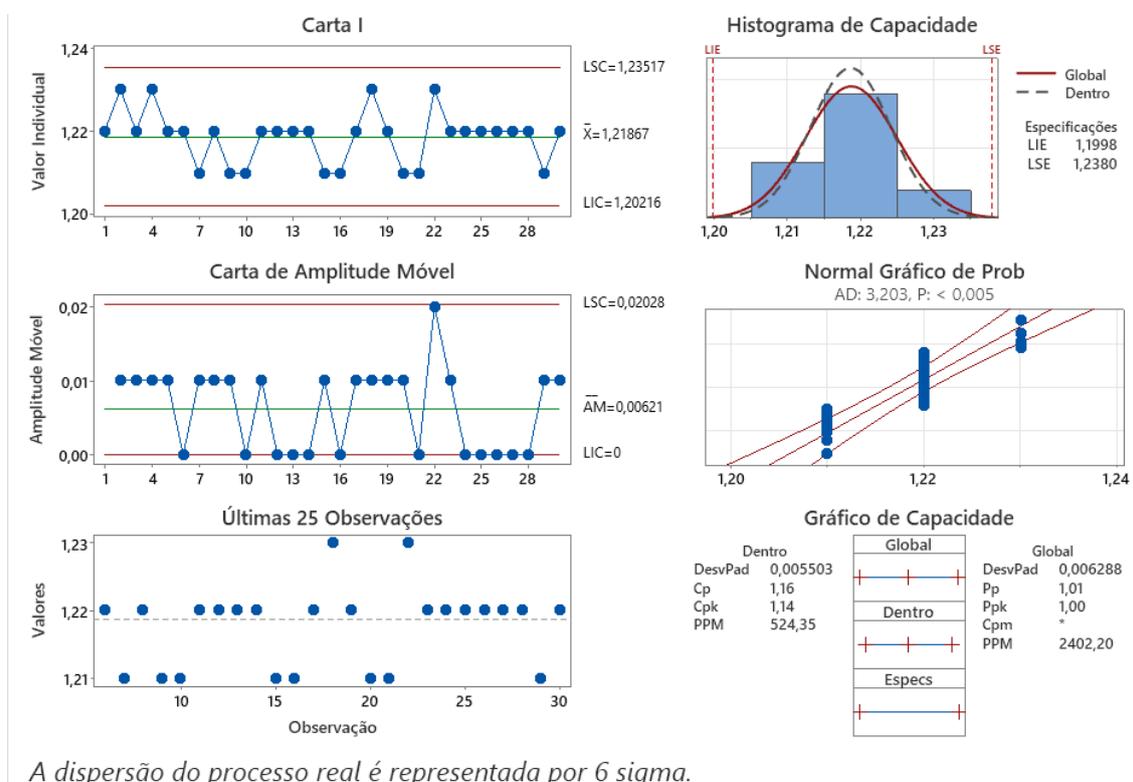


Figura 36- Análise estatística no dia 1 às 14h

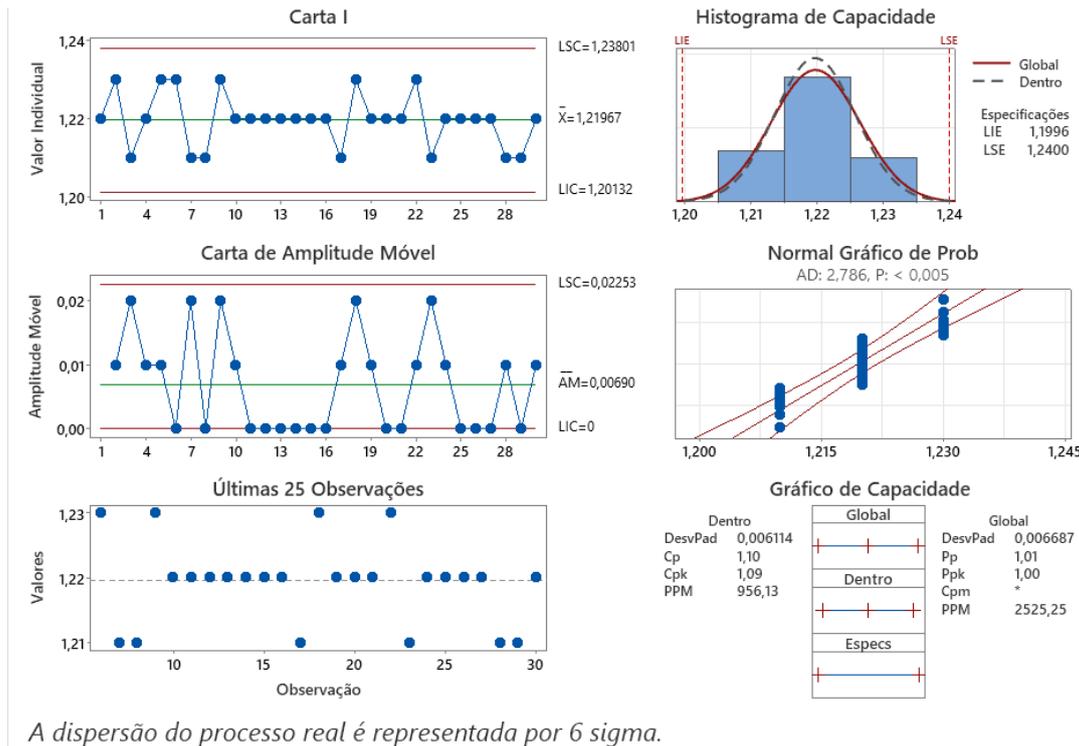


Figura 37- Análise estatística no dia 3 às 14h

Também se obtiveram gráficos onde o processo não se encontra em controlo estatístico no momento, quer seja porque os valores dos pesos se encontrarem dentro dos limites de especificação ou por causa dos valores apresentarem algum dos restantes padrões não aleatórios descritos anteriormente, como se pode verificar na figura 38 e 39 dos dias 1 e 4 respetivamente, ambos pelas 10h. E como estes 2 casos, verificaram-se muito outros que podem ser observados nos anexos. Neste caso o valor de C_{pk} não deve ser tido em conta já que como o processo não se encontra em controlo estatístico, esse valor acaba por ser enganador para uma previsão de as peças poderem vir a estar dentro das especificações definidas no futuro.

Por último, com os resultados obtidos para as cartas individuais foi possível a construção de uma carta de controlo presente na figura 40, sendo que desta vez se trata de uma carta de Médias e Amplitudes, em que como se pode verificar, existe um ponto fora dos limites de controlo, mostrando que o processo não é de todo estável, mesmo com um valor de C_{pk} aceitável.

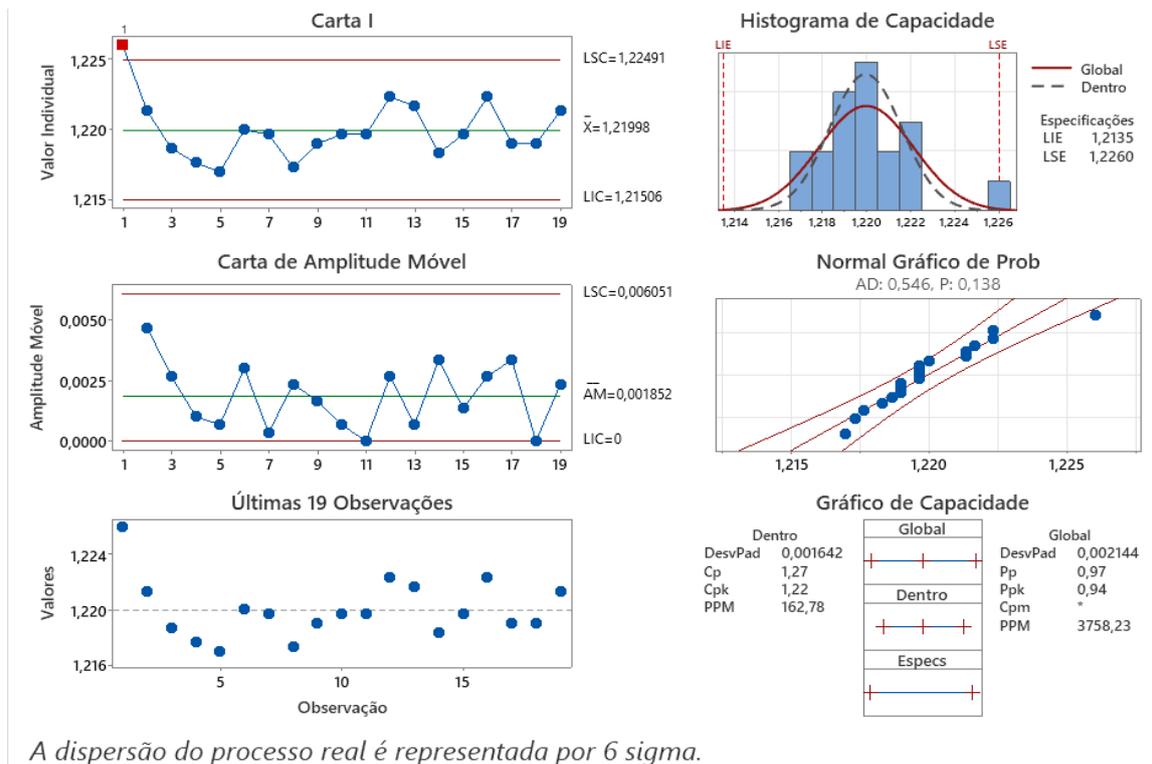


Figura 40- Análise estatística para as médias dos valores de cada dia

Assim através desta análise podemos concluir que apesar de em certos momentos durante esta análise o processo demonstra ter potencial, ou seja, em se manter constante no que toca ao peso, contudo também apresenta algumas lacunas, demonstradas pelos resultados negativos relativamente ao controlo estatístico e aos valores de C_{pk} calculados em certos momentos da análise. Deste modo não podemos afirmar que o processo está completamente em controlo estatístico e que demonstra potencial relativamente a manter consistência relativamente ao seu peso, ou seja, demonstra que ainda pode ser melhorado e que devem ser aplicadas metodologias de modo a tentar tornar este processo mais consistente.

6.2. Resultados dos estudos do *scientific molding*

Realizada a análise ao controlo estatístico do processo no seu estado atual, sem que tenha sofrido qualquer tipo de alteração ou otimização, foram então aplicados os 6 estudos do *scientific molding* descritos anteriormente, sendo que os resultados obtidos serão apresentados neste capítulo pela ordem estabelecida no planeamento experimental definido anteriormente.

6.2.1. Queda de pressão

Primeiramente, foi então realizado o estudo da queda de pressão. Aqui, altera-se o ponto de comutação de modo a encher apenas a zona onde se pretende avaliar a pressão, pois é este parâmetro que influencia a quantidade de material a ser injetado.

Na tabela 9 encontram-se os valores de dosagem e ponto de comutação para as diferentes zonas de moldação que foram inseridos em máquina

Tabela 9- Dosagem e ponto de comutação das zonas analisadas

Zona	Dosagem (mm)	Ponto de comutação (mm)
Purga	88.2	-
Injeção mínima	88.2	68
Jito/ataque	88.2	42
Peça completa	88.2	23
Máximo	88.2	23

Feita a recolha dos dados obteve-se o gráfico da figura 41. Como era de esperar, com a diminuição do ponto de comutação, têm-se uma compensação através do aumento da pressão de injeção, que tem como valor máximo 30 bar aproximadamente. Ou seja, comparativamente com a pressão máxima admissível pela máquina, este processo utiliza aproximadamente 20% da pressão admissível.

Isto significa que a máquina de injeção possui pressão mais que suficiente para pressurizar material para o interior da cavidade de modo a evitar peças incompletas. Se o processo necessitasse de mais pressão que o admissível pela máquina, isto pode traduzir-se em defeitos visuais como chupados ou incompletos, para além de poder afetar dimensionalmente as peças. Neste caso ainda existe uma margem bastante elevada de pressão de injeção que se pode utilizar.

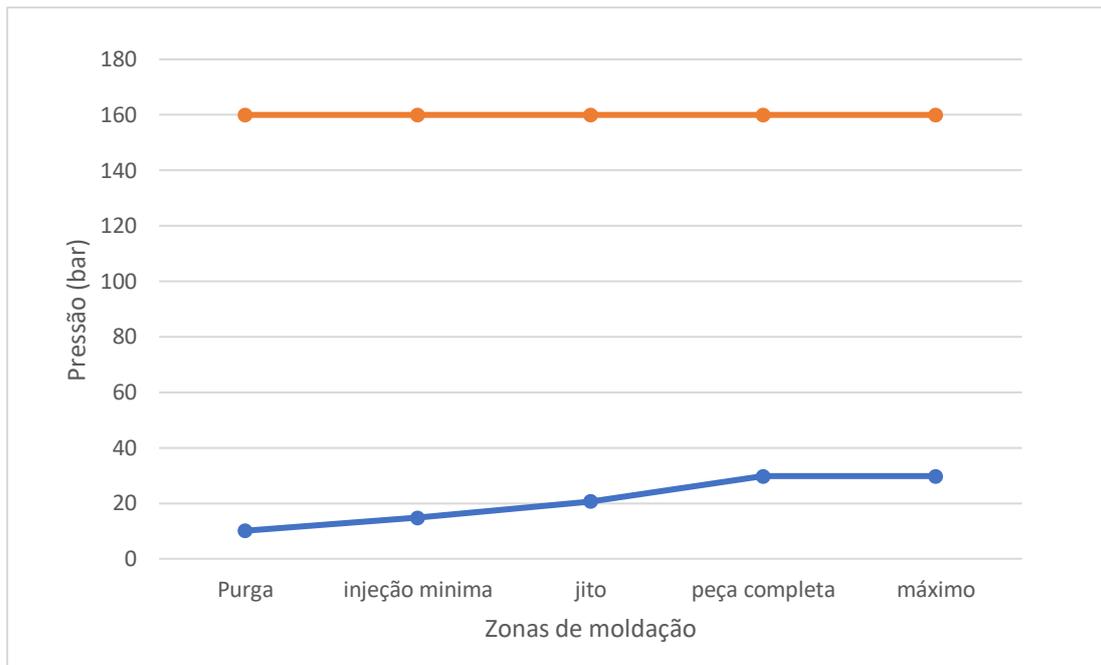


Figura 41- Queda de pressão do processo

6.2.2. Curva de viscosidade

Como já referido anteriormente, o objetivo deste estudo será a variação do valor da velocidade de injeção em máquina de modo a observar como varia a viscosidade relativa em relação à taxa de corte, de modo a encontrar a partir de que valor a variação da viscosidade é menor, que corresponderá à velocidade de injeção ideal.

Para a construção do gráfico da curva reológica, é necessário calcular a taxa de corte aparente, que corresponde ao inverso do tempo de enchimento dado pela máquina, e a viscosidade relativa pela seguinte fórmula:

$$Visc. relativa = Pico P. injeção \times t. enchimento \times Intensification Factor$$

De referir que o *Intensification Factor* da fórmula é um valor normalmente fornecido pelo construtor da máquina, porém quando este não é disponibilizado pela entidade, usa-se o valor 10, que foi o considerado para os cálculos efetuados neste estudo. [6]

Deste modo, foi possível a construção do gráfico presente na figura 42. Como se pode observar e como era previsível, à medida que a taxa de corte aumenta, a viscosidade relativa do material vai diminuindo acentuadamente. Contudo, verifica-se que para taxas de corte mais elevadas essa variação começa a diminuir até um ponto em que começa a estagnar, nomeadamente a partir dos

dos $30 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ de viscosidade relativa e aproximadamente $1,00 \text{ s}^{-1}$ de taxa de corte aparente, que irá corresponder a aproximadamente 60% de velocidade de injeção.

Deste modo, pode concluir-se que de modo a garantir maior consistência do processo a nível da velocidade de injeção, deve-se injetar a partir de uma velocidade de 70%, pois a partir desse valor garante-se uma menor variação da viscosidade do material, que se irá traduzir num enchimento mais consistente a partir da velocidade de injeção indicada que influenciará diretamente a consistência dimensional da peça.

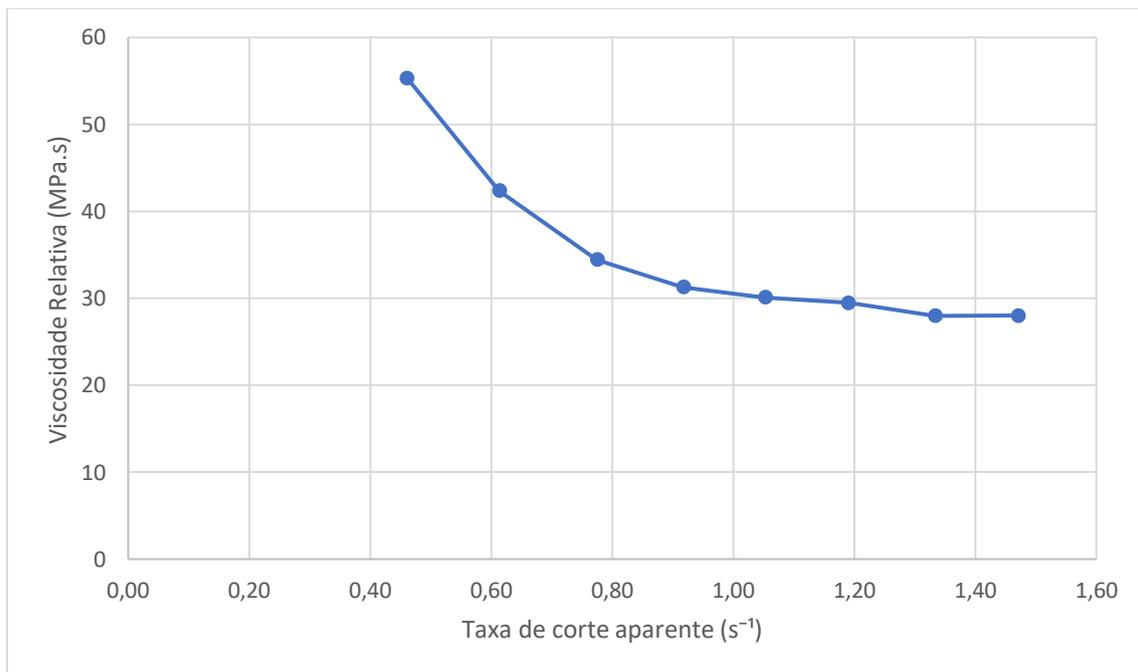


Figura 42- Curva de viscosidade

6.2.3. Janela de processo

Com a realização deste estudo, obter-se-ão intervalos de variação no qual o processo vai produzir peças esteticamente aceitáveis. Estes intervalos devem ser os mais amplos possíveis de modo que o processo seja robusto e capaz de aceitar grandes variações sem que isso afete esteticamente a peça.

Deste modo obteve-se a janela de processo presente na figura 43. Como se pode verificar, à medida que se vão aumentando os valores de 2ª pressão e de temperatura, a janela começa a ficar mais estreita, sendo que a temperaturas mais elevadas teremos mais sensibilidade a nível de 2ª pressão. Contudo, pode-se na mesma afirmar que o processo possui uma janela de processo ampla, sendo que se forem aplicados valores de temperatura e de 2ª pressão mais localizados no

centro da janela (aproximadamente nos 25 bar de 2ª pressão e nos 235°C de temperatura), o processo ainda aceitará alguma variação, mantendo na mesma a peças esteticamente aceitáveis. Ou seja, esta janela não deixa de ser característica de um processo robusto, sendo capaz de suportar variações consideráveis, tendo em atenção que a temperaturas mais elevadas a 2ª pressão que o processo aceita será menor que a temperaturas mais baixas.

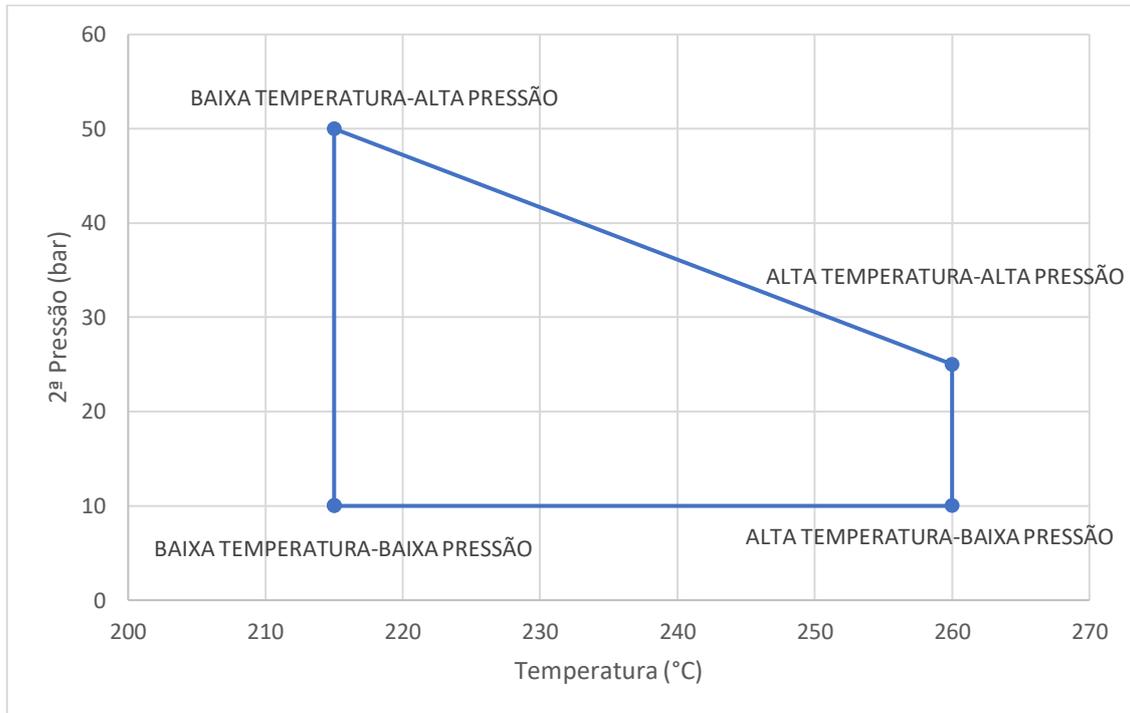


Figura 43- Janela do processo

6.2.4. Balanceamento de cavidades

No estudo do balanceamento de cavidades foram usadas as peças obtidas em cada um dos pontos do gráfico da janela de processo, como referido anteriormente. Após pesadas todas 8 cavidades para cada ponto (numeradas de 5 a 12) obteve-se o gráfico da figura 44.

Como se pode verificar, existe alguma variação a nível dos pesos entre cada cavidade nas 4 condições indicadas. Contudo essa variação não é significativa ao ponto de se considerar que as cavidades não se encontram balanceadas, já que em termos de injeção dificilmente é possível obterem-se cavidades com exatamente o mesmo em cada moldação. Estas variações são na casa das centésimas de grama e comportam-se de maneira semelhante entre as cavidades para as 4 condições em análise, não sendo possível afirmar qual a cavidade que enche em primeiro lugar, já que para os pontos de temperaturas mais baixas verifica-se um pico na cavidade 5 e para temperaturas mais altas esse pico passa para a cavidade 8. Todavia para esta análise interessa-

nos apenas afirmar que as cavidades se encontram bem balanceadas e o enchimento dá-se da mesma forma para todas as cavidades.

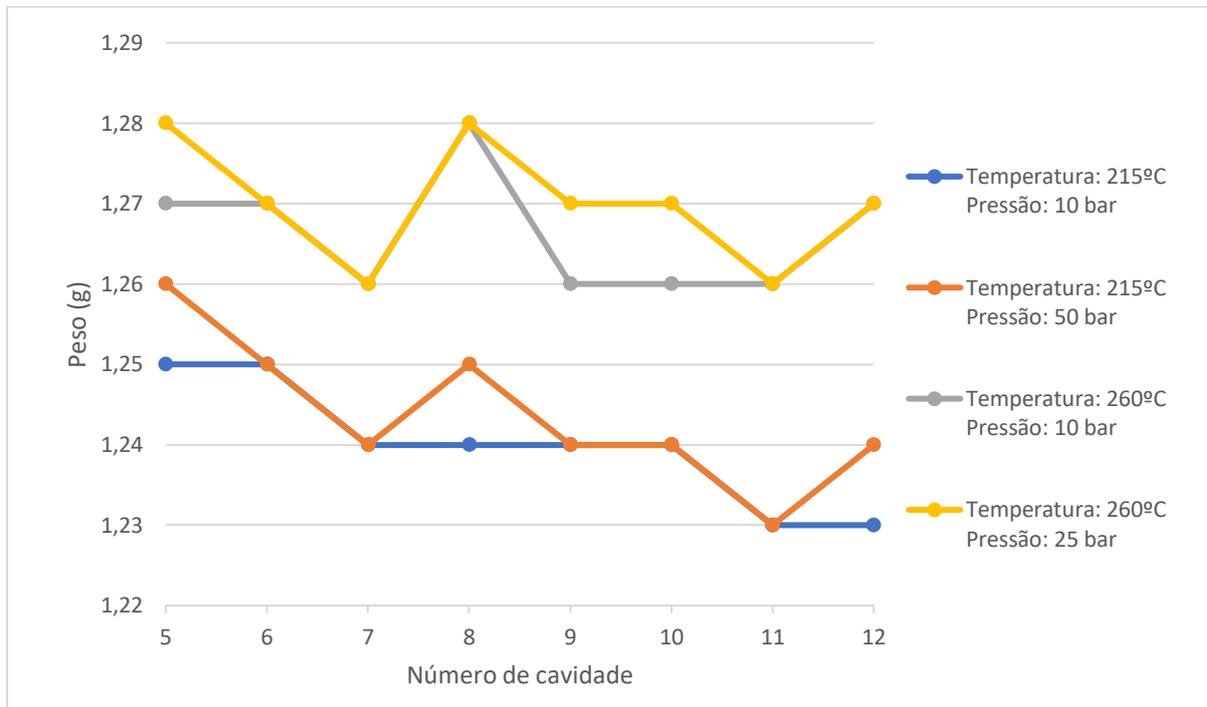


Figura 44- Gráfico do balanceamento de cavidades

6.2.5. Tempo de solidificação do ataque

Na figura 45 encontra-se o gráfico do tempo de solidificação do ataque. Para esta experiência já foi usada uma 2ª pressão de 22 bar, tendo em conta a janela de processo obtida anteriormente. Analisando o gráfico verifica-se que os pesos das moldações começam a estabilizar a partir dos 4s de tempo de 2ª pressão, começa-se a dar a solidificação do ataque. Deste modo deve-se seleccionar 1 segundo a mais que o tempo de solidificação do ataque obtido de modo a garantir que em todos os ciclos o ataque se encontra completamente solidificado. Assim através deste estudo obteve-se um tempo de solidificação do ataque, e por sua vez, um tempo de 2ª pressão de 5s.

Este tempo de 2ª pressão terá sempre influência no tempo de arrefecimento da peça. Tendo em conta que o tempo de arrefecimento seleccionado se dá após a aplicação de 2ª pressão no material, é incorreto dizer que a peça começa a arrefecer só após a aplicação dessa pressão, já que a partir do momento em que o material entra em contacto com as paredes do molde se começa a dar o arrefecimento da peça. Assim o tempo de ciclo será a soma do tempo de enchimento com a aplicação de 2ª pressão e o tempo de arrefecimento colocado em máquina, ou seja, caso haja uma

redução de tempo de 2ª pressão, esta deve ser compensada com mais tempo de arrefecimento e vice-versa.

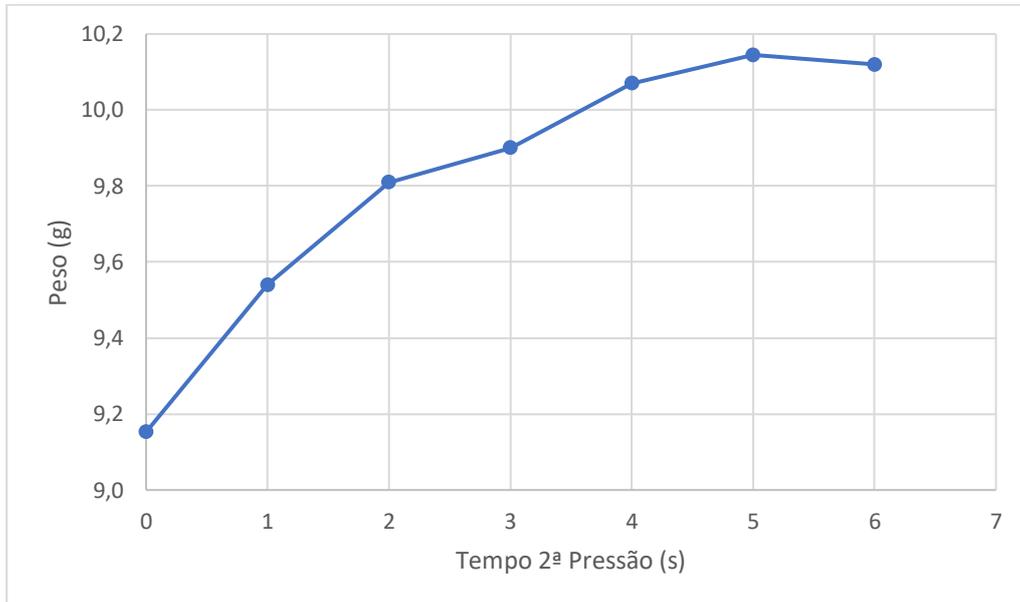


Figura 45- Gráfico do tempo de solidificação do ataque

6.2.6. Tempo de arrefecimento

Para este estudo apenas se realizou a comparação entre 3 tempos de arrefecimento, já que abaixo dos 6s se verificava que a peça não arrefecia o suficiente para ser extraída completamente. De referir que a cota A referida é a da figura 18, que possui de valor máximo 11 mm e um mínimo de 10,80 mm, e a cota B é a da figura 19, de 1 mm com $\pm 0.5\text{mm}$ de tolerância. Portanto os tempos estudados foram os 6 e os 7 segundos e depois para um tempo de arrefecimento mais longo, neste caso de 11s, de modo a verificar se é mesmo necessário recorrer a tempo de arrefecimentos mais elevados de modo a manter as cotas críticas dentro das tolerâncias.

Como se pode verificar pela tabela 10 e pelo gráfico da figura 46, para 6s verifica-se que todos os valores para todas as cavidades da peça em cada uma das duas cotas críticas se encontram dentro das tolerâncias, tal como acontece para os 7s de tempo de arrefecimento. Para o valor mais analisado de tempo de arrefecimento verifica-se que os valores das cotas também se mantêm constante, apesar de alguns valores se encontrarem fora das tolerâncias para a cota A.

Tabela 10- Tempos de arrefecimento e cotas obtidas para cota A

Tempo de arrefecimento (s)	Cota 1 (mm)								Média (mm)
6	11,00	11,00	10,99	10,99	10,98	11,00	11,00	10,96	10,990
7	10,98	11,00	10,99	11,00	11,00	10,98	11,00	10,99	10,993
10	11,03	11,03	11,02	11,04	11,04	11,00	11,02	11,04	11,028

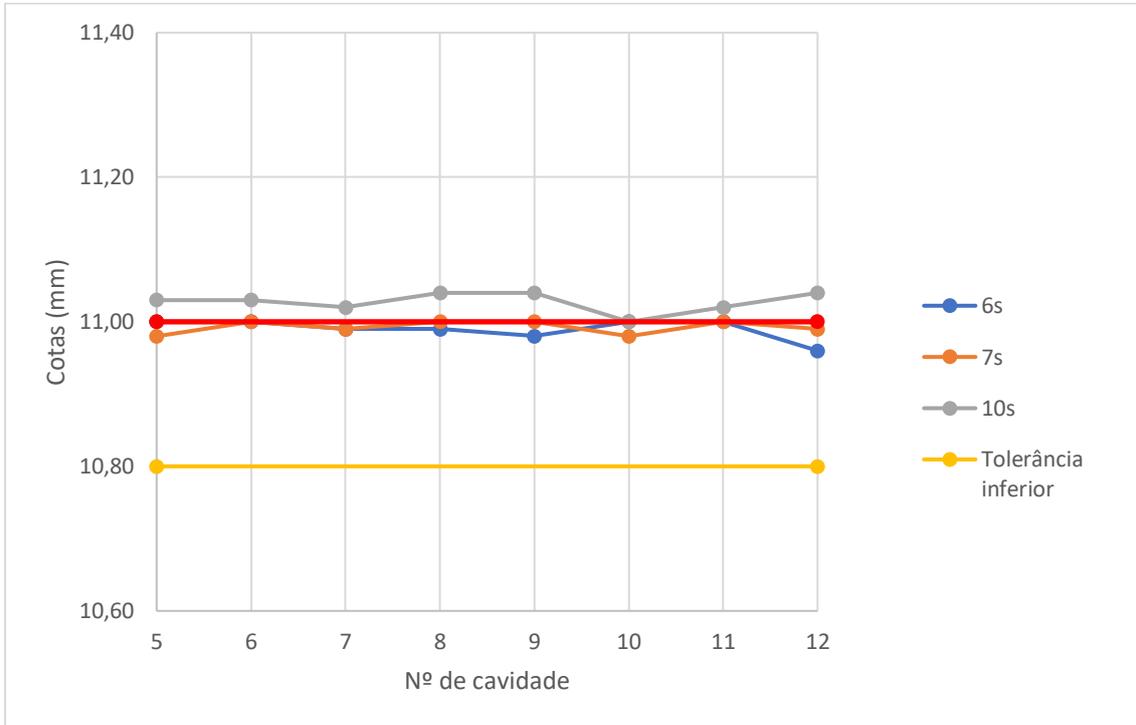


Figura 46- Variação da cota A por cavidade

Relativamente á cota B, em nenhuma das cavidades se verifica que o valor da cota para cada cavidade não ultrapassa os limites definidos, pelo que o tempo de arrefecimento não afetará esta espessura.

Tabela 11- Tempos de arrefecimento e cotas obtidas para cota B

Tempo de arrefecimento (s)	Cota 2 (mm)								Média (mm)
6	1,00	0,98	0,96	1,00	0,96	0,97	0,96	0,98	0,976
7	0,97	0,99	0,97	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00	0,985
10	0,98	0,99	1,00	1,00	0,97	0,97	0,98	0,96	0,981

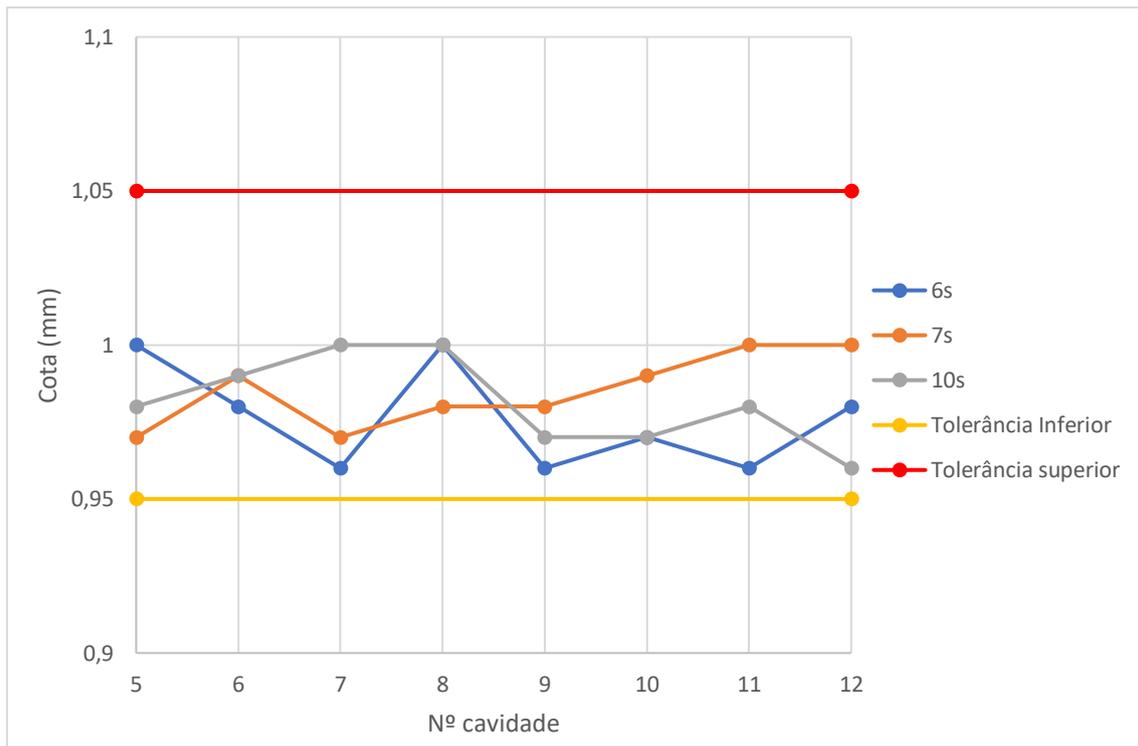


Figura 47- Variação da cota B por cavidade

Findos os estudos de otimização do processo, obtiveram-se as condições de processamento presentes na tabela 12 que depois foram usadas em máquina aquando da análise da capacidade do processo que se efetuou após estes estudos.

Tabela 12- Parâmetros obtidos através da moldação científica

Parâmetro analisado	Valor obtido
Velocidade de injeção	70%
Pressão de injeção	3,17 MPa
2ª Pressão	25 bar
Tempo de 2ª pressão	5s
Dosagem	88,2 mm
Tempo de arrefecimento	6s

6.3. Análise do estudo da capacidade de processo pós-*scientific molding*

Após a aplicação da moldação científica no processo em análise, as condições de processamento ideais obtidas nos ensaios são colocadas em máquina, sendo que depois de passar algum tempo para o processo estabilizar, começou-se a realizar a análise da capacidade do processo com as novas condições de processamento.

Analisando os resultados obtidos nas pesagens de peças com as novas condições de processamento, verifica-se a nível de cartas de controlo que no primeiro dia de recolhas que apenas às 12h é que o processo não se encontra em controlo estatístico, pois um dos valores encontra-se fora dos limites de especificação, como se pode verificar pela figura 48.

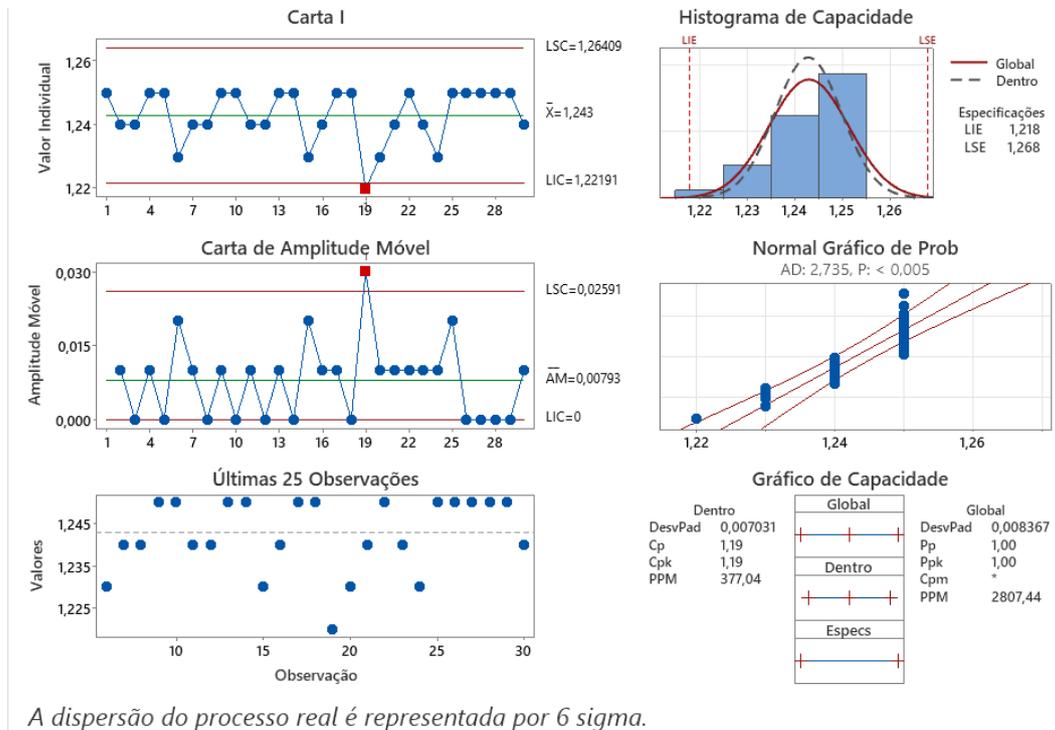


Figura 48- Análise estatística dia 1 às 12h

Nos restantes horários desse dia, verifica-se que no momento da recolha o processo se encontra em controlo estatístico, contudo a nível de capacidade de processo, os valores não ultrapassam 1.00 de C_{pk} , o que indicia um processo incapaz como foi o caso às 10h (figura 49), mas também existem horários nesse dia em que o C_{pk} é superior a 1.00, indicando que nesse momento o processo se encontra estável a nível de capacidade de processo, como aconteceu às 16h, comprovado pela figura 50.

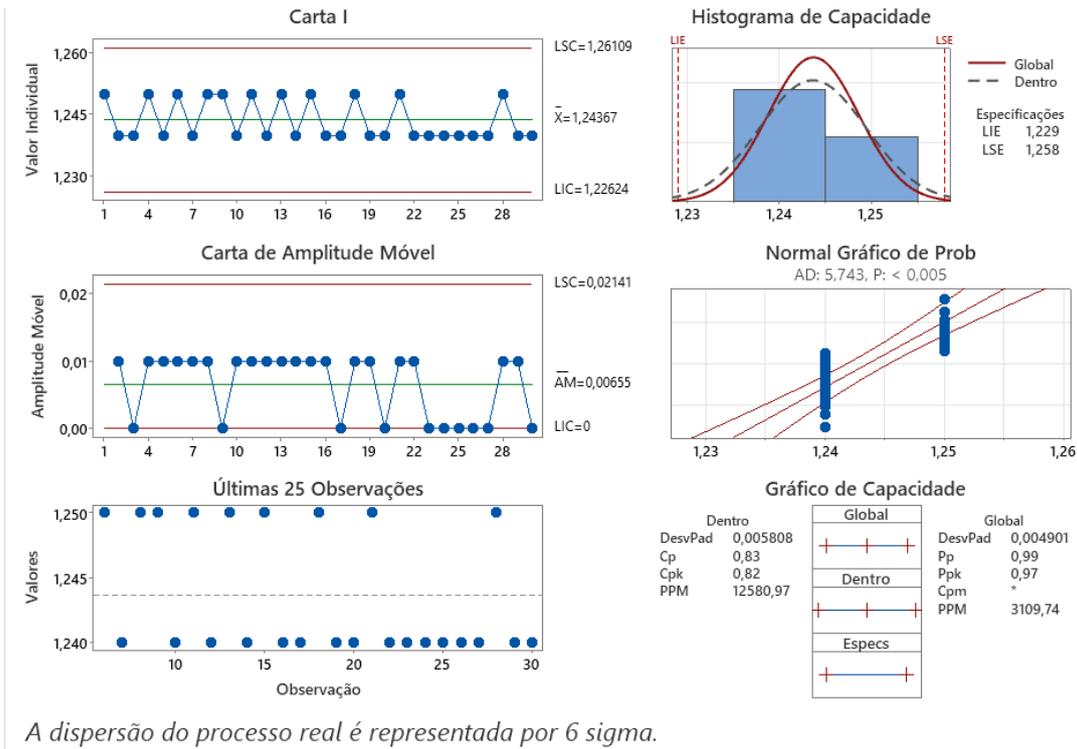


Figura 49- Análise estatística dia 1 às 10h

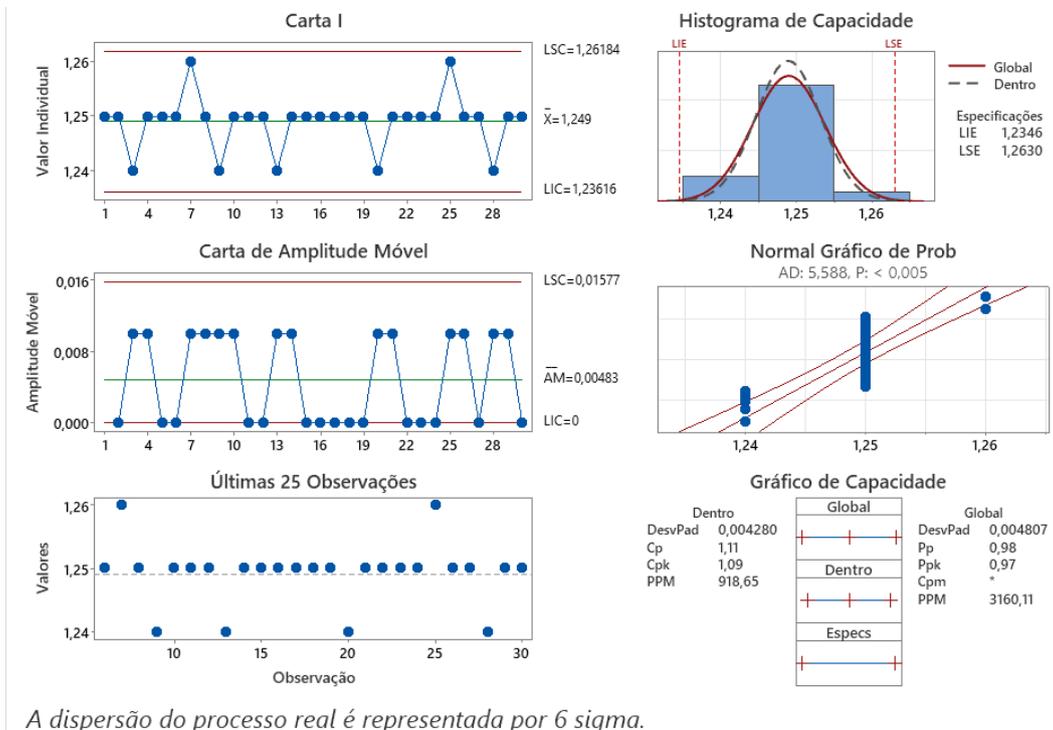


Figura 50- Análise estatística dia 1 às 16h

Esta irregularidade tanto a nível de controlo estatístico como a nível de capacidade de processo poder-se-ia justificar pelo facto de o processo ainda estar numa fase de estabilização pelo que o processo ainda se encontrava com potencial para melhorias relativamente ao primeiro dia.

Contudo no 2º dia verificou-se a mesma tendência que o primeiro, ou seja, apesar de em todos os horários o processo estar estatisticamente controlado e de existirem horários em que o processo é ideal, como aconteceu às 10h (figura 51), existem casos em que os valores de C_{pk} se encontram abaixo de 1.00, mais uma vez indicando instabilidade no processo, como se verifica na figura 52, relativo às 16h.

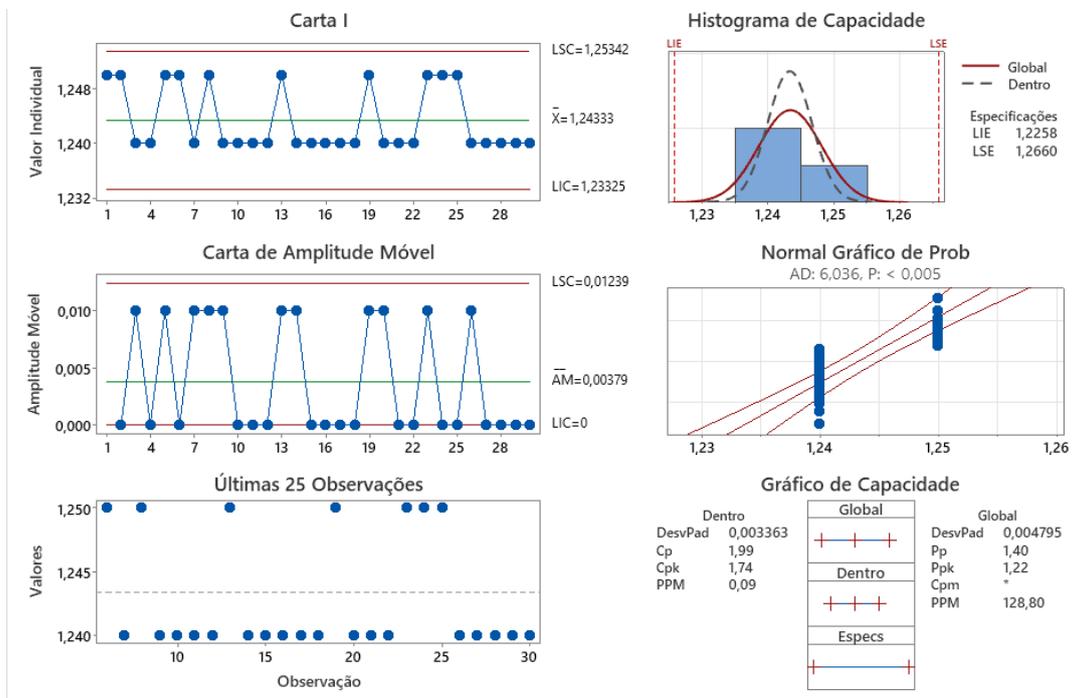


Figura 51- Análise estatística dia 2 às 10h

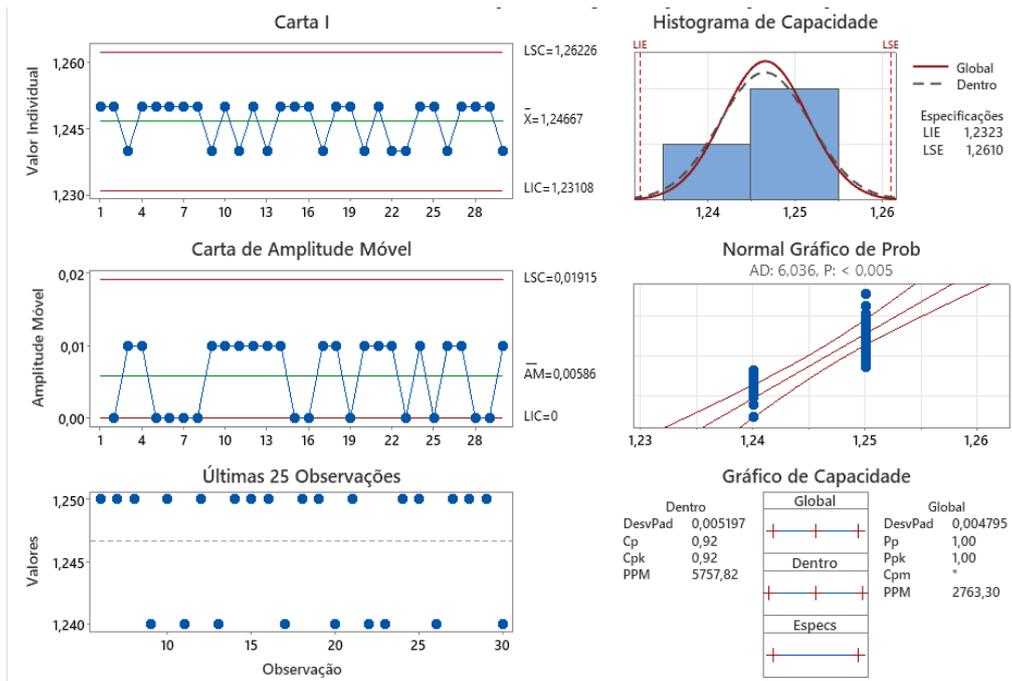


Figura 52- Análise estatística dia 2 às 16h

Avançando para o terceiro dia, não há grandes mudanças relativas ao comportamento do processo, desta vez já há o aparecimento de um caso em que o processo não está em controle estatístico que foi às 10h, como se verifica na figura 53, apresentando o padrão não aleatório referente à regra 6 (ver tabela 1).

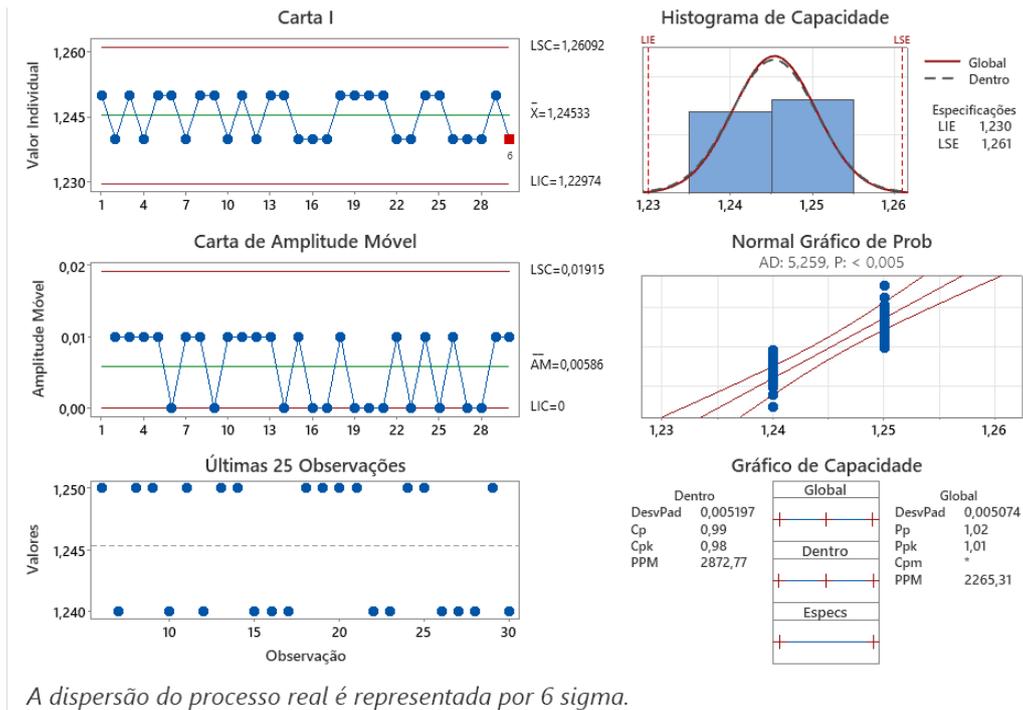


Figura 53- Análise estatística dia 3 às 10h

Tal como nos dias anteriores, os restantes horários encontram-se todos em controlo estatístico, havendo casos em que o C_{pk} se encontra acima de 1.00, como é caso da figura 54, referente às 12h, e casos em que C_{pk} é inferior a 1, como se verifica às 16h (figura 55)

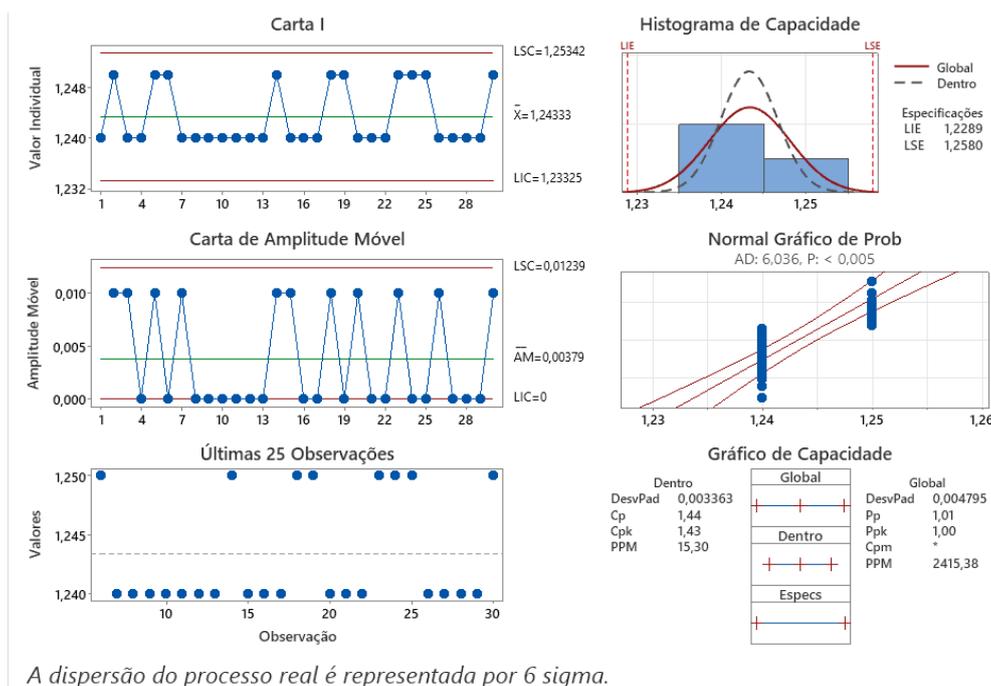


Figura 54- Análise estatística dia 3 às 12h

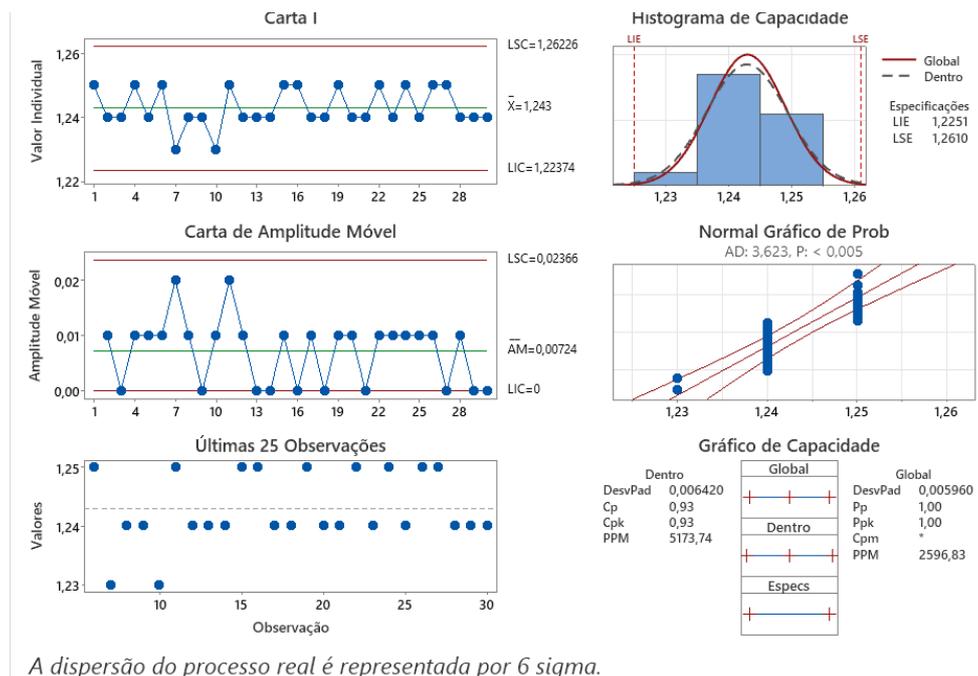


Figura 55- Análise estatística dia 3 às 16h

No quarto e quinto dia obtêm-se novamente os mesmos comportamentos que nos dias anteriores. Em pelo menos um dos horários o processo não se encontra em controlo estatístico, como acontece às 14h do dia 4, onde há o aparecimento da regra 5 dos padrões não-aleatórios de variação, e no dia 5 às 16h, aparecendo a regra 6 dos padrões não aleatórios (ver tabela 1).

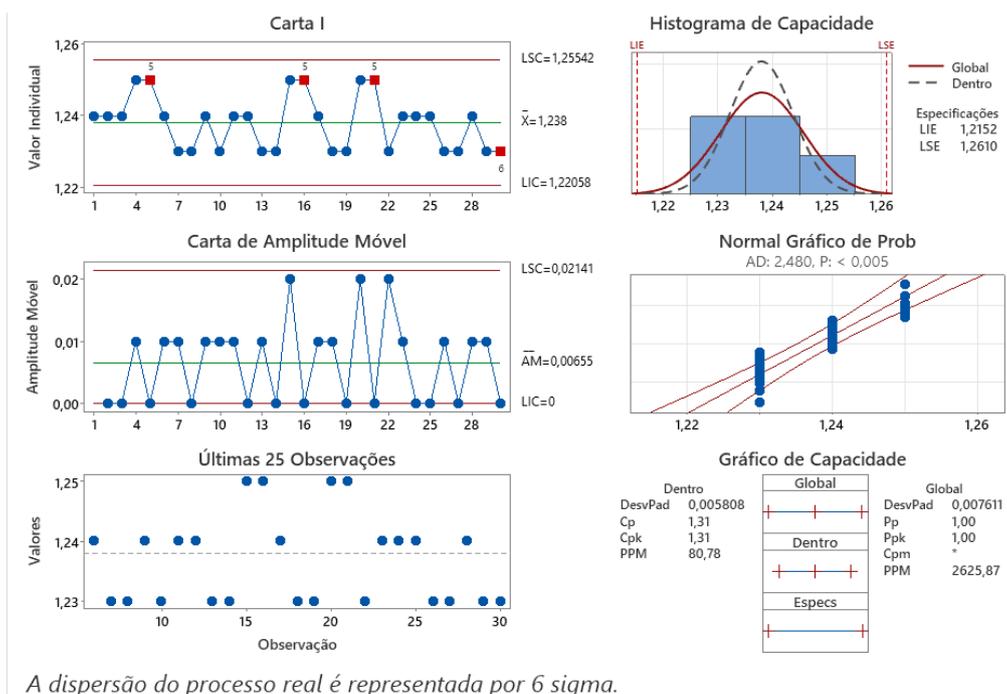


Figura 56- Análise estatística dia 4 às 14h

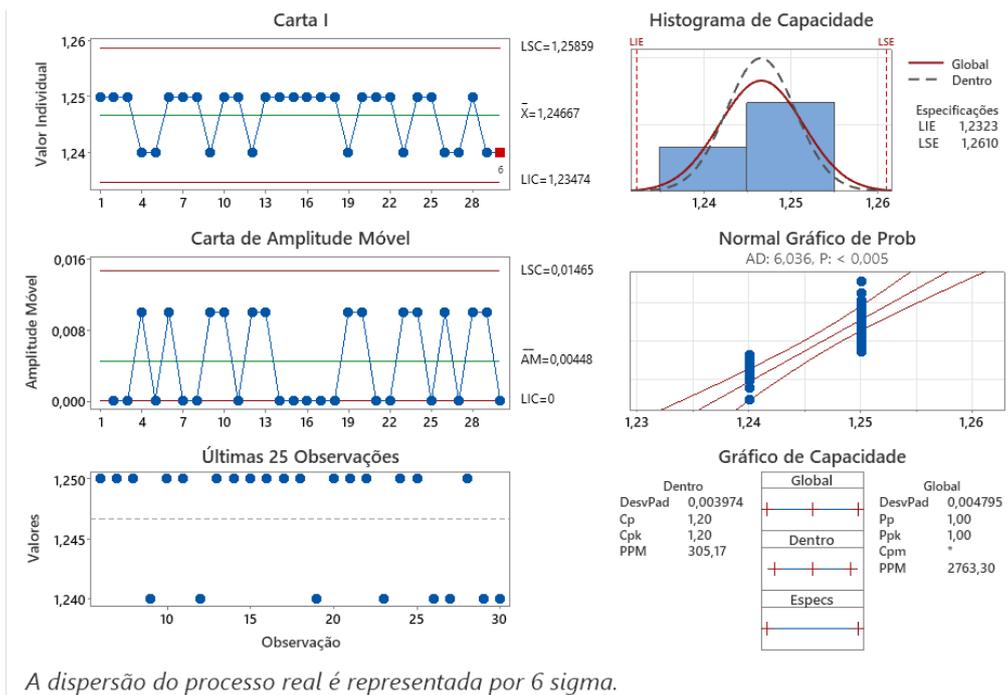


Figura 57- Análise estatística dia 5 às 16h

Depois denota-se também que existiam fases do dia em que o processo se encontrava em controlo estatístico e com valores de C_{pk} superiores, como é o caso do dia 4 pelas 16h e do dia 5 as 14h, presentes nas figuras 58 e 59 respetivamente.

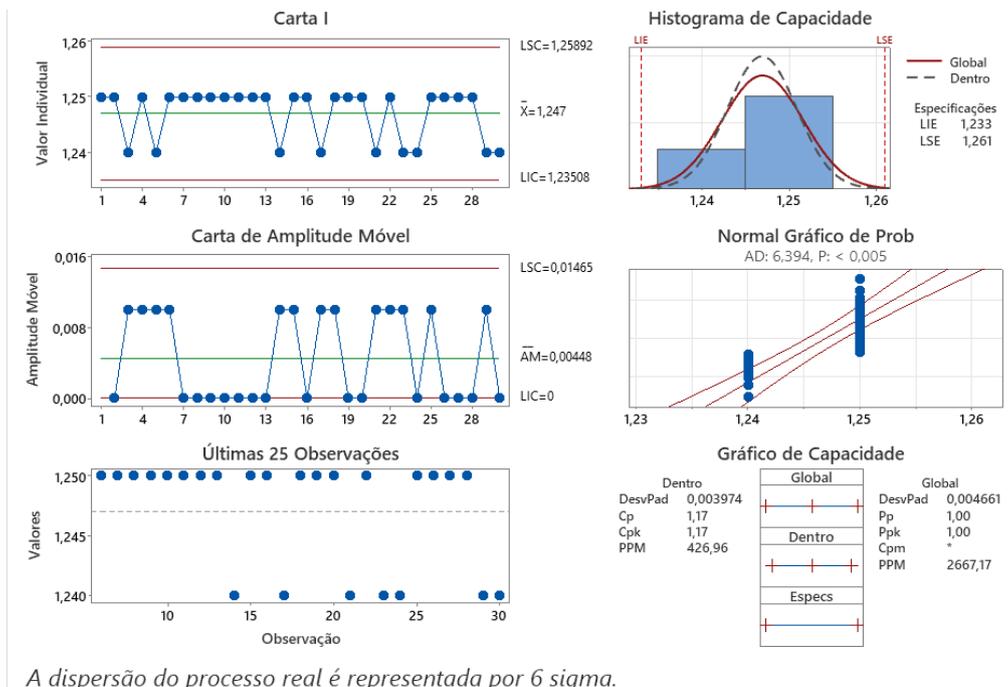


Figura 58- Análise estatística dia 4 às 16h

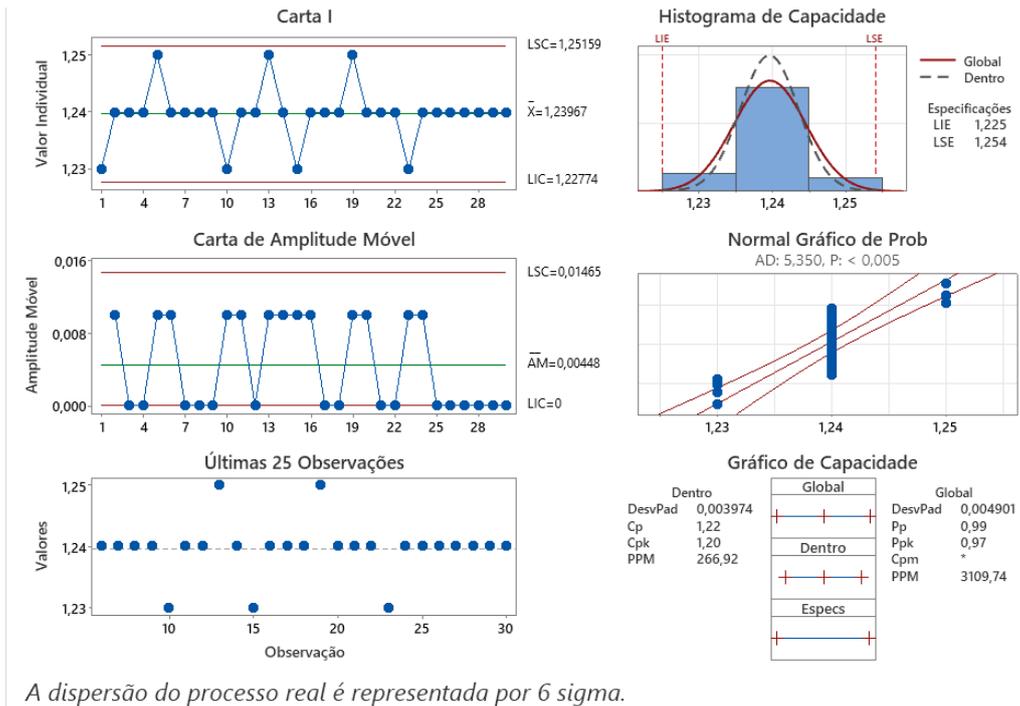


Figura 59- Análise estatística dia 5 às 14h

Apesar disso, em ambos os dias ainda se verificou bastantes momentos em que o processo, apesar de estar em controlo estatístico, possui valores muito baixos de C_{pk} , como se pode ver no dia 4, pelas 12h e no dia 5 também pelas 12h.

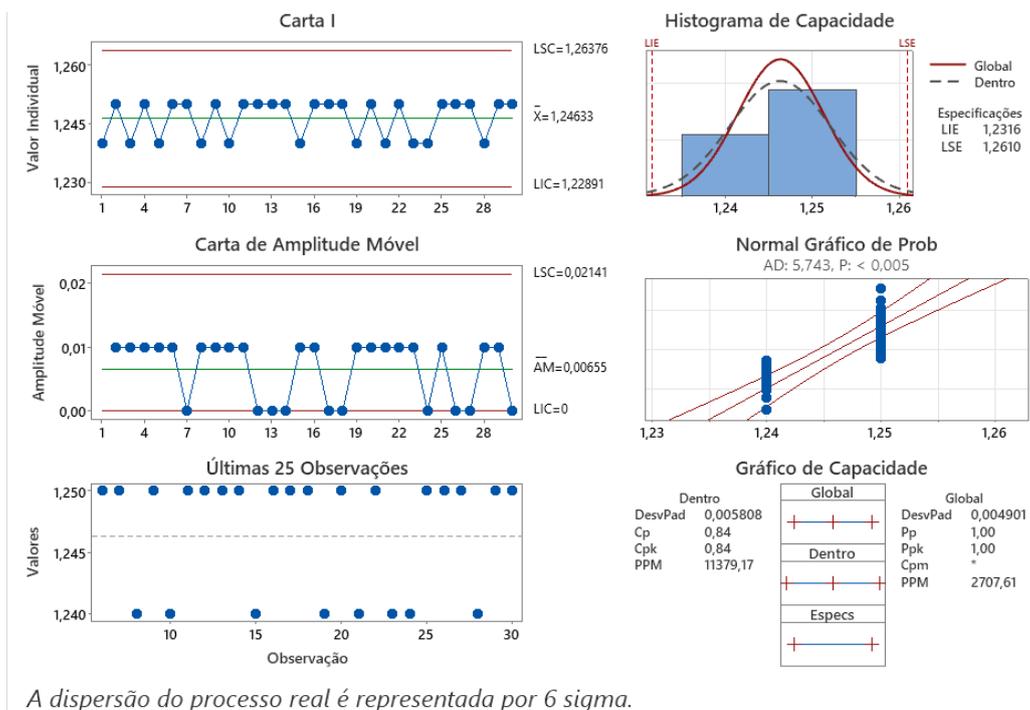


Figura 60- Análise estatística dia 4 às 12h

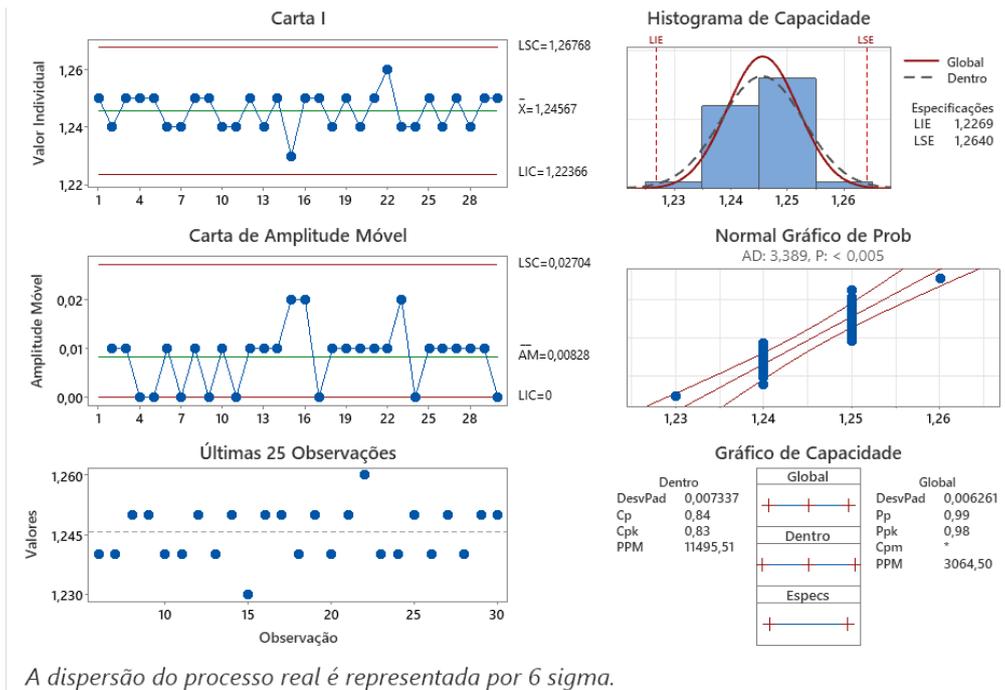


Figura 61- Análise estatística dia 5 às 12h

Posteriormente foi realizada a carta das Médias e Amplitudes Móveis recorrendo às médias amostrais das pesagens realizadas em cada dia de recolha. Essa carta encontra-se na figura 62. Como se pode observar, esta não se encontra em controlo estatístico. Para além de possuir valores fora dos limites de controlo, possui também muitos padrões não-aleatórios, que como se pode verificar, são os correspondentes às regras 5, 6 e 8 (ver tabela 1). Assim podemos afirmar que o processo em média é bastante irregular, não apresentado controlo estatístico ao longo das várias recolhas.

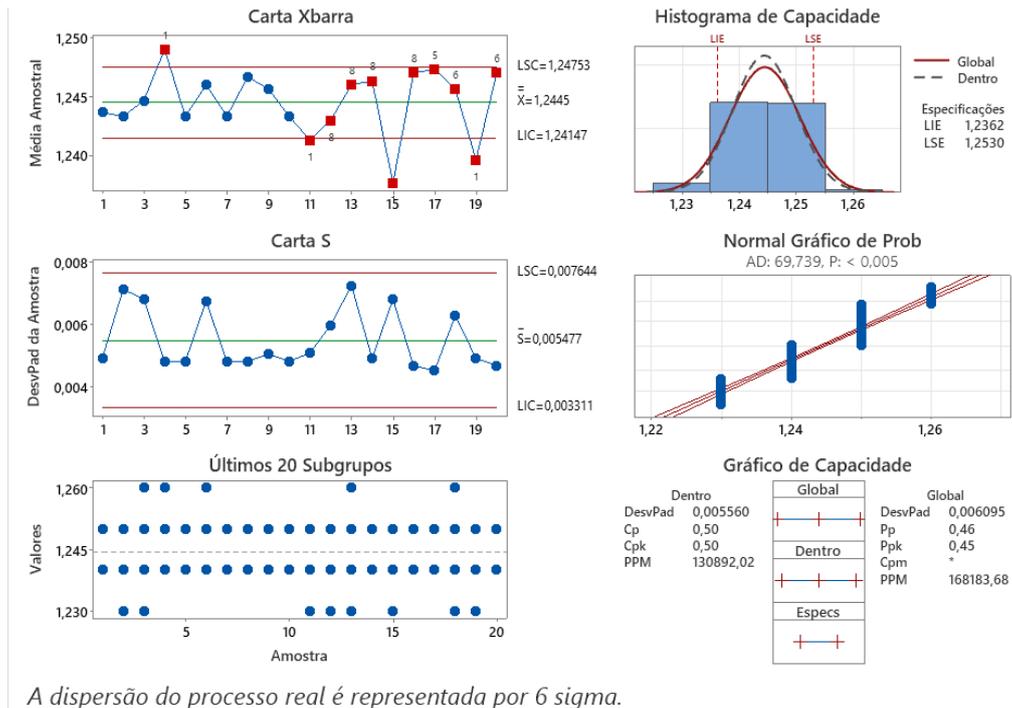


Figura 62- Análise estatística para as médias dos valores de cada dia

Analisando os resultados obtidos, podemos constatar através da observação das cartas das Observações Individuais que realmente houve uma melhoria a nível do controlo estatístico do processo, que este apresenta mais regularidade, ou seja, mais momentos em que se encontra em controlo estatístico. Mesmo com alguns momentos em que o processo apresentava irregularidades e estava fora de controlo estatístico, em comparação com a primeira análise esta apresenta muito mais momentos em controlo estatístico (16 momentos do dia face a apenas 5 momentos do dia da primeira análise). No entanto, a nível de capacidade do processo, este demonstra não ter o potencial desejados quando se fala a nível industrial, já que deveria de apresentar valores de Cpk superiores a 1.33 de modo a ter-se um processo satisfatório. Observando a tabela 13, que contém todos os valores de Cpk em que o processo se encontrava em controlo estatístico, fazendo a média desse valores e apesar dessa média ainda ser superior a 1, a nível industrial o processo não será de todo capaz.

Tabela 13- C_{pk} ao longo da análise

Dia	Hora	Cpk
1	10h	0,83
	14h	0,93
	16h	1,09
2	10h	1,74
	12h	0,95
	14h	1,12
	16h	0,92
3	12h	1,43
	14h	1,11
	16h	0,93
4	10h	1,00
	12h	0,84
	16h	1,06
5	10h	1,21
	12h	0,83
	14h	1,20
	Média	1,07

Transitando para a carta \bar{X} , ainda mais se evidencia a inconstância e pouca consistencia que o processo apresenta quando comparada a análise anterior, pelo que não se pode por e simplesmente afirmar que o *Scientific Injection Molding* foi benéfico para o processo, quando se fala em peso da peça.

Em suma, pelas cartas dos valores individuais, o processo demonstrou poder estar mais controlado quando se fala no peso desta peça, contudo a nível de capacidade do processo, esta é muito baixa para um processo industrial, podendo numa prespetiva futura próxima necessitar de uma nova análise de modo a implemetar melhorias ao processo.

Tendo em conta a carta das médias, esta evidencia que o processo não se encontra completamente controlado, sendo que desta forma se pode constatar que a moldação científica

em pouco ajudou no que se refere ao controlo estatístico do processo, no que se refere ao peso da peça.

Ou seja, isto não significa diretamente que foi a moldação científica que causou estas incôncias nos pesos. Podem existir outros fatores alheios à abordagem do *scientific molding* ou até mesmo ao processo produtivo em si que possa de alguma maneira ter influenciado o processo, o que justificaria uma alteração da capacidade do processo.

6.4. Obtenção da janela dimensional de processamento para as cotas críticas

6.4.1. Análise ANOVA

Para a obtenção da janela de processamento realizou-se um DOE em máquina, que foi contruído anteriormente. Foram então realizadas as experiências definidas no DOE de forma aleatória e foram medidas as duas cotas críticas também apresentadas posteriormente.

Ao efetuarmos um DOE, existe sempre uma variação inerente às variáveis a serem estudadas, sendo que neste caso se trata de dimensões. Por isso é importante analisar estas diferenças de modo a verificar de que maneira as alterações efetuadas no processo afetam a variável em estudo. Para isso existe uma forma de analisar estas diferenças, que se denomina de ANOVA. Também conhecida como análise de variância, compara a variação inerente dentro de um processo através da diferença entre as médias das variáveis. Recorrendo às experiências definidas no DOE, retiraremos os valores da média de cada uma das cotas e será feita a diferença das médias tendo em conta os níveis definidos no DOE para cada condição de processamento a variar.

É importante referir que deve haver uma alteração suficiente no processo de moldação por injeção de modo que posteriormente se verifique uma diferença significativa na peça. Deste modo usa-se como referência a janela de processamento cosmética obtida anteriormente, que pode servir de ponte de ligação para definir limites de condições de processamento, algo que se teve em conta nas definições dos intervalos do DOE obtido para esta análise.

Posto isso, fez-se uma análise ANOVA para cada uma das cotas A e B, tendo em conta os valores obtidos em cada experiência do DOE utilizando o programa *Design Expert*.

Em primeiro lugar deve-se verificar se as diferenças entre as médias são significativas. Para isso define-se um nível de significância α que normalmente possui o valor de 0.05, sendo que este deve ser igual ou superior a um valor denominado de Valor-P, que é dado pelo programa. Caso isto não aconteça diz-se que os valores das médias não são estatisticamente significativos.

Em primeiro lugar foram analisados os resultados obtidos para a cota A, que podem ser observados na tabela 14. De referir que, e tal como é possível observar no tópico das dimensões da peça, esta cota tem um valo máximo de 11,00mm, sendo que internamente foi definido um valor mínimo de 10,80mm, de modo que não há uma grande discrepância a nível dimensional para esta cota.

Tabela 14- Valores da cota A obtidos no DOE

Experiências	Cota A (mm)								
	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
1	10,97	10,98	10,98	10,98	10,98	10,97	10,98	10,97	10,98
2	10,97	10,99	10,97	10,98	10,97	10,98	10,99	10,98	10,98
3	10,96	10,95	10,96	10,97	10,97	10,96	10,97	10,98	10,97
4	10,98	10,98	10,98	10,97	10,97	10,96	10,97	10,96	10,97
5	11,00	11,00	11,00	10,99	11,00	10,99	11,00	11,00	11,00
6	10,99	11,00	10,99	10,99	10,98	11,00	11,00	11,00	10,99
7	11,00	11,00	11,00	11,00	10,99	10,99	10,99	10,99	11,00
8	10,99	11,00	11,00	11,00	10,99	11,00	10,99	10,98	10,99

Efetuada a análise ANOVA para estes resultados, relativamente às 3 condições de processamento analisadas, verifica-se que o Valor-P para a 2ª pressão é inferior a 0.05, pelo que este possui uma influência significativa no processo. Para as restantes condições, verifica-se que esse valor já é superior a 0.05, no entanto para a tempo de arrefecimento esse valor é de 0.1817, tal como para o tempo de arrefecimento e para a interação entre 2ª pressão e tempo de arrefecimento. Isto significa que nenhuma delas irá influenciar a cota em análise, pelo que podemos afirmar que para esta cota o processo é robusto relativamente aos 2 parâmetros que revelaram não ter qualquer influência (tempo de arrefecimento e temperatura do molde). Ou seja, para qualquer valor dentro dos intervalos que foram analisados no DOE para cada um dos parâmetros, nenhum deles terá influência a nível dimensional para esta cota A análise ANOVA realizada encontra presente na tabela 15.

Tabela 15- Tabela ANOVA para a cota A

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0,0009	4	0,0002	14,25	0,0271	significant
A-2ª Pressão	0,0008	1	0,0008	48,00	0,0062	
B-Tempo de arrefecimento	0,0001	1	0,0001	3,00	0,1817	
C-Temperatura do molde	0,0001	1	0,0001	3,00	0,1817	
AB	0,0001	1	0,0001	3,00	0,1817	
Residual	0,0000	3	0,0000			
Cor Total	0,0010	7				

De modo a verificar o efeito que cada condição de processamento tem nesta cota, as médias depois são expostas num gráfico onde no eixo do X estão os níveis do DOE e no eixo do Y o valor

da condição a analisar. Neste caso apenas interessa observar o comportamento da 2ª pressão na cota, tendo em conta que segundo a análise ANOVA efetuada é a única que tem influência significativa na cota em análise.

Observando o gráfico da figura 63, e como era de se esperar, verifica-se que à medida que aumentamos a 2ª pressão o valor da cota tende a aumentar, pois com o aumento da 2ª pressão, há um aumento da quantidade de material que entra para a cavidade que compensa eventuais contrações volúmicas que a peça possa ter, pelo que não afetará tanto a mesma a nível dimensional.

Factor Coding: Actual

R1

X1 = A

Actual Factors

B = Average over

C = Average over

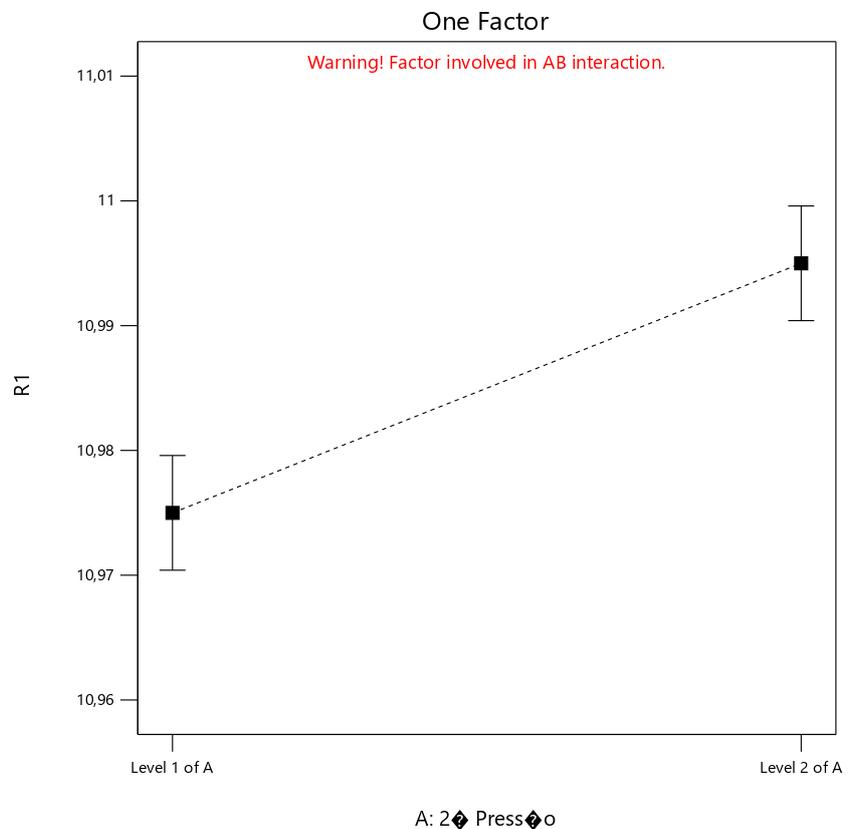


Figura 63- Variação da cota A com a 2ª pressão

Analisando agora a cota B, a tabela 16 mostra os resultados obtidos no DOE experimental efetuado. Neste caso o desenho técnico indica-nos que esta cota é $1 \pm 0,05$ mm, possuindo um valor máximo de 0,95mm e um valor máximo de 1,05mm.

Tabela 16- Valores da cota B obtidos no DOE

Experiências	Cota B (mm)								
	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
1	0,99	1,02	0,98	0,98	0,98	0,99	0,98	0,98	0,99
2	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98
3	0,99	0,98	0,98	0,97	0,98	0,99	1,01	0,98	0,99
4	1,00	0,99	1,01	0,98	1,02	1,00	0,99	1,03	1,00
5	0,99	0,98	0,97	0,97	0,98	0,98	0,96	0,96	0,97
6	0,99	0,99	0,99	0,97	0,99	0,98	0,99	1,00	0,99
7	0,99	0,97	0,97	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98
8	1,00	0,98	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Ao realizar a análise ANOVA verificou-se que nenhum dos parâmetros de processamento que foram variados terão influência nesta cota. Observando a tabela 17, para todos os parâmetros, o Valor-p é inferior a 0.05, incluindo às interações.

Tabela 17- Tabela ANOVA para a cota B

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0,0005	6	0,0001	0,7037	0,7218	not significant
A-2ª Pressão	0,0001	1	0,0001	1,00	0,5000	
B-Tempo de arrefecimento	0,0001	1	0,0001	1,0000	0,5000	
C-Temperatura do molde	0,0001	1	0,0001	1,0000	0,5000	
AB	0,0000	1	0,0000	0,1111	0,7952	
AC	0,0001	1	0,0001	1,00	0,5000	
BC	0,0000	1	0,0000	0,1111	0,7952	
Residual	0,0001	1	0,0001			
Cor Total	0,0006	7				

Como nenhum dos parâmetros ou interações são considerados significativos ao ponto de afetarem esta espessura, não é de interesse avaliar a variação desta cota para cada parâmetro de processamento, já que nenhum mostrou ser significativo, ou seja, o comportamento observado na cota não será relevante para uma análise da variação da mesma para estas condições de processamento. Contudo isto também significa que relativamente a esta cota o processo encontra-se robusto para estas condições de processamento.

Finalizada a análise ANOVA, pode-se concluir que na primeira cota apenas a 2ª pressão tem influência significativa na cota A, ou seja, a variação da 2ª pressão irá influenciar o valor da mesma, pelo que é importante ter em atenção este parâmetro a nível de otimização e controlo do processo,

ao contrário do que acontece com os restantes parâmetros, que em pouco influenciam o valor desta cota. A nível dimensional isto pode significar uma certa robustez do processo, já que apenas uma variação mais acentuada da 2ª pressão afetará mais notoriamente esta dimensão crítica.

Para a cota B, verifica-se que estas condições do processamento não afetarão em demasia esta dimensão, pelo que qualquer variação mais acentuada destes 3 parâmetros em pouco irá afetar esta espessura.

Posto isso, a nível de construção de uma janela dimensional, apenas interessa para a cota A já que é a única que possui uma condição de processamento que influencia verdadeiramente o valor desta dimensão.

6.4.2. Janela dimensional

Após a análise ANOVA apresentada anteriormente, apenas se obteve uma janela de processo para a cota A que é a única que se deixa influenciar por uma das condições de processamento em análise. Para isso, em primeiro lugar é necessário obter uma equação que relaciona estes parâmetros de processamento. Utilizou-se esta equação para efetuar uma previsão sobre respostas para determinados níveis de cada fator da mesma. Também é útil para identificar o impacto relativo dos fatores em análise comparando os coeficientes dos fatores.

A tabela 18 apresenta os valores para cada termos da equação para a cota A determinados através do programa *Design Expert*.

Tabela 18- Fatores da equação para obtenção da janela dimensional

	R1	=
	+10,99	
	+0,0100	* A
	-0,0025	* B
	-0,0025	* C
	+0,0025	* AB

Em que A é o termo correspondente à 2ª pressão, B ao tempo de arrefecimento, C à temperatura do molde e AB a interação entre a 2ª pressão e o tempo de arrefecimento. Claramente é evidenciado também através dos termos de mesma que é mais o fator A (2ª pressão) que influencia mais o gráfico que se vai obter para a janela de processamento

Para isso, realizou-se em Excel um gráfico através da equação presente na tabela 18, de modo a observar o comportamento da cota quando se varia os parâmetros da equação. Tendo em conta o programa onde se obtiveram os parâmetros, estes devem ser variados entre -1 e 1. Neste caso como apenas o parâmetro A se apresenta o único com influência significativa, apenas se obteve uma curva onde este parâmetro variou entre -1 e 1, e os restantes tiveram um valor constante, neste caso, o fator B será a -1, o C será 1 e por sua vez, o fator AB será igual à multiplicação do fator A pelo fator B.

Posto isto obteve-se o gráfico da figura 64.

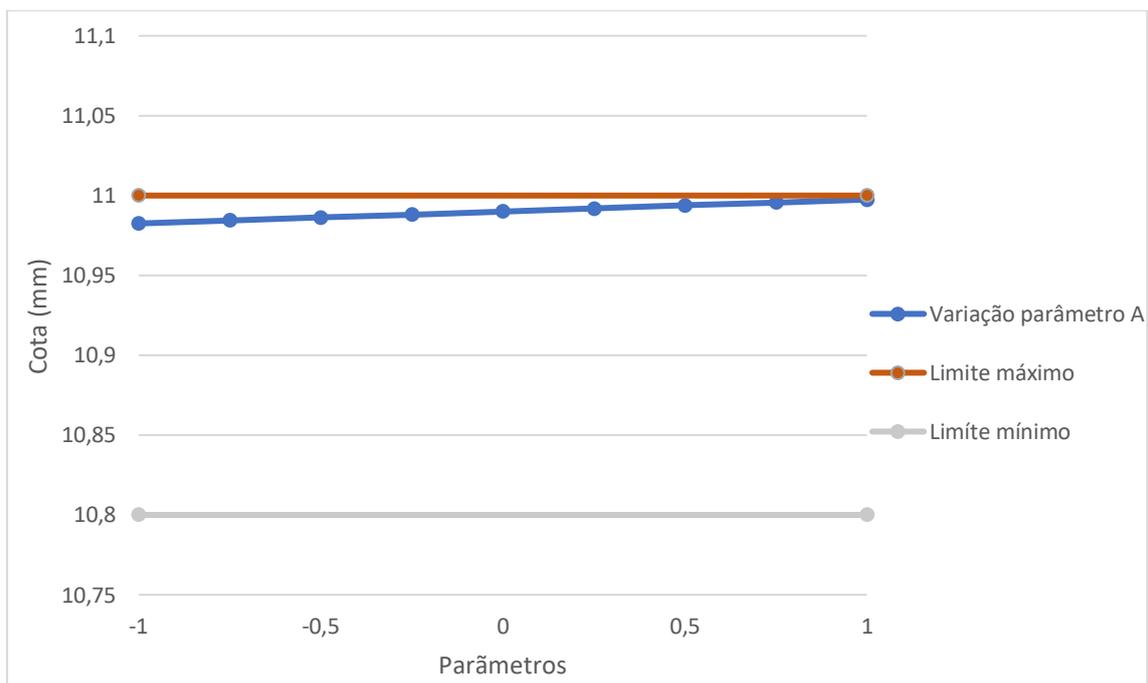


Figura 64- Janela dimensiona cota A

Como se pode observar no gráfico, todos os valores obtidos quando se varia o parâmetro A estão muito próximos do limite superior da cota em causa, sendo que o valor mínimo obtido no gráfico ronda os 10,98 mm, havendo ainda há uma distância relativamente grande entre o valor mínimo

obtido na reta e o limite mínimo que esta cota pode ter, já que estes valores não se encontram “centrados” entre os limites estabelecidos para esta cota.

Isto significa que tendo em conta os resultados obtidos nesta equação, os valores se encontram dentro dos limites que estão estabelecidos. Contudo, todos eles se encontram muito próximos do limite superior, significando que qualquer variação que possa ser provocada no processo pode facilmente provocar com que estes valores possam ultrapassar o valor máximo e comprometer a aprovação da peça. Ou seja, de facto não podemos garantir que, para esta cota, o processo é robusto no que toca à 2^o pressão, já que mesmo que atualmente este valor se encontram todos dentro de tolerâncias, nada garante que qualquer alteração que possa acontecer no processo possa mudar esta variação. No entanto, podemos concluir que recorrendo a valores mais baixos de 2^o pressão, podem causar valores mais baixos de cota, pelo que este gráfico permite concluir que usando valores mais baixos de 2^a pressão iremos obter valores mais baixos de cota, pelo que isto deve ser tido em conta aquando da colocação dos parâmetros de injeção em máquina.

7. Conclusão

Através da realização deste projeto foi possível reter novos conhecimentos e novas ferramentas relativas à otimização de processos de moldação por injeção. Recorrendo à moldação científica, conseguiu-se fazer uma análise ao processo produtivo em causa, acabando por otimizar, de certa forma, parâmetros importantes deste processo, como velocidades mais elevadas de injeção, e uma janela de processamento de 2ª pressões e temperaturas de fuso robusta. Verificou-se também uma redução do tempo de arrefecimento em 4 segundos. Em contrapartida, obteve-se um tempo de 2ª pressão mais elevado 2 segundos em relação ao anteriormente usado no processo, resultando numa redução de 2 segundos no tempo de ciclo, algo bastante positivo.

Neste caso, moldação científica verificou ser uma abordagem muito vantajosa, pois é uma metodologia mais científica e bem planeada que permitiu a obtenção de parâmetros ideais de injeção, originando pouco desperdício pelo facto de ser algo muito bem definido e planeado relativamente à abordagem mais convencional. No entanto ainda há alguns pontos em que esta pode e deve ser melhorada, principalmente no que toca ao tempo de aplicação da mesma, que se verificou ser muito longo e que futuramente deve ser algo a analisar com mais detalhe, de modo a tentar arranjar forma, por exemplo, a nível do planeamento de experiências, de que forma esse tempo de aplicação da abordagem pode ser reduzido.

No que toca ao DOE e ao seu propósito, verificou-se através da análise ANOVA que, a nível dimensional para as 2 cotas críticas em análise, apenas a 2ª pressão irá afetar uma delas, sendo o processo robusto para as restantes condições de processamento analisadas para cada uma das cotas.

Quanto ao controlo estatístico do processo, os resultados obtidos não foram os que se esperavam inicialmente. De facto, era de se esperar melhorias a nível de controlo estatístico comparativamente à primeira análise antes da moldação científica. Contudo, quando se analisa as cartas de controlo obtidas, e apesar de se verificar que maior parte das amostras se encontram dentro dos limites de controlo e sem apresentarem causas de variação especiais, quando se observam os valores de capacidade de processo obtidos, estes são relativamente baixos, pois poucos são os que possuem um C_{pk} acima de 1.33, inclusive alguns apresentam valores abaixo do 1.00 de C_{pk} , o que revela que o processo apresenta no seu estado atual muita variabilidade e não apresenta expectativas futuras de melhoramento. Isto não significa automaticamente que foi a moldação científica que causou esta variabilidade.

Muitos podem ter sido os fatores que podem ter contribuído para esta grande variabilidade. Algo que se pode suspeitar são fatores externos ao processo. Podem as condições atmosféricas ter tido alguma influência no processo em si, por causa da máquina se encontrar relativamente próxima de um ponto de carga e descarga de mercadorias, sendo que a abertura e fecho de portas pode descontrolar o processo. Outro fator que poderá ter sido determinante é a máquina de injeção em si, por se tratar de um equipamento bastante antigo, e que tem de estar sempre em constante vigia pois pode necessitar de algum tipo de manutenção durante os processos produtivos, sendo também uma máquina que sofre de constantes paragens durante qualquer produção.

Em suma, foi possível aplicar a moldação científica como metodologia de otimização do processo, já que conseguimos obter condições de processamento que irão tornar o processo mais robusto, que acima de tudo era o principalmente o objetivo deste projeto. Apesar de os resultados obtidos a nível de controlo estatístico e capacidade do processo não terem sido muito animadores no que toca à validação desta metodologia, não podemos de todo afirmar que devemos descartar esta abordagem por completo apenas tendo em conta esta análise. Como trabalhos futuros seria interessante aplicar esta metodologia noutros processos da empresa, tendo em conta alguns fatores referidos anteriormente, como as condições atmosféricas do local e o equipamento onde decorre o processo, de modo a evitar variações alheias ao processo que possam influenciar o controlo estatístico do processo e comprometer a análise de resultados.

8. Bibliografia

- [1] CS Plastic, “CS Plastic.” <https://www.csplastic.pt/> (accessed Feb. 10, 2022).
- [2] C. C. Fernandes Da Silva, “Desenvolvimento e Aplicação do Método Científico de Moldação por Injeção,” 2021.
- [3] H. M. M. de Oliveira, “Estágio profissional na INOVEPLASTIKA,” 2008.
- [4] M. A. C. Sena, “Otimização da eficiência térmica de moldes de injeção,” pp. 4–6, 2014.
- [5] G. F. Schiller, “A Practical Approach to Scientific Molding,” 2018.
- [6] S. Kulkarni, *Robust process development and scientific molding: Theory and practice*. 2010.
- [7] FimmTech, “The Five Pillars and the Three Consistencies.” <https://fimmtech.com/knowledgebase-2/the-5-pillars-and-3-consistencies/> (accessed Mar. 18, 2022).
- [8] F. M. N. Teixeira, “Moldação Científica – Estudo da otimização de processos de injeção,” 2017.
- [9] Rosti, “Injection Molding: Complete Guide to Scientific Molding.” <https://www.plasticcomponents.com/scientific-molding-comprehensive-guide#whats-the-difference-traditional-scientific-molding> (accessed Mar. 28, 2022).
- [10] KAYSUN, “Scientific Molding.” <https://www.kaysun.com/what-is-scientific-molding> (accessed Mar. 25, 2022).
- [11] R. Godina, “Controlo Estatístico do Processo Um estudo de caso numa empresa na área da indústria automóvel Engenharia e Gestão Industrial,” 2013.
- [12] T. Araújo, “Controle Estatístico do Processo de Anodização , na Empresa STA – Sociedade Transformadora de Alumínios, SA,,” p. 77, 2012.
- [13] D. C. Montgomery, *Statistical quality control*, vol. 192. 2014.
- [14] P. De Brito and Q. Caramujo, “Controlo Estatístico do Processo de Injeção de um Fabricante de Intercoolers,” 2018.
- [15] J. G. Cunha Santos, “Melhoria do Programa de Controlo Estatístico de um Processo de Injeção de Plásticos,” pp. 22–29, 2014.
- [16] L. M. Mota Rodrigues, “Aplicação dos Métodos de Taguchi e Estudo da Capacidade do Processo: Caso de Estudo na Indústria Automóvel,” 2013.
- [17] S. Kotz and N. L. Johnson, *Process Capability Indices*. 1993.
- [18] ISIXSIGMA, “Process Capability (Cp, Cpk) and Process Performance (Pp, Ppk) – What is the Difference?” <https://www.isixsigma.com/tools-templates/capability-indices-process-capability/process-capability-cp-cpk-and-process-performance-pp-ppk-what-difference/> (accessed May 16, 2022).
- [19] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments Eighth Edition. Arizona State University*, vol. 2009, no. 2005. 2013.

- [20] M. Anderson, "Design of experiments," *Ind. Phys.*, vol. 3, no. 2, p. 24, 1997, doi: 10.4324/9780203324073_chapter_4.
- [21] N. F. Vital Curates Moita, "Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos," 2007.
- [22] R. J. Camilo Carbas, "Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi," 2008.
- [23] Moldes Injeção Plástico, "Classificação do Molde de Injeção." <http://moldesinjecao plasticos.com.br/classificacao-do-molde-de-injecao/> (accessed Apr. 22, 2022).
- [24] FimmTech, "Scientific Molding: The 6-Step Study." <https://fimmtech.com/knowledgebase-2/scientific-molding-the-6-step-study/> (accessed Mar. 18, 2022).
- [25] GreyCampus, "Introduction on MiniTab." <https://www.greycampus.com/opencampus/minitab/introduction-on-minitab> (accessed Jul. 29, 2022).
- [26] simplylearn, "What is MiniTab? | An Introduction to MiniTab Data Analysis, Statistical & Process Improvement Tools." <https://www.simplilearn.com/what-is-minitab-data-analysis-tool-article> (accessed Jul. 29, 2022).
- [27] StatEase, "DesigExpert Version13." <https://www.statease.com/software/design-expert/> (accessed Jul. 29, 2022).

9. Anexos

ANEXO I –Ficha técnica PP CAPILENE R 50

Technical Data Sheet
CAPILENE® R 50
 Polypropylene Homopolymer



Product Description

CAPILENE® R 50 is a polypropylene homopolymer intended for general-purpose applications.

Features:	<ul style="list-style-type: none"> Basic additive package
Uses:	<ul style="list-style-type: none"> Household articles Crates Injection molded items
Processing Methods:	<ul style="list-style-type: none"> Injection molding

Properties		Method	Typical Value*	Unit
Physical				
Melt Flow Rate	(230°C/2.16 kg)	ISO 1133	12	g/10 min
Mechanical				
Tensile Stress at Yield	(50 mm/min)	ISO 527-2	32	MPa
Tensile Strain at Yield	(50 mm/min)	ISO 527-2	11	%
Flexural Modulus	(5 mm/min)	ISO 178	1400	MPa
Izod Impact Strength, notched	(+23°C)	ISO 180	3	kJ/m ²
Thermal				
Vicat Softening Temperature	(10 N)	ISO 306	153	°C
Heat Deflection Temperature	(0.45 MPa)	ISO 75-2	90	°C

*Typical values; not to be construed as specifications.

Health, Quality, Regulations and Safety

This product is not classified as dangerous substance. Material safety data sheets, international standards certificates (e.g. ISO 9001) and other regulatory documents are available on our website. Carmel Olefins products have not been tested and therefore not validated for use in pharmaceutical/medical applications, and their suitability for these uses cannot be guaranteed. It is the customer's responsibility to test and approve their technical and regulatory suitability in order to satisfy themselves as to the particular purpose and application(s).

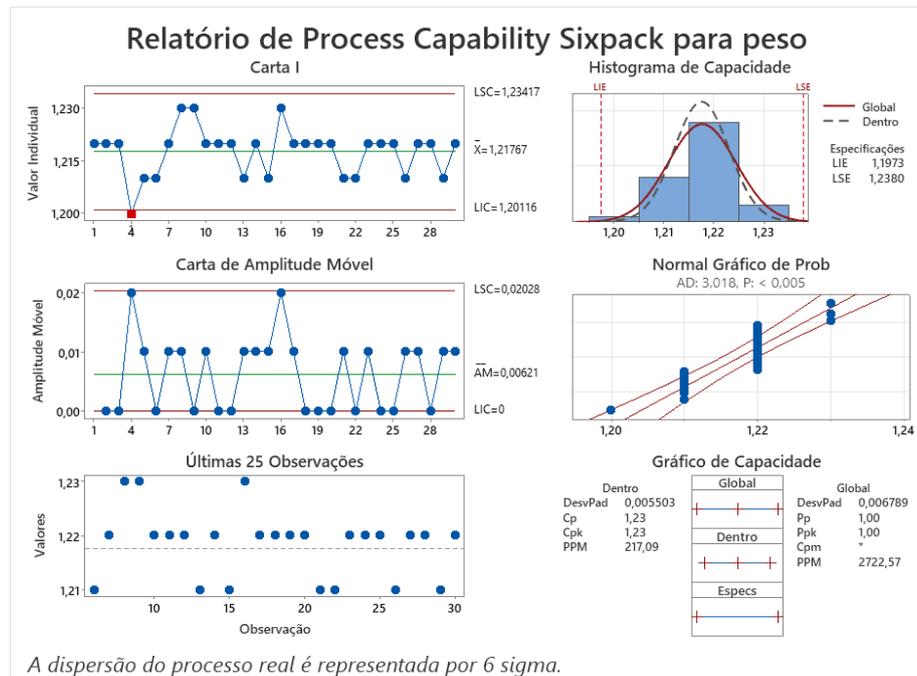
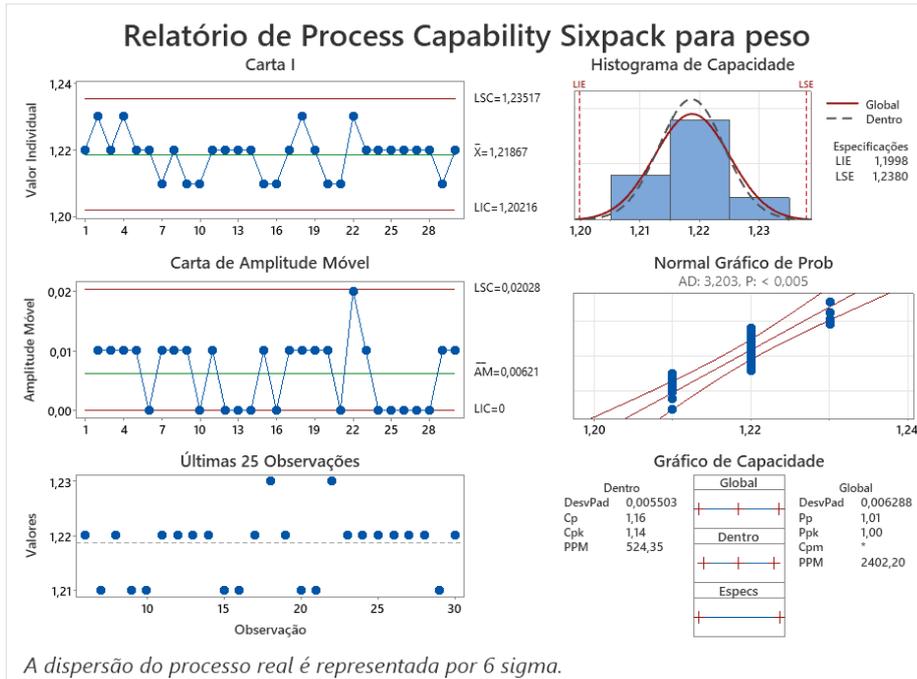
Carmel Olefins Ltd. POB 1468 Haifa 31014 Israel
 Website: <http://www.Carmel-Olefins.co.il>
 Email: techserv@coel.co.il

Date: January 2022

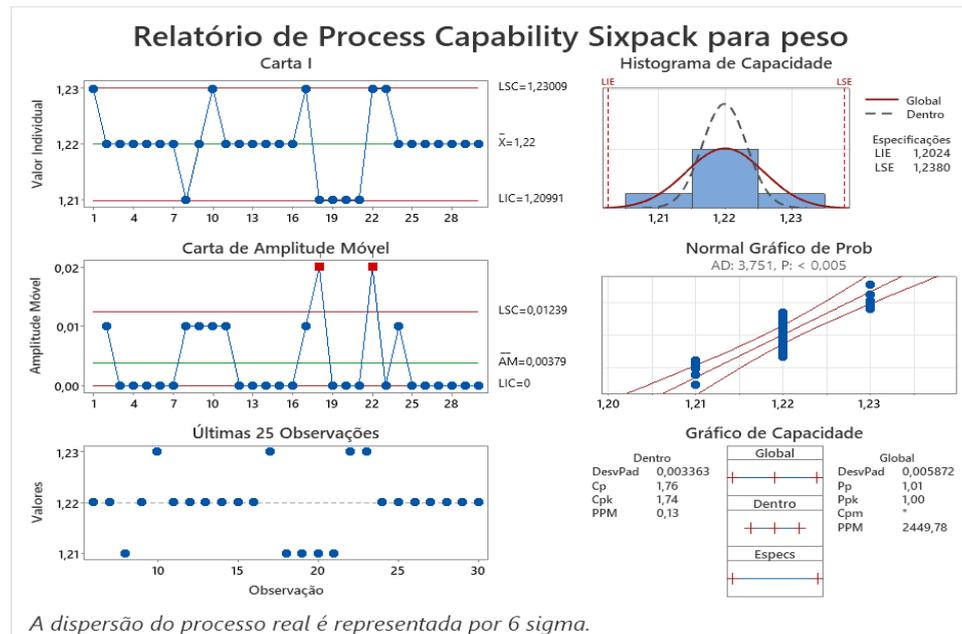
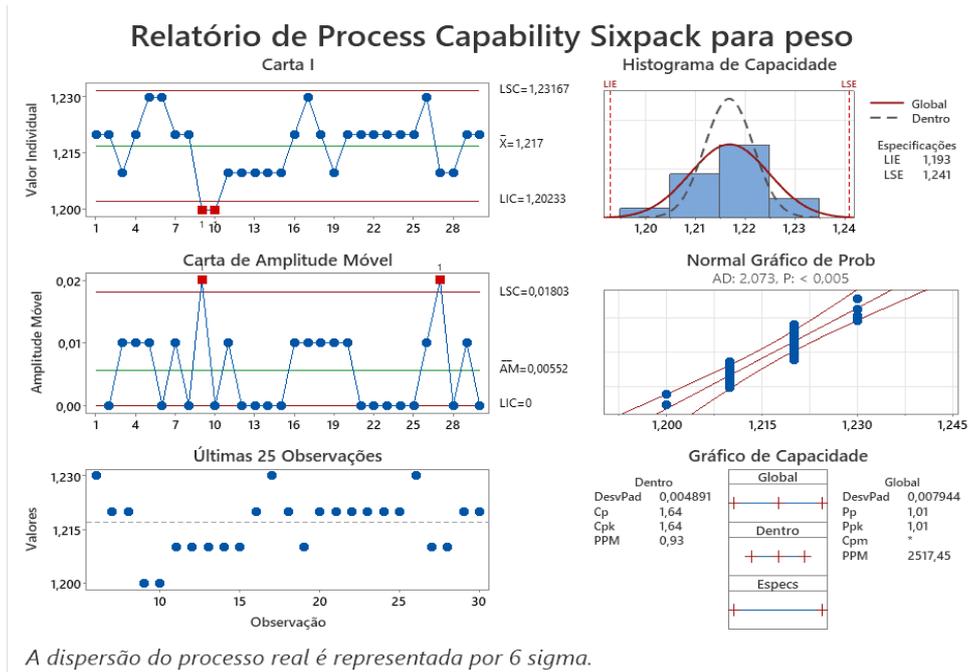
The information contained herein is to our knowledge accurate and reliable as of the date of publication. Carmel Olefins recommends its customers to review both the manufacturing processes and applications of Carmel Olefins products to ensure, that the products are not used for purposes they are not intended or tested for. Carmel Olefins extends no warranties and makes no representations as to the accuracy or completeness of the information contained herein and assumes no responsibility regarding the consequences of its use or for any printing errors. Our products are intended for sale to industrial and commercial customers. Data in this document relates only to the specific product and may not be valid for any combination of this product with other materials. It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy himself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is responsible for its employees' safety and the appropriate, safe and legal use, processing, handling and disposing of our products and packaging. Carmel Olefins shall not be liable for any consequential, incidental or indirect damages resulting from this statement or its use.

ANEXO II- Constantes para cartas de control

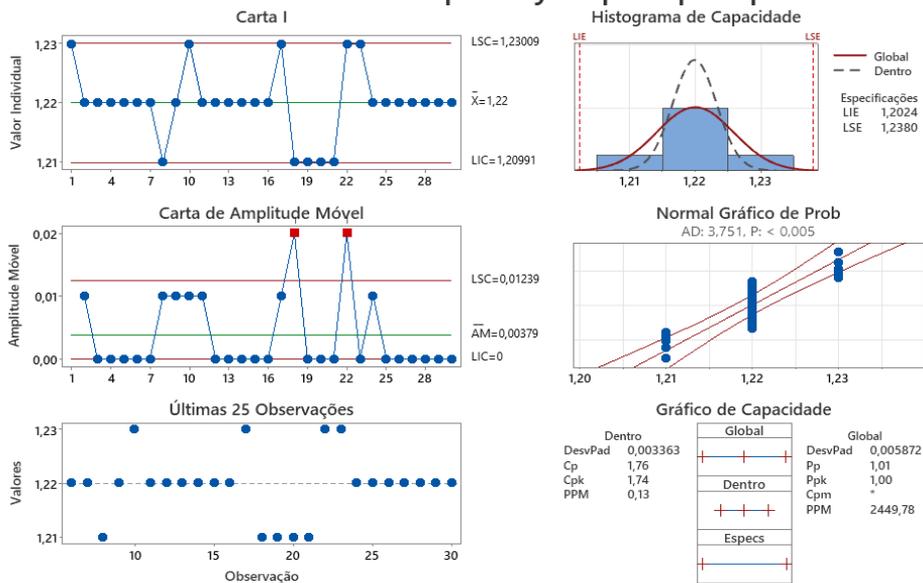
n ▲	d2 †	d3 †	A2 †	D3 †	D4 †
2	1.1284	0.8525	1.8800	0.0000	3.2665
3	1.6926	0.8884	1.0233	0.0000	2.5746
4	2.0588	0.8798	0.7286	0.0000	2.2821
5	2.3259	0.8641	0.5768	0.0000	2.1145
6	2.5344	0.8480	0.4832	0.0000	2.0038
7	2.7044	0.8332	0.4193	0.0757	1.9243
8	2.8472	0.8198	0.3725	0.1362	1.8638
9	2.9700	0.8078	0.3367	0.1840	1.8160
10	3.0775	0.7971	0.3083	0.2230	1.7770
11	3.1729	0.7873	0.2851	0.2556	1.7444
12	3.2585	0.7785	0.2658	0.2833	1.7167
13	3.3360	0.7704	0.2494	0.3072	1.6928
14	3.4068	0.7630	0.2354	0.3281	1.6719
15	3.4718	0.7562	0.2231	0.3466	1.6534
16	3.5320	0.7499	0.2123	0.3630	1.6370
17	3.5879	0.7441	0.2028	0.3779	1.6221
18	3.6401	0.7386	0.1943	0.3913	1.6087
19	3.6890	0.7335	0.1866	0.4035	1.5965
20	3.7349	0.7287	0.1796	0.4147	1.5853
21	3.7783	0.7242	0.1733	0.4250	1.5750
22	3.8194	0.7199	0.1675	0.4345	1.5655
23	3.8583	0.7159	0.1621	0.4434	1.5566
24	3.8953	0.7121	0.1572	0.4516	1.5484
25	3.9306	0.7084	0.1526	0.4593	1.5407
26	3.9643	0.7050	0.1484	0.4665	1.5335
27	3.9965	0.7017	0.1445	0.4733	1.5267
28	4.0274	0.6986	0.1408	0.4797	1.5203
29	4.0570	0.6955	0.1373	0.4857	1.5143
30	4.0855	0.6927	0.1341	0.4914	1.5086



Dia 2- 10h, 12h, 14h, 16h

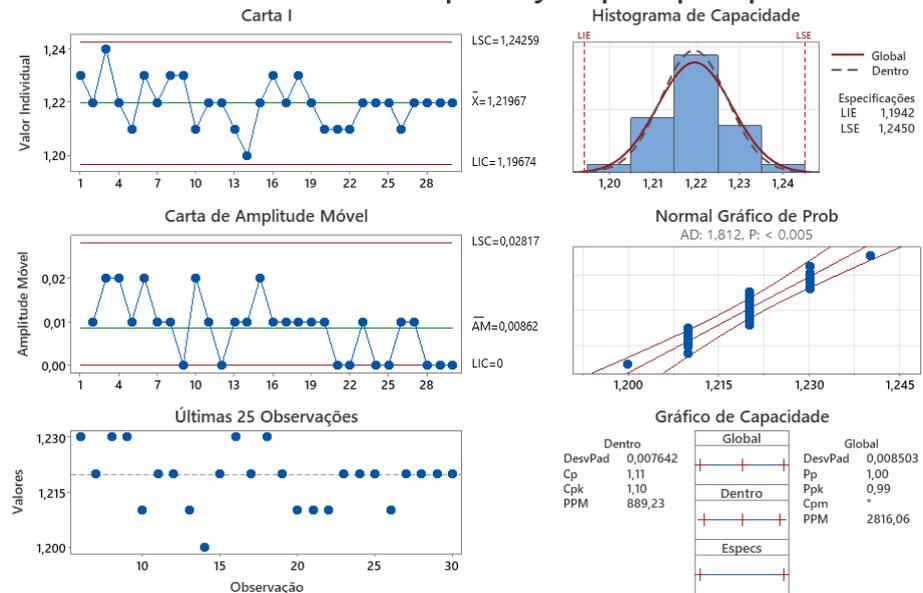


Relatório de Process Capability Sixpack para peso



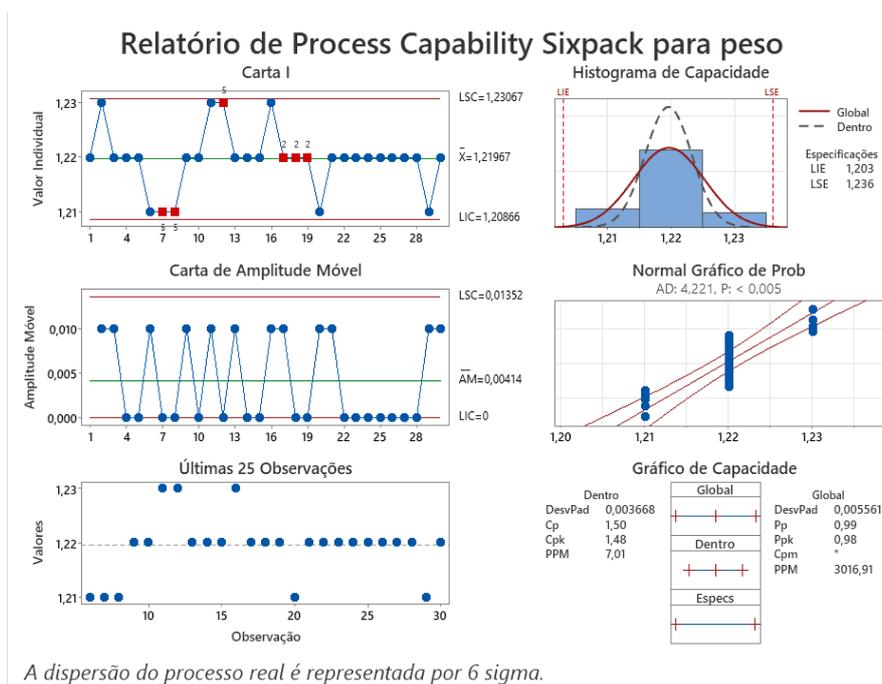
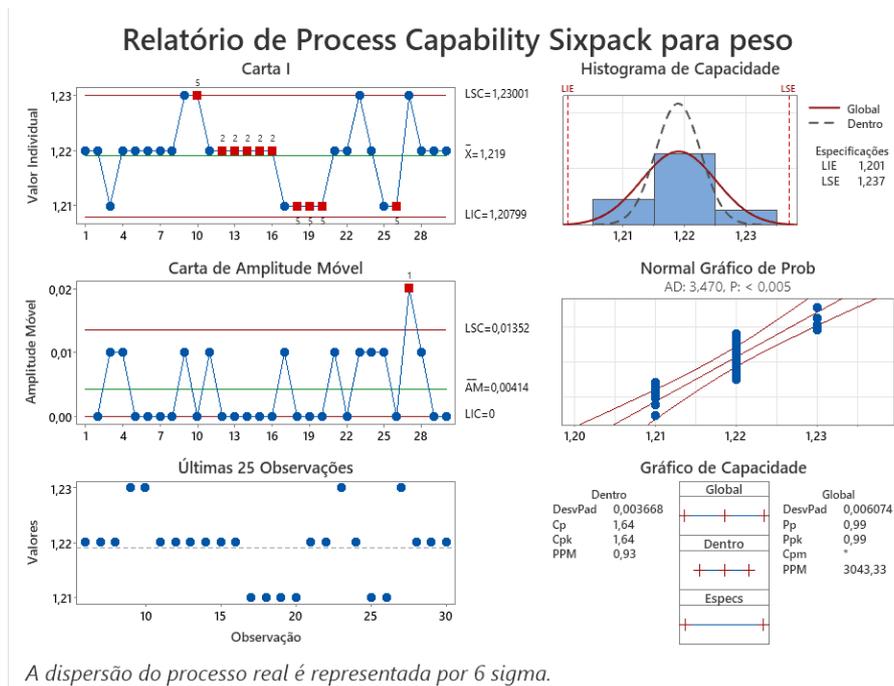
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Relatório de Process Capability Sixpack para peso

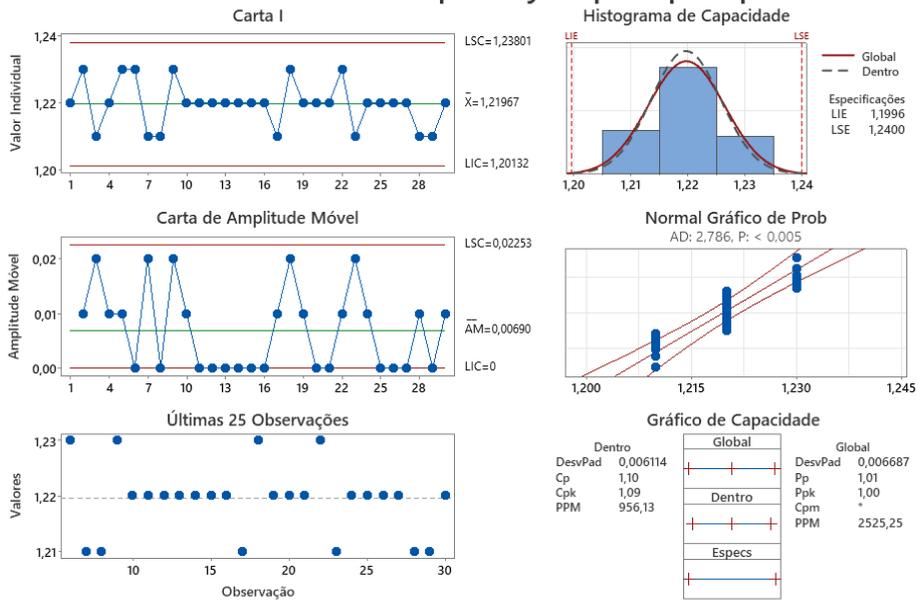


A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Dia 3- 10h, 12h, 14h, 16h

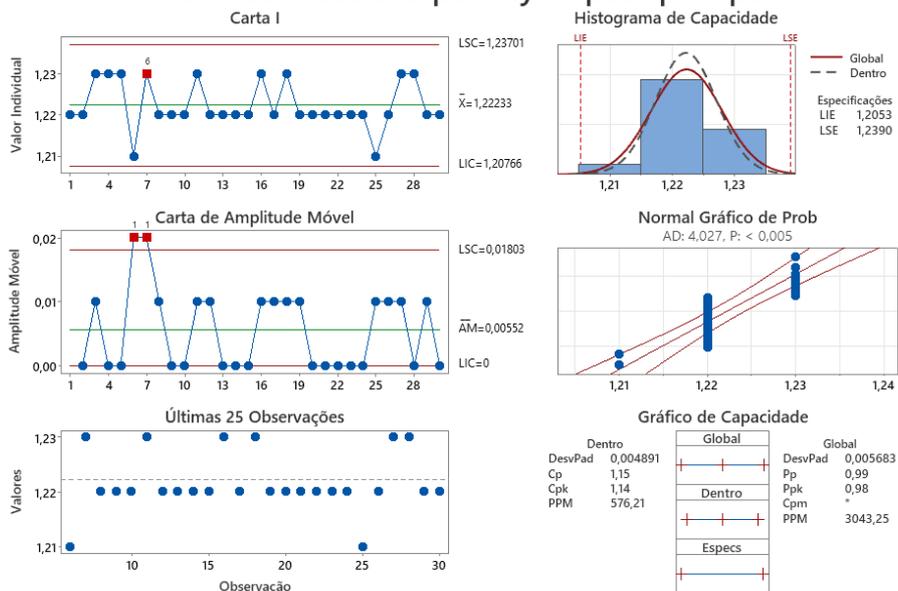


Relatório de Process Capability Sixpack para peso



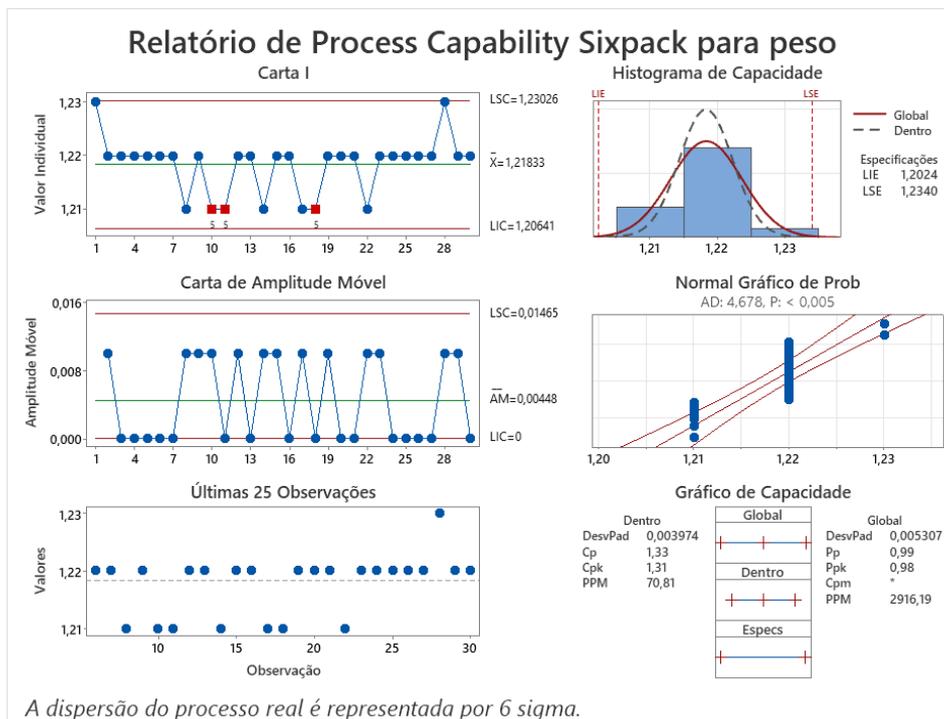
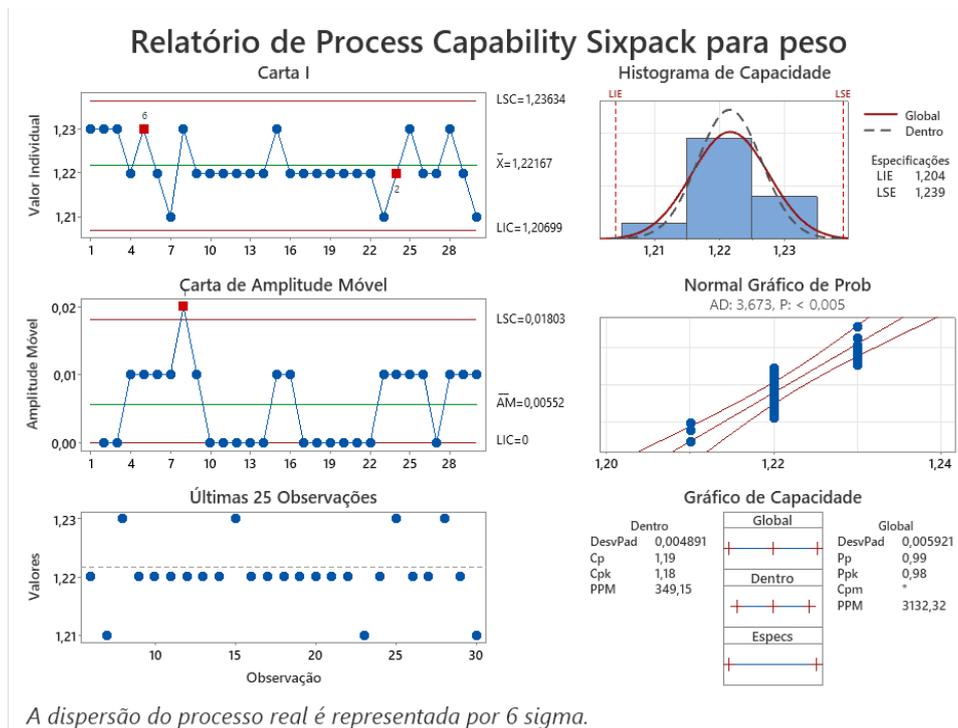
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Relatório de Process Capability Sixpack para peso

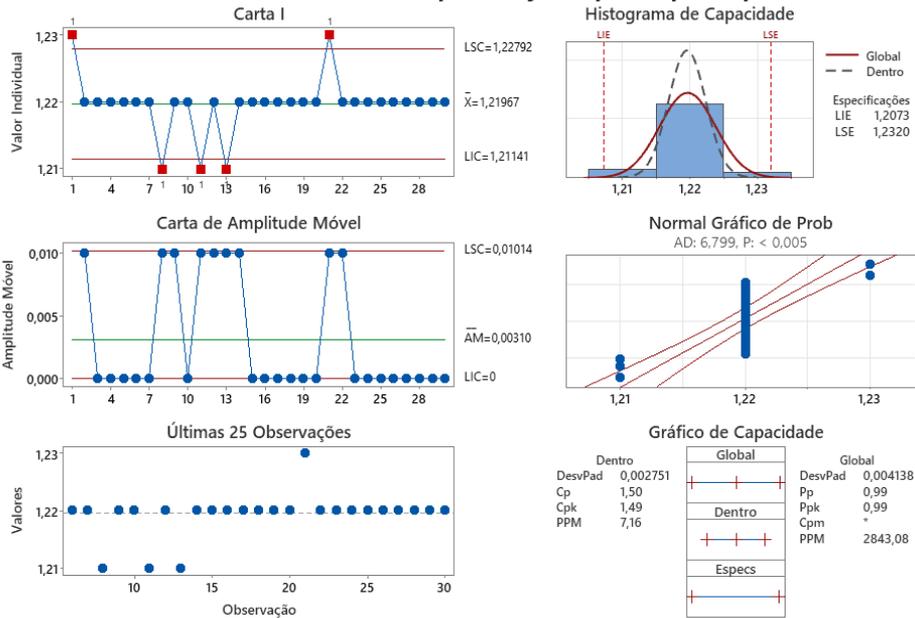


A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Dia 4- 10h, 12h, 14h, 16h

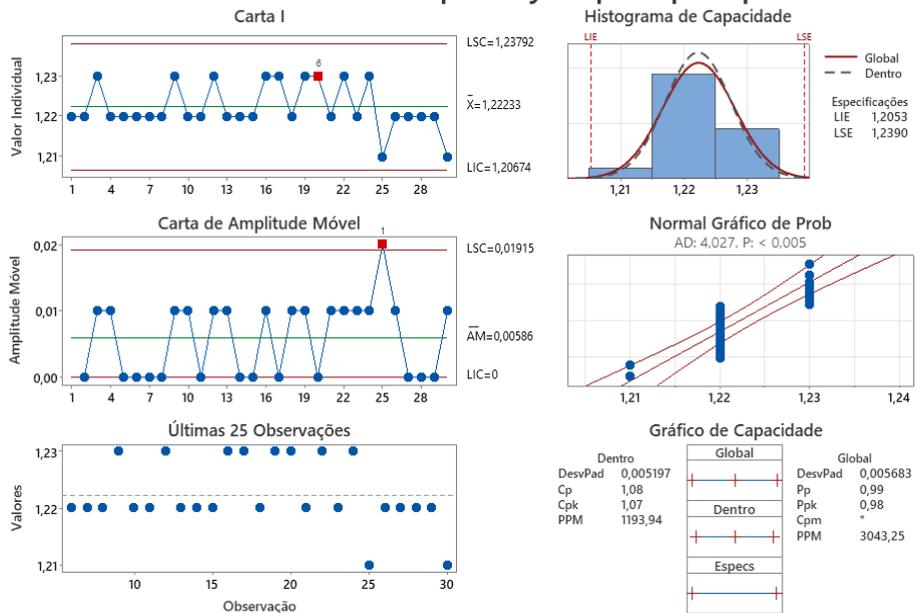


Relatório de Process Capability Sixpack para peso



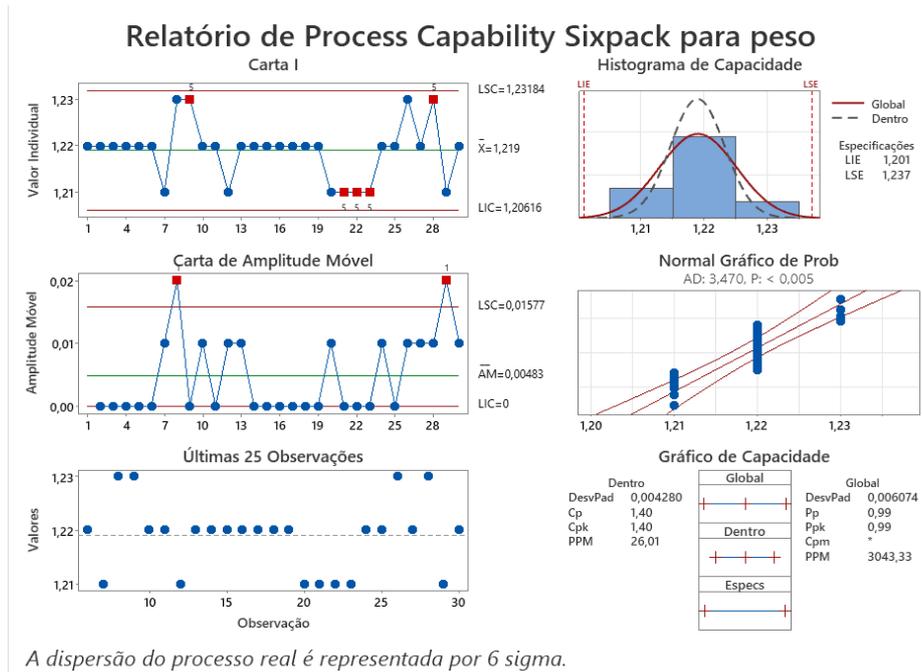
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Relatório de Process Capability Sixpack para peso

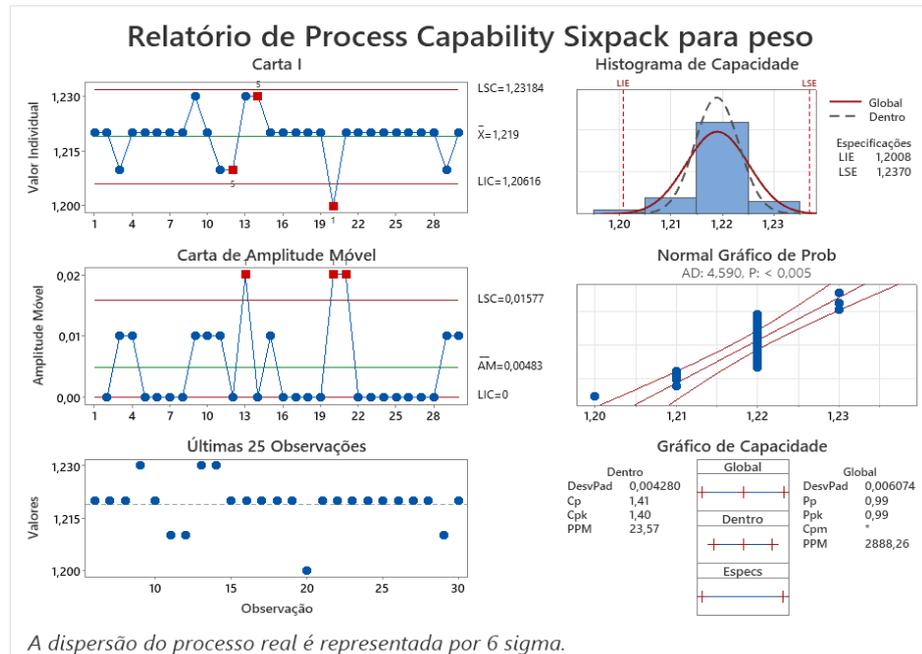


A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

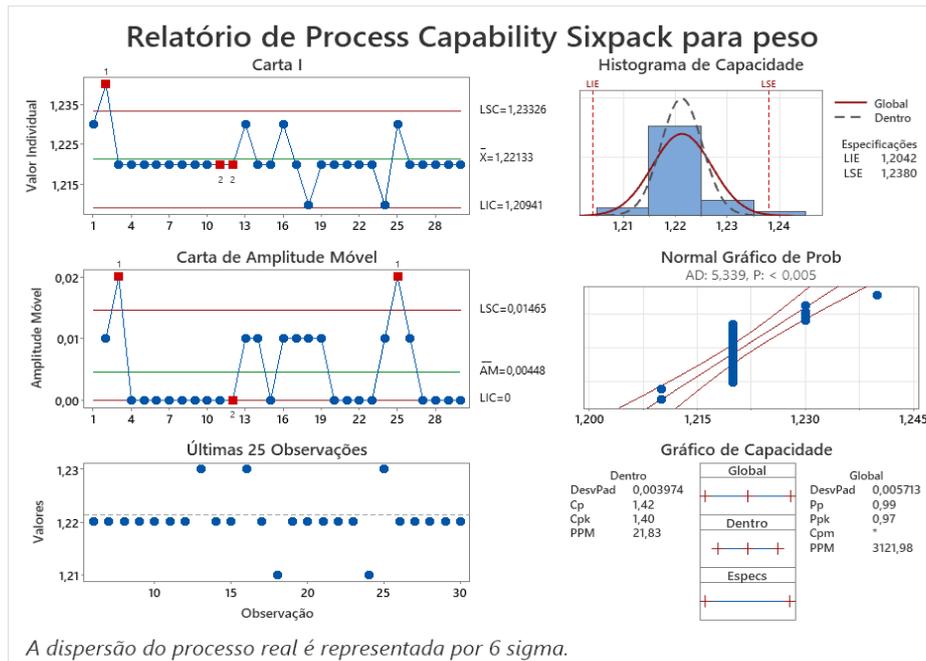
Dia 5- 10h, 12h, 14h



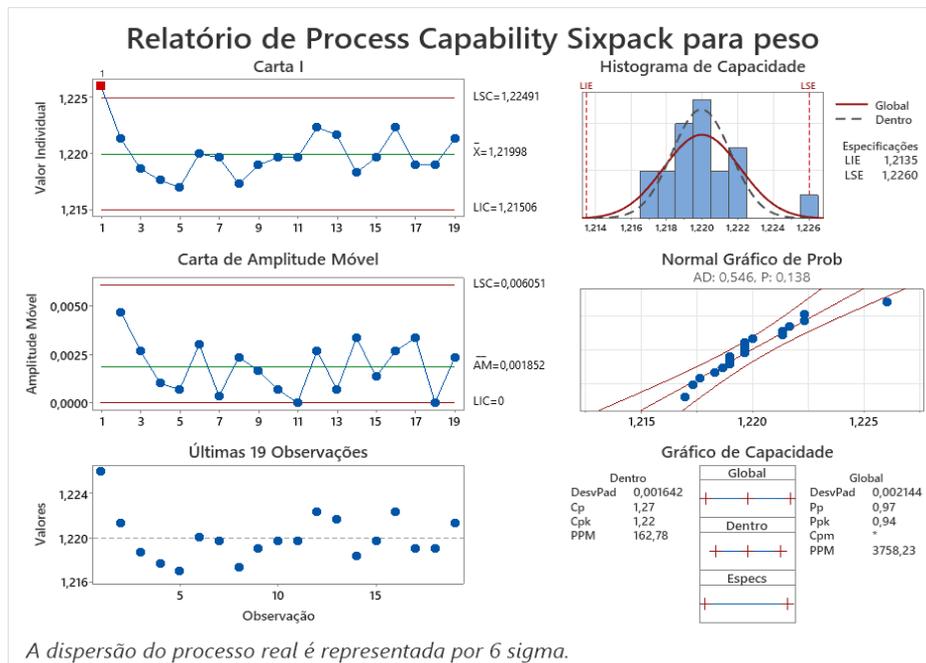
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.



A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

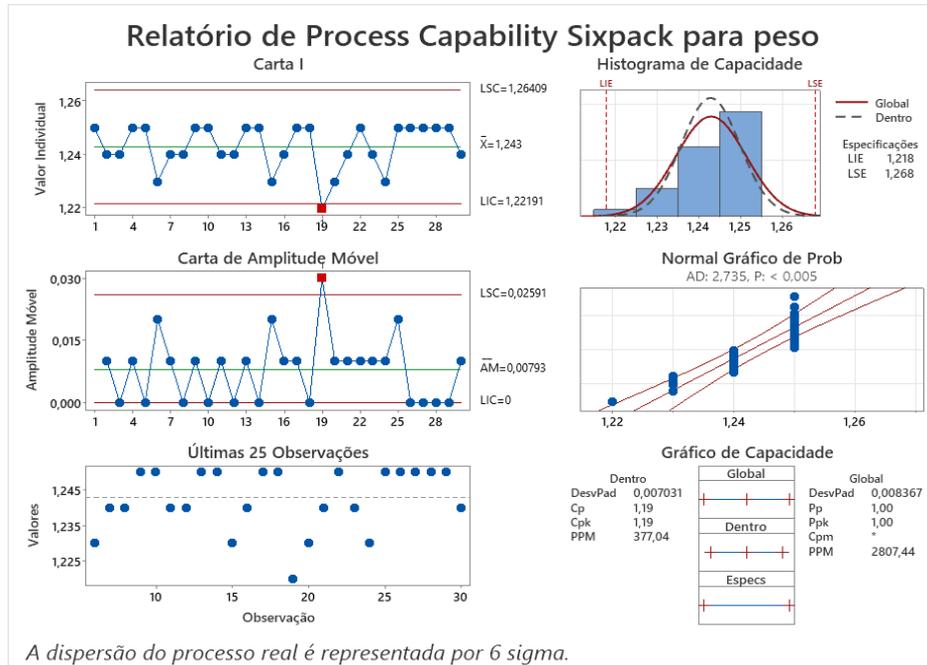
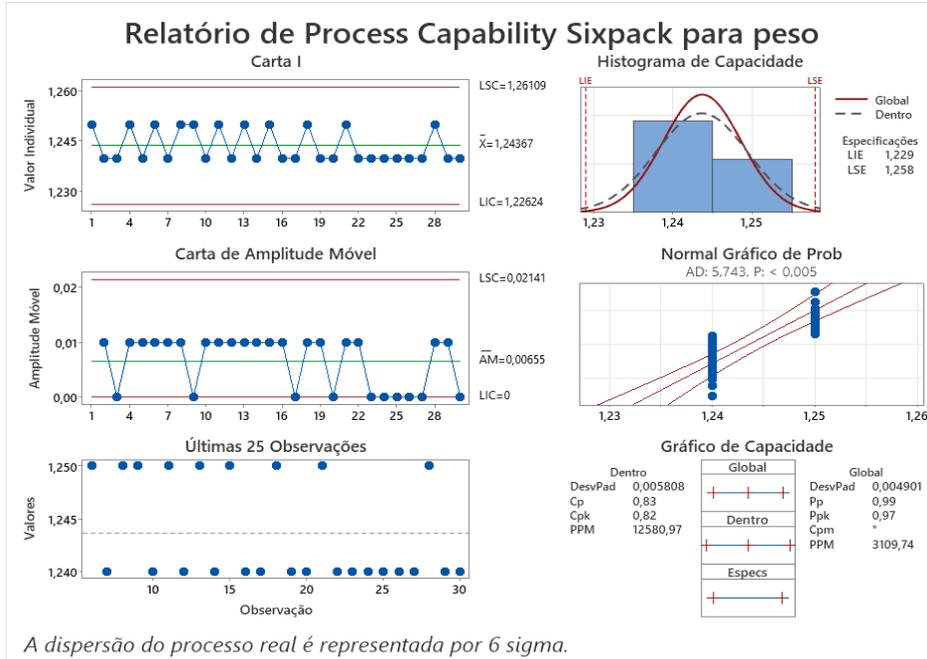


Cartas das Médias e Amplitudes

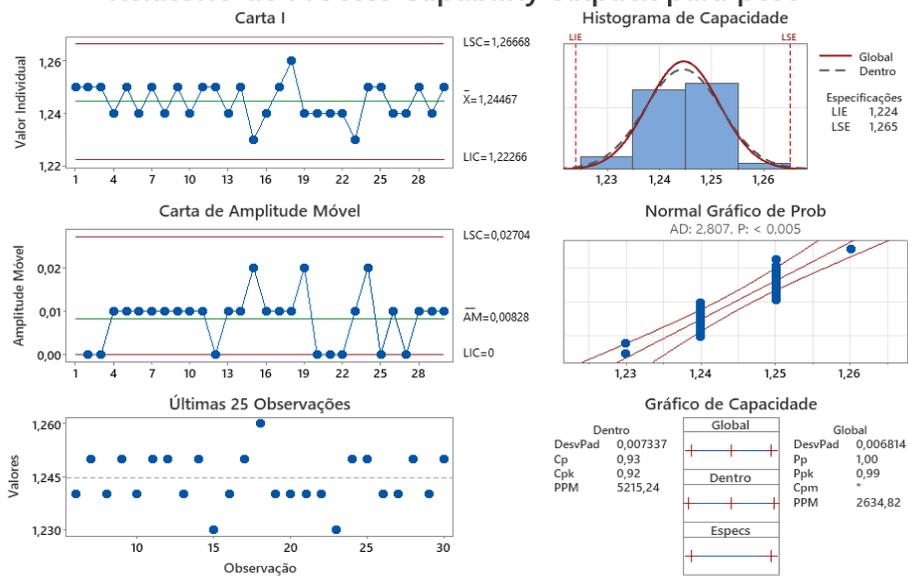


ANEXO IV- Análises estatísticas pós- *scientific molding*

Dia 1- 10h, 12h, 14h, 16h

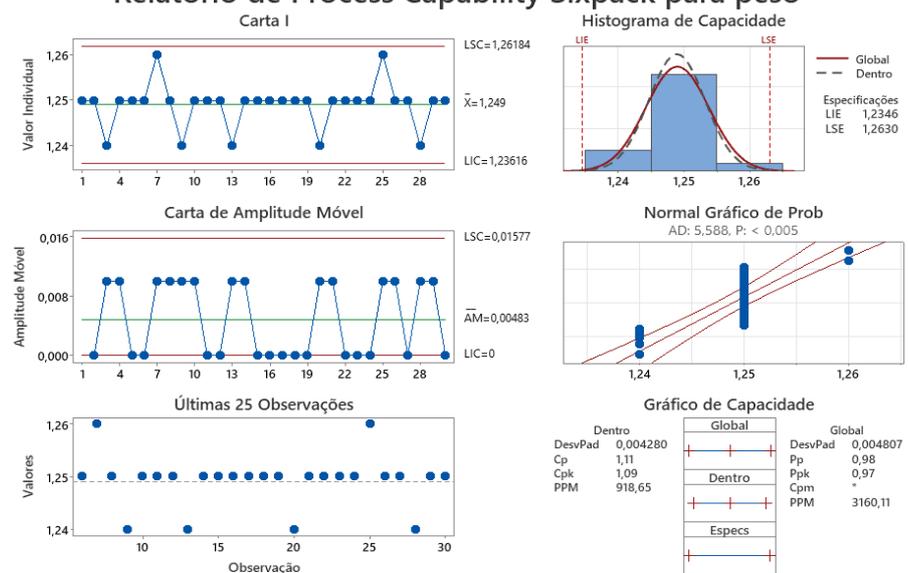


Relatório de Process Capability Sixpack para peso



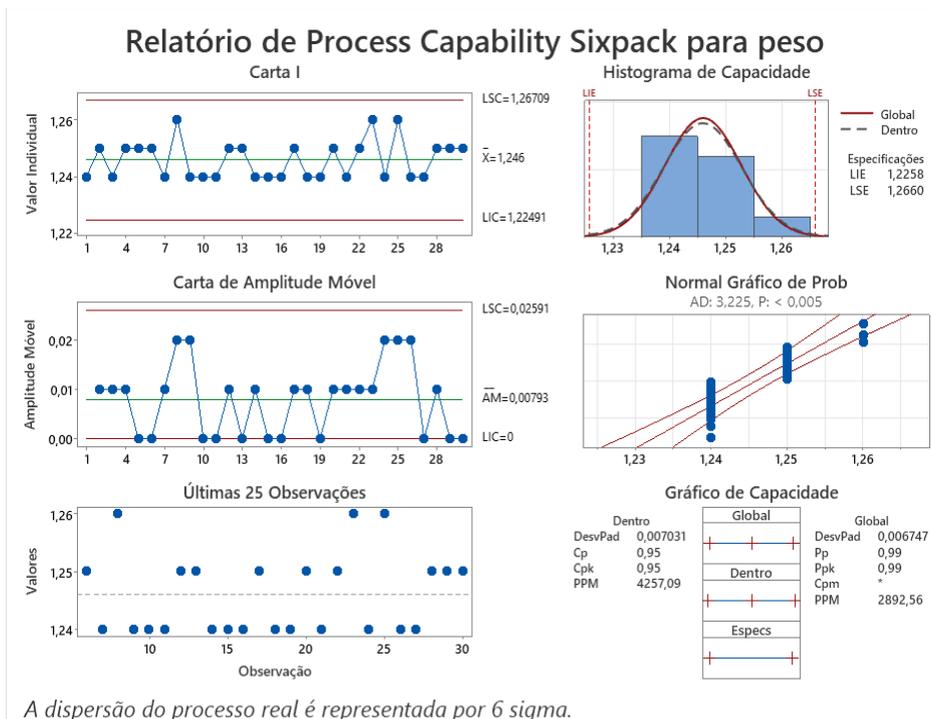
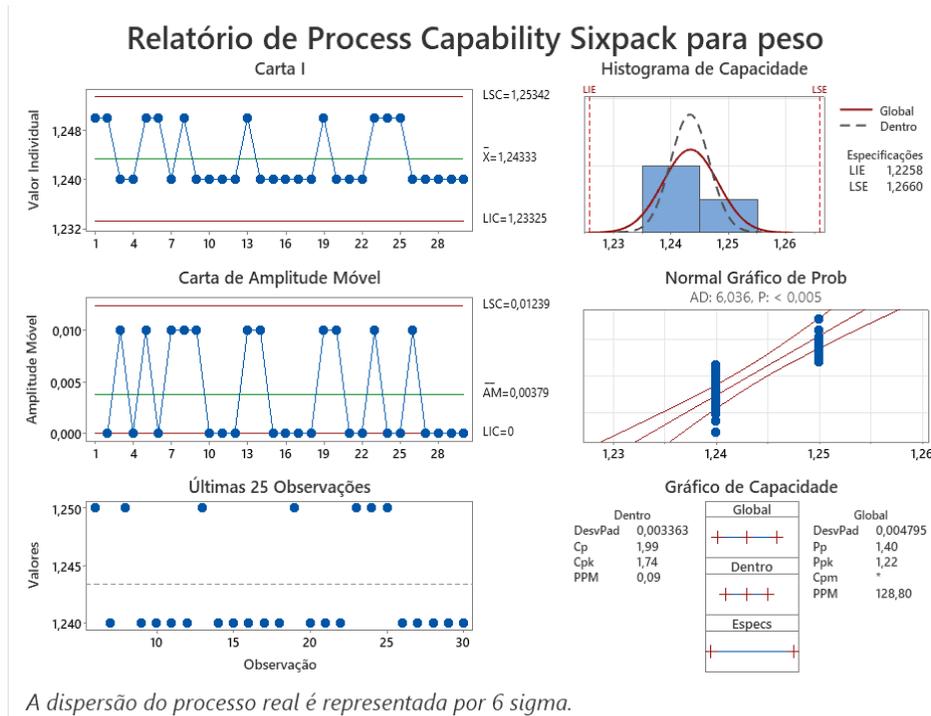
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

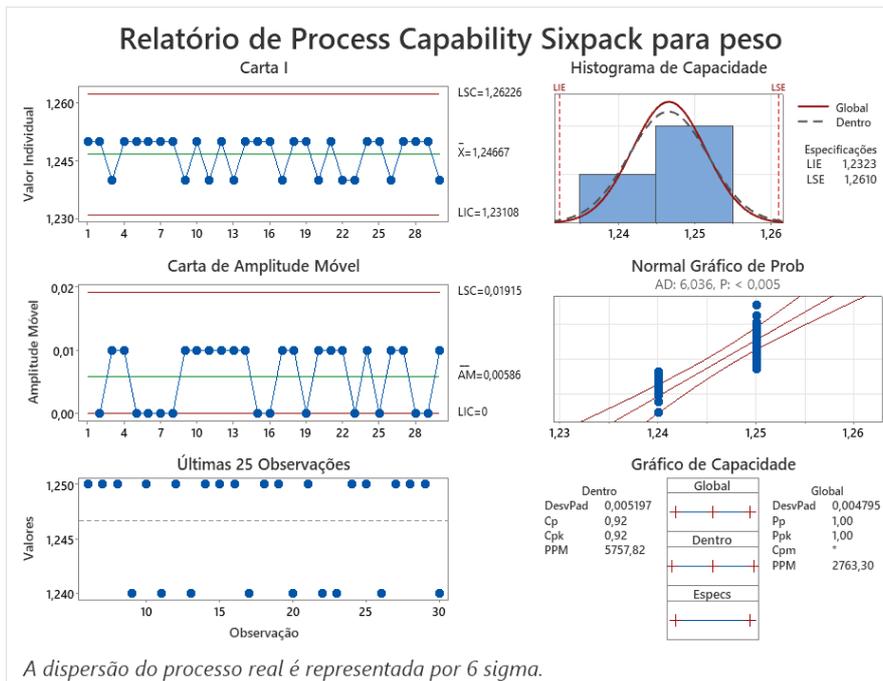
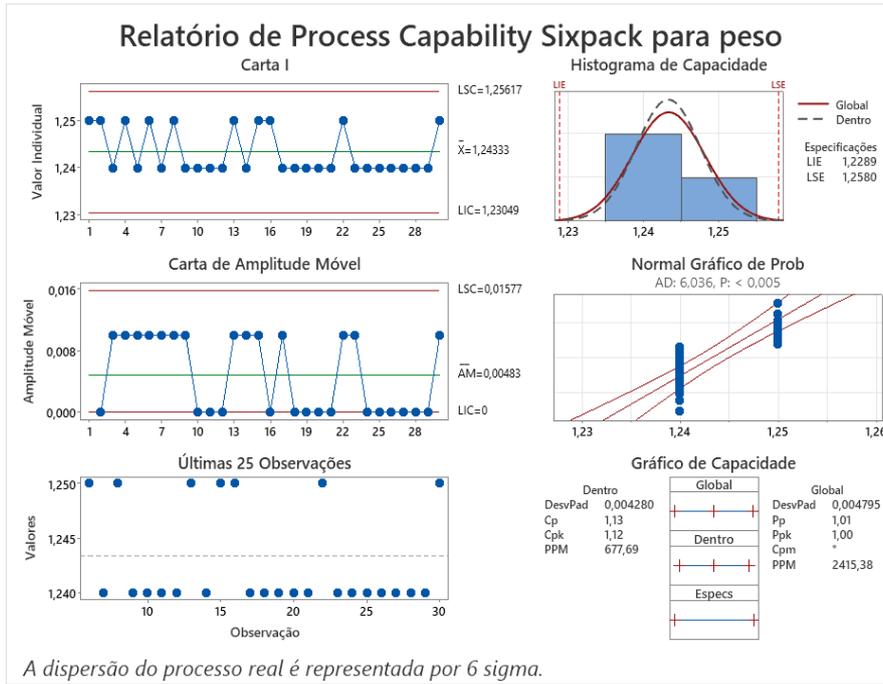
Relatório de Process Capability Sixpack para peso



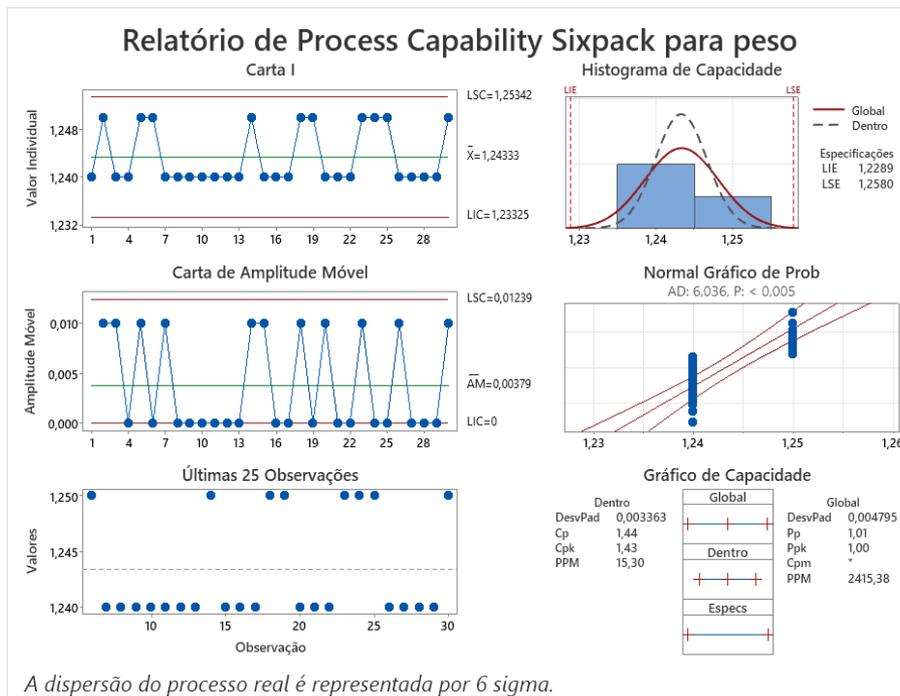
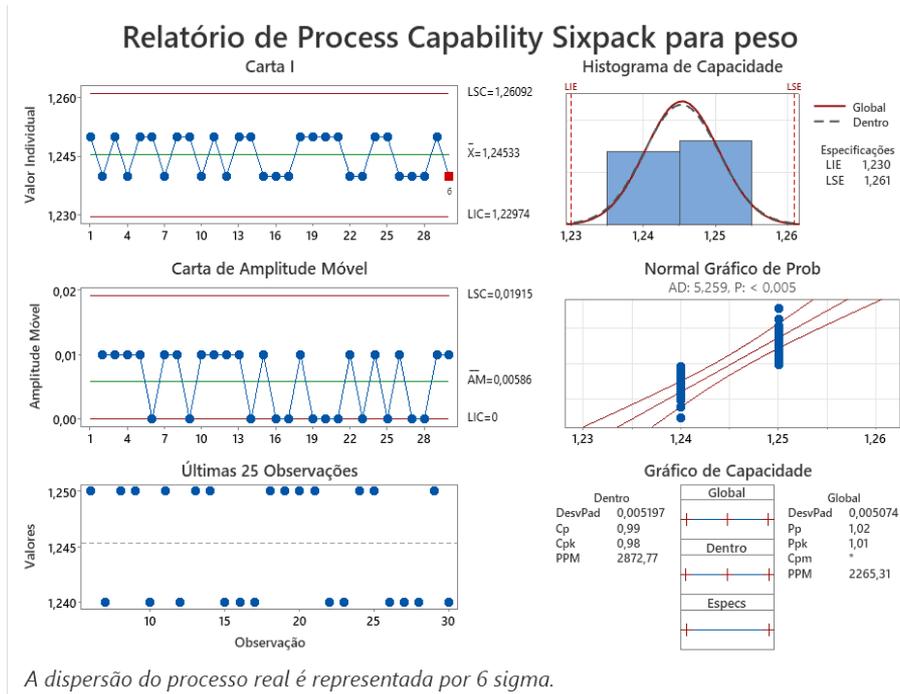
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Dia 2- 10h, 12h, 14h, 16h

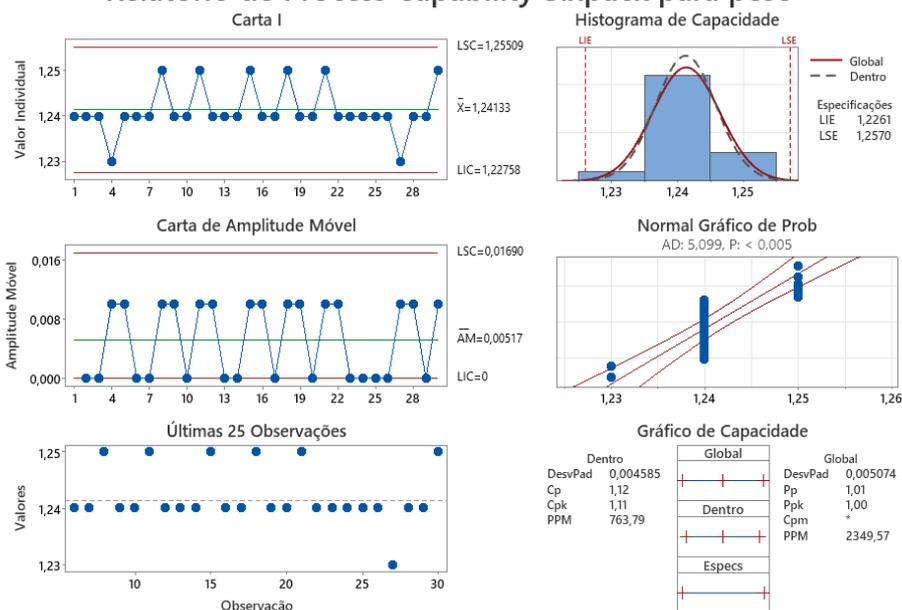




Dia 3- 10h, 12h, 14h, 16h

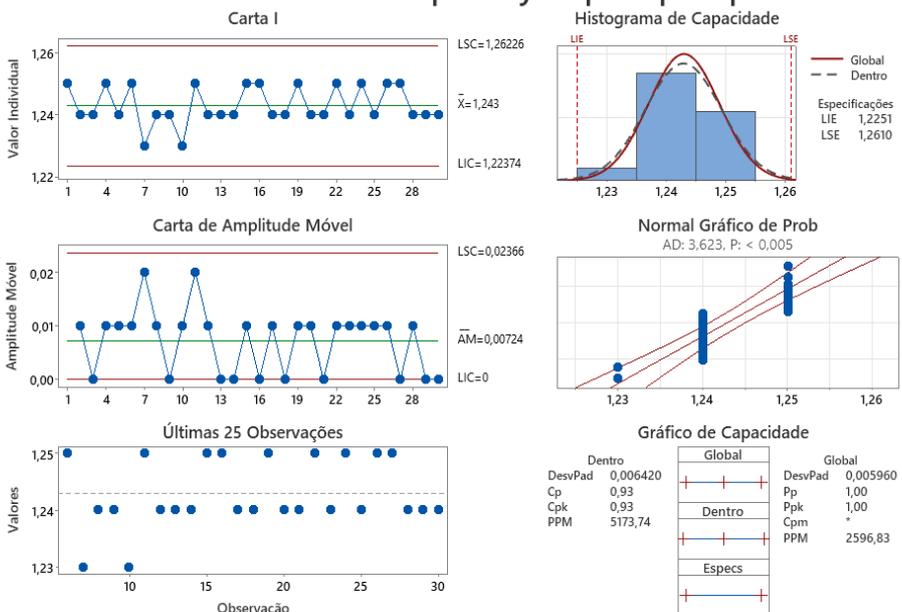


Relatório de Process Capability Sixpack para peso



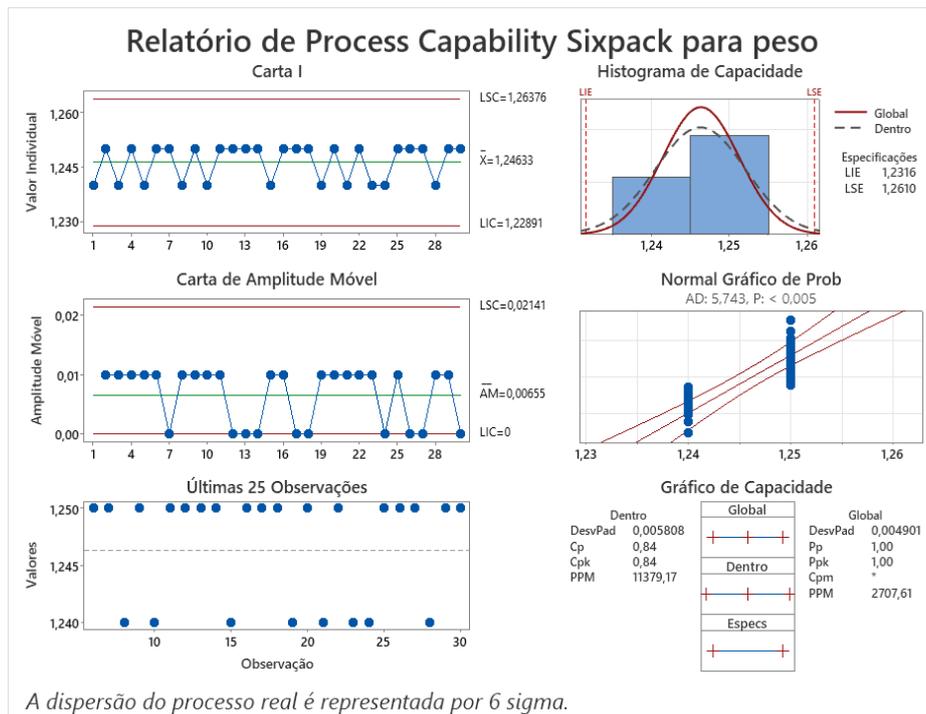
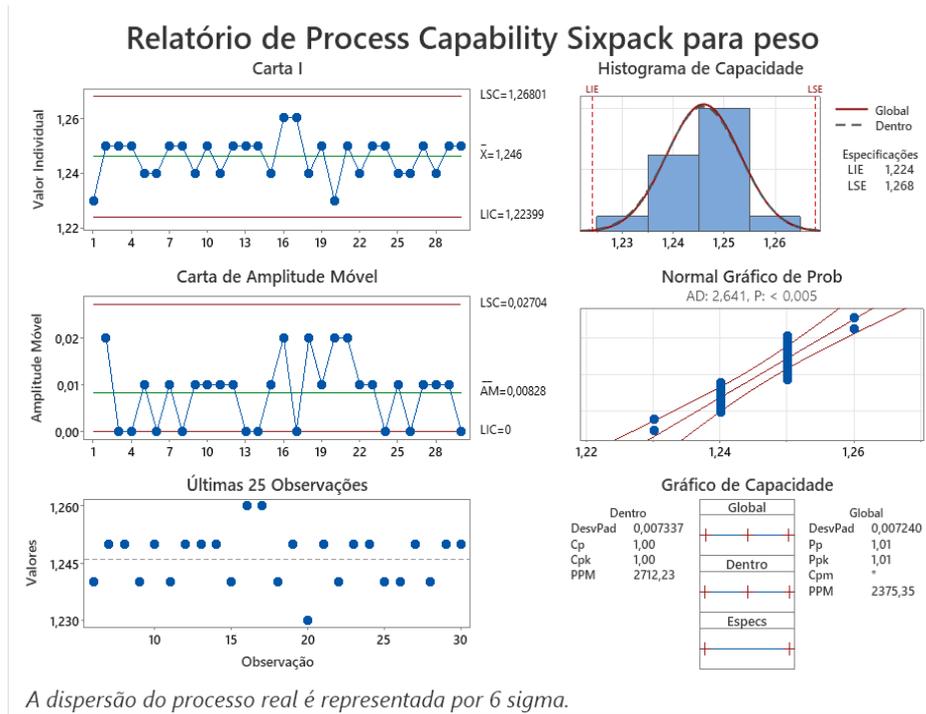
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Relatório de Process Capability Sixpack para peso

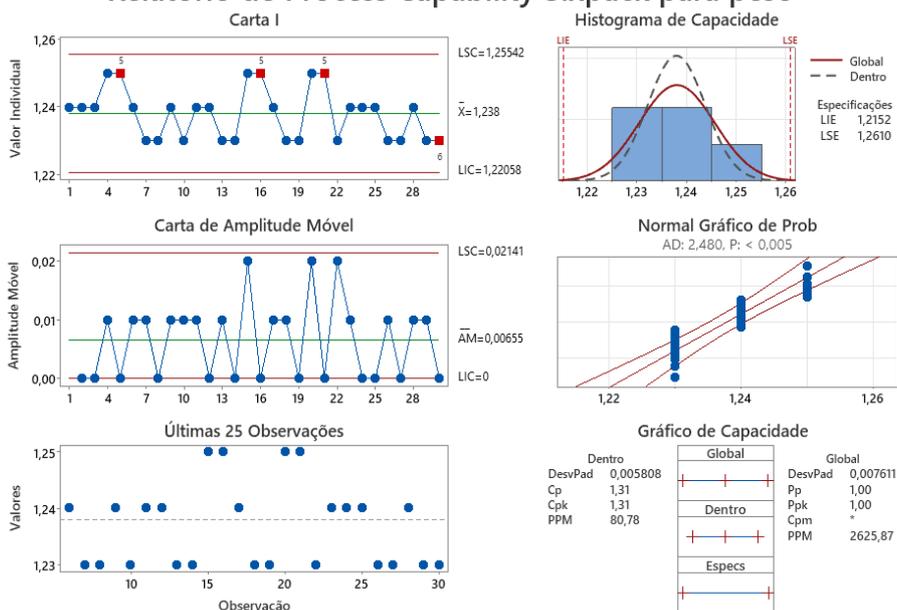


A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Dia 4- 10h, 12h, 14h, 16h

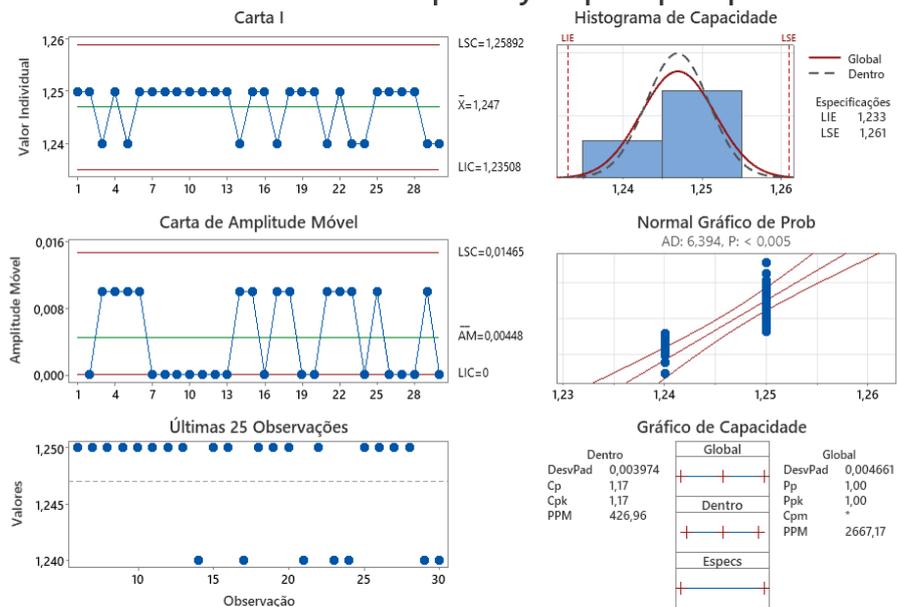


Relatório de Process Capability Sixpack para peso



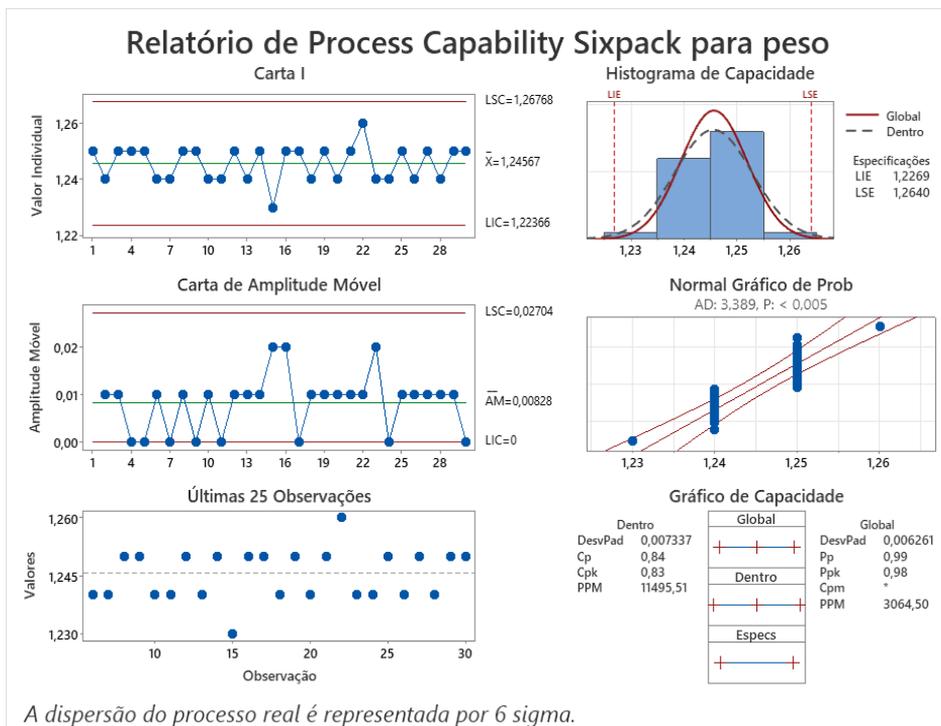
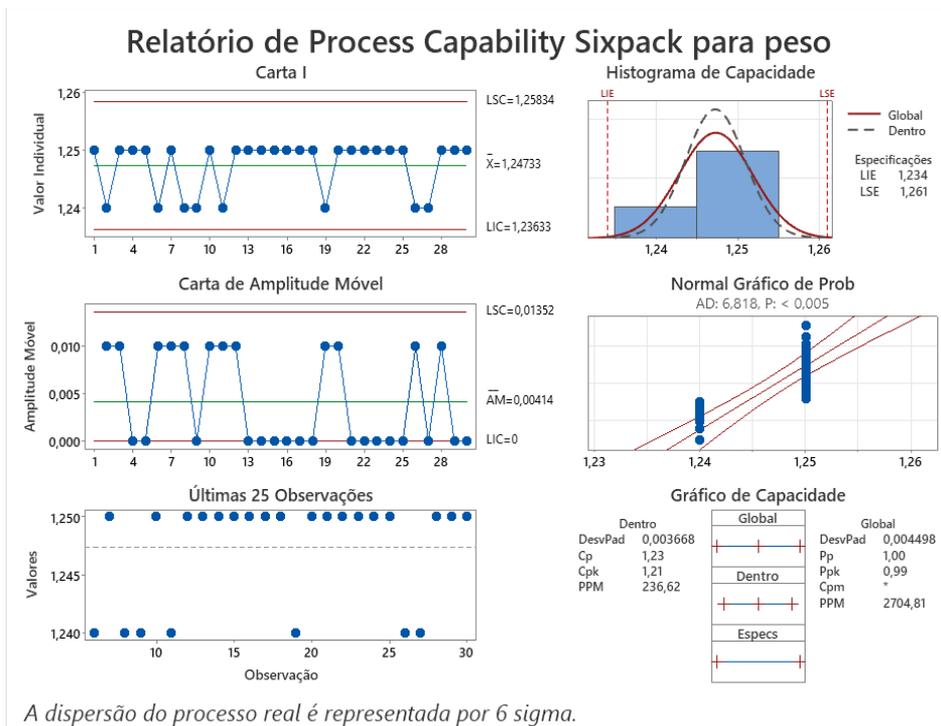
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

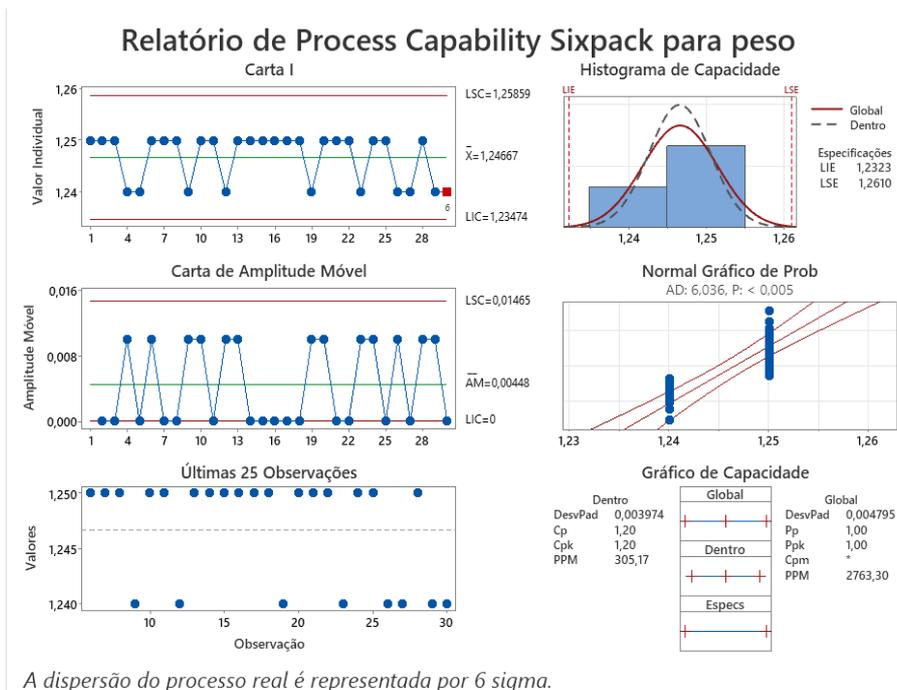
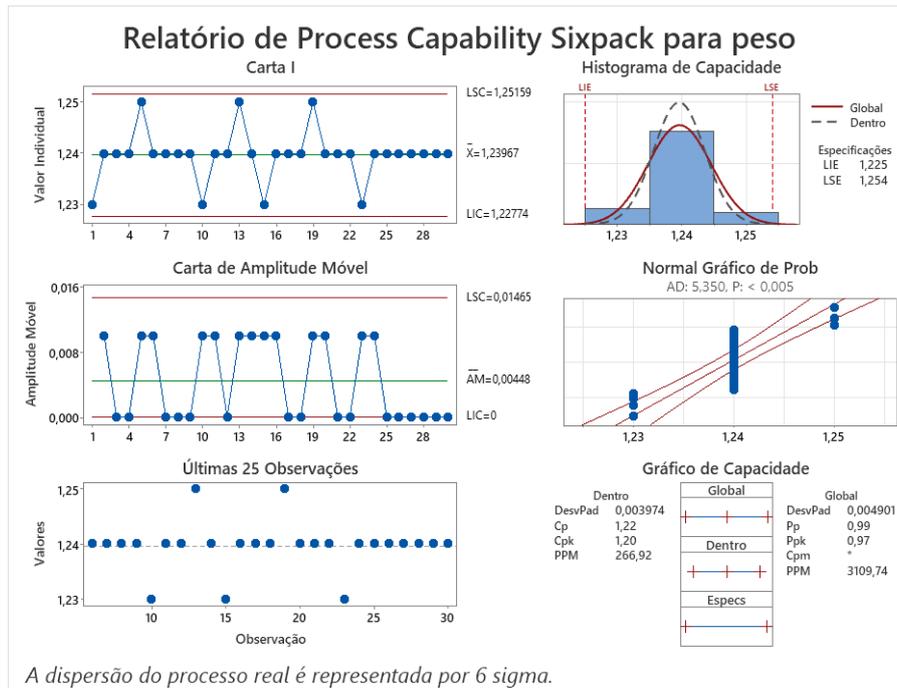
Relatório de Process Capability Sixpack para peso



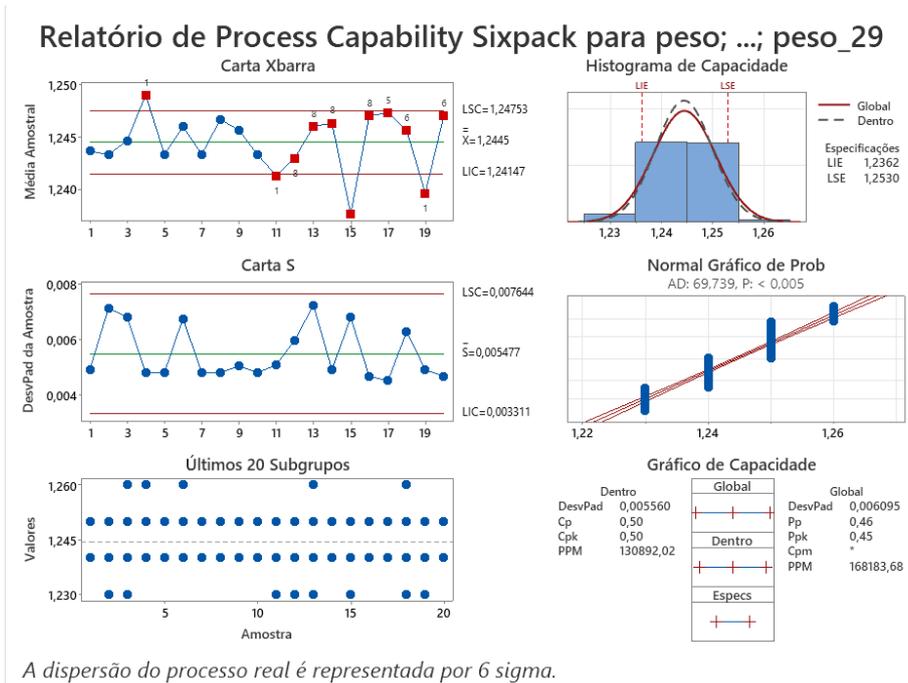
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Dia 5- 10h, 12h, 14h, 16h





Cartas das Médias e Amplitudes



ANEXO V- Máquina de injeção

