

Optimização do processo de fabrico do vidro oco

Correlação de variáveis processuais no best day



Anastasiya Zorina

Dissertação de Mestrado para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Orientadores:

Orientadora: Professora Doutora Maria Clara Henriques Baptista Gonçalves

Co-Orientador: Engenheiro Fernando Coelho Mourão Bianchi Aguiar

Júri:

Presidente: João Carlos Moura Bordado

Orientador: Professora Doutora Maria Clara Henriques Baptista Gonçalves

Vogal: Professora Doutora Isabel Margarida Salvado

Junho 2018

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero demonstrar a minha gratidão à *BA Glass*, pela oportunidade dada em participar neste projeto, que permitiu consolidar diversas matérias adquiridas ao longo do curso. Reconheço que sem a ajuda do meu co-orientador, Engenheiro Fernando Aguiar, a realização deste trabalho não seria possível. Agradeço pela sua paciência, disponibilidade e sobretudo pela constante motivação.

Quero também prestar uma homenagem ao Diogo Simões, ao Hugo Mestre, ao Carlos Gomes, ao Engenheiro Filipe Pereira e à Engenheira Cláudia Travassos por me esclarecerem todas as dúvidas, a qualquer hora, do processo fabril envolvente.

Um especial obrigada devo à minha orientadora do IST, Doutora Clara Gonçalves, por me ter guiado nesta dissertação, pela disponibilidade, amabilidade, simpatia e positivismo.

Quero agradecer também à Doutora Conceição Amado, pertencente ao departamento de Matemática do IST, que se disponibilizou em me ajudar numa parte fulcral deste projecto, que é a análise estatística. Sem a sua ajuda esta realização de dissertação não seria de todo possível.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos do curso, por nunca me deixarem desistir, por partilharem sorrisos e lágrimas, e sobretudo por terem acreditado em mim quando eu própria duvidei.

Obrigada à todas as minhas amigas de longa data (Rita, Márcia, Joana Miguel, Joana Tomé e Sara) fora da comunidade do IST, que sempre me fizeram acreditar que poderia ir mais além e que o fim desta meta estava mais perto do que nunca.

Um enorme obrigada ao Ricardo Dias, companheiro e parceiro, pela paciência, pelo cuidado, pela motivação, pelo amor e pela amizade demonstrados ao longo destes anos.

Por fim, dedico esta dissertação aos meus pais e avó, que sempre me desafiaram em dar mais de mim e estar sempre pronta para qualquer desafio lançado pela vida. Sem vocês, esta dissertação, não teria o mesmo sentido.

Resumo

A presente dissertação de Mestrado surge como resposta a um desafio proposto pela fábrica de vidro de embalagem *BA Glass* - a implementação do projecto *Best Day* numa linha de produção. O projecto *Best Day* visa monitorizar, em tempo real, todas as variáveis processuais numa linha de produção seleccionada e registar todos os parâmetros de produto, por forma a caracterizar o *Melhor Dia de Fabrico* para um artigo em estudo. O *Melhor Dia de Fabrico (Best Day)* de um dado artigo corresponde ao dia em que se registou a maior produção, com ausência de defeitos críticos e de reclamações por parte do cliente (registo *a posteriori*).

Neste projeto procuraram-se estabelecer as variáveis do processo que exigem um controlo acrescido face às restantes variáveis, com o propósito de obter uma produção mais eficiente. Para cumprir com este objectivo é feito um estudo estatístico no qual se estabelecem correlações lineares entre as variáveis explicativas e as variáveis resposta de interesse, seguida da modelação das mesmas de modo a efetuar uma inferência estatística através do uso do *SPSS*.

Concluiu-se que as variáveis relacionadas com o forno, nomeadamente algumas temperaturas, como T1102 e T1203, e também o seu caudal de ar/gás utilizados possuem correlações de *Pearson* fortes a moderadas com as variáveis resposta. O mesmo verifica-se com as variáveis da fabricação, relacionadas com a forma de gota, nomeadamente parâmetros que dizem respeito à punção. A formação de uma gota perfeita é a condição primária para se atingir uma embalagem de vidro conforme.

Palavras-chave: Optimização, *Melhor dia de fabrico*, produção útil, defeitos críticos, correlações de *Pearson*

Abstract

This Master's dissertation emerges as a response to a challenge posed by the *BA glass* packaging plant - the implementation of the *Best Day* project in a production line. The *Best Day* project aims to monitor, in real time, all the process variables in a selected production line and to register all the product parameters, to characterize the *Best Manufacturing Day* for a study article. The *Best Manufacturing Day* of an article corresponds to the day when the highest production was recorded, with no critical defects and customer complaints (a *posteriori* registration).

In this project was tried to establish the process variables that require an increased control over the other variables, to obtain a more efficient production. To accomplish this objective, a statistical study is carried out in which linear correlations between the explanatory variables and the response variables of interest are established, followed by the modeling of the variables to make a statistical inference through the use of *SPSS*.

It was concluded that the variables related to the furnace, namely some temperatures, as well as the air /gas ratio used have strong to moderate *Pearson* correlations with the response variables. The same is true of manufacturing variables related to the shape of gout, namely parameters that pertain to plunger. The formation of a perfect gout is the primary condition for achieving a conformal glass container.

Key words: Optimization, Best Manufacturing Day, highest production, critical defects, *Pearson* correlations

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Estrutura do trabalho	2
1.4	Metodologia	2
1.5	Apresentação da empresa	3
2	Estado da arte	5
2.1	O vidro	5
2.2	Processo de fabrico de vidro de embalagem	6
2.2.1	Zona de armazenagem e ensilagem de matéria-prima	6
2.2.2	Zona da fusão.....	8
2.2.3	Zona da fabricação	9
2.2.4	Zona fria.....	12
2.3	Análise estatística do processo fabril de vidro de embalagem	12
3	Descrição das variáveis processuais de fabrico do vidro de embalagem	17
3.1	Variáveis resposta	17
3.2	Variáveis processuais recolhidas	18
3.2.1	Variáveis recolhidas do forno	18
3.2.2	Variáveis recolhidas da fabricação.....	21
3.2.3	Variáveis recolhidas da zona fria.....	24
3.2.4	Variáveis gerais do controlo do processo	24
4	Resultados.....	27
4.1	Análise exploratória das variáveis processuais.....	27
4.1.1	Análise exploratória da produção útil	28
4.1.2	Análise exploratória do KCR	36
4.1.3	Análise exploratória dos defeitos críticos	44
4.2	Escolha das variáveis para <i>input</i> no SPSS.....	52
4.3	Correlações das variáveis processuais com as variáveis resposta	55
4.3.1	Produção útil.....	55
4.3.2	KCR	59

4.3.3	Defeitos críticos	60
4.4	Validação das correlações obtidas.....	62
4.4.1	Produção útil.....	62
4.4.2	KCR	63
4.5	Modelação das variáveis resposta	64
4.5.1	Modelo de regressão linear	64
4.5.2	Modelo de regressão logística.....	68
4.6	<i>Best Day</i>	71
5	Conclusões e Recomendações.....	72
6	Referências bibliográficas	73
7	Anexos.....	76
7.1	Estudo da arte	76
7.1.1	Zona fria do processo de fabrico do vidro de embalagem	76
7.2	Descrição das variáveis processuais de fabrico de vidro de embalagem	76
7.2.1	Defeitos.....	76
7.3	Análise exploratória das variáveis processuais.....	78
7.3.1	Distribuição normal das variáveis processuais	78
7.3.2	Análise visual das variáveis processuais do Havana Club 0,7cL	88
7.4	Correlações das variáveis processuais com as variáveis resposta	88
7.5	Modelação das variáveis resposta	89
7.5.1	Verificação da variabilidade dos dados	89
7.5.2	Erros associados às variáveis resposta previstas.....	89

Lista de tabelas

Tabela 1 - Composição da matéria-prima utilizada para fabrico do vidro de embalagem, no forno em estudo. ..	7
Tabela 2 - Classificação da força entre os valores de correlação de Pearson.	13
Tabela 3 - Enumeração dos defeitos críticos reconhecidos na BA, Venda Nova (de acordo com a codificação antiga).	17
Tabela 4 - Variáveis não incluídas na análise estatística da garrafa de 4630S037 de 0,7 cL.	52
Tabela 5 - Variáveis incluídas na análise estatística da garrafa do 4630S037 de 0,7 cL.	53
Tabela 6 - Correlações de <i>Pearson</i> (<i>M- Moderada, F – Fraca, D-Desprezável</i>) obtidas entre as variáveis processuais e a produção útil do 4630S037 de 0,7cL.	58
Tabela 7 - Correlações de <i>Pearson</i> (<i>For- Forte, M – Moderada, F – Fraca, D- Desprezável</i>) obtidas entre as variáveis processuais e o KCR do 4630S037 de 0,7 cL.	60
Tabela 8 - Correlações de <i>Pearson</i> (<i>F – Fraca, D- Desprezável</i>) obtidas entre as variáveis processuais e os defeitos críticos categorizados do 4630S037 de 0,7cL.	60
Tabela 9 - Correlações de <i>Pearson</i> obtidas entre as variáveis processuais e a produção útil do 4930S037 de 1cL.	62
Tabela 10 - Correlações de <i>Pearson</i> obtidas entre as variáveis processuais e o KCR do 4930S037 de 1cL.	63
Tabela 11 - Previsão dos defeitos críticos do 4630S037 de 0,7 cL ao longo do fabrico de Março de 2018.	70
Tabela 12 - Verificação da distribuição das variáveis processuais no forno.	78
Tabela 13 - Verificação da distribuição das variáveis processuais da fabricação.	83
Tabela 14 - Verificação da distribuição das variáveis da zona fria.	86
Tabela 15 - Verificação da distribuição das variáveis resposta.	87
Tabela 16 - Erros relativos associados à previsão da produção útil da garrafa de 4630S037 de 0,7 cL ao longo do fabrico de Março de 2018.	89
Tabela 17 - Erros relativos associados à previsão do <i>KCR</i> da garrafa 4630S037 de 0,7 cL ao longo do fabrico de Março de 2018.	90

Lista de figuras

Figura 1 - Evolução da constituição da BA Glass ao longo do tempo [Adaptado [1]].	4
Figura 2 - Segmentação das vendas para diferentes mercados na BA Glass.	4
Figura 3 - Variação do volume específico em função da temperatura. [Adaptado de [3]]	5
Figura 4 - Fluxograma do processo do fabrico do vidro de embalagem. 1 - Composição; 2 - Fusão; 3 - Condicionamento térmico; 4 - Moldagem e TSQ; 5 - Recozimento; 6 - TSF; 7 - Inspeção; 8 - Embalagem. .	6
Figura 5 - Esquema do forno regenerativo.	9
Figura 6 - Perfil de temperaturas ao longo da transformação da matéria-prima sódico-silicosa em massa vítrea, no forno regenerativo [Adaptado de [9]].	9
Figura 7 - Fluxograma do vidro ao longo da zona de fabricação [Adaptado [11]].	10
Figura 8 - Forehearth da linha em estudo, no fabrico do artigo 4630S037 de 0,7cL.	10
Figura 9 - Mecanismo do feeder na queda da gota. [Adaptado [14]].	10
Figura 10 - Distribuição da gota de vidro.	10
Figura 11 - Processo de fabricação Soprado-Soprado.	11
Figura 12 - Processo de fabricação Prensado-Soprado.	11
Figura 13 - Aplicação do TSF na zona fria do processo fabril do vidro oco.	12
Figura 14 - Zonas de especificação da garrafa.	18
Figura 15 - Dados a recolher da zona do forno, em formato Excel.	19
Figura 16 - Temperaturas monitorizadas de diferentes secções do forno em estudo.	19
Figura 17 - Diferentes secções do feeder integrantes da máquina IS. [Adaptado [37]]	24
Figura 18 - Modelação da embalagem de vidro nos moldes. [Adaptado [38]]	24
Figura 19 - Comportamento das variáveis resposta ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7 cL.	27
Figura 20 - Comportamento das variáveis resposta ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7 cL.	27
Figura 21 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	28
Figura 22 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	28
Figura 23 – Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforna correspondentes com a produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	29
Figura 24 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforna correspondentes com a produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	29
Figura 25 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com a produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	30
Figura 26 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com a produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	30
Figura 27 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com a produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	31

Figura 28 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com a produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	31
Figura 29 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com a produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	32
Figura 30 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com a produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	32
Figura 31 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente produção útil e defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	33
Figura 32 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente produção útil e defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	33
Figura 33 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	34
Figura 34 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	34
Figura 35 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais do vidro e a correspondente produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	35
Figura 36 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais e a correspondente produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	35
Figura 37 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente KCR do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7 cL.....	36
Figura 38 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforna correspondentes com o KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	37
Figura 39 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforna correspondentes com o KCR ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	37
Figura 40 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com o KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	38
Figura 41 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com o KCR ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	38
Figura 42 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com o KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	39
Figura 43 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com o KCR ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	39
Figura 44 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com o KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	40
Figura 45 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com o KCR ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	40
Figura 46 - Variáveis processuais da fabricação e correspondente KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7 cL.....	41

Figura 47 - Variáveis processuais da fabricação e correspondente KCR ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7 cL	41
Figura 48 - Variáveis processuais da fabricação e correspondente KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7 cL	42
Figura 49 - Variáveis processuais da fabricação e correspondente KCR ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7 cL	42
Figura 50 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais do vidro e o KCR correspondente ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cL	43
Figura 51 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais do vidro e o KCR correspondente ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.....	43
Figura 52 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do pior fabrico 4630S037 de 0,7cL	44
Figura 53 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do melhorr fabrico do 4630S037 de 0,7cL	44
Figura 54 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforna correspondentes com a percentagem de defietos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL	45
Figura 55 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforna correspondentes com a percentagem de defietos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL	45
Figura 56 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com a percentagem dos defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL	46
Figura 57 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com a percentagem dos defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL	46
Figura 58 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com a percentagem de defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL	47
Figura 59 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com a percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL	47
Figura 60 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com a percentagem de defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL	48
Figura 61 Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com a percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL	48
Figura 62 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL	49
Figura 63 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL	49
Figura 64 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais do vidro e a percentagem de defeitos críticos correspondente ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL	50

Figura 65 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL	50
Figura 66 - Resumo do modelo final obtido da regressão multivariada da produção útil.....	64
Figura 67 - Coeficientes de regressão multivariada obtidos da análise da produção útil.....	65
Figura 68 - Resíduos padronizados provenientes da regressão multivariada da produção útil.	65
Figura 69 - Produção útil prevista e efetiva ao longo do fabrico de Março de 2018 do 4630S037 de 0,7 cL.	66
Figura 70 - Resumo do modelo final obtido da regressão multivariada do KCR.	67
Figura 71 - Coeficientes de regressão multivariada obtidos da análise do KCR.....	67
Figura 72 - KCR previsto e efetivo ao longo do fabrico de Março de 2018 do 4630S037 de 0,7 cL.....	68
Figura 73 - Resíduos padronizados provenientes da regressão multivariada da produção útil.	68
Figura 74 - Classificação dos defeitos críticos em função das categorias estabelecidas no modelo de regressão multivariada logística.	69
Figura 75 – Resumo do modelo obtido da previsão dos defeitos críticos referente ao fabrico do 4630S037 de 0,7cL.	69
Figura 76 - Teste de Hosmer e Lemeshow efetuado na regressão logística dos defeitos críticos do 4630S037 de 0,7 cL.	69
Figura 77 – Coeficientes de regressão logística multivariada obtida da análise dos defeitos críticos.....	69
Figura 78 - Curva de recozimento aplicada no fabrico de 4630S037 de 0,7 cL.....	76
Figura 79 – Bolha (defeito crítico).....	76
Figura 80 - Rebarba no topo da marisa (defeito crítico).	76
Figura 81 – Trapézio (defeito crítico).	76
Figura 82 - Defeitos do tipo 1, 3 e 4 existentes nas embalagens de vidro.	77
Figura 83 - Intensidade da corrente em diversas posições do boosting correspondente com a produção útil ao longo do pior fabrico do Havana Club de 0,7cL.	88
Figura 84 - Amostragem das correlações obtidas na análise de produção útil com as variáveis processuais retiradas directamente do visualizador no SPSS.....	88
Figura 85 - T1203 vs Produção útil ao longo dos 241 dias de fabrico analisados da garrafa de 4630S037 de 0,7 cL.	89
Figura 86 - Sulfato de Sódio vs Produção útil ao longo dos 241 dias de fabrico analisados da garrafa de 4630S037 de 0,7 ccL.....	89
Figura 87 - Percentagem de rejeição nas máquinas de inspecção MIL vs Produção útil ao longo dos 241 dias de fabrico analisados da garrafa 4630S037 de 0,7 cL.....	89
Figura 88 - Fase do punção vs Produção útil ao longo dos 241 dias de fabrico analisados da garrafa 4630S037 de 0,7 cL.	89

Nomenclatura

Lista de Abreviaturas e Simbologia

BA – Barbosa Almeida

KCR – Key Cavity Rate

TSF – Tratamento superficial a frio

MP – Matéria-prima

CIVE – Companhia Industrial Vidreira, SA

T-V – Temperatura-Volume

T_f – Temperatura de fusão

T_g – Temperatura de transição vítrea

I.S. – Secção independente

TSQ – Tratamento superficial a quente

Na_2O – Óxido de Sódio

K_2CO_3 – Carbonato de Potássio

CaO – Óxido de Cálcio

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

Na_2SO_4 – Sulfato de Sódio

ZnSeO_3 – Selenito de Zinco

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro

CO – Monóxido de Carbono

CO_2 – Dióxido de Carbono

SO_2 – Dióxido de Enxofre

NO_x – Óxidos de Azoto

r_{12} – Coeficiente de correlação de *Pearson*

VIF – Fator de inflação da variância

r_s – Coeficiente de correlação de *Spearman*

CFD – Computational Fluid Dynamics

Sig – Significância

OR – *Odds Ratio*

1 Introdução

1.1 Motivação

A presente dissertação de Mestrado surge como resposta a um desafio proposto pela fábrica de vidro de embalagem *BA Glass* (Rua Vice Almirante Azevedo Coutinho, 2700-843 Venda Nova) - a implementação do projecto *Best Day* numa linha de produção. O projecto *Best Day* visa monitorizar, em tempo real, todas as variáveis processuais numa linha de produção seleccionada e registar todos os parâmetros de produto, por forma a caracterizar o *Melhor Dia de Fabrico* para um artigo em estudo. O *Melhor Dia de Fabrico* de um dado artigo corresponde ao dia em que se registou a maior produção, com ausência de defeitos críticos e de reclamações por parte do cliente (registo *a posteriori*).

O projecto *Best Day*, para além de permitir o registo do *Melhor Dia de Fabrico* na fábrica em estudo, permite ainda comparar as variáveis processuais e os parâmetros de produto de um mesmo artigo quando produzido em distintas fábricas do grupo (*BA Glass*).

A implementação do *Best Day* iniciou-se com a selecção de um artigo, seguida do estudo de uma linha de produção estável, com o objectivo de estabelecer as variáveis processuais que mais perturbam os parâmetros de produto que assinalam o *Melhor Dia de Fabrico*. O artigo escolhido foi a garrafa de vidro 4630S037 de 0,7 cL, artigo de vidro oco produzido em máquina I.S. através do processo Soprado-Soprado. A linha de produção, L31, escolhida diz respeito à produção proveniente do forno 3.

Seleccionados artigo e linha produtiva fez-se um levantamento de todas as variáveis processuais. Com base no conhecimento do processo de fabrico de vidro oco e num primeiro estudo de modelação, que visa prever o comportamento das variáveis resposta (variáveis dependentes das variáveis explicativas), foi possível identificar associações entre variáveis processuais, e assim reduzir significativamente o número (de 300 para 87) de variáveis, adequando a aplicação de um modelo matemático ao histórico de registos fabris.

Com apoio do grupo do departamento de matemática do IST, nomeadamente da professora Doutora Conceição Amado, aplicou-se a ferramenta estatística *SPSS Software* na modelação das variáveis resposta e das variáveis explicativas. As variáveis resposta são: i) *KCR* (*Key Cavity Rate*) (relaciona o peso da gota com a sua velocidade de distribuição); ii) a ausência dos *defeitos críticos* (em particular aqueles que colocam em risco a saúde do consumidor); iii) ausência de reclamações após venda do produto ao cliente. Para cumprir os objectivos estabelecidos pela *BA Glass*, nomeadamente a comparação entre o processo produtivo das diversas fábricas do grupo e suas variáveis processuais (desde o forno até às do *TSF*, tratamento superficial a frio aplicado nas garrafas na zona fria) de um mesmo artigo, usaram-se também ferramentas de modelação fornecidas pela fábrica tais como o programa *Matrix*.

Com o propósito de validar as associações entre as variáveis explicativas e as resposta resultantes da análise da garrafa 4630S037 de 0,7cL, analisou-se uma outra garrafa 4931S037 agora de 1L, na mesma linha produtiva, mas com diferentes condições processuais na zona da fabricação.

1.2 Objectivos

A presente dissertação tem como o primeiro objectivo determinar o melhor dia de fabrico (*Best Day*) da garrafa 4630S037 de 0,7 cL.

O segundo objectivo deste projeto situa-se no âmbito de melhoria contínua do processo. Neste sentido procuraram-se estabelecer as variáveis do processo que carecem de um maior controlo, com o propósito de maximizar a produção e reduzir a presença de defeitos críticos, que conduzem à não conformidade do produto final. Para cumprir com este objectivo é feito um estudo estatístico no qual se estabelecem correlações entre as variáveis explicativas e as variáveis resposta de seleccionadas.

O último objectivo deste estudo do caso é estabelecer modelos preditivos das variáveis resposta.

1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação foi dividida em 5 capítulos.

No primeiro capítulo é efetuado um pequeno enquadramento teórico do tema. Definem-se os objetivos a atingir, bem como a metodologia utilizada para a realização da presente dissertação. Apresenta-se a estrutura da tese. Apresenta-se também a empresa em que o estudo do caso foi realizado.

No segundo capítulo exhibe-se o estado da arte sobre os temas diretamente relacionados com esta dissertação, nomeadamente o processo de fabrico do vidro oco e estudos estatísticos efetuados a nível de processo fabril para melhoria contínua do processo.

No terceiro capítulo descrevem-se todas as variáveis do processo.

O quarto capítulo foi reservado para a análise dos resultados tanto a nível de associações estabelecidas como também relativamente à modelação do processo. Antes de ser terem efetuado as associações, concretizou-se uma análise exploratória de todas as variáveis processuais integrantes, de forma a fazer uma triagem das mesmas.

Por fim, o quinto e último capítulo apresenta as conclusões e recomendações finais, de acordo com os resultados obtidos. Posteriormente apresentam-se os anexos respeitantes aos capítulos 2, 3 e 4.

1.4 Metodologia

Ao longo desta dissertação foi perpetuada a seguinte metodologia:

- Na primeira fase, que correu nos meses de Setembro e Outubro de 2017, a empresa proporcionou uma aprendizagem contínua, dando a conhecer todas as áreas de processo relevantes para o presente trabalho. Esta aprendizagem passou pelo contacto com várias áreas do processo fabril tais como: i) ensilagem das matérias-prima (MP), ii) fusão das MP, para originar à massa vítrea, iii) condicionamento do vidro, iv) moldação da pasta vítrea em máquinas automáticas, IS,v) tratamento superficial a quente, vi) recozimento, vii) tratamento superficial a frio (TSF), viii) inspeção das embalagens de vidro na zona fria, e, por último, ix) paletização do produto final pronto a ser expedido. Desta forma foi possível conhecer, na prática, as rotinas tomadas pelos quadros da empresa.

- Na segunda fase, durante os meses de Novembro e de Dezembro de 2017, a empresa identificou as variáveis globais integrantes do processo fabril, presentes no *Best Day*. Foi necessário explorar a documentação guardada em histórico, durante 3 anos (desde 2015 até à data presente), das principais

áreas integrantes do processo fabril. Para o artigo 4630S037, de 0,7cL construiu-se um documento final *Excel* com todas as variáveis do processo, ao longo de todos os anos registados na fábrica.

- Na terceira etapa exploraram-se várias ferramentas (*software*) possíveis para a resolução do problema matemático – o estabelecimento de associações entre as variáveis resposta e as variáveis explicativas do processo. Esta fase foi a mais desafiante, e teve lugar durante os meses de Janeiro e Fevereiro de 2018. Foram várias as ferramentas estatísticas exploradas, entre as quais *R*, *SPSS* e *Minitab*, que exigiram uma pesquisa em detalhe para estudo do funcionamento das mesmas. Foi necessário verificar também qual seria a ferramenta a ser utilizada para estabelecer modelos preditivos das variáveis resposta, pelo que a escolha da ferramenta estatística passou por encontrar a que cumprisse todos os objetivos estabelecidos da forma mais eficiente possível.

- A penúltima fase deste estágio consistiu em validar os modelos preditivos estabelecidos no fabrico de Março do artigo 4630S037 de 0,7 cL (desde 1-03-2018 até 15-03-2018).

- A quinta etapa passou por recolher os dados do artigo 4931S037 de 1L, que embora seja feita na mesma linha que a garrada de 0,7 cL, apresenta algumas condições processuais diferentes, mais concretamente de moldação na zona quente. Sendo um modelo de garrafa diferente, será possível validar as associações obtidas no objeto principal do estudo efetuado ao longo do tempo do estágio. Esta última fase de projeto decorreu a par com a penúltima etapa, no entanto a sua análise estatística efetuou-se no início do mês de Abril.

1.5 Apresentação da empresa

A empresa “Barbosa e Almeida”, atual BA Glass, empresa centenária, foi fundada em 1912 pelos sócios Raul da Silva Barbosa e Domingos de Almeida. Iniciou a sua atividade em 1930 em Campanhã, com a - “Fábrica de Vidros Barbosa e Almeida, Lda.”. Entre 1947 e 1965 foram instaladas máquinas de alimentação e moldagem automática que vieram contribuir para o aumento da produção. Em 1971 foi instalada a primeira máquina de secção independente, *máquina IS*, que favoreceu ainda mais a capacidade produtiva. Poucos anos depois, em 1979, estas máquinas passam a ser computadorizadas. A partir de 1993, adquiriu-se mais uma fábrica na Marinha Grande, com a compra da CIVE. A evolução do aumento do grupo pode ser observada na Figura 1 [1]. É de notar que atualmente o grupo possui 12 fábricas localizadas em 7 países diferentes tais como: Portugal, Espanha, Polónia, Alemanha, Grécia, Roménia e Bulgária.

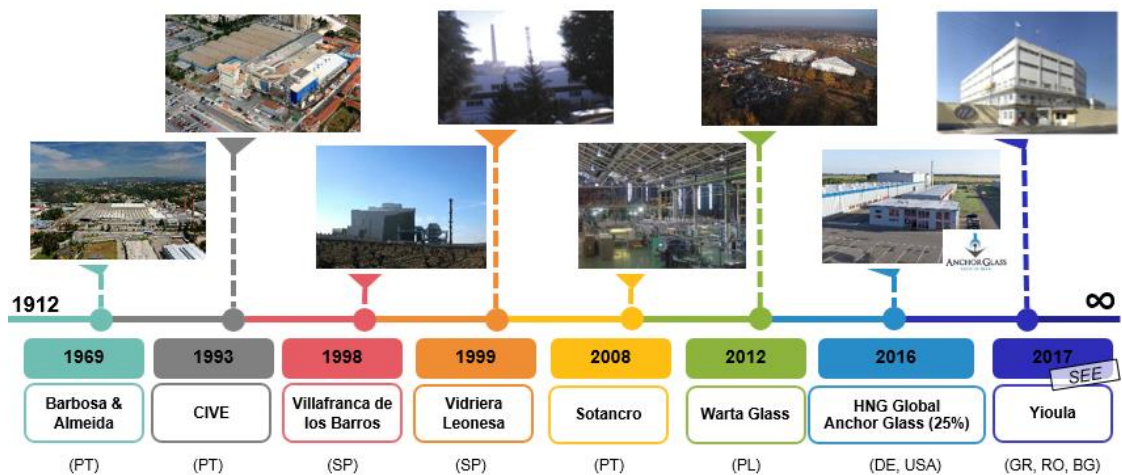


Figura 1 - Evolução da constituição da BA Glass ao longo do tempo [Adaptado [1]].

A BA Glass produz por ano mais de 8 biliões de garrafas, em 11 cores. Com um total 3800 funcionários, a BA distribui embalagens de vidro em mais de 80 países por todo o mundo. O seu volume de negócios atual atinge cerca de 780 milhões €. Actualmente, a BA Glass exporta os seus produtos para 82 países, dentro dos quais estão a Espanha, a Polónia, a França, a Roménia, a Grécia, a Alemanha, a Itália, a Cuba, entre outros.

A fábrica da Venda Nova, situada em Lisboa, a antiga Sotancro, possui de momento 2 fornos regenerativos de 300 toneladas e 315 toneladas de capacidade máxima. A produção atual centra-se em vidro branco ou branco azulado (campanha bianual). Cada um deles possui 4 linhas de produção que se destinam ao fabrico de frascos, garrafas e boiões com aplicações em diferentes segmentos tal como se pode verificar de uma forma generalizada na Figura 2. Os processos automáticos utilizados no fabrico de vidro de embalagem podem ser Soprado-Soprado ou Prensado-Soprado.

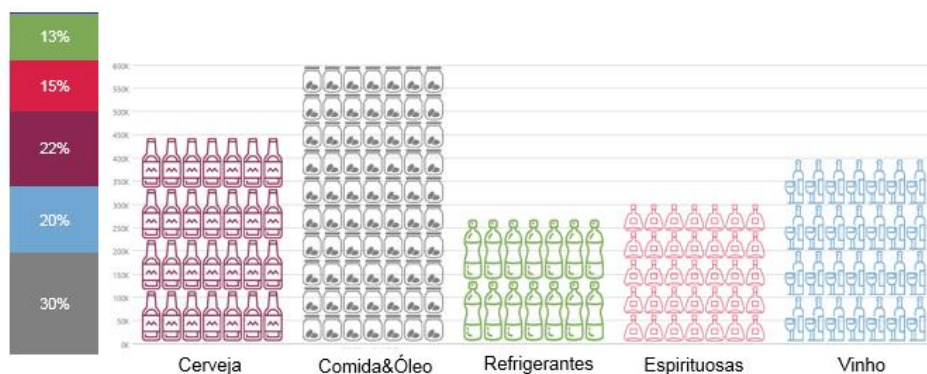


Figura 2 - Segmentação das vendas para diferentes mercados na BA Glass.

2 Estado da arte

2.1 O vidro

O vidro é um líquido sobrefeificado com uma viscosidade tão elevada que adquire propriedades e rigidez de um sólido. A sua formação pode ser compreendida no diagrama T-V apresentado na Figura 3. É de notar que à medida que um líquido é arrefecido, o seu volume específico diminui. Ao chegar à T_f (Temperatura de fusão), pequenos cristais tendem a formar-se. Um líquido só passa ao estado cristalino (sólido cristalino) após um determinado período tempo, tempo necessário para que ocorra difusão atômica/iônica que conduz à formação do cristal. Se o líquido for arrefecido muito rapidamente [2], este torna-se sobrefeificado (e não cristaliza a T_f) e ao tornar-se mais viscoso com a diminuição da temperatura, passa a um estado vítreo. Este estado apenas é atingido abaixo da temperatura de transição vítrea, T_g (Figura 3).

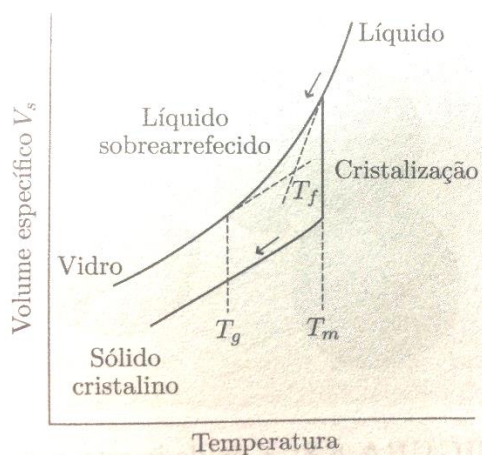


Figura 3 - Variação do volume específico em função da temperatura. [Adaptado de [3]]

A fase vítrea é obtida por fusão de diversas matérias-primas através de reações a alta temperatura para obtenção de uma pasta homogênea, seguida de um arrefecimento rápido a velocidade controlada, evitando a cristalização [4].

2.2 Processo de fabrico de vidro de embalagem

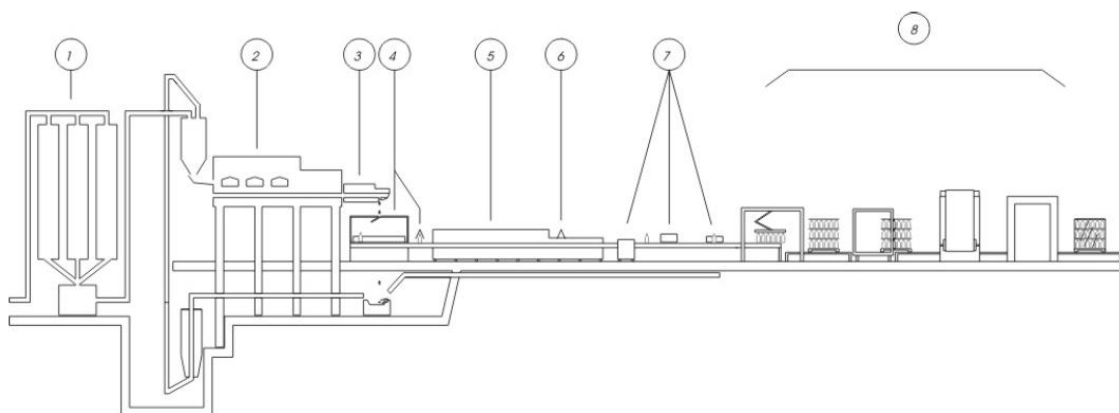


Figura 4 - Fluxograma do processo do fabrico do vidro de embalagem. 1 - Composição; 2 - Fusão; 3 - Condicionamento térmico; 4 - Moldagem e TSQ; 5 - Recozimento; 6 - TSF; 7 - Inspeção; 8 - Embalagem.

A Figura 4 ilustra o processo de produção de vidro. Este inicia-se com a recepção da matéria-prima, na zona de ensilagem/composição. Esta é em seguida transportada para a zona de fusão, onde ocorrem as reações de formação de massa vítrea. A massa vítrea depois de homogeneizada é transportada pelo *forehearth* até aos *feeders*, mantendo um condicionamento térmico até às máquinas de conformação de vidro, *máquinas IS*. Posteriormente dá-se o tratamento superficial a quente (TSQ). Após o TSQ, o vidro oco é recozido. Na penúltima etapa, as embalagens de vidro são tratadas a frio superficialmente (TSF) e passam finalmente pelas máquinas de inspeção para a verificação da sua conformidade. Por fim, o produto é expedito para o armazém e por último para o cliente.

2.2.1 Zona de armazenagem e ensilagem de matéria-prima

A *BA Glass* recebe diariamente as MP necessárias à produção das embalagens de vidro, sendo cada uma delas armazenada no seu silo. A areia é ensilada por um sistema de “nora de alcatruzes” e as restantes matérias-primas são ensiladas através de um sistema combinado de pressurização e transporte pneumático.

Enquanto se efectua esta operação, o sistema de pesagem da composição encontra-se parado. Aquando da descarga da matéria-prima, ou seja, antes da ensilagem da mesma, são recolhidas amostras, numa quantidade ~1 kg, para verificar a sua conformidade com o caderno de encargos.

A especificação das matérias primas depende do vidro a produzir, mas também do forno a alimentar. No presente caso de estudo, utilizou-se o forno 3, destinado a produzir vidro branco durante as campanhas de manufactura do artigo principal em estudo.

Tabela 1 - Composição da matéria-prima utilizada para fabrico do vidro de embalagem, no forno em estudo.

Matéria-prima	Função	Composição(%)
Areia	Vitrificante	77,4-36,3
Na ₂ O	Fundente	23,5-10,9
K ₂ CO ₃		0,5-0
CaO	Estabilizante	21,1-9,4
Al ₂ O ₃		4,3-0
Escórias		1-0
Na ₂ SO ₄	Afinante	0,3-0
C (carvão fino)		0,01-0
ZnSeO ₃	Corantes	0,002-0
Fe ₂ O ₃		5,8-0
Casco branco	-	38,6-0
Casco verde		2,6-0

As MP classificam-se de acordo com o seu papel estrutural (Tabela 1):

- Vitrificantes, conferem estrutura vítrea, sendo um exemplo clássico o Óxido de Silício, presente na areia. A partir da unidade estrutural tetraédrica [SiO₄]⁴⁻ forma uma rede aperiódica tridimensional (3D). Como os vitrificantes encontram-se em maior quantidade na composição vítrea, é necessário que cumpram uma série de especificações mineralógicas, químicas e granulométricas para garantir a produção de um vidro de qualidade. É de notar que o SiO₂ puro apresenta a temperatura de fusão a 1723°C [4], pelo que a composição do vidro de embalagem necessita de adição de outras substâncias químicas para que o processo possa ser industrialmente rentável.

Os vitrificantes proporcionam uma maior resistência mecânica, a estabilidade química, a resistividade elétrica, a resistência ao choque térmico e a transparência à radiação UV. Contudo a temperatura de fusão é elevada.

- Fundentes, compostos essencialmente por Óxido de Sódio e Óxido de Potássio, têm a finalidade de diminuir a temperatura de fusão do vidro. Estes Óxidos atuam como modificadores de rede pois quebram a rede vítrea do formador, dando origem a espécies oxigénio terminais. O NaO (soda), com uma densidade variável entre 1,0 e 1,2 g/cm³, é adicionado em maior quantidade face ao K₂CO₃, pois permite menor ataque sobre os refractários do forno, é menos higroscópico e possui maior condutividade térmica. O Carbonato de Potássio favorece o recozimento do vidro, embora aumente a sua viscosidade ao mesmo tempo que alarga o intervalo térmico do trabalho.

- Estabilizantes, contribuem para estabilizar a massa vítrea, após a sua fusão. São exemplo o Óxido de Cálcio e o Óxido de Alumínio para potenciar a estabilidade química do vidro embora o primeiro passa a contribuir para a desvitrificação da rede vítrea. O segundo contribui para a resistência mecânica, maior poder refractário, diminuição do coeficiente da dilatação térmica e conseqüentemente uma melhor resistência ao choque térmico. A alumina tende a reduzir a desvitrificação, aumenta a viscosidade do vidro, alarga a temperatura de trabalho e aumenta a tensão superficial no entanto não contribui para a diminuição da temperatura de fusão da massa a fundir [4] [5].

- Afinantes, compostos por carvão fino e Sulfato de Sódio favorecem a eliminação dos gases dissolvidos na massa vítrea, que são causadores de não conformidades do produto final. Esses gases são diversos compostos por NO_x, SO₂, CO₂ e CO, resultantes primeiramente das reações de decomposição ocorridas a partir da enfora da massa a fundir. Posteriormente os gases formam-se através das reações de dissolução, de desidratação e de contacto com as matérias-primas com tijolos refractários do forno, sobretudo na zona de afinagem do forno.

As diferentes matérias-primas são previamente pesadas e transportadas para o misturador, onde se produz uma mistura o mais homogénea possível, com teor de humidade situado entre 2-2,5%. Posteriormente, é adicionado vidro partido, designado por casco, com o objectivo de diminuir a temperatura de fusão da mistura, reduzindo assim o consumo energético. Por outro lado o casco tem impacto na cinética da formação da massa fundida como também na respetiva dissolução[6]. Antes desta mistura ser alimentada ao forno, ocorre uma filtração no precipitador eletrostático para evitar contaminação da matéria a fundir, com outras substâncias presentes, consideradas como impurezas, da matéria-prima.

2.2.2 Zona da fusão

É de notar que a zona de ensilagem e o forno operam em contínuo. O forno não pode parar, caso contrário a pasta vítrea solidifica. O forno é regenerativo [7], alimentado a gás natural e ar e é potenciado pelo *boosting* eléctrico que contribui em 40% para a zona de fusão e 60% para a zona de afinação.

O forno é composto por diversas partes diferentes [8], tal como está ilustrado na Figura 5 em que existe:

- *Recuperador/Regenerador*: formado pela empilhagem de peças refractárias, composta por vários favos de colmeia - e é aquecida pela passagem dos gases de combustão. A intervalos de tempo regulares (20 a 30 minutos – designado por tempo de inversão) a queima é cortada e a câmara de regeneração passa a ser a conduta de ar de combustão. Os queimadores desse lado são ligados e a outra câmara passa a funcionar como conduta de fumos até ao fim do ciclo, isto é, até se dar uma nova inversão do sistema.

- *Zona de fusão*: onde ocorrem as reações de transformação (dissolução, descarbonatação, entre outras) das matérias-primas. Aqui formam-se diversos gases provenientes das reações ocorridas, que no caso de permanecerem no vidro, gerarão defeitos graves tais como *bolhas* e *murça*.

- *Zona de afinação*: responsável pela eliminação dos gases dissolvidos através da adição de afinantes e da existência de borbulhadores.

- *Tanque de trabalho*: encarregado por homogeneizar a massa vítrea através de influência de temperatura promovida. Serve de ligação aos canais de distribuição do vidro, *forehearths*. Estes têm a funcionalidade de remover o calor, isto é, sem exceder 80°C removidos ao nível do fundo.

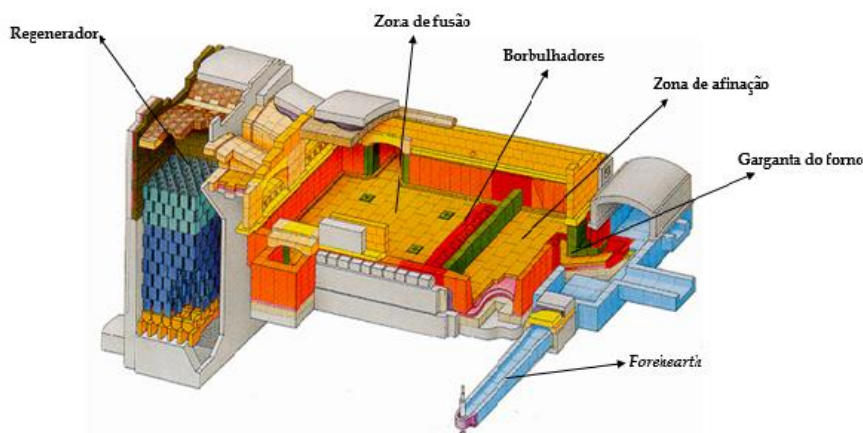


Figura 5 - Esquema do forno regenerativo.

A sequência do perfil de temperaturas ao longo do comprimento do forno pode ser observada na Figura 6. Esta deve ser respeitada para garantir que as reações de fusão sejam completas e que não haja nenhuma partícula de quartzo por reagir. Para além disso é fundamental que haja um balanço entre o tempo de residência da massa vítrea e das forças convetivas do forno para a homogeneização térmica-química do mesmo, sem existência de *bolha* ou *murça*, para que o produto final esteja conforme [9]. É essencial que a massa vítrea gerada possua uma densidade na gama de 2,48-2,52 g/cm³. No caso presente, esta densidade não pode ultrapassar o valor de 2,50 g/cm³.

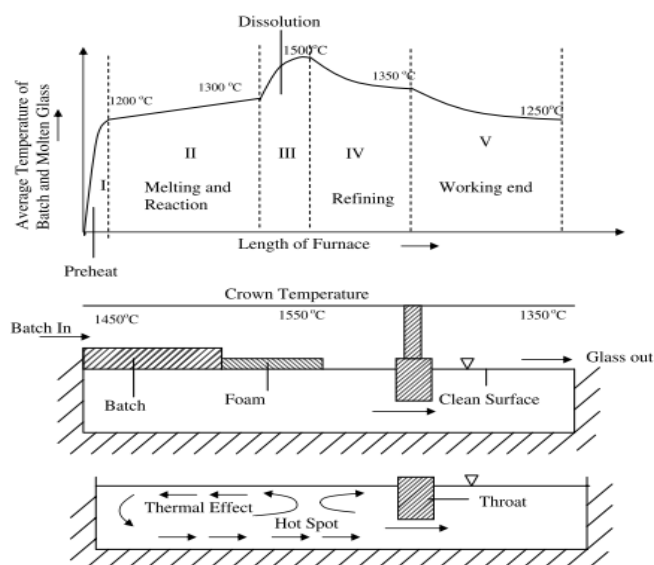


Figura 6 - Perfil de temperaturas ao longo da transformação da matéria-prima sódico-silicosa em massa vítrea, no forno regenerativo [Adaptado de [9]].

2.2.3 Zona da fabricação

Esta, a seguir a zona do forno, é uma das zonas mais quentes do processo. É aqui que a massa vítrea fundida passa através do canal de condicionamento, *forehearth*, em que o vidro abandona a garganta do forno à volta dos 1150°C[10] e é conseqüentemente aquecida/arrefecida para chegar à

zona do condicionamento, que alimenta as gotas do vidro, através do *feeder*, às máquinas IS. (Figura 7)

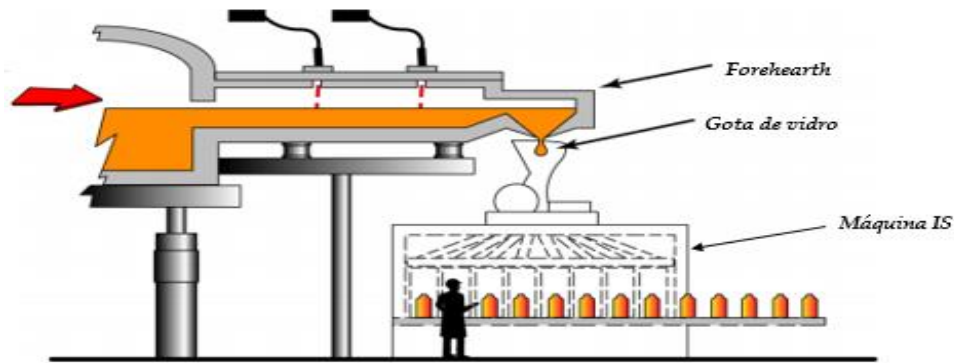


Figura 7 - Fluxograma do vidro ao longo da zona de fabricação [Adaptado [11]].

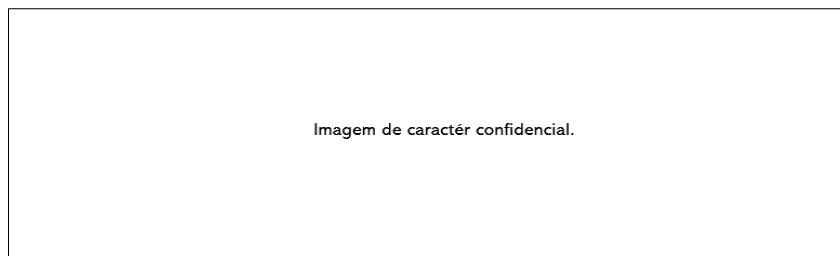


Figura 8 - Forehearth da linha em estudo, no fabrico do artigo 4630S037 de 0,7cL.

O condicionamento do vidro, ilustrado na Figura 8, permite o ajuste da viscosidade do vidro. Tem uma influência directa na tiragem do forno e na temperatura de saída do vidro [12].

Após o condicionamento, a gota do vidro cai devido a 2 fatores: mecanismo do *feeder* e gravidade. O *feeder* consiste na combinação da manilha (tubo refractário) que está situado a uma determinada altura e que gira a uma certa velocidade e num dado sentido que permite com que o fluxo do vidro seja homogeneizado [13]. Com o auxílio de um punção o vidro é empurrado para baixo e a gota cai verticalmente para os canais de distribuição [13] [10]. Para que o atrito durante a queda de gota seja mínimo, esta é lubrificada com água e óleo tal como se pode ilustrar na Figura 9. Após a passagem das gotas de vidro pelos canais de distribuição, estas são direccionadas pelas calhas e posteriormente pelos canais defletores, tal como se pode observar na Figura 10.

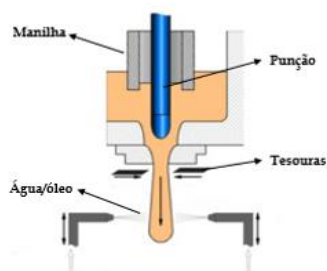


Figura 9 - Mecanismo do feeder na queda da gota. [Adaptado [14]].

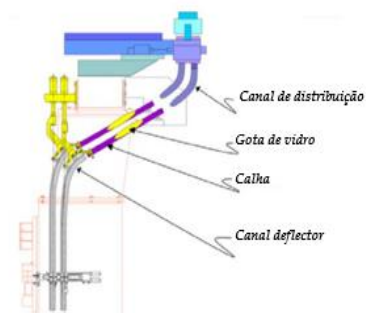


Figura 10 - Distribuição da gota de vidro.

A gota de vidro é, portanto, deflectida para a secção do contramolde das máquinas *IS*. Estas são compostas por 6 a 12 secções independentes. No presente projecto as secções independentes constituintes da máquina de fabricação *IS* são 10, e dividem-se em 2 partes diferentes: uma diz respeito à moldação de pré-forma da embalagem (contramolde) e a outra relaciona-se com a forma final da embalagem (molde final). O contramolde oferece um esboço ao produto final incluindo a marisa do mesmo, proporcionando uma adequada transferência de calor do vidro para o molde, de forma a garantir uma certa viscosidade [15]. O molde final, como o próprio nome indica, contribui para a impressão final da embalagem.

Os processos de moldação do vidro podem ser de 2 tipos:

- *Soprado-Soprado*, em que tanto o esboço como o molde final ganham forma final através do ar soprado a uma determinada pressão, através dos orifícios existentes na ferramenta. No contramolde o ar é soprado pela cabeça de sopro, bucha, e assim se forma a marisa da garrafa, ilustrado desde A até C (Figura 11). O esboço é transferido do molde de principal até ao molde final, tal como se pode verificar em C-D. Por fim o ar é soprado pela bucha (F) e a embalagem é transportada pelas pinças (G) para o tapete de transferência.

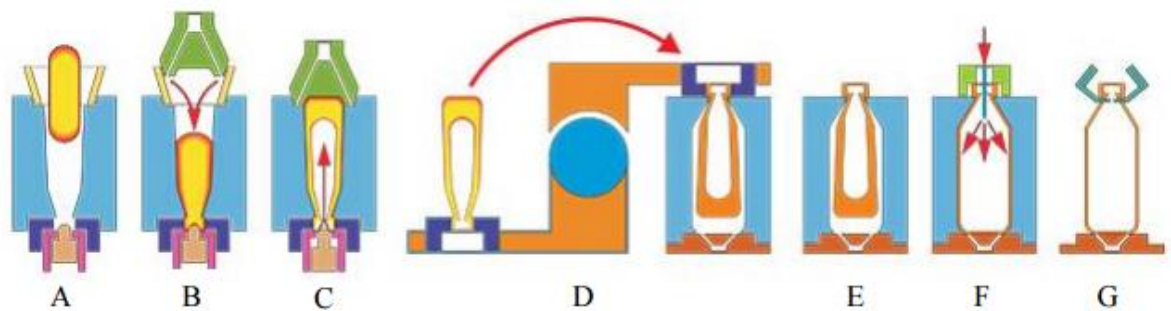


Figura 11 - Processo de fabricação Soprado-Soprado.

- *Prensado-Soprado*, que é semelhante ao processo anterior, no entanto neste a ação mecânica de uma punção contribui para a formação do esboço e, por outro lado, é formado primeiramente o fundo da garrafa em vez da marisa. Posteriormente é soprado o ar para conformar a embalagem de vidro.

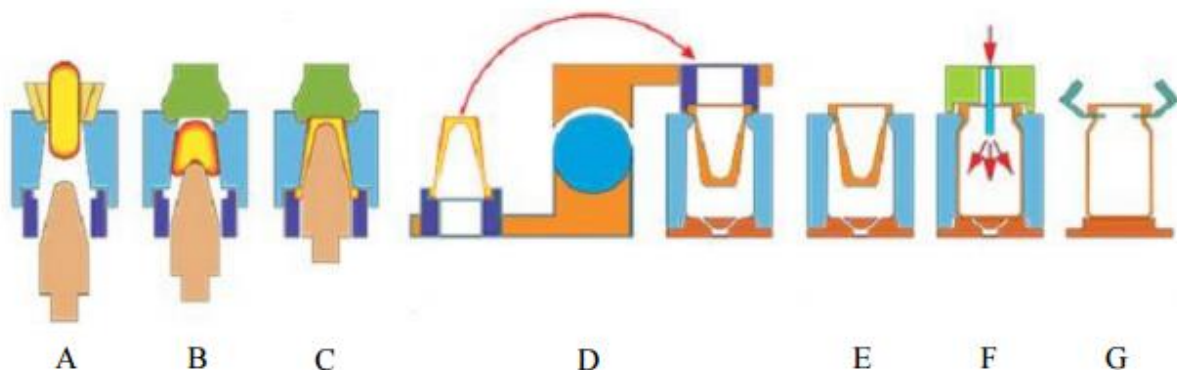


Figura 12 - Processo de fabricação Prensado-Soprado.

No presente projeto a garrafa 4630S037 de 0,7 cL é produzida pelo processo Soprado-Soprado. O que determina a escolha entre os 2 processos relaciona-se com razão entre a altura

pretendida da embalagem de vidro e o diâmetro interno da marisa, uma vez que, para alturas muito elevadas relativamente ao diâmetro interno da marisa, não é possível introduzir a punção até uma altura que permita uma distribuição adequada de vidro no interior do molde.

As embalagens de vidro após a saída das máquinas *IS*, passam por um tratamento superficial a quente para garantir a sua resistência mecânica. Este é efetuado através de vaporização de uma fina película de *SEPOAN 601 TC*, numa gama de temperaturas entre 160°C a 170°C, composto por tetracloreto de estanho e ácido clorídrico.

2.2.4 Zona fria

Após a deposição da camada de TSQ, as embalagens de vidro estão sujeitas ao alívio das tensões através do recozimento na arca do recozimento cujo tempo de operação não dura mais de 30 minutos. O perfil de temperaturas de recozimento pode ser consultado nos Anexos 7.1. Após a aplicação do TSQ, é aplicado TSF através da pulverização de um produto dominado por TEGOGLASS RP 40 (ver Figura 13). Este produto tem o propósito de melhorar a resistência mecânica das embalagens de vidro e reduzir os potenciais riscos e fissuras durante o enchimento e transporte.

Finalmente, as embalagens de vidro passam por máquinas de inspeção que permitem a seleção das garrafas conforme a especificação desejada. Todas as garrafas rejeitadas são alvo de transporte para casco interno.



Figura 13 - Aplicação do TSF na zona fria do processo fabril do vidro oco.

2.3 Análise estatística do processo fabril de vidro de embalagem

A análise estatística iniciou-se com o levantamento das variáveis de processo. Fez-se a diferenciação entre variáveis discretas, aquelas que tomam valores finitos, e as variáveis contínuas, as que tomam valores aleatórios num determinado intervalo, no *SPSS*. [16]

As ferramentas estatísticas, tais como o *R* (uma linguagem de programação e também um ambiente de desenvolvimento integrado para cálculos estatísticos e gráficos [17]), semelhante ao *SPSS* (mas que não implica o uso de linguagem de programação), foi utilizado na análise multivariada de dados, com o objetivo de classificar locais provenientes de amostras de vidro medieval [18]. A origem do vidro estabeleceu-se através de correlações de *Pearson* que fornecem a relação linear entre diversos constituintes da composição do vidro. As correlações bivariadas de *Pearson* podem ser calculadas [19] através de:

$$r_{12} = \frac{\sum(Y_{i1} - \bar{Y}_1)(Y_{i2} - \bar{Y}_2)}{[\sum(Y_{i1} - \bar{Y}_1)^2 \sum(Y_{i2} - \bar{Y}_2)^2]^{1/2}} \quad \text{Equação 1}$$

em que Y_{i1} é a variável aleatória i regredida noutra, 1 , e \bar{Y}_1 é o valor da média aritmética dessa variável. O r_{12} pode tomar valores entre -1 e $+1$, cuja interpretação dos valores está explícita na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da força entre os valores de correlação de Pearson.

r_{12}	Força de correlação
0,9 - 1	Muito forte
0,9 - 0,7	Forte
0,7 - 0,5	Moderada
0,5 - 0,3	Fraca
0,3 - 0	Desprezável

É de tamanha importância reconhecer que uma correlação não implica causalidade, e particularmente a de Pearson só se deve aplicar quando se cumprem os seguintes critérios [20] [21] [22]:

- As distribuições das variáveis são normais e independentes;
- As variáveis analisadas tomam valores contínuos;
- Existem relações lineares entre as variáveis.

Para validar a multicolinearidade existente entre as variáveis que futuramente serão utilizadas no modelo de regressão linear, utiliza-se o *VIF*, *Variance Inflation Factor*, cuja fórmula de cálculo pode ser encontrada em [23]. É importante denotar que este não pode tomar valores superior a 10, para que as variáveis não sejam significativamente dependentes entre si. As correlações de *Pearson* podem ser utilizadas mesmo quando existem variáveis a analisar dicotômicas e contínuas [24], como é o exemplo da análise descrita dos defeitos críticos categorizados, tal como se verá adiante no capítulo 4.3. Basta que para além dos critérios mencionados acima, as variáveis contínuas tenham a mesma variância para cada variável dicotômica. Para verificar se ocorre a homogeneidade da variância das variáveis, utiliza-se o teste de *Levene*. Se o teste for inferior a 0,05, isto significa que as variâncias são estatisticamente diferentes e a abordagem paramétrica não pode ser utilizada.

Devido aos critérios acima mencionados foi necessário efetuar uma análise exploratória ao processo fabril como se verá adiante.

Aquando da análise exploratória, verificou-se que algumas das variáveis em estudo não apresentam distribuição normal. Numa segunda abordagem, testaram-se correlações não paramétricas, mais concretamente as de *Spearman* [25] [23], que podem ser calculadas conforme a seguinte equação:

$$r_s = \frac{\sum(R_{i1} - \bar{R}_1)(R_{i2} - \bar{R}_2)}{[\sum(R_{i1} - \bar{Y}_1)^2 \sum(R_{i2} - \bar{R}_2)^2]^{1/2}} \quad \text{Equação 2}$$

onde as observações Y_1 a Y_n são expressas em R_1 que são valores ordinais. Em vez de se considerarem valores observados, utilizam-se as ordens das observações. Nos casos em que os dados não formam uma nuvem “bem comportada”, com alguns pontos muito afastados dos restantes, ou em que parece existir uma relação crescente ou decrescente em formato de curva, o r_s é o mais apropriado.

As correlações foram testadas a um nível de significância de 5% e de 1% que corresponde à probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira, que no caso presente diz respeito à existência de associação entre 2 variáveis [16]. Desta forma pode-se constatar se o teste realizado é estatisticamente significativo ou não.

Denotou-se que diversos estudos de modelação relacionados com o vidro já foram realizados, dentro dos quais estão os projetos relacionados com:

- Transferência de calor que visa simular o comportamento das matérias-primas na zona de fusão e de afinação, com base na cinética das reações de dissolução, com o auxílio de modelos de *CFD*, *Computational Fluid Dynamics* (Fluidodinâmica Computacional) [26] [27] [28];

- Decomposição do forno em 2 zonas diferentes, nomeadamente a câmara de combustão e o banho de fusão, com o objetivo de otimizar a zona das reações e obter uma simplificação de hidrodinâmica ocorrida através do uso de *CFD* [29].

A literatura não revelou nenhum projecto relacionado com uma avaliação estatística global do processo de fabrico de vidro. Por outro lado, também não foi encontrada nenhuma análise preferencial sobre as variáveis que necessitam de uma monitorização constante, para que haja ausência de algum tipo específico de defeitos ou maior quantidade de artigos produzida.

Para ser possível uma inferência estatística sobre as variáveis que prevêm o comportamento das variáveis dependentes estudadas, optou-se por primeiramente observar graficamente as variáveis processuais e os parâmetros da garrafa estudados. Após essa observação, aplicaram-se modelos de regressão multivariados lineares e logísticas.

O modelo de regressão linear múltipla consiste em relacionar de uma forma linear uma variável independente com diversas variáveis dependentes de acordo com [23] [30] [31]:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad \text{Equação 3}$$

onde Y_i é a variável dependente do estudo e os β_{p-1} são os coeficientes constantes que representam o declive da reta enquanto que o β_0 é a variável que representa a intersecção da recta com o eixo vertical. O ε_i é o erro que está associado à distância entre o valor observado e o correspondente ponto na curva do modelo proposto.

Os parâmetros de avaliação que consistiram em validação do modelo são nomeadamente:

- O teste de significância que serve para dar resposta à utilidade do modelo para prever a variável dependente, designado no *SPSS*, por *Sig*, cujo cálculo pode se encontrar em [23];

- Coeficiente de determinação, conhecido como R^2 , que corresponde à proporção da variância da variável dependente (que advém da previsão das variáveis independentes), cujo cálculo devolvido pelo *SPSS*, pode ser consultado em [23];

- Teste de *Durbin-Watson*, teste estatístico realizado para detetar autocorrelações em resíduos, a partir da regressão linear obtida, cujo cálculo pode ser consultado em [23];

- Distribuição dos resíduos padronizados, isto é, se esta é normalmente distribuída ou não.

O modelo de regressão logística aplica-se quando a variável resposta, variável dependente, é binária/dicotômica e o comportamento da curva não é estritamente linear. É baseado no método da máxima verosimilhança [32]. Este modelo foi apenas aplicado no estudo dos defeitos críticos, mais concretamente na inferência da sua existência, pelo que a sua variável categórica é dividida em 2 categorias: existir defeito crítico (cotado como 1) e não existir defeito crítico (cotado como 0). Os requisitos da aplicação são bastante semelhantes ao modelo preditivo linear. A regressão logística segue a função explícita na Equação 4 :

$$p(x) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)}} \quad \text{Equação 4}$$

onde $p(x)$ está entre 0 e 1 que por sua vez representa a probabilidade de ocorrer ou não defeito crítico. Portanto, se a $p(x) < 0,5$ significa que a maior chance é de não ocorrer defeito crítico. Se, no entanto, $p(x) > 0,5$ significa que há maior probabilidade de ocorrer defeito crítico. Os coeficientes (β_1 a β_k) apresentados na Equação 4 expressam a variação da medida da variável dependente por cada mudança unitária da variável independente.

Para validação do modelo logístico diversos testes são aplicados [33][32]. Um deles baseia-se no *Odds Ratio*, razão de possibilidades. Para uma variável dependente binária este é calculado através da seguinte equação, cuja dedução pode ser verificada em [32] [23]:

$$OR = e^{\beta_k} \quad \text{Equação 5}$$

Esta medida de associação com valor igual a 1, indica que a condição do evento sob estudo ocorre de igual forma nas 2 categorias. Se por outrora for superior a 1, significa que ocorre mais frequentemente no primeiro grupo. Se, no entanto, for inferior a 1, significa que ocorre mais frequentemente no segundo grupo do que no primeiro.

Outro teste utilizado é o de *Hosmer&Lemeshow* que mede o quanto bem o modelo se ajusta aos dados disponíveis. É considerado que o modelo se ajusta de uma forma significativa quando o valor *Sig* é superior a 0,05. Outro critério do ajuste do modelo pode ser observado na tabela de classificação que quantifica os casos que foram bem classificados em percentagens conforme o modelo estabelecido.

A inferência dos coeficientes do modelo logístico é medida através do teste de *Wald*. Este teste verifica se cada parâmetro estimado é diferente de 0, portanto testa a hipótese de que um determinado coeficiente é nulo.

Neste modelo, outros parâmetros para classificação do modelo são tomados em conta. Estes são nomeadamente os valores de pseudo R^2 , que são dados através do *Cox&Snell Square*, que no máximo atinge o valor de 0,75, ao contrário do R^2 de regressão linear que toma valores máximos de 1. Por outro

lado, também pode se tomar em conta o valor de *Nagelkerke R Square* que já por semelhança com o R^2 , tomando valores mínimo de 0 e máximo de 1.

3 Descrição das variáveis processuais de fabrico do vidro de embalagem

3.1 Variáveis resposta

As variáveis dependentes, resposta, são:

i) Produção útil, que está descrita em *kg*, correspondente à produção conforme, pronta a ser expedita para o cliente.

ii) *KCR*, *Key Cavity Rate*, que segue a seguinte equação:

$$KCR = \sqrt{\text{Cadência} \times \text{Peso do artigo}} \quad \text{Equação 6}$$

onde a cadência significa o número de artigos feitos por minuto.

iii) Defeitos críticos que podem ser diversos e enumeram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Enumeração dos defeitos críticos reconhecidos na BA, Venda Nova (de acordo com a codificação antiga).

Tipo de defeito	Tipo de defeito
Rebarba lateral da marisa (cortante)	Marca da pipeta
Rebarba topo	Patamar da marisa saliente
Rebarba Corpo/Fundo cortante ou perigosas	Vidro agarrado interior
Marca Fundo Começar	Vidro solto interior
Marisa lascada/estalada	Contaminação interior
Corpo lascado - cortante	Bico na marisa (interior)
Fundo lascado - cortante	Rebentar no topo-marisa
Sujidade marisa (grafite)	Bolha na marisa
Colagem - cortante	Bolha de rebentar no interior (corpo)
Chapéu na marisa	Bolha de rebentar no exterior (corpo)
Agulha Marisa	Fundo falso
Agulha Fundo	Má distribuição no gargalo
Trapézio	Furo mínimo estrangulado

De forma a se conseguir identificar os defeitos presentes nas embalagens de vidro é fundamental conhecer as designações das diferentes secções da garrafa, ilustradas na Figura 14.

Os defeitos recolhidos foram classificados em: tipo 1, 2 (críticos), 3 e 4. Estes são classificados em relativo, absoluto, absoluto principal e crítico. Os defeitos do tipo 3 são os relativos e não apresentam qualquer tipo de perigo para o consumidor. Os defeitos tipo 1 e 4 são os absolutos principais e absolutos que podem ter portanto influência numa utilização pouco segura da garrafa do ponto de vista do consumidor. O levantamento destes defeitos fez-se em conjunto uma vez que foram recolhidas as frequências de cada um e para uma base de 100% calcularam-se as correspondentes

percentagens. Os defeitos críticos como se constatará mais tarde, são aqueles que apresentam valores menores.

As não conformidades em análise, requisito do *Best Day*, têm diversas origens incluindo as mecânicas e as térmicas. As térmicas podem surgir aquando da manipulação da ferramenta, sobretudo aquela que tem de cumprir com determinados parâmetros de temperatura de utilização. Surgem também quando o condicionamento no *forehearth* não é o mais apropriado. As origens mecânicas relacionam-se essencialmente com a conformidade do equipamento utilizado. É importante ter em conta que o peso do artigo, também pode originar defeitos uma vez que este é relacionado com a forma da gota. No que toca às máquinas de inspeção, o seu *timing* (programação da ordem e do tempo em que a gota é descarregada) também pode ter uma influência significativa para a origem dos defeitos críticos [34].



Figura 14 - Zonas de especificação da garrafa.

Visualmente os defeitos podem ser consultados em Anexos na secção 7.2.1., nas figuras tais como Figura 79, Figura 80 e Figura 81 [35] [36].

3.2 Variáveis processuais recolhidas

As variáveis processuais recolhidas foram obtidas através de diversos documentos fornecidos pelas áreas processuais tais como as do forno, da fabricação e da zona fria pelo que o levantamento destas será seccionado por estas zonas. É de notar que os fabricos da principal garrafa de vidro em estudo, 4630S037 de 0,7 cL, são diversos e sumarizam um total de 241 dias de fabrico, a começar desde 22-7-2015 até 8-1-2018. O último fabrico desta garrafa, desde 1-3-2018 a 15-3-2018 foi usado como validação de previsão dos modelos obtidos no subcapítulo 4.4.

É fundamental reconhecer que embora muitas das variáveis estejam programadas para estar a um determinado valor, existe sempre uma margem de erro que faz com as variáveis apresentem variabilidade, o que por sua vez tem influência nos parâmetros de qualidade de embalagem.

3.2.1 Variáveis recolhidas do forno

Na próxima figura está apresentado um diagrama de todas as variáveis registadas no forno e que posteriormente foram sumarizadas num único ficheiro *Excel*. Nesta zona processual, as medições

e os respetivos registos são efetuados diversas vezes ao dia, englobando diversos turnos (turno A, B e C). Como tal, foi necessário efetuar um tratamento destas variáveis uma vez que o seu número de registos não é sempre o mesmo em todas as variantes do forno. Assim, procedeu-se à realização das médias de cada variável do forno para que todas as variáveis do forno pudessem ser interligadas de uma forma linear no tempo e no espaço. O mesmo se sucede para as restantes variáveis do processo, englobando, portanto, as zonas de fabricação e a fria. É então necessário que haja apenas uma observação por dia de cada variável do forno, uma observação por dia de cada variável da fabricação e uma observação por dia de cada variável da zona fria para que possa haver uma conexão temporal. Embora hajam muitas medições e respetivos registos de algumas variáveis durante o dia respetivo de produção na zona do forno, o mesmo não acontece com muitas das outras variáveis das diferentes zonas processuais.

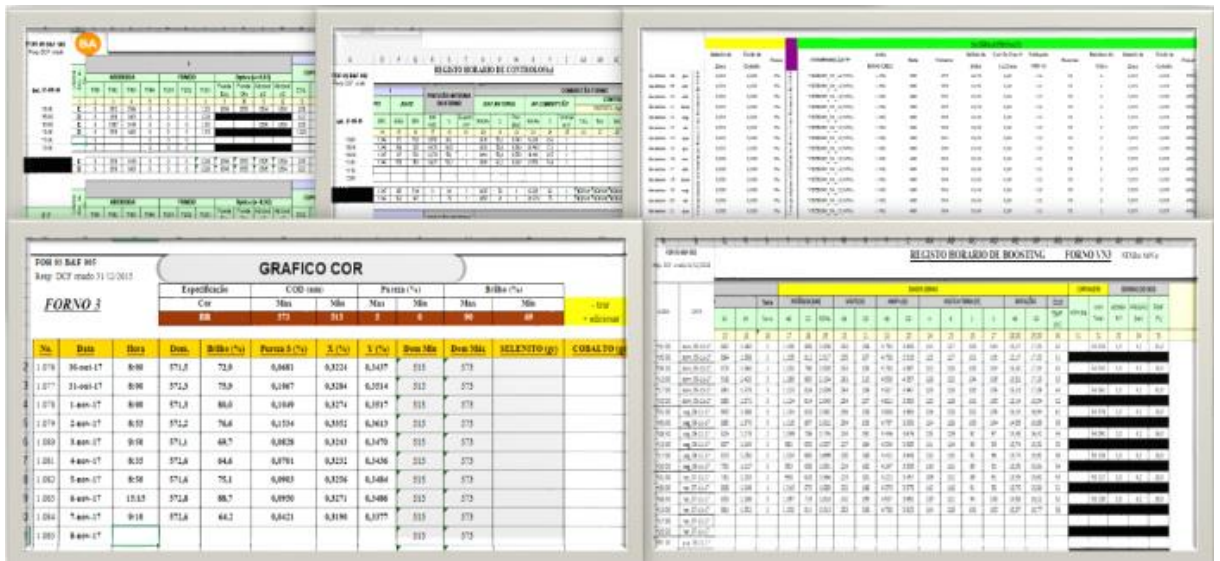


Figura 15 - Dados a recolher da zona do forno, em formato Excel.

Com base na Figura 15, os dados todos recolhidos do forno foram:

- T1101, T1102, T1103 e T1104 que são as temperaturas da abóboda nas diferentes zonas do forno, tal como se pode observar na Figura 16.
- T1201, T1202 e T1203 que são por sua vez as temperaturas próximas da zona de garganta do forno, como se ilustra na Figura 16.



Figura 16 - Temperaturas monitorizadas de diferentes secções do forno em estudo.

- T_Parede é a temperatura da parede do forno do lado direito e do lado esquerdo, medida no tijolo refractário.

- *T_Abóboda* é a temperatura da abóboda do forno, tanto do lado direito como do lado esquerdo do mesmo, medida no tijolo refractário.
- *T_Topo* é a temperatura do topo do forno do lado direito e do lado esquerdo.
- *T_Base* é a temperatura da base do forno, do lado direito e do lado esquerdo.
- *PI_mm_H₂O* é a pressão interna do forno, medida em mm de H₂O.
- *EPI_perc* é a percentagem relativa da pressão interna utilizada no forno.
- *EPI_N* é o número de exaustores utilizado para controlar a pressão interna do forno.
- *Gas_Nm³_h* é a quantidade de gás utilizado no forno dos lados direito e esquerdo.
- *Gast_perc* é a percentagem associada ao gás gasto na combustão no forno dos lados direito e esquerdo.
- *Gast_PresBar* é a pressão do gás utilizado na combustão no forno dos lados direito e esquerdo.
- *ArComb_Nm³_h* é a quantidade de ar utilizada na combustão do lado direito e esquerdo do forno.
- *ArComb_of_perc* corresponde à percentagem do ar utilizado na combustão do lado direito e esquerdo do forno.
- *ArComb_Ventilador_N* corresponde ao número de ventiladores utilizados para controlar o ar de combustão.
- *Control_O₂* refere-se ao controlo de Oxigénio no forno.
- *Control_No_x* diz respeito às emissões de NO_x ocorridas do forno.
- *Control_SO₂* corresponde ao SO₂ emitido no forno.
- *Control_CO* é o registo do CO emitido no forno.
- *Ar_Gás* corresponde à relação que existe em percentagem entre o ar e o gás utilizado no forno, tanto dos lados direito como do esquerdo.
- *Leitura_Manual_Nvidro* resume a leitura manual que se regista constantemente do nível de vidro, tanto do lado direito como do lado esquerdo do forno.
- *SP_NN* é o set point do nível do vidro no forno, medido tanto do lado direito como do lado esquerdo.
- *PV_NN* está relacionado com o nível de vidro, concretamente com a sua variação face ao set-point.
- *NV* é a percentagem da quantidade de enforna dos lados direito e esquerdo do forno.
- *Inversão* é o tempo que o forno demora a inverter o sentido da queima da enforna do vidro.
- *Perc_casco* é a percentagem de casco utilizada no forno.
- *PULL* é a tiragem associada ao forno.
- *C1 a C4, D1 a D4, B1 a B4, E1 a E4* correspondem às posições dos electrodos do boosting no forno, sendo que as que estão mais perto da garganta do forno são as posições C4 e D4.
- *POT_AB* e *POT_CD* são as potências associadas às rotações dos electrodos do boosting nas posições AB e CD.
- *POT_TOT* é a potência total associada às rotações no boosting em todas as posições dos electrodos.
- *VOLTS_AB* e *VOLTS_CD* são as potências associadas às rotações AB e CD em volts.
- *AMPS_AB* e *AMPS_CD* são as intensidades das correntes associadas às rotações AB e CD.

- *VOLTS_TA*, *VOLTS_TB*, *VOLTS_TC* e *VOLTS_TD* são as potências associadas às rotações nas posições A, B, C e D dos eléctrodos em volts.
- *ROTAÇÕES_AB* e *ROTAÇÕES_CD* são as rotações associadas aos electródos nas posições AB e CD no boosting.
- *ÓLEO_T* é a temperatura do óleo associada às camisas de arrefecimento dos electródos, do boosting.
- *CONT_KW_DIA* sumariza a quantidade total de energia que foi gasta no forno, por dia, em kW.
- *CONT_TOT_KWH* corresponde à quantidade total de energia que foi gasta no forno, por hora, em kW.
- *BOMBA_N* é o número de bombas associadas ao sistema de arrefecimento das camisas dos electródos.
- *BOMBA_PRESS* é a pressão da bomba utilizada no sistema de arrefecimento das camisas dos electródos.
- *BOMBA_TEMP* corresponde à temperatura das bombas de arrefecimento das camisas dos electródos.
- Quantidades em kg de matérias-primas do forno 3, tais como a areia, a soda, o calcário, o Sulfato de Sódio, o carvão fino, o feldspato, as escórias, os resíduos do filtro eletrostático, o Selenito de Zinco, o Selénio, o Óxido de Cobalto, o casco branco interno, o casco branco externo e o casco verde interno;
- *Peso_Amostra* é o peso do produto final, que resulta da média amostragem da linha em estudo.
- *Murça* é um parâmetro de qualidade, que corresponde às bolhas pequeninas na garrafa.
- *Bolhas* é o número de bolhas encontradas numa garrafa, em média, por dia, no produto final.
- *Bolha_Kg* é o número de bolhas encontradas numa garrafa, em média, no produto final, por kg do mesmo.
- *Dom* diz respeito ao comprimento de onda dominante correspondente à cor do vidro em causa.
- *Brilho_perc* é a média da quantidade da luz visível transmitida pelo vidro.
- *Pureza_S_perc* é a percentagem da concentração da cor associada a uma garrafa.
- *X_perc* e *Y_perc* são as coordenadas utilizadas para determinar o *Dom* no mapa do comprimento de onda dominante associadas à cor do vidro.

3.2.2 Variáveis recolhidas da fabricação

As variáveis recolhidas da zona de fabricação contemplam o condicionamento do vidro e as máquinas IS. As do condicionamento ilustram-se na Figura 8 e são as temperaturas *Rear* (corresponde à zona traseira do condicionamento do vidro), *Front* (que diz respeito à zona da frente do condicionamento do vidro), *Left*, *Centre* e *Right* (são as temperaturas respeitantes a zona dianteira do condicionamento, dos lados esquerdo e direito como também no centro), *Roof* (é a temperatura medida antes da curva no *feeder*) e *Crank* (é a medida da temperatura na curva do *feeder*).

Existe uma série de variáveis recolhidas da fabricação que se dividem em equipamento variável de máquina e equipamento variável de entrega, nomeadamente:

- *Altura_Manilha* que é como o próprio nome indica a altura a que se coloca a manilha, na parte superior da *máquina IS*.
- *Torque_manilha* é como o próprio nome indica, o torque da manilha, que está subjacente ao sentido em que esta toma e à sua intensidade.
- *Velocidade_do_tubo* é a velocidade, em *rpm*, da manilha a girar.
- *Curso_Punções* é a distância a que sobe a punção para dentro da gota do vidro, de modo a formar a gota de vidro.
- *Altura_Punções* é como o próprio nome indica a altura em que a punção está situado.
- *Fase_Punção* é o diferencial dado pelo número de graus entre o instante após o qual a punção iniciou o seu curso ascendente (0º corresponde ao ponto morto inferior) e momento em que as tesouras efectuam o corte da gota.
- *Cruzamento_Tesouras* é a distância que as lâminas se cruzam (sobrepõem) no final do curso (momento do corte).
- *Curso_tesouras* é a distância que as tesouras atravessam desde a posição inicial até atingirem a posição de sobreposição, a posição do centro das tesouras.
- *Consumo_Água_Tesouras* é a quantidade de água consumida por hora aquando do corte das tesouras.
- *Pressão_água_Tesouras* é a pressão a que a água que está a “lubrificar” as tesouras está sujeita.
- *Tempo_corte_tesouras* é o tempo de corte da gota de vidro.
- *Posição_inicial_tesouras* é a abertura inicial das tesouras antes destas cortarem a gota de vidro, medida em mm.
- *Posição_centro_tesouras* é a posição atingida das tesouras, em mm, no momento do corte da gota.
- *Rácio_água_óleo* é a relação existente entre a quantidade de água/óleo utilizados para diminuição do atrito associado à queda da gota de vidro.
- *Ventilação_da_máquina* é a pressão do ventilador subjacente ao funcionamento da *máquina IS*.
- *Pressão_do_ventilador* é a pressão do ventilador associado à toda quantidade de ar que é necessário introduzir na *máquina IS*.
- *Temperatura* é a temperatura do ar associado à ventilação na *máquina IS*.
- *Ventilação_Placa_Morta* é a pressão a que está sujeita a placa morta (ver Figura 18).
- *Vácuo* diz respeito à pressão exercida na ferramenta através de orifícios dos moldes de forma a puxar o vidro para envolver as paredes do molde.
- *Rompimento* é a pressão exercida aquando é formado o esboço do modelo da embalagem de vidro.
- *Compressão* é a pressão exercida pelos compressores que distribuem o ar comprimido à *máquina IS*.
- *Arref_Marisa* é a pressão exercida aquando a marisa da garrafa é arrefecida.
- *Sopro_Final* é a pressão exercida no desenho final da garrafa.
- *Pressão_pilotagem* é a pressão total fornecida à *máquina IS* para o seu funcionamento.
- *Pressão_interna* é a pressão interna a que está sujeita a garrafa de vidro.

- *Pressão_ar_alta* corresponde à alimentação da linha, desde a zona fria a começar pelo TSF até à zona de paletização.
- *Pressão_ar_baixa* é relativa à pressão exercida na *máquina IS*.
- *Atr_canal_colher_distribuidor* é a altura a que está o canal da colher do distribuidor das gotas de vidro.
- *Tempo_de_queda* é o tempo que o distribuidor demora a entregar as gotas de vidro.
- *Tamanho_tubo_guia* como o próprio nome indica, é o tamanho do tubo guia que tem o fim de guiar as gotas de vidro desde o momento do corte das tesouras até ao distribuidor da gota.
- *Tamanho_da_scoop* é o tamanho da colher que tem o objetivo de distribuir a gota pelos diferentes sectores da máquina de secções independentes.
- *Tempo_de_movimento_scoop* é o tempo que a scoop leva a distribuir as gotas de vidro para os diferentes sectores.
- *Tamanho_defletores* é o tamanho dos defletores que têm como função entregar e alinhar a gota para a entrada do Contra-Molde.
- *Tamanho_Calhas* é o tamanho associado às calhas que entregam a gota desde o distribuidor até ao deflector (ver Figura 10).
- *Versão_da_bucha* é a codificação utilizada para a dita ferramenta.
- *Versão_cabeça_sopro* é a codificação utilizada para a dita ferramenta.
- *Contramolde_set* é o arranjo do contramolde utilizado, em termos de diferentes existências do mesmo.
- *Molde_final_set* é o arranjo do molde final utilizado, em termos de diferentes existências do mesmo.
- *Boquilha_set* é o arranjo da boquilha utilizada, em termos de diferentes existências da mesma.
- *Funis* é o diâmetro do funil utilizado que tem a finalidade de guiar a gota para o interior do contramolde e permitir a passagem de ar para executar o assentamento.
- *Velocidade_puxadores* é a velocidade que os puxadores têm para movimentar as embalagens de vidro desde a saída do molde final até à placa morta.
- *Espaçamento_transferência* é o espaçamento entre as garrafas que entram na arca de recozimento.
- *Espaçamento_tapete_rápido* é o espaçamento associado às garrafas que saem do contramolde e se dirreccionam até à arca de recozimento.
- *Temperatura_contramolde* é a temperatura do contramolde em diferentes secções da máquina.
- *Temperatura_molde_final* corresponde à temperatura do molde final nas diversas secções da máquina.
- *Temperatura_boquilha* diz respeito à temperatura da boquilha nas diferentes secções.
- *1F_vel, 2T_vel até 10F_vel e 10T_vel* são as velocidades da gota em diferentes secções da *máquina IS*.
- *1F_comp até 10T_comp*, de forma análoga às velocidades da gota, são os comprimentos da gota em diferentes secções da *máquina IS*.
- *1F_diam até 10T_diam*, diz respeito ao diâmetro da gota nas diferentes secções da *máquina IS* após obviamente o corte das tesouras.

- *Ordem_carga* corresponde à ordem em que as gotas são descarregadas nas diferentes secções da máquina.
- *Freq_TSQ* é a frequência com que o produto do TSQ é pulverizado sobre as embalagens de vidro.
- *T_Hott* é a temperatura da hott onde se dá o TSQ.
- *1AE_Rec*, *1AD_Rec*, *2_Rec*, *3_Rec*, *4_Rec*, *5_Rec* e *6_Rec* são as diferentes temperaturas impostas nas diferentes secções da arca de recozimento tal como se pode constatar pela Figura 78.

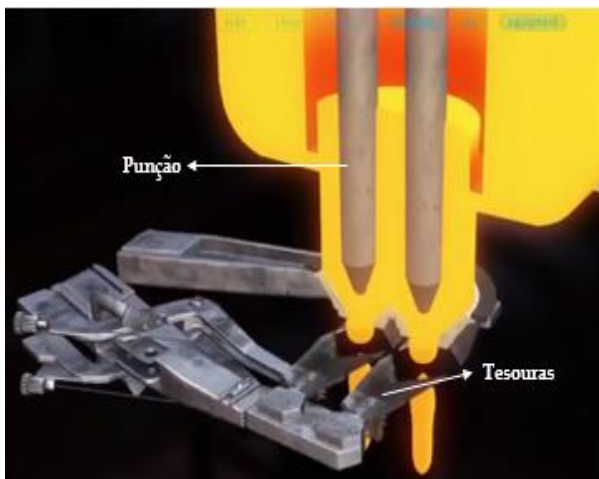


Figura 17 - Diferentes secções do feeder integrantes da máquina IS.
[Adaptado [37]]

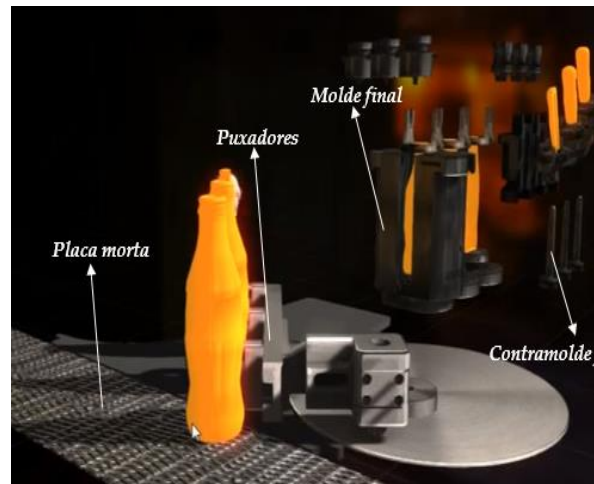


Figura 18 - Modelação da embalagem de vidro nos moldes.
[Adaptado [38]]

3.2.3 Variáveis recolhidas da zona fria

As variáveis desta parte do processo contemplam o TSF, e que dizem, portanto respeito à:

- *E_T_TSF*, *C_T_TSF* e *D_T_TSF* que são as temperaturas das garrafas à esquerda, ao centro e à direita da zona em que é aplicado o TSF.
- *TSF_grau_E*, *TSF_grau_C* e *TSF_grau_D* que são os graus de aplicação da pulverização do TEGOGLASS RP 41, tanto avaliados dos lados esquerdo, centro e direito.

As variáveis que dizem respeito à inspecção das garrafas e posteriormente à paletização, não foram levantadas uma vez que são constantes. Uma vez que a garrafa é sempre a mesma, a sua especificação é sempre igual a nível de controlo de qualidade e não faz parte do âmbito deste projeto. Como tal, nem sequer consta na plataforma do *Best Day* na plataforma da *BA GLASS*.

3.2.4 Variáveis gerais do controlo do processo

Existem diversas variáveis relacionadas com o rendimento do processo. Este pode ser quantificável pelos seguintes parâmetros:

- *Densidade*, medida em g/cm^3 da massa vítrea no forno.
- *Cadência* associada à velocidade de saída dos frascos por minuto, na máquina IS (*Independent Section*).

- *PESO* é o peso médio da amostragem feita das garrafas nesse dia de produção.
- *T_UTIL* corresponde à tiragem útil em *kg* da linha.
- *PROD_BRUTA* é a produção bruta vinda da saída da *máquina IS*, medida em *kg*.
- *PROD_UTIL* está relacionada com a quantidade de vidro em *kg* que foi embalado nesse dia e que estava conforme (note-se que está presente aqui também a quantidade de vidro que foi por sua vez reescolhida).
- *QUANT_UTIL* está relacionada com a quantidade de vidro em número de peças que foi embalado nesse dia e que estava conforme.
- *Paletes* é o número de paletes associado à quantidade útil, em que a anterior é dividida pelo número de garrafas de uma paleta (1398 garrafas).
- *Hot_End_PERC* é o rendimento atingido das garrafas na zona quente, mais concretamente entre a saída da máquina *IS* e a entrada das garrafas na arca de recozimento.
- *R_PROD* é o rendimento final da produção por dia, na linha em estudo.
- *PERC_REJ* relaciona-se com a percentagem de rejeição entre a entrada das embalagens de vidro na arca de recozimento e no paletizador.
- *PERC_REJ_MIL* é a percentagem de rejeição obtida das garrafas entre a entrada das mesmas nas máquinas de *inspeção MIL* e a respetiva saída.
- *Saldo* relaciona-se com o número de paletes que foram bloqueadas, nesse dia de produção, devido à existência de defeitos na embalagem final.
- *Taxa_utilização_MP* e *Taxa_utilização_MF* correspondem à percentagem de uso ao longo dos fabricos do contramolde e do molde final, de forma a controlar o seu tempo de vida.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

4 Resultados

4.1 Análise exploratória das variáveis processuais

De forma a seleccionar as variáveis relevantes para a análise das associações entre as variáveis resposta e as variáveis processuais, procedeu-se à análise da distribuição das observações (isto é, se seguem uma distribuição normal). Em anexo 7.3.1. encontram-se as ilustrações da análise feita.

Antes de se proceder à triagem das variáveis (com base na análise da distribuição normal), observou-se que algumas apresentam *outliers* (pontos mais afastados da média das variáveis processuais). Para melhor compreensão deste fenómeno, analisaram-se as variáveis resposta em conjunto com as processuais, no pior e melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL. Este pior/melhor fabrico seleccionou-se com base na existência de defeitos críticos e com a maior/menor quantidade de produção útil. Os *outliers* muito altos do KCR relacionam-se directamente com a produção útil, pois quanto maior for o KCR, existe consequentemente maior quantidade de produção útil. No entanto, os *outliers* menores do KCR não possuem esta relação directa e serão portanto analisados à parte, não cumprindo então o pior dia do fabrico.

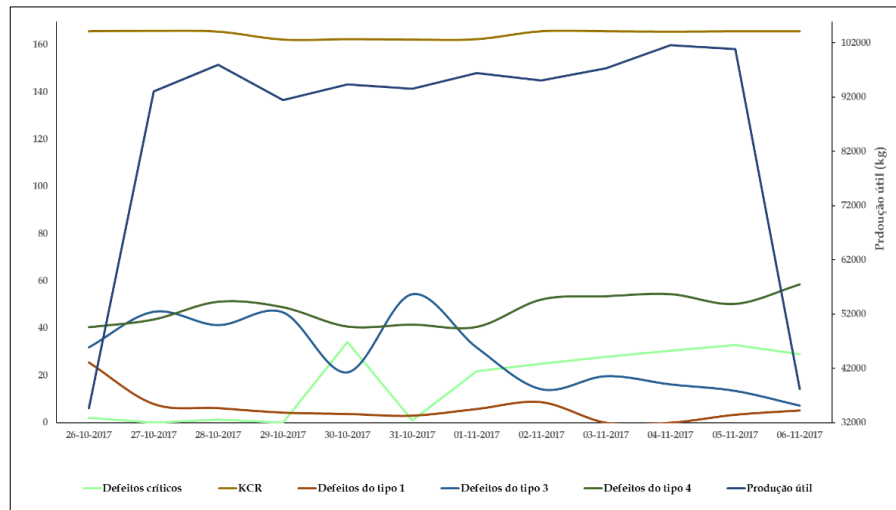


Figura 19 - Comportamento das variáveis resposta ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7 cL.

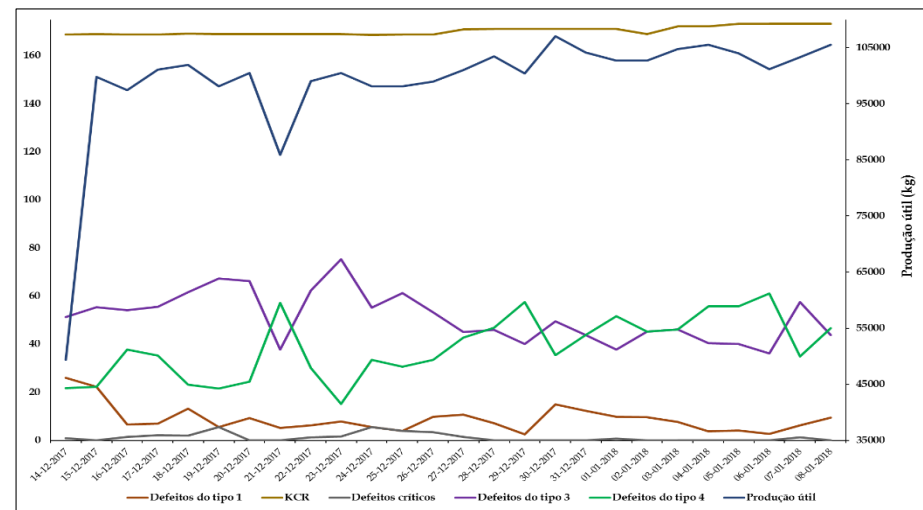


Figura 20 - Comportamento das variáveis resposta ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7 cL.

Como se pode observar, na Figura 19 e Figura 20 encontram-se as variáveis resposta ao longo do pior e do melhor fabrico do artigo principal em estudo. Nota-se que tanto no 1º dia como no último dia de produção, os valores da produção útil situam-se na casa dos 30 ton, valor muito inferior aos restantes dias de produção. Isto deve-se essencialmente à mudança da máquina /S, pois enquanto esta é feita, diversas ferramentas na máquina são mudadas perturbando assim a produtividade. Após a mudança, diversas horas ou até mesmo um dia podem passar até que, a máquina estabilize. Os defeitos do tipo 1, do tipo 3 e do tipo 4 tendem a ter o mesmo comportamento da produção útil. O mesmo não se aplica aos defeitos críticos. O KCR aparentemente não tem qualquer tipo de relação com nenhuma das outras variáveis resposta.

4.1.1 Análise exploratória da produção útil

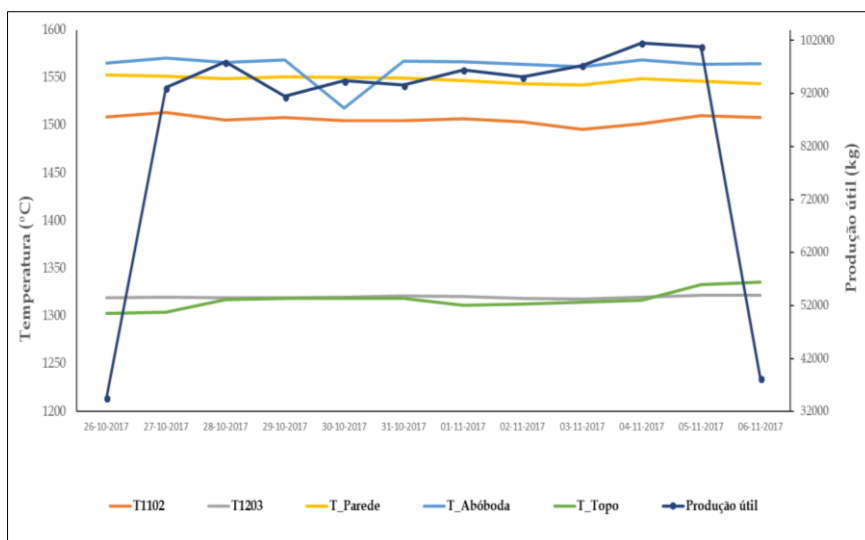


Figura 21 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

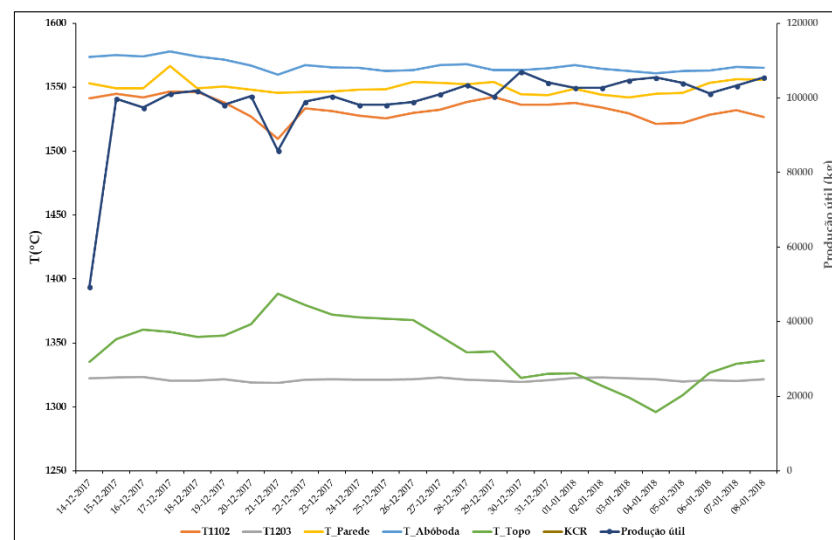


Figura 22 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

A T1102 tanto na Figura 21 e na Figura 22 aparenta ter uma influência ligeira na produção útil, enquanto que a T1203 parece ser constante independentemente do valor tomado pela produção útil. Embora a temperatura da parede (T_Parede) esteja constante na primeira figura analisada, não acontece o mesmo com a segunda, pois varia inversamente com a quantidade de vidro útil produzida. A temperatura da abóboda do forno parece ter um

comportamento quase constante, embora acompanhe tanto no pior como no melhor dia de fabrico a produção útil. A temperatura do topo do forno não influencia a variável resposta.

Com base na Figura 83 constata-se que as variáveis processuais do *boosting* têm um comportamento semelhante, independentemente dos dias de fabrico em causa. Seleccionaram-se as posições C₄ e D₄, por serem aquelas que estão mais próximas da garganta do forno, para posteriormente integrarem a análise das correlações existentes e a posterior modelação.

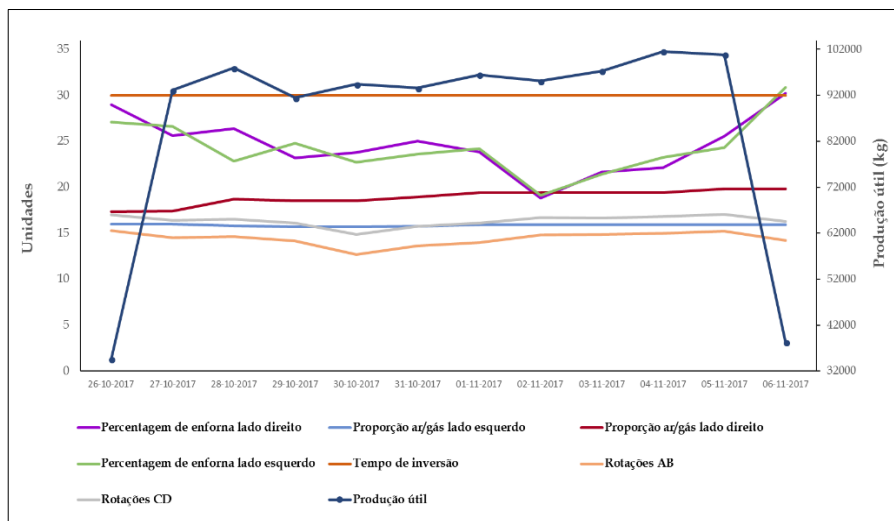


Figura 23 – Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforna correspondentes com a produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

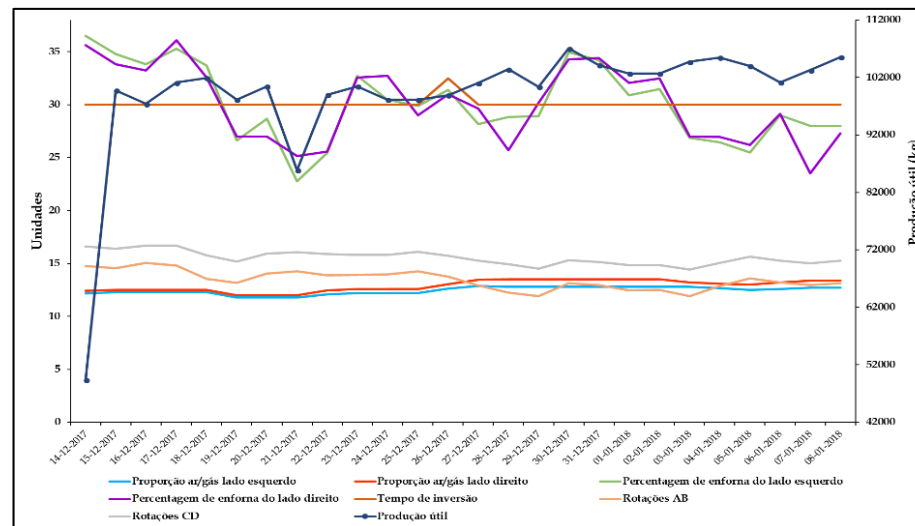


Figura 24 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforna correspondentes com a produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL

Na Figura 23 e Figura 24 verifica-se que o tempo de inversão no forno possui um comportamento constante. As percentagens de enforna dos lados esquerdo e direito, têm um comportamento bastante semelhante e de carácter linear para com a produção útil o que era de prever, uma vez que quanto maior quantidade de matéria-prima a enfornar, maior quantidade de vidro produzido haverá. As proporções de ar/gás tanto do lado esquerdo como do lado direito, possuem valores constantes, dado que é necessário manter sempre um excesso de ar entre 5-15% de modo a evitar a pós-combustão nos recuperadores. As rotações AB e CD dos electrodos também apresentam um carácter praticamente estável, sem qualquer tipo de influência na produção útil.

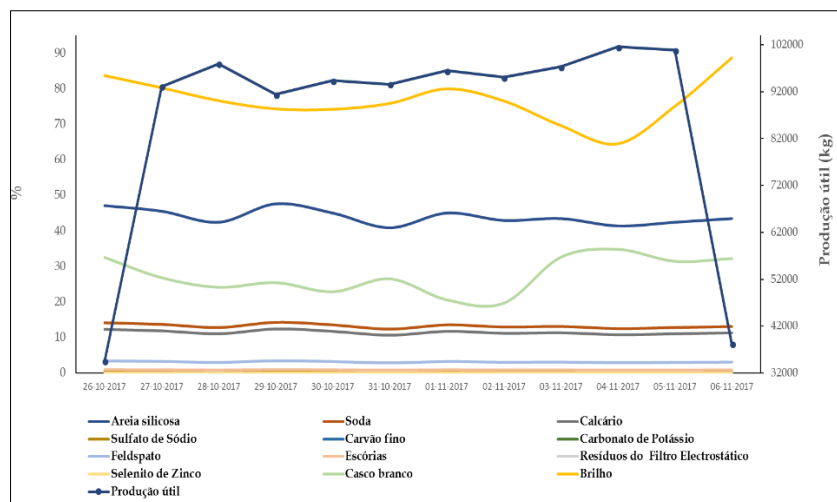


Figura 25 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com a produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

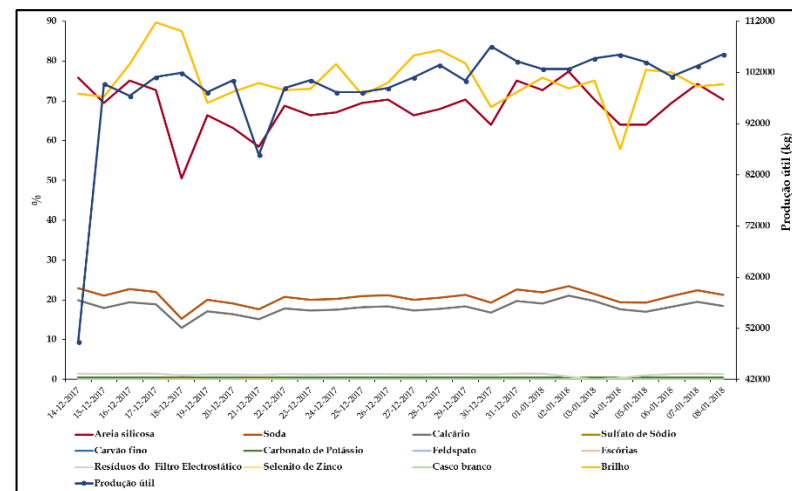


Figura 26 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com a produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

É de prever que a quantidade útil produzida terá o mesmo comportamento da quantidade de matéria-prima utilizada, sobretudo a vitrificante, como é o caso da areia silicosa, tal como se pode constatar na Figura 25 e Figura 26, pois é a maioritária na composição vítrea. O mesmo sucede com o uso do casco branco apenas na Figura 25. Para o gráfico ao lado, onde se usam quantidades mínimas de casco (até 5%), não existe nenhuma associação com a variável resposta estudada. Isto ocorre, pois, faz-se o ajuste da matéria-prima a utilizar conforme a disponibilidade da mesma, que no caso presente tem um intervalo amplo (9%-38%). Quando há falta de stock de casco, isto é, em situações extremas, a quantidade de areia a ser utilizada tende a ser maior. A soda e o calcário têm um comportamento semelhante e praticamente sem qualquer tipo de influência aparente na produção útil. É de notar que as matérias-primas afinantes e estabilizantes têm um comportamento constante e a percentagem utilizada das mesmas não excede 4%, não interferindo, portanto, diretamente na quantidade de vidro produzido. Nestes gráficos foi analisado um parâmetro de qualidade da garrafa que é o brilho, por conveniência, tendo uma gama de valores semelhante às das percentagens de massa utilizadas no forno, e por ventura não possui uma relação linear com a produção útil.

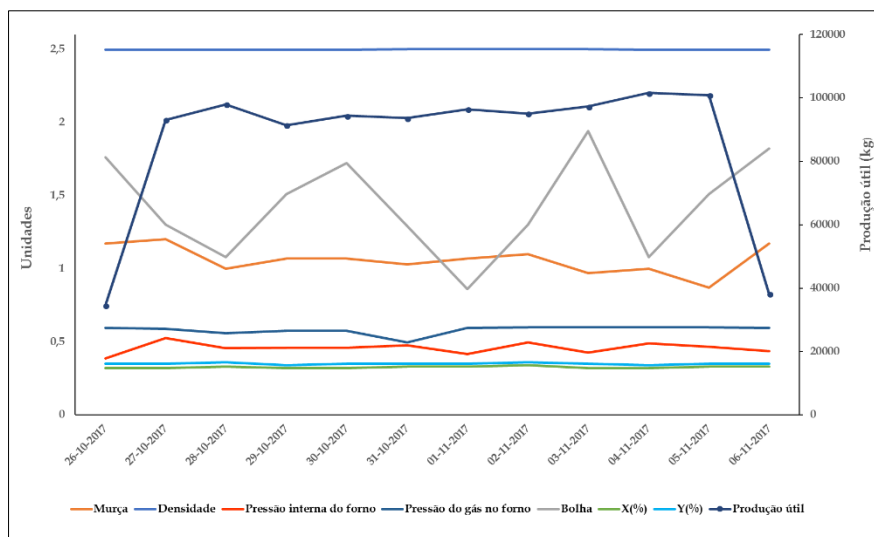


Figura 27 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com a produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

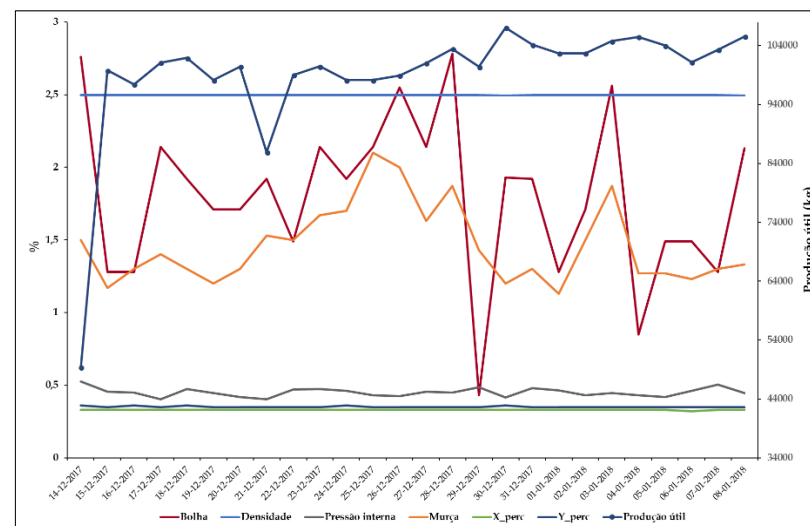


Figura 28 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com a produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

Nas figuras acima observa-se a independência da densidade do vidro relativamente à produção útil. Este comportamento é expectável e desejável, pois é fundamental que a densidade do vidro seja constante e independente da produção útil diária. O mesmo se regista para as percentagens X e Y da identificação da cor do vidro. No caso dos defeitos *murça* e *bolha*, estes não se relacionam com a produção útil, exibindo um comportamento totalmente aleatório, mas com baixa percentagem de ocorrências (~ 3%). Por último, a pressão interna do forno apresenta um comportamento contraditório. Na Figura 27 observa-se uma diminuição com a produção útil, Figura 28 um aumento.

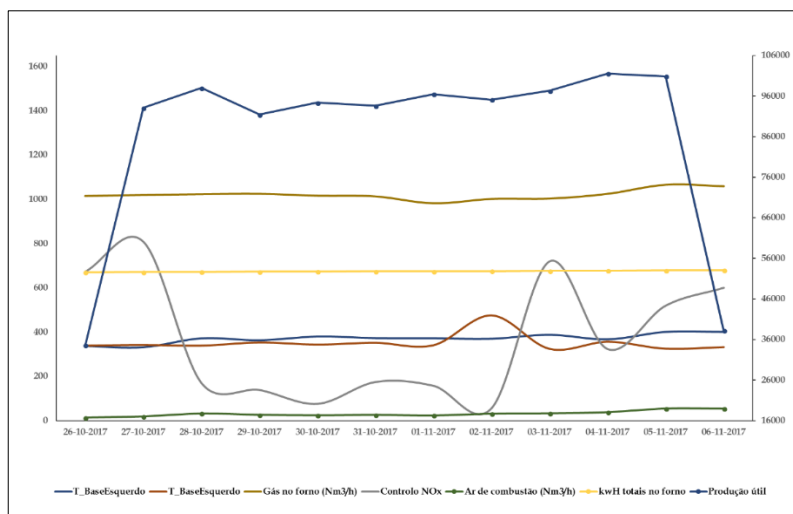


Figura 29 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com a produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

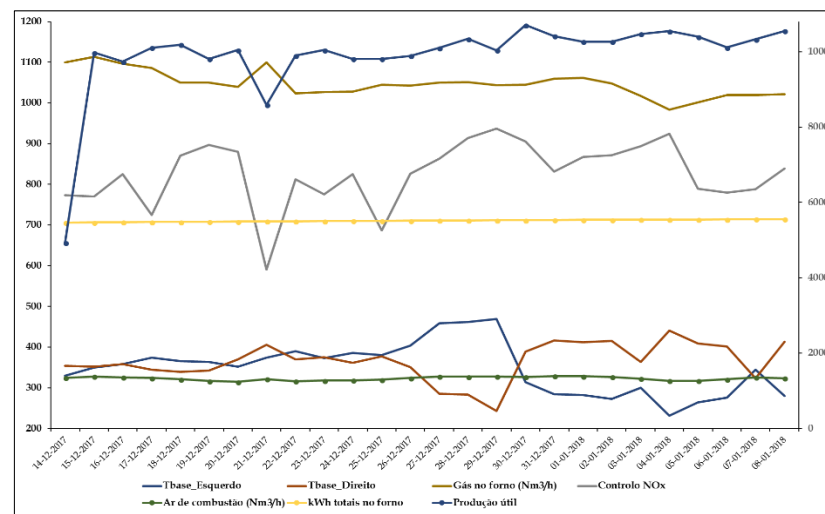


Figura 30 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com a produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

O ar de combustão e a energia total consumida (por hora) no forno apresentam valores constantes ao longo dos fabricos analisados (Figura 29 e Figura 30). As temperaturas da base do forno (do lado esquerdo e lado direito) possuem comportamento idêntico, sem influência directa na produção útil. Já a quantidade de gás no forno varia de forma inversa com a produção (Figura 30). O controlo de NO_x é de elevado interesse para a fábrica, pois é um indicador de combustão incompleta. Pela análise dos gráficos acima não se verifica qualquer tipo de relação com a produção útil. No entanto, nos mínimos relativos (dias 19-12-2017 e 29-12-2017), observa-se um decréscimo da produção útil para um aumento de emissão de NO_x.

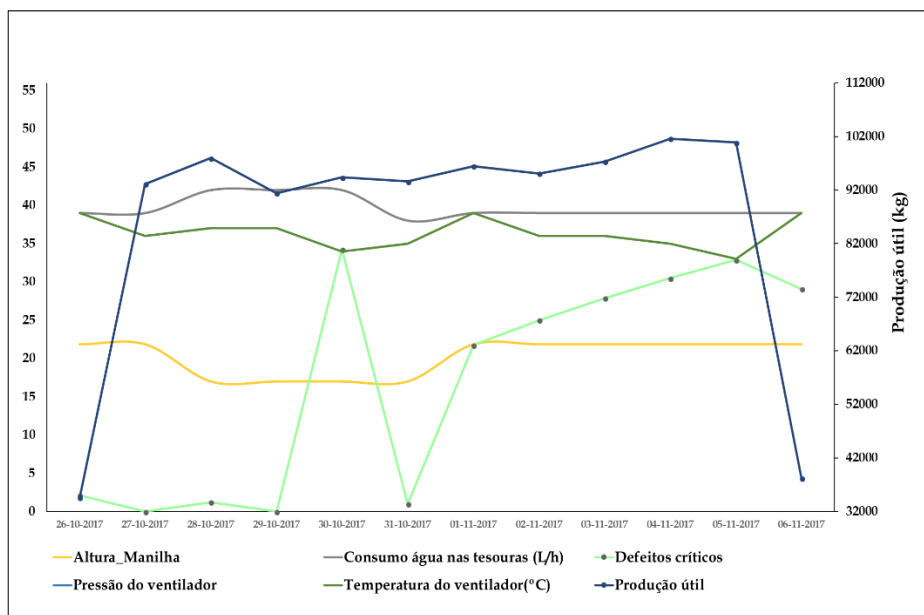


Figura 31 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente produção útil e defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

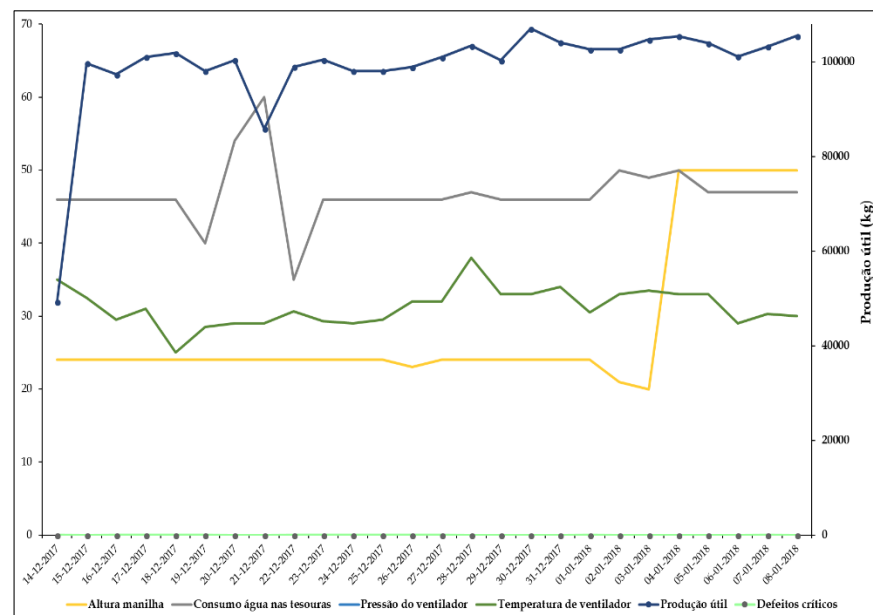


Figura 32 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente produção útil e defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

As irregularidades da temperatura do ventilador, presente em ambos os gráficos (Figura 31 e Figura 32) é independente da produção útil e dos defeitos críticos. O mesmo ocorre com a pressão do ventilador, que se mantém constante ao longo de ambos os fabricos. O consumo da água nas tesouras apenas teve impacto na produção útil quando esta diminuiu no dia 21-12-2017 (Figura 32) o que significa que houve necessidade de arrefecer ou até mesmo lubrificar as gotas de vidro. É de notar que a pressão do ventilador em ambas as figuras está afectado de uma escala de 10, ou seja na realidade os valores situam-se entre 1000 e 1300 mm H₂O.

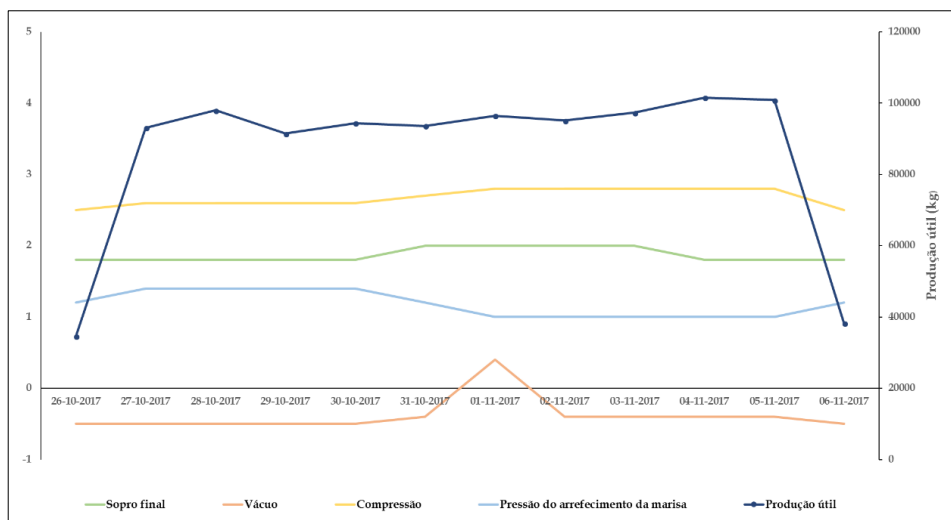


Figura 33 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

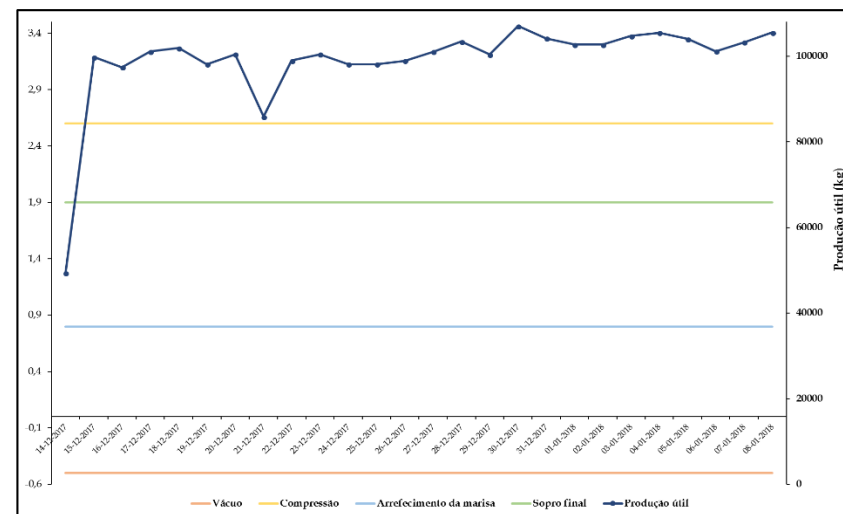


Figura 34 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

Tanto na Figura 33 como na Figura 34 observa-se que embora tenha havido uma flutuação no vácuo no dia 01-11-2017, nos restantes dias de produção do pior e melhor fabrico da garrafa em estudo, as variáveis processuais representadas não parecem ter influência na produção útil.

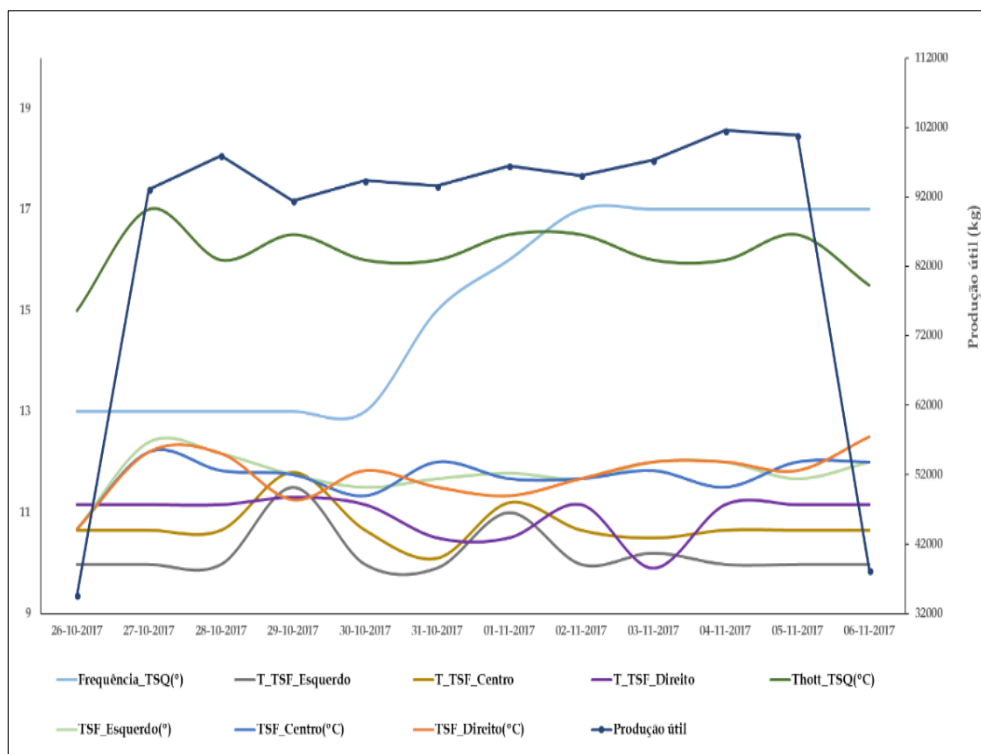


Figura 35 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais do vidro e a correspondente produção útil ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL

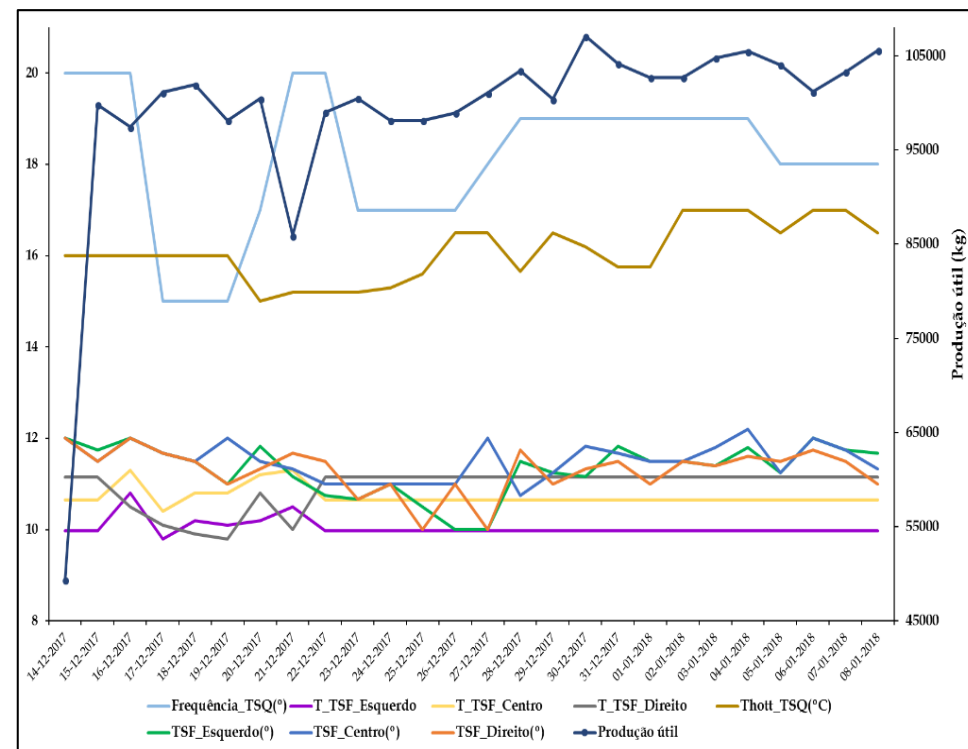


Figura 36 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais e a correspondente produção útil ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL

Na Figura 35 e na Figura 36 apresentam-se as variáveis processuais dos tratamentos superficiais aplicadas nas embalagens de vidro. É de ter em conta que as temperaturas aqui apresentadas tanto das garrafas na zona fria como na zona quente, mais concretamente nos tratamentos superficiais, estão afectadas de uma escala de 10 vezes menor. Nota-se que a temperatura das garrafas à esquerda e ao centro no TSF apresentam um comportamento semelhante sem qualquer tipo de influência na produção útil. Por outro lado, a temperatura do lado direito no TSF parece aumentar quando as outras 2 diminuem, e vice-versa. A temperatura da *hott*, em ambas as figuras, parece acompanhar a produção útil. A frequência de aplicação do TSQ não parece estar relacionada com a variável resposta estudada. Os graus de aplicação do TSF têm um comportamento irregular e não aparentam relacionar-se com a produção útil.

4.1.2 Análise exploratória do KCR

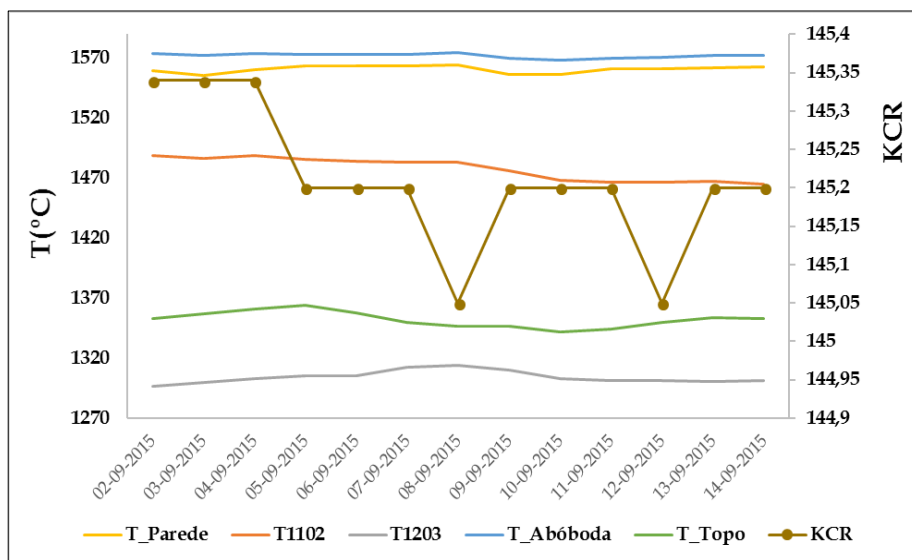


Figura 48 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7 cl..

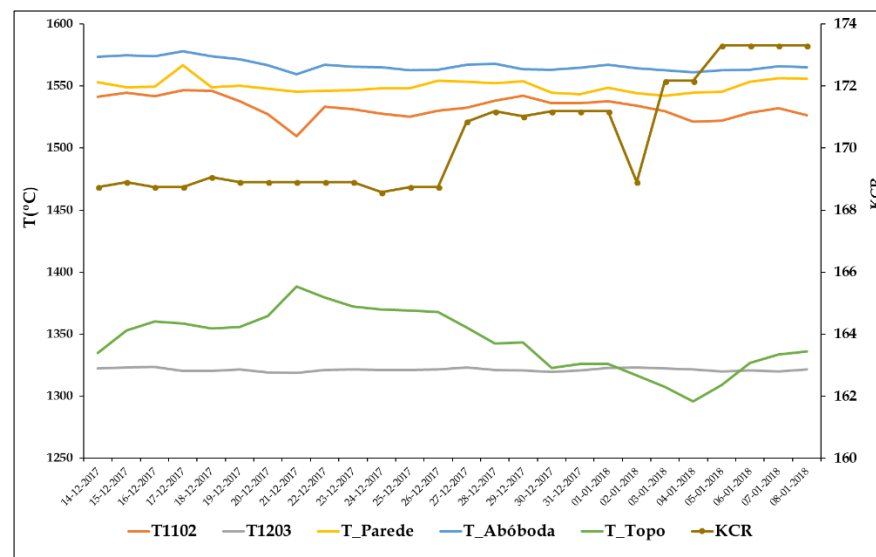


Figura 37 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente KCR do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7 cl..

Com base na Figura 37 e Figura 38 observa-se que as diferentes temperaturas do forno não têm qualquer relação com o KCR o que é de prever pois os parâmetros que o caracterizam relacionam-se com a velocidade da máquina e com o peso do artigo produzido.

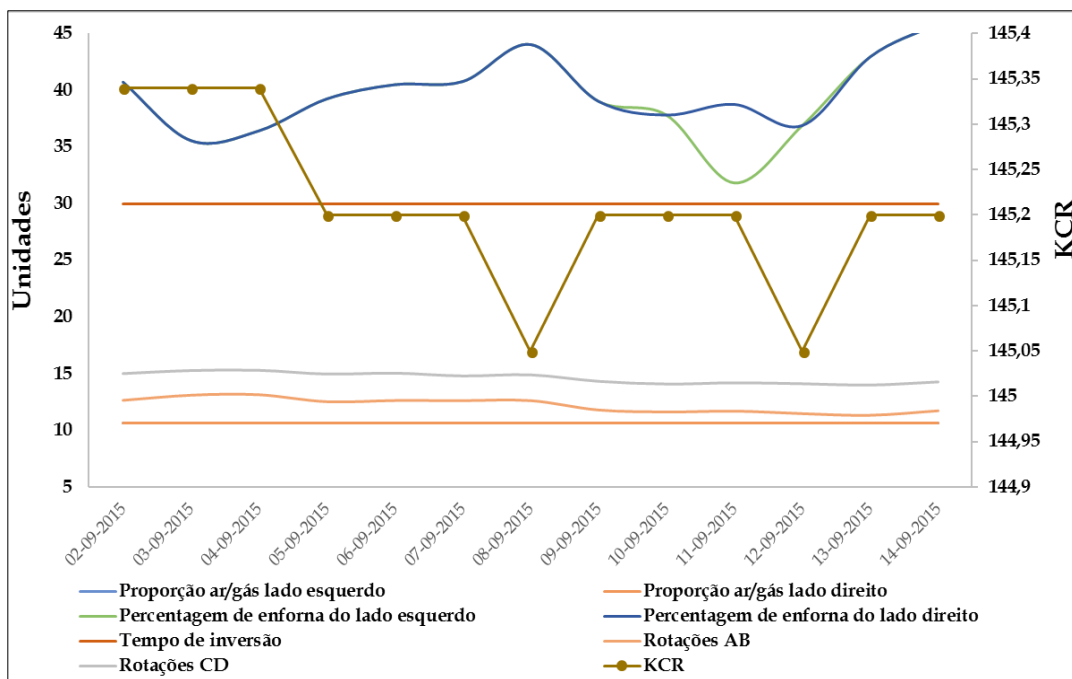


Figura 38 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforma correspondentes com o KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

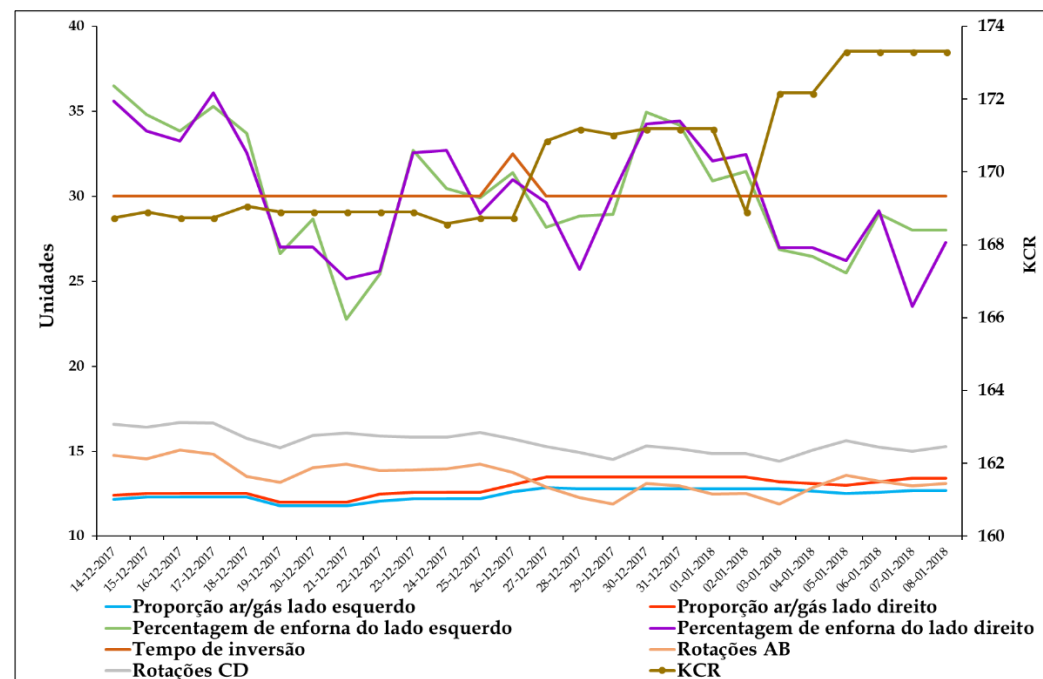


Figura 39 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforma correspondentes com o KCR ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

O *KCR* não é afectado de uma forma linear pelas variáveis relacionadas com a regeneração do forno, tal como se pode constatar pelas Figura 38 e Figura 39. Denota-se o comportamento contraditório da enforma, em que na Figura 38, nos primeiros dias de fabrico, se verifica uma diminuição do *KCR* com o aumento da percentagem de enforma enquanto que, nos últimos acontece o contrário. A Figura 39 sugere que, de facto, o *KCR* diminui com o aumento da enforma, o que não era de prever, uma vez que quanto maior é a enforma da MP, maior tende a ser necessidade de aumentar a cadência da máquina. Este aumento da cadência deve-se à necessidade manter o nível de pasta vítrea no forno constante.

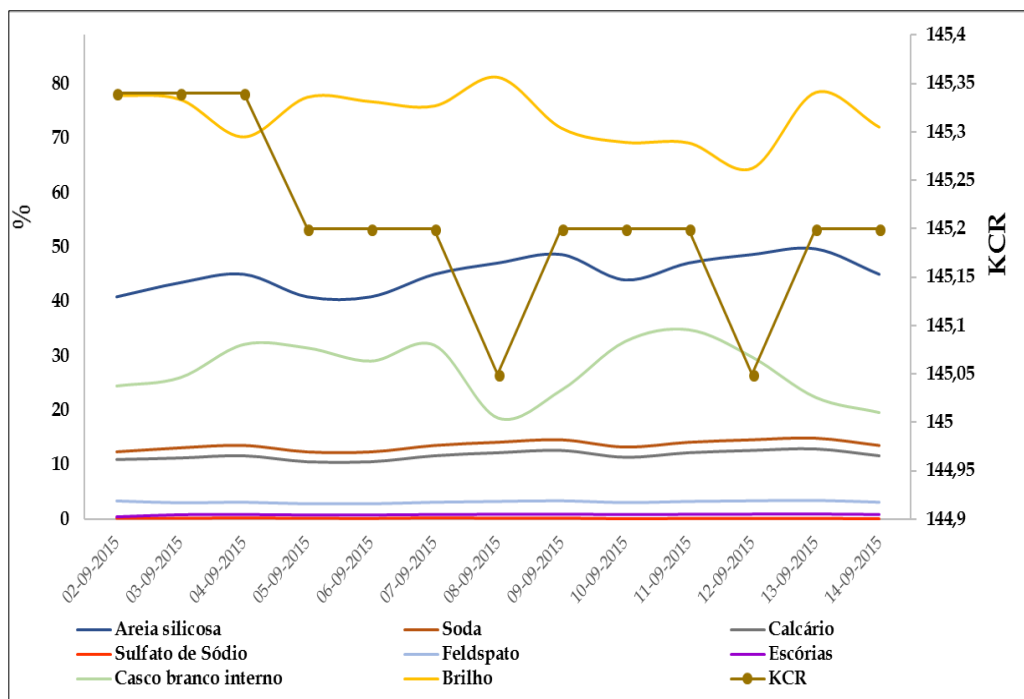


Figura 40 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com o KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cL

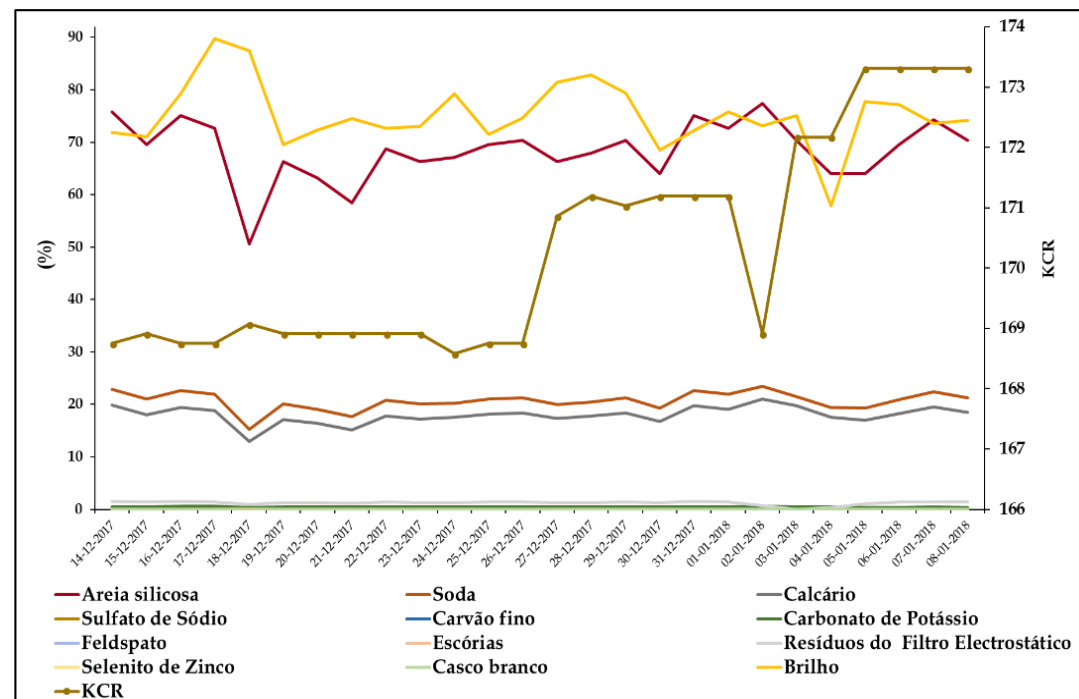


Figura 41 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com o KCR ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

De forma análoga aos defeitos críticos, o *KCR* não está a ser influenciado pela quantidade de matérias-primas utilizadas directamente, tal como se pode constatar na Figura 40 e na Figura 41.

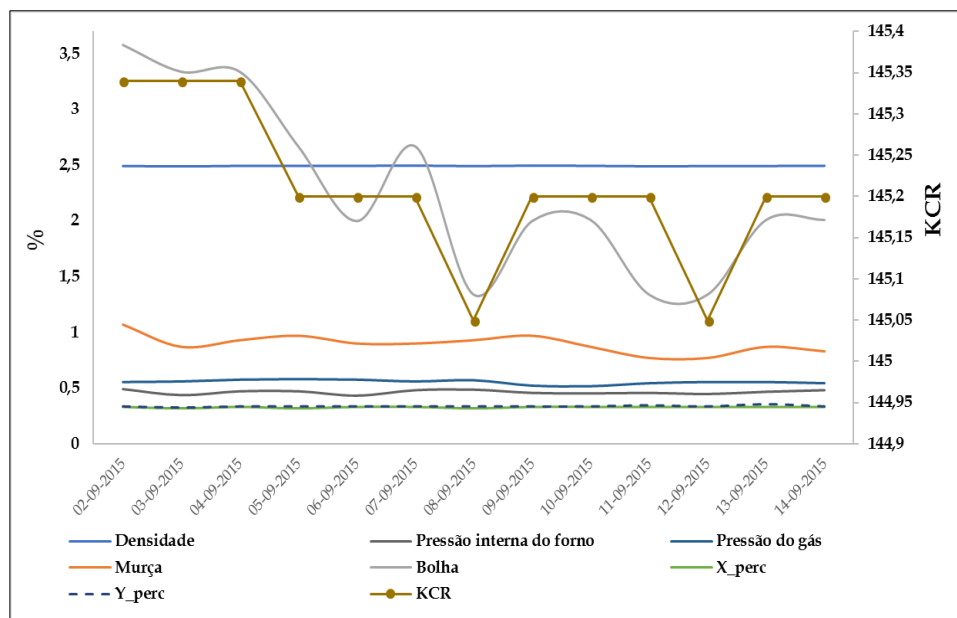


Figura 42 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com o KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cl

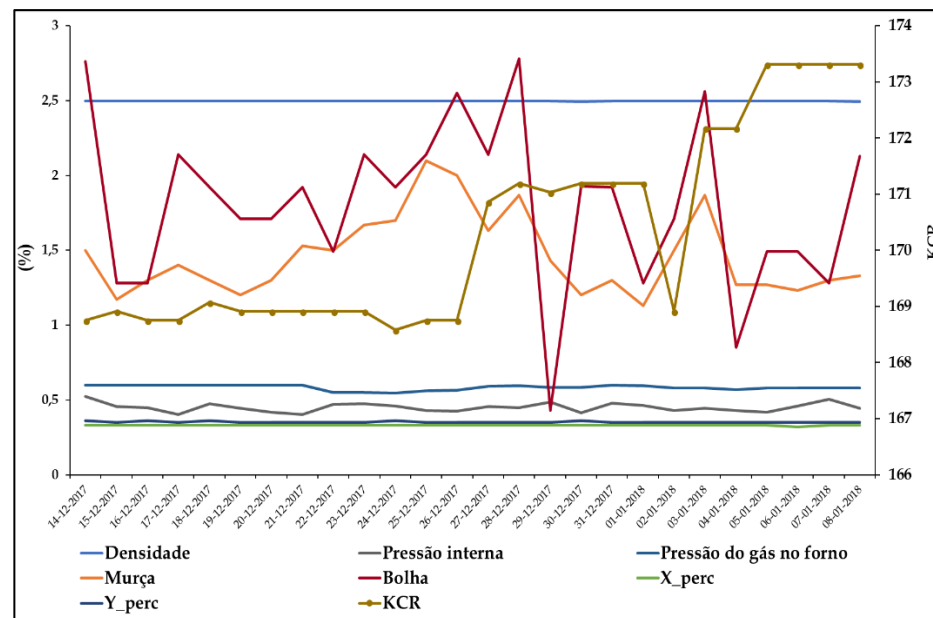


Figura 43 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com o KCR ao longo do melhot fabrico do 4630S037 de 0,7cl

Pela Figura 42 pode-se constatar que o *KCR* sofre variações linearmente com a existência de bolha. O mesmo não acontece na figura ao lado. Quanto às restantes variáveis observadas, verifica-se um comportamento aleatório em relação ao *KCR*.

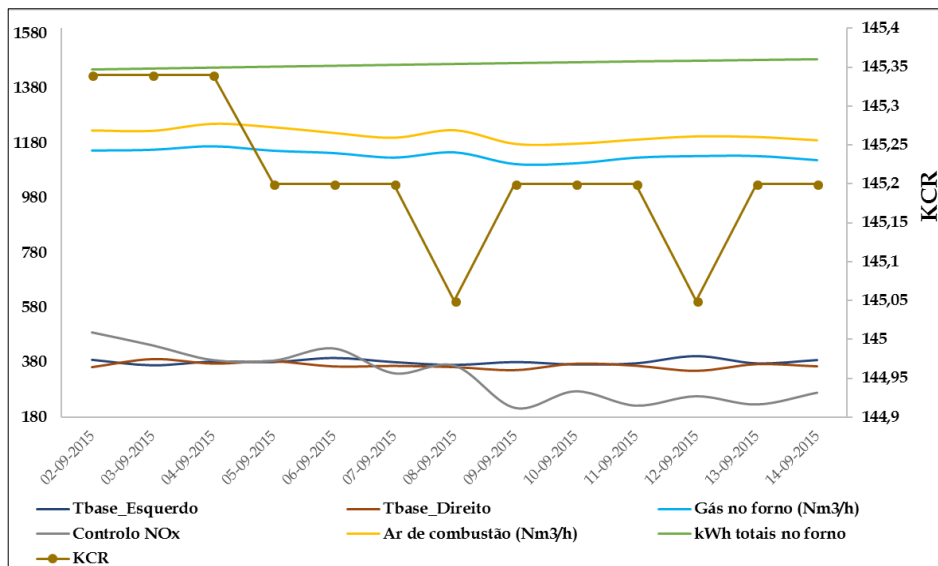


Figura 44 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com o KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cl

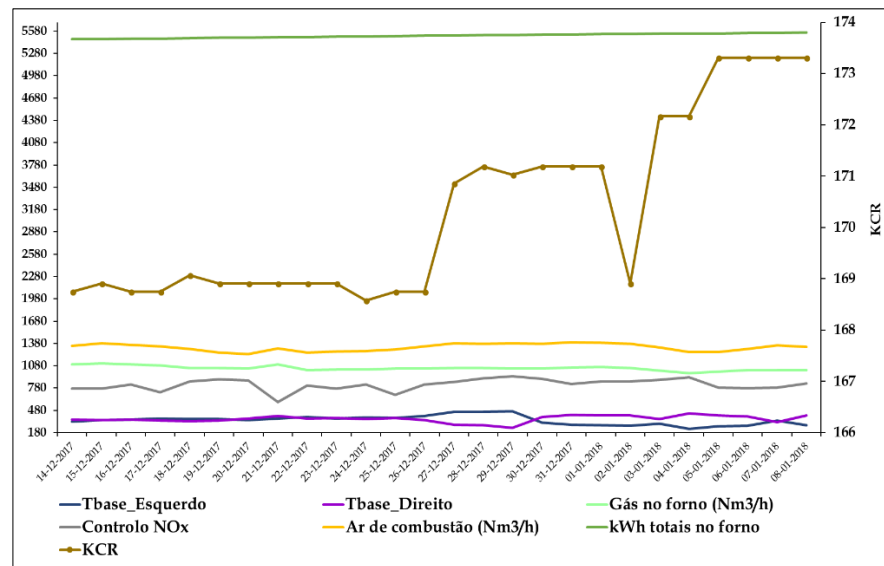


Figura 45 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com o KCR ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cl

Tanto na Figura 44 como na Figura 45 não ocorre nenhuma variação linear das temperaturas da base do forno, do gás e do ar utilizados neste, do controlo das emissões gasosas, nomeadamente o NO_x , e por fim da energia consumida no mesmo com o *KCR*.

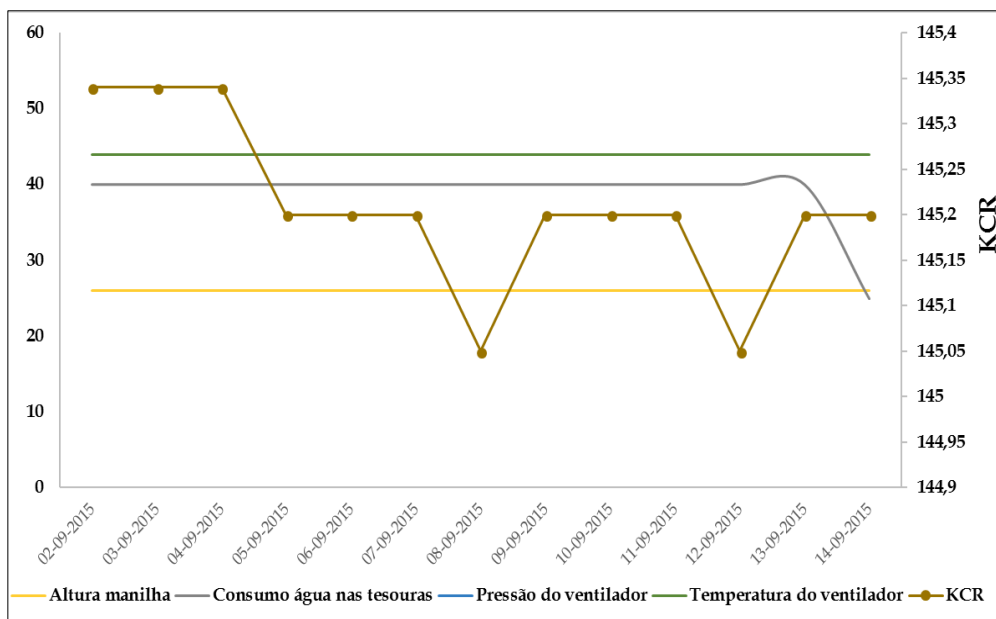


Figura 46 - Variáveis processuais da fabricação e correspondente KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7 cL

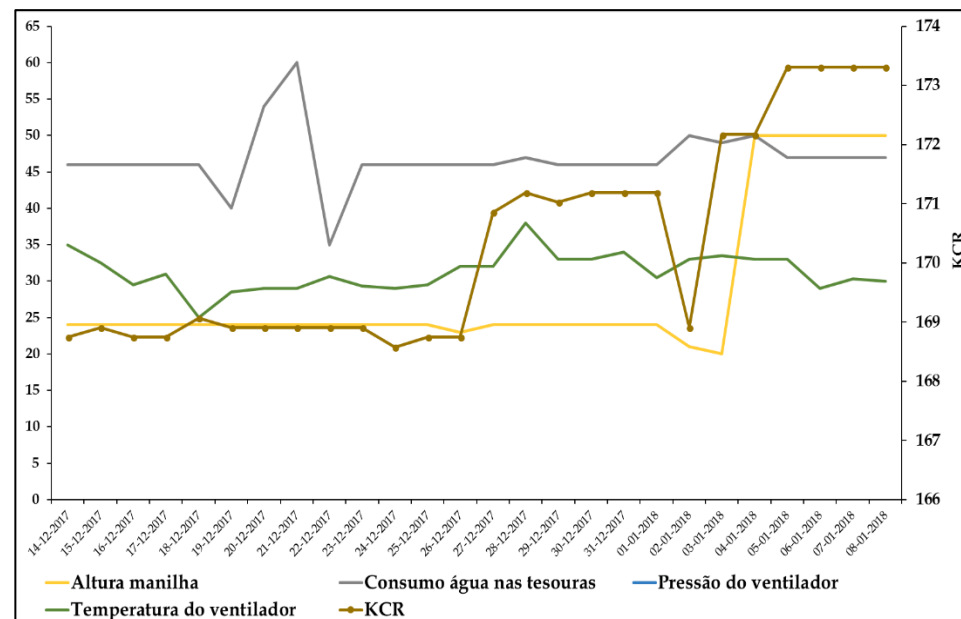


Figura 47 - Variáveis processuais da fabricação e correspondente KCR ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7 cL

Embora o comportamento das variáveis processuais de fabricação na Figura 46 tem um comportamento constante, o mesmo não sucede na Figura 47. Nesta última figura, a altura da manilha aumenta com o KCR. Esta observação é sustentada pela informação de que a altura da manilha controla a quantidade de gota injetada de forma a controlar o peso da gota [39]. É de fulcral importância que a gota tenha o diâmetro, comprimento e peso correctos. Estes parâmetros modelam a qualidade de vidro produzida. O KCR é afectado pelo consumo de água nas tesouras como também pela temperatura do ar e da respetiva pressão a que são distribuídas, dado destas depende a distribuição de temperatura e por sua vez o perfil uniforme ou não do vidro.

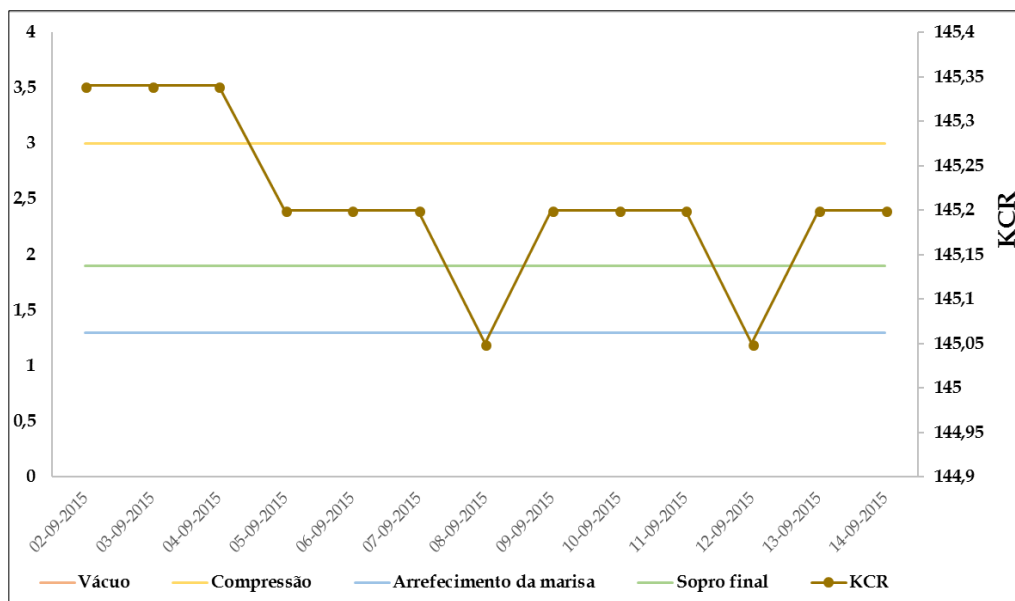


Figura 48 - Variáveis processuais da fabricação e correspondente KCR ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7 cL

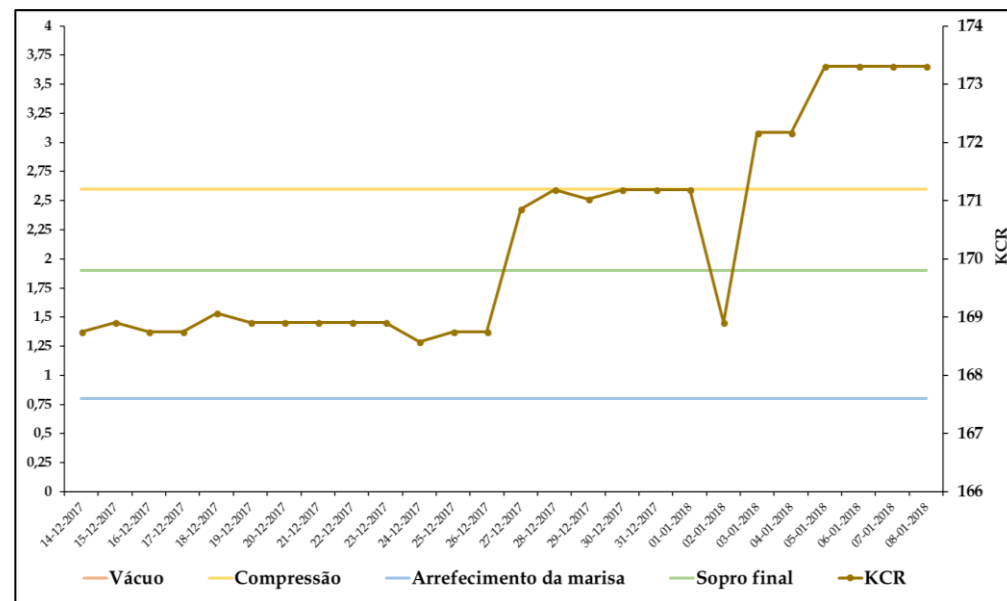


Figura 49 - Variáveis processuais da fabricação e correspondente KCR ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7 cL

Da observação na Figura 48 e na Figura 49 conclui-se que as variáveis processuais de fabricação relacionadas com a pressão não afectam o KCR

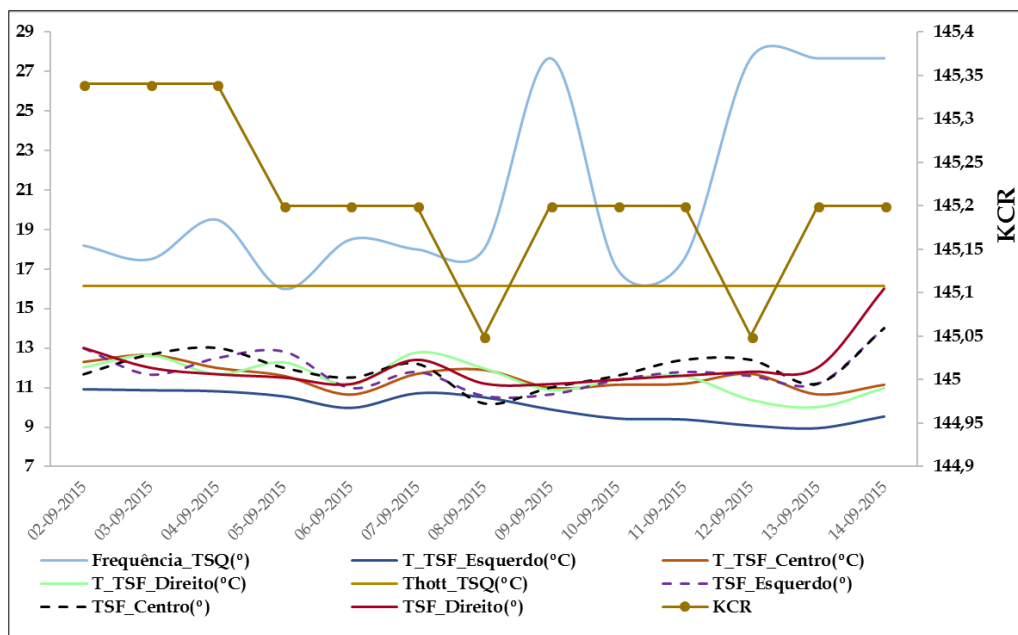


Figura 50 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais do vidro e o KCR correspondente ao longo do fabrico do 4630S037 de 0,7cL

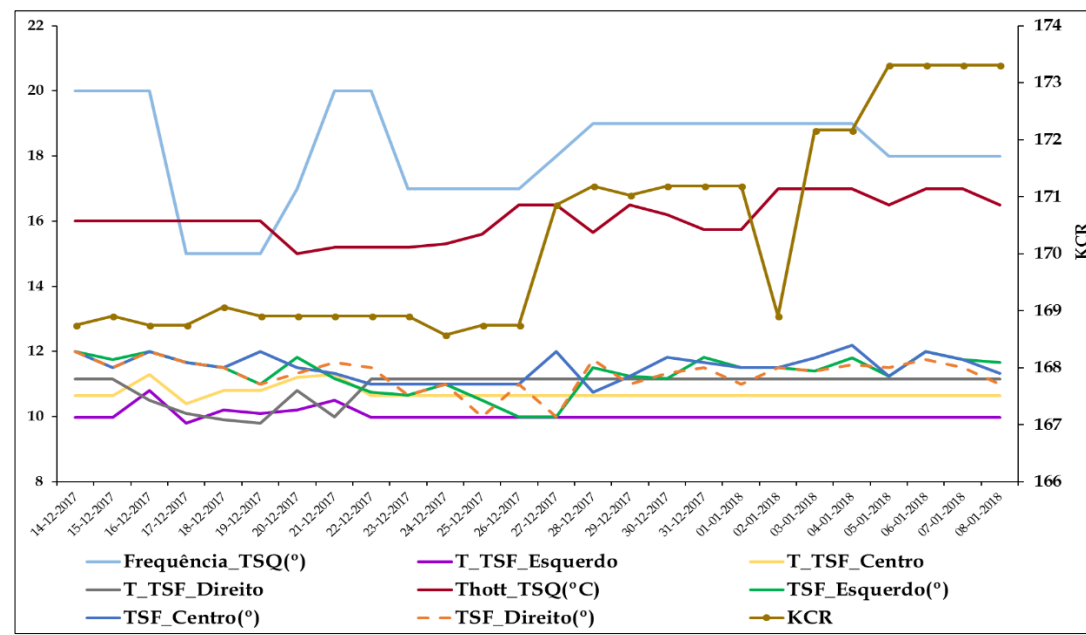


Figura 51 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais do vidro e o KCR correspondente ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL

No que toca às variáveis respeitantes aos tratamentos aplicados nas garrafas de vidro, não há qualquer relação destas com o KCR. Este facto é previsível dado que este monitoriza-se na zona de fabricação e não na zona fria, pelo que as variáveis desta última não possuem influência no KCR.

4.1.3 Análise exploratória dos defeitos críticos

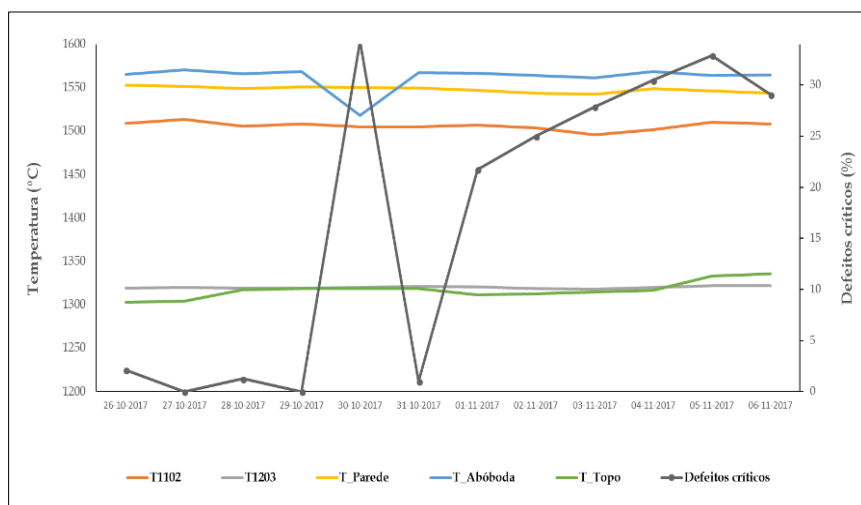


Figura 52 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do pior fabrico 4630S037 de 0,7cL

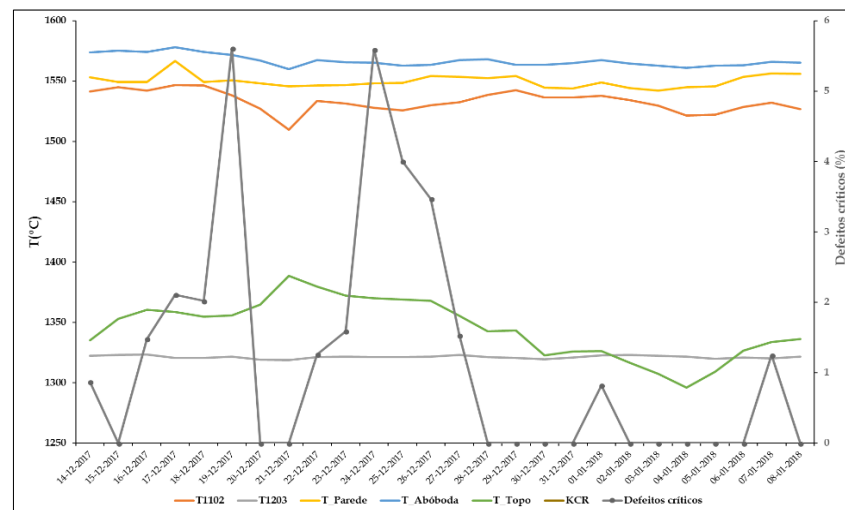


Figura 53 - Comportamento das diferentes temperaturas registadas nas diferentes secções do forno e correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL

A T1203 (Figura 52 e Figura 53) tem um comportamento constante ao longo dos dias de fabrico envolvidos. O mesmo não sucede com a T1102, sobretudo no melhor fabrico, em que esta tem um comportamento pouco regular. No entanto como no pior fabrico esta é constante e existe variação dos defeitos críticos, não se estabeleceu uma associação directa com a variável resposta aqui estudada. Embora a temperatura da parede (T_Parede) esteja constante na Figura 52, o mesmo não acontece na Figura 53, onde não se observa uma relação directa com a variável resposta em causa. A temperatura da abóboda do forno tem um comportamento quase constante ao longo da produção, embora o pior dia de fabrico esteja associado a um mínimo relativo, surgindo um pico nos defeitos críticos.

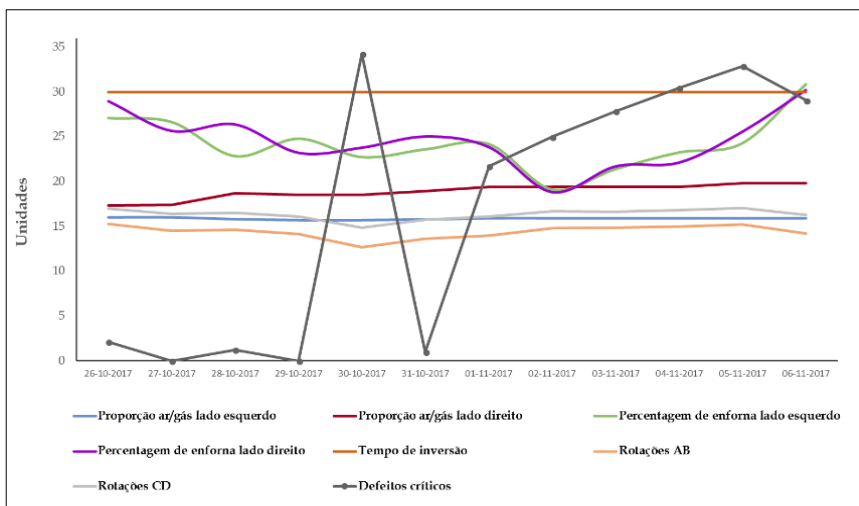


Figura 54 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforma correspondentes com a percentagem de defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL

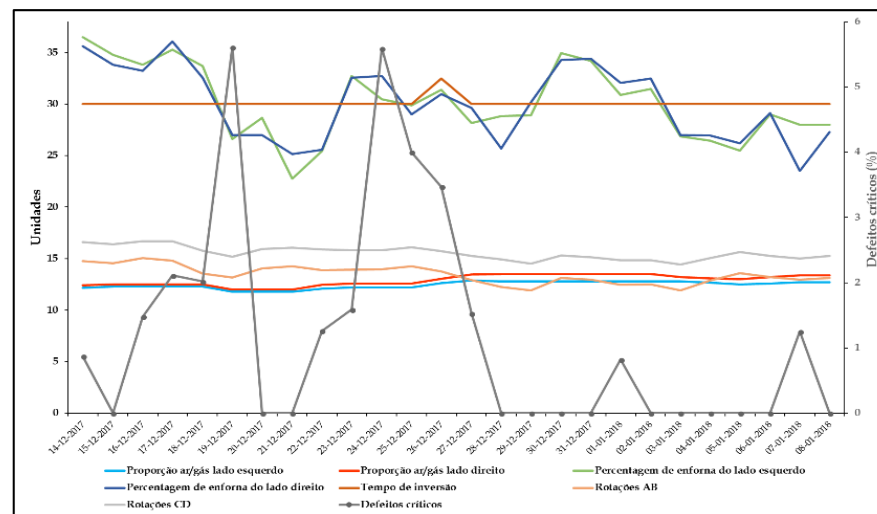


Figura 55 - Comportamento das diversas variáveis relacionadas com regeneração do forno e a respetiva enforma correspondentes com a percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

Enquanto que os defeitos críticos sofrem variações, o mesmo não se sucede com as rotações dos electrodos e percentagens de ar/gás, tendo estas variáveis um comportamento praticamente constante. No que toca à quantidade de enforma utilizada, é de se ter em conta que com a diminuição desta (Figura 54 e Figura 55), existe um aumento da percentagem dos defeitos críticos. O tempo de inversão, tal como já foi visto anteriormente, apresenta um comportamento constante.

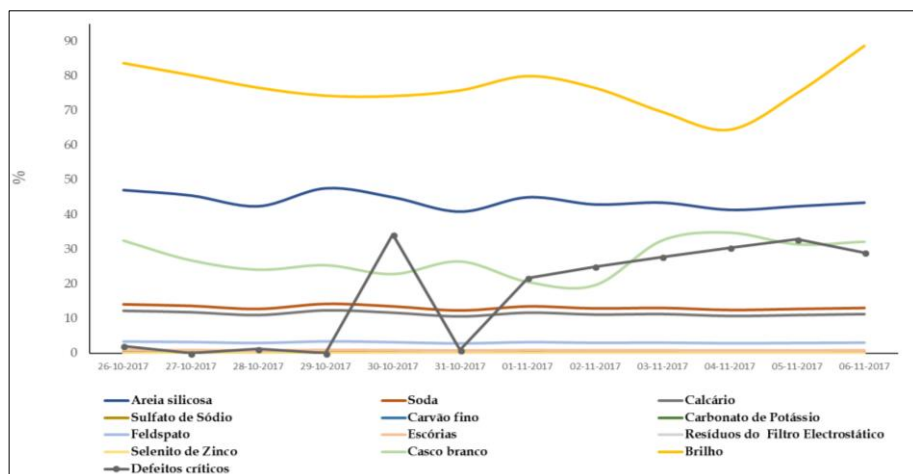


Figura 56 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com a percentagem dos defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

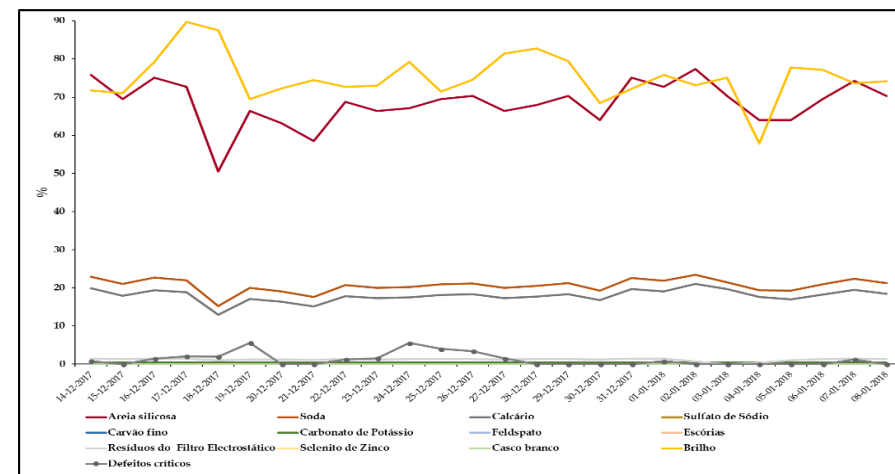


Figura 57 - Comportamento das diversas matérias-primas do forno correspondente com a percentagem dos defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

Ao analisar as Figura 56 e Figura 57 verifica-se que as matérias-primas não têm qualquer influência na percentagem dos defeitos críticos, o que já é expectável dado a qualidade das mesmas e confiança nos fornecedores relativamente ao caderno de encargos.

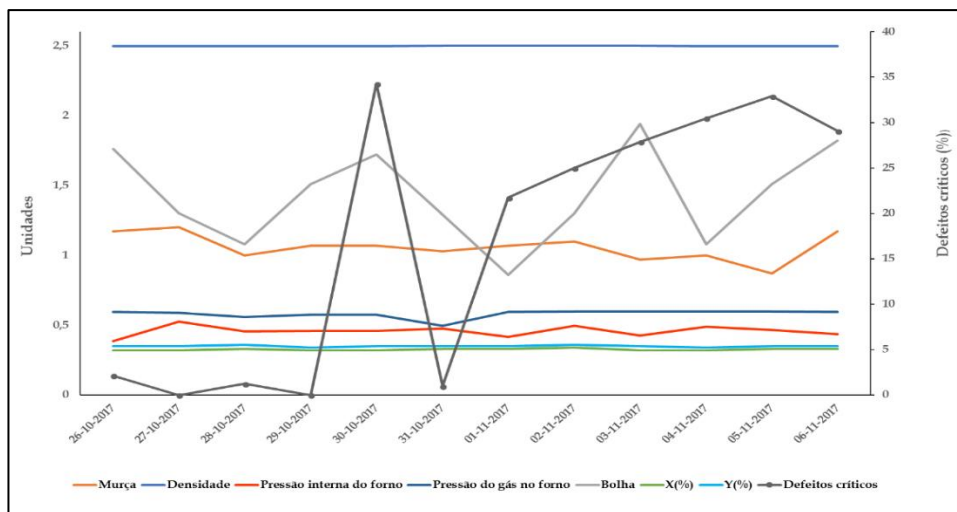


Figura 58 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com a percentagem de defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL

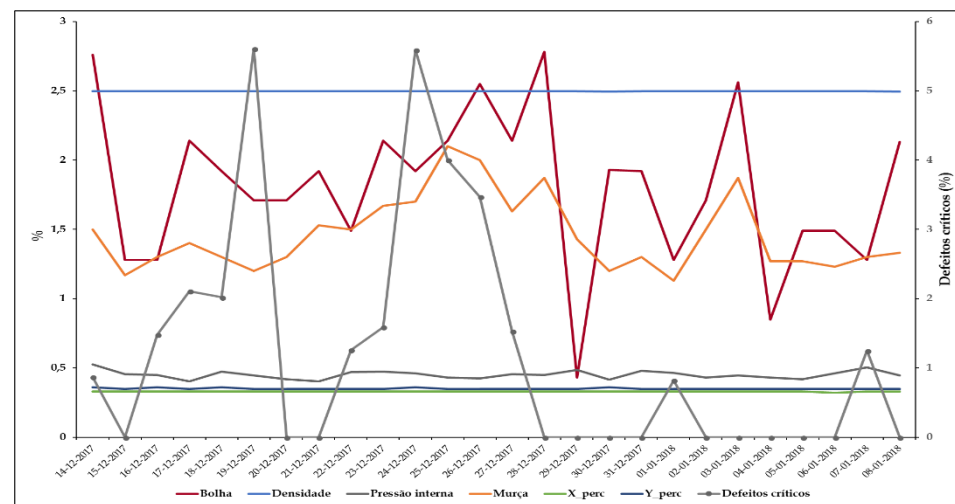


Figura 59 - Parâmetros de qualidade em conjunto com algumas variáveis do forno correspondente com a percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL

Tal como visto anteriormente, na análise da Figura 27 e Figura 28, os defeitos críticos, à semelhança da produção útil, são independentes da densidade do vidro. Este comportamento é expectável e desejável, pois é fundamental que a densidade do vidro seja constante. O mesmo se regista para as percentagens X e Y da identificação da cor do vidro. No caso dos defeitos murça e bolha, estes apresentam alguns máximos relativos, mas com baixa percentagem de ocorrências (~ 3%), que acompanham alguns máximos relativos da variável resposta estudada. Por último, a pressão interna do forno apresenta um comportamento contraditório.

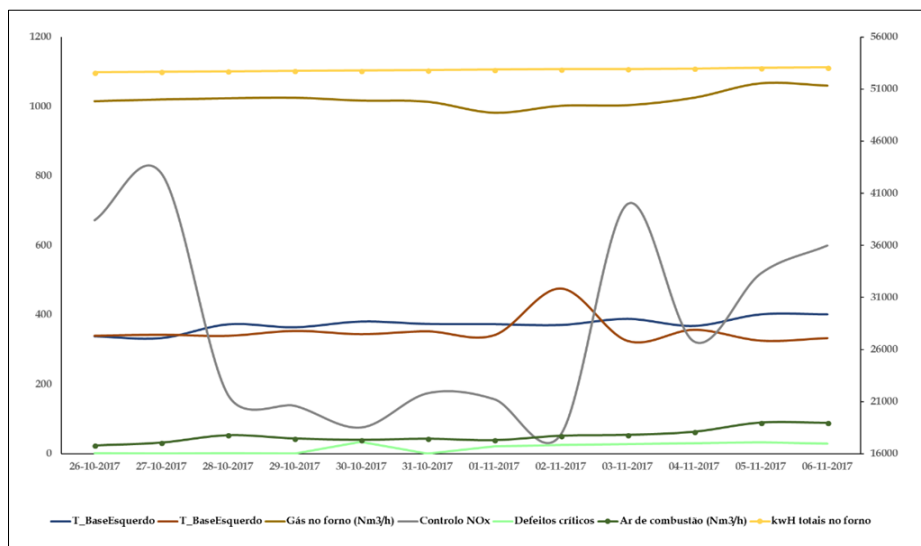


Figura 60 - Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com a percentagem de defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL

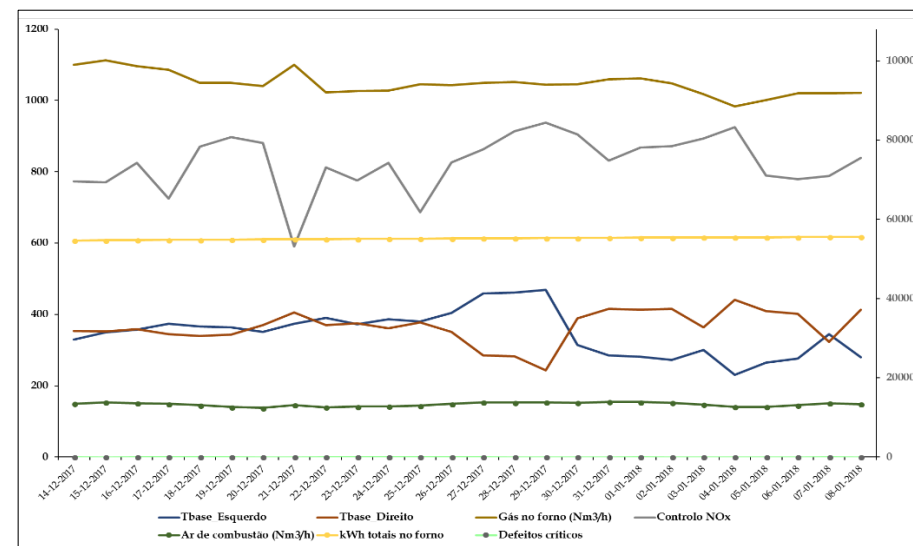


Figura 61 Comportamento de algumas variáveis processuais do forno correspondente com a percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL

Na Figura 60 e na Figura 61 as variáveis processuais já foram analisadas anteriormente aquando da sua relação com a produção útil, que por sua vez não é diferente da análise em conjunto com a percentagem de defeitos críticos. O Controlo de NO_x é de elevado interesse de analisar, pois é um indicador de combustão incompleta. No entanto, pelos 2 gráficos apresentados verifica-se que não existe qualquer relação directa com a produção útil.

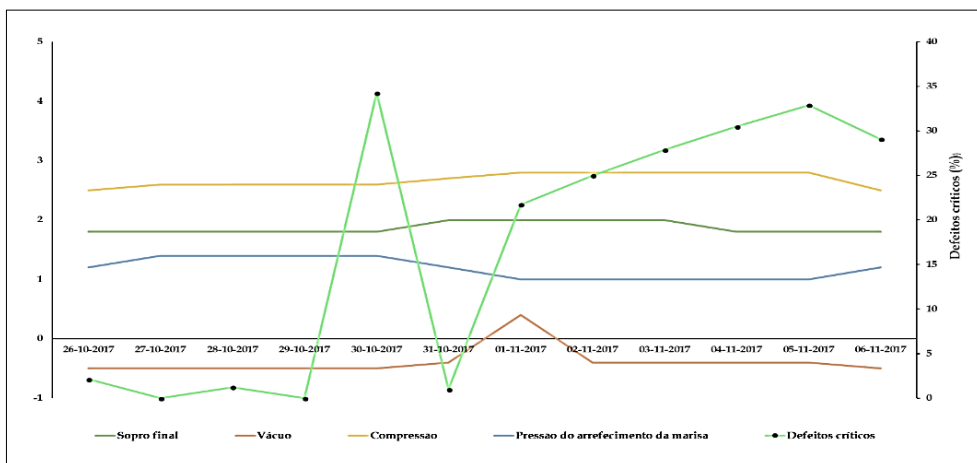


Figura 62 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL .

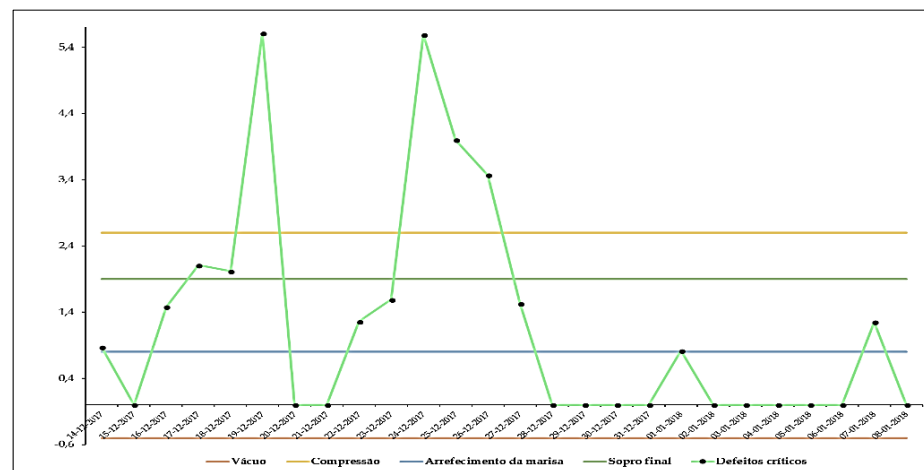


Figura 63 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL

Em ambas as figuras (Figura 64 e Figura 65) nota-se que embora tenha havido uma flutuação no vácuo utilizado no dia 01-11-2017, nos restantes dias de produção do pior e melhor fabrico da garrafa em estudo, as variáveis processuais representadas não parecem ter influência no comportamento dos defeitos críticos.

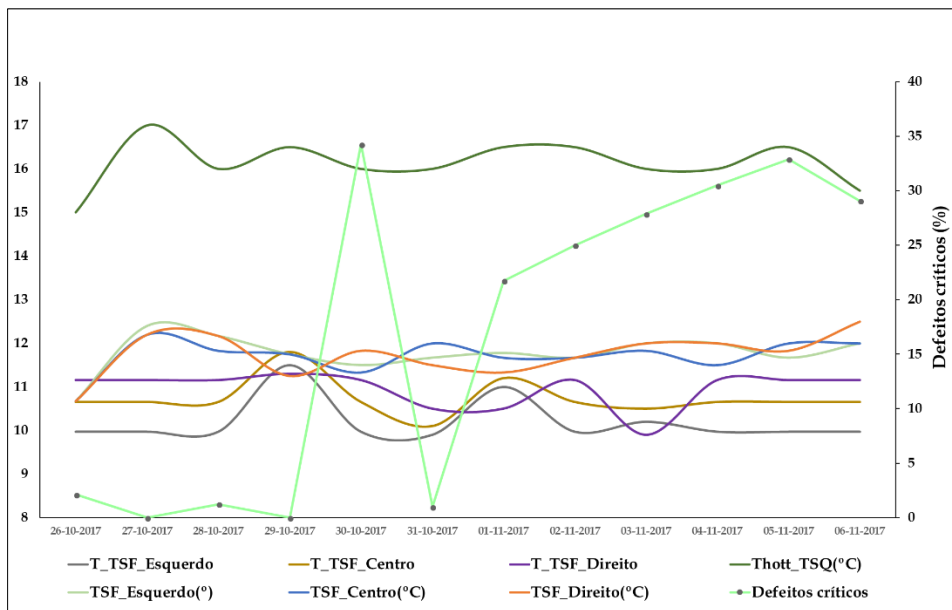


Figura 64 - Variáveis processuais dos tratamentos superficiais do vidro e a percentagem de defeitos críticos correspondente ao longo do pior fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

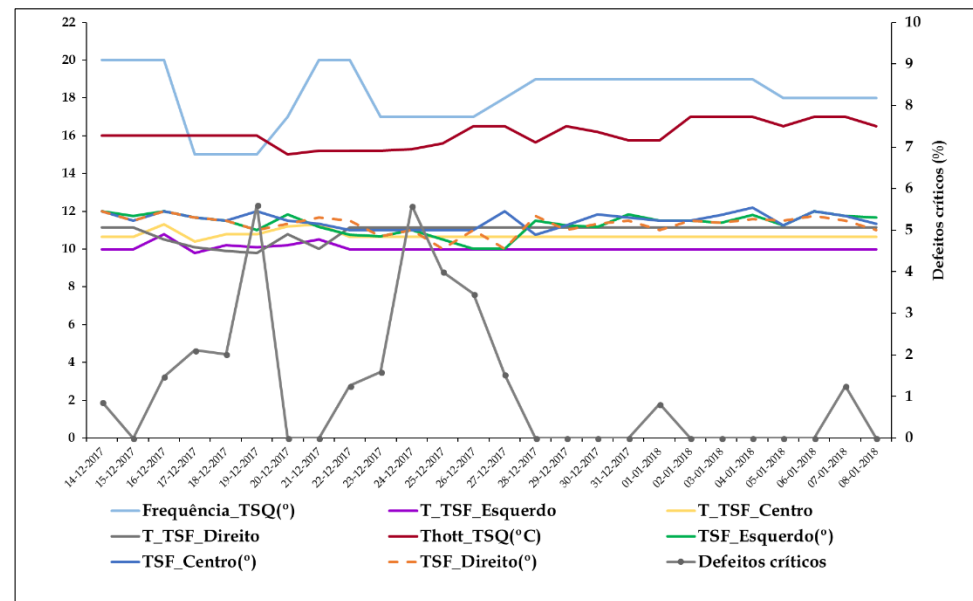


Figura 65 - Variáveis processuais da fabricação e a correspondente percentagem de defeitos críticos ao longo do melhor fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

Tal como na Figura 35 e na Figura 36, na Figura 64 e Figura 65, as variáveis processuais dos tratamentos aplicados nas garrafas de vidro, não aparentam ter qualquer tipo de relação com a percentagem de defeitos críticos ocorrida.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

4.2 Escolha das variáveis para *input* no SPSS

Com base na análise exploratória feita acima e na distribuição normal das variáveis fez-se uma triagem das mesmas para serem integrantes do *input* no SPSS, de forma a ser feita a inferência estatística. Esta triagem está apresentada nas tabelas seguintes, em que a primeira representa as variáveis que não farão parte da análise estatística e que estão subdivididas em constantes ou então com faltas de registo, isto é, número insuficiente de observações. É de se ter em conta que é necessário possuir entre 10 a 20 observações por cada variável analisada para que a inferência estatística seja significativa. A segunda tabela diz respeito às variáveis a utilizar.

Tabela 4 - Variáveis não incluídas na análise estatística da garrafa de 4630S037 de 0,7 cl.

Não incluídas	
Falta de registo	Constantes
T1101	Atr_canal_colher_distribuidor
T1103	Tamanho_tubo_guia
T1104	Tamanho_da_scoop
T1201	Tempo_de_movimento_scoop
T1202	Tamanho_defletores
Control_O2	Tamanho_Calhas
Control_SO2	Versão_da_bucha
Control_CO	Versão_cabeça_sopro
Tempo_de_queda	Contramolde_set
T_contramolde	Molde_final_set
T_molde_final	Boquilha_set
T_boquilha	Funis
1F_vel/1T_vel até 10F_vel/10T_vel	Espaçamento_transferência
1F_comp até 10T_comp	Espaçamento_tapete_rápido
1F_diam até 10T_diam	Ordem_carga
1AE_Rec até 6_Rec	
Temperaturas do <i>forehearth</i>	

Verifica-se pela observação da Tabela 4 que as temperaturas do forno careceram de um registo constante para que pudessem ser incluídas na análise estatística. Isto sucedeu devido à avaria de alguns termopares, e também de avarias eléctricas que transmitem o sinal à sala de controlo. O mesmo observou-se com as variáveis de controlo de emissões gasosas, que são indicativas da qualidade de combustão ocorrida no forno. O tempo de queda da gota nos distribuidores também tem em falta o histórico dos registos. As temperaturas do contramolde, molde final e boquilha têm uma quantidade de registos pequena (81 observações registadas em 241 dias de fabrico analisados) o que impossibilita a sua análise, embora sabe-se que estas têm um papel fundamental na distribuição do vidro. Para além do registo das temperaturas de ferramenta, também estão em falta as condicionantes da gota de vidro, que são nomeadamente a sua velocidade, o seu comprimento e o seu diâmetro. Sabe-se que a gota tem de ser o mais curta e larga possível, de forma cilíndrica com pontas arredondadas, tendo uma

relação entre o seu comprimento e diâmetro de 2,8 [39]. As temperaturas do *forehearth* também têm registos em falta, em que em 241 dias de fabrico, só existem 66 observações, mais uma vez um número insuficiente de observações para que a análise seja possível.

Existem 2 variáveis, mais concretamente os tamanhos dos direccionadores de gota (tubos, calhas e colher), que apesar de tomarem valores constantes, possuem 2 gamas diferentes conforme o peso do artigo pretendido. As restantes variáveis processuais são de facto constantes, inclusive a ordem de entrega da gota que é sempre a mesma.

Tabela 5 - Variáveis incluídas na análise estatística da garrafa do 4630S037 de 0,7 cl.

Incluídas				
T1102	SP_NN	BOMBA_PRESS	Curso_Punções	Saldo
T1203	PV_NN	BOMBA_TEMP	Altura_Punções	Compressão
T_Parede	NV	Controlo_NO _x	Fase_Punção	Arref_Marisa
T_Abóboda	Inversão	% Matéria-prima	Cruzamento_Tesouras	Sopro_Final
T_Topo	Perc_casco	Peso_Amostra	Curso_tesouras	Pressão_pilotagem
T_Base	PULL	Densidade	Consumo_Água_Tesouras	Pressão_interna
PI_mm_H2O	Posições do boosting	Murça	Pressão_água_Tesouras	Pressão_ar_alta
EPI_perc	POT_AB / POT_CD	Bolha	Tempo_corte_tesouras	Pressão_ar_baixa
EPI_N	POT_TOT	Bolha/kg	Posição_inicial_tesouras	Velocidade_puxadores
Gast_Nm3_h	VOLTS_AB/VOLTS_CD	Dom	Posição_centro_tesouras	Freq_TSQ
Gast_perc	AMPS_AB/AMPS_CD	Brilho_perc	Rácio_água_óleo	T_Hott
Gast_PresBar	VOLTS_TA a VOLTS_TD	Pureza_S_perc	Ventilação_da_máquina	E_T_TSF
ArComb_Nm3_h	ROTAÇÕES_AB/ROTAÇÕES_CD	X_Perc	Pressão_do_ventilador	C_T_TSF
ArComb_of_perc	ÓLEO_T	Y_Perc	Temperatura	D_T_TSF
ArComb_Ventilador_N	CONT_KW_DIA	Altura_Manilha	Ventilação_Placa_Morta	TSF_grau_E
Ar_Gás	CONT_TOT_KWH	Torque_manilha	Vácuo	TSF_grau_C
Leitura_Manual_Nvidro	BOMBA_N	Velocidade_do_tubo	Rompimento	TSF_grau_D

Com base na Tabela 5 constata-se que as variáveis integrantes da análise estatística a realizar, dizem respeito às todas as zonas processuais anteriormente discutidas. Embora existam variáveis que aparentemente são constantes, tal como o rompimento utilizado, o seu valor varia de fabrico para fabrico. Também é de ter em conta que algumas das variáveis da fabricação não possuíam até a uma dada altura o controlo diário de registo de variáveis, tendo sido apenas anotados valores no penúltimo dia de fabrico, onde normalmente a máquina automática de moldação já se encontra estabilizada.

Algumas das variáveis apresentadas acima possuem multicolinearidade, isto é, são dependentes umas das outras, com uma força de correlação superior a |0,8|. As variáveis embutidas no modelo têm de respeitar este critério e a escolha das mesmas reside na associação linear mais forte estabelecida com a variável resposta. As multicolinearidades existentes, independentemente das variáveis resposta analisadas, dizem respeito às relações entre:

- Pressão interna do forno e a percentagem utilizada da mesma;
- Quantidade de gás utilizada no forno e a respetiva percentagem;
- Ar de combustão no forno e a respetiva percentagem;
- Leitura manual do vidro e o respetivo set point;
- Set point do nível do vidro e o desvio do mesmo;
- Proporção do ar/gás utilizados dos 2 lados do forno;
- Potências dos electródos nas diferentes posições no boosting e a respetiva potência total, tanto medida em Amperes como medida em Volts;
- Rotações dos electródos nas posições AB e CD;
- Contagem dos kW usados no forno por dia e por hora;
- Percentagens X e Y, usadas na determinação da cor;
- Intensidade de aplicação do *TSF* em diferentes zonas da arca;
- Temperatura das garrafas em diferentes zonas da arca no *TSF*.

4.3 Correlações das variáveis processuais com as variáveis resposta

4.3.1 Produção útil

Tendo em vista que a produção útil se divide em 2 gamas de valores, foi fundamental decidir como se iria analisar esta variável. Dado que, estas 2 gamas de valores são compostas por:

- dias de fabricos em que a quantidade produzida situa-se entre 80-100 ton produzidos por dia;
- dias de fabricos em que a produção útil situa-se entre 30-40 ton produzidos por dia.

optou-se por analisar a secção com maior número de observações, que no caso presente são os dias de fabrico em que a quantidade produzida útil é de maior valor. Reconhece-se que seria interessante analisar os dias de fabrico instáveis, isto é, primeiro e último dia de produção, em que existe uma mudança na máquina, causadora de instabilidade na variável estudada. No entanto, tal como foi dito anteriormente, não existem observações suficientes para que tal análise seja possível.

Procedeu-se então à análise das 199 observações adquiridas desde 23/7/2015 até 8/1/2018, de forma a estabelecer correlações lineares entre as variáveis explicativas e a variável resposta. Na Figura 84 situa-se uma amostragem da análise feita no SPSS. Foi necessário filtrar a informação obtida, nomeadamente as correlações obtidas com a variável de interesse, eliminando as que não contemplam o objeto de estudo. Efetuaram-se diversos tipos de correlações (*Pearson* e *Spearman*) sendo que as que produziram resultados estatisticamente significativos foram as paramétricas.

Ao observar-se a Tabela 6, que foi construída de acordo com a legenda da Tabela 2, verificam-se diversas associações lineares estabelecidas. Constata-se que a produção útil tem correlações moderadas com alguns parâmetros do forno. Esta aumenta quando há um acréscimo na energia consumida, na T1102, na T1203 e no Sulfato de Sódio utilizado, o que é expectável visto que quando se utiliza maior quantidade de afinante, é porque existe maior quantidade de matéria-prima a enfiar, pelo que a T1102 sofre um aumento e conseqüentemente a energia consumida no forno é maior. Entretanto, ao existir maior quantidade de produção útil, a utilização de *boosting* eléctrico tende a ser maior também. Assim, o arrefecimento do mesmo é acrescido, pelo que a temperatura da bomba diminui e a pressão da bomba aumenta, com o fim de arrefecer os eléctrodos.

Verificam-se algumas correlações fracas entre os parâmetros do forno com a quantidade de produção útil. Quando existe um incremento na produção útil, a relação existente a quantidade de ar/gás a alimentar o forno tende a aumentar devido à uma flutuação positiva na MP a ser alimentada ao forno. No entanto, quando esta relação aumenta, é esperado que o ar de combustão e o gás natural a ser alimentado também aumentem, o que por sua vez não acontece. Isto induz à conclusão de que a correlação obtida entre a quantidade de gás utilizada no forno e a produção útil, é uma correlação espúria [40] [41] (isto é, correlação que embora tenha significado estatístico, não apresenta qualquer sentido físico).

O nível da enfiar apresenta 2 correlações de forças diferentes, embora de sinal igual. É suposto estas serem numericamente iguais e durante os diferentes dias de fabrico verificaram-se flutuações. Contudo estas são negativas, o que significa que quando a produção útil aumenta, estas diminuem. Quando a

quantidade de MP a enfiar aumenta, tem de se ter o devido cuidado de ter em conta o tempo de residência da mesma. Quando este critério não é cumprido, a qualidade do vidro produzido não é adequada e assim a quantidade útil produzida baixa.

Uma outra correlação espúria é da pressão interna do forno em que esta demonstra que com o seu incremento, ocorre o aumento da produção útil. Isso não é necessariamente verdade, pois procura-se ter um valor fixo de 0,5 mm H₂O sem qualquer flutuação. Existem outras correlações não fisicamente significativas, tais como a diminuição da produção útil com o aumento das escórias e dos resíduos do filtro eletrostático utilizado. Estas associações carecem de sentido físico pois é expectável que com o aumento destas, aumente também a produção útil.

A nível de parâmetros qualitativos do vidro de embalagem, constata-se que a variável analisada aumenta com o aumento de *murça* e com a diminuição de *bolha*. A *murça* tende a aparecer em maior quantidade quando não se faz o controlo adequado do forno, isto é, na zona de afinagem. Entretanto o defeito anterior é aceite enquanto que a existência de bolha aniquila praticamente na totalidade a qualidade de vidro. A partir de um certo diâmetro de *bolha*, as embalagens de vidro passam a ser rejeitadas nas máquinas de inspecção, o que por sua vez contribui para a diminuição da quantidade do produto final.

A coordenada Y, indicativa da cor do vidro, apresenta uma correlação negativa com a quantidade de produto final. Esta relação linear é espúria pois as coordenadas do mapa da cor possuem um comportamento normalmente distribuído, cuja flutuação mínima de comportamento não tem influência na cor da garrafa a embalar.

Constatam-se algumas associações lineares fracas em que se conclui que a variável resposta estudada tende a aumentar quando as temperaturas da base, do topo e da abóboda do forno baixam. Isto dá-se devido a um controlo não apropriado destas variáveis, o que implica um funcionamento não desejável da zona de fusão e de afinagem no forno.

É de ressaltar o facto de que o uso do carvão fino, enquanto afinante, favorece a quantidade de vidro oco produzido. Por outro lado, o ligeiro aumento de quantidade de NO_x libertado relaciona-se com o acréscimo da produção útil, já que há maior concentração da MP no forno.

É suposto que a densidade da massa vítrea se mantenha constante, no entanto através da análise estatística estabelecida, esta aumenta quando a produção útil aumenta. Na verdade, esta variável é controlada ao centésimo do milésimo, em que o valor máximo que esta toma é de 2,50000 g/cm³. É de esperar que haja esta pequena correlação pois a densidade é diretamente relacionada com a quantidade de substâncias presentes no forno.

É natural que o KCR e a cadência aumentem com o aumento da produção útil, pois existe maior massa vítrea para distribuir pelas secções independentes e estes parâmetros estão intrinsecamente interligados. O mesmo aplica-se ao peso, parâmetro estritamente relacionado com as variáveis anteriormente mencionadas.

No que se refere às variáveis processuais de fabricação, constata-se correlações moderadas positivas com o tamanho do tubo guia, altura do canal do distribuidor e a pressão de pilotagem. A razão pela qual estas são verificadas é o peso da garrada a ser produzida. Quanto maior for o peso desta,

maior é a gota envolvida em termos de diâmetro, pelo que o tamanho do tubo guia é maior. De forma a haver uma correcta distribuição de vidro nos moldes, a pressão total envolvida na máquina /S também tende a ser maior. O torque da manilha apresenta uma correlação positiva moderada, isto é, quanto maior for a produção útil, maior deve ser a força aplicada no motor. Fisicamente isto pode ser constatado pelo aumento da densidade do vidro, uma vez que ao existir maior quantidade de MP, é necessário aplicar mais força no torque da manilha para empurrar o vidro para baixo. A altura da manilha possui uma associação linear positiva fraca, o que é de esperar pois esta correlaciona-se com o peso da gota e indiretamente com a quantidade de produto final.

Observa-se uma correlação moderada negativa entre a velocidade dos puxadores e a produção útil de vidro. Note-se que isto verifica-se pois quando o peso da garrafa a ser produzida é maior, o vidro é mais lentamente distribuído e vice-versa.

Antes de se proceder à análise dos parâmetros respeitantes à formação da gota, tais como a altura, curso e fase da punção, é fundamental compreender que estes parâmetros têm influência directa na formação da gota. A gota perfeita é conseguida com fluxo de vidro homogeneizado e temperatura correcta (à saída da garganta do forno tem de estar a 1150°C e à entrada do contramolde numa gama entre 465°C-475°C) para que a distribuição do vidro seja a mais uniforme possível. A fase da punção aumenta quando o peso do artigo aumenta, pois, o seu comprimento também aumenta. Se o comprimento da gota aumenta, a altura da punção é diminuída, pelo que a correlação aqui explícita é negativa e correcta. O curso da punção diminui com o aumento da tiragem (consequente aumento da produção útil), existindo assim variação do peso da gota ou da cadência da máquina, e é necessário garantir a proporção entre comprimento e diâmetro de 2,8, tal como foi dito anteriormente. É de notar que não são estabelecidas correlações entre as variáveis do condicionamento do vidro e as posteriores temperaturas nas diferentes secções da máquina modeladora do vidro, o que influi de uma forma negativa nos resultados aqui mencionados. Os parâmetros acima referidos são críticos na quantidade de vidro injetada, que se interliga directamente com as variações de temperatura no *forehearth*.

Atendendo-se às variáveis relacionadas com o corte da gota, é possível examinar que a quantidade de produção útil aumenta quando estas diminuem tanto o seu curso, como também a sua posição central, isto é, quando a sua abertura tem um valor mais baixo. Esta relação é óbvia dado que quando há maior quantidade a produzir, mais alta é a velocidade da máquina e, portanto, mais rápido tem de ser o movimento do corte das tesouras. O consumo de água nas tesouras aumenta, tal como se observa pela correlação moderada existente com a variável estudada, o que é previsível dado que com o aumento da produção útil também aumenta a necessidade de quantidade de água para lubrificar as mesmas. O rácio de água/óleo utilizado nas tesouras, com o fim de diminuir o atrito existente e guiar correctamente a gota de vidro, diminui com o incremento da produção útil. Esta relação é espúria pois quando se produz maior quantidade de vidro, maior fração de agentes lubrificantes é requerida. O cruzamento das tesouras tem uma associação linear fraca, que pode ser entendida através do desgaste das tesouras utilizadas com o aumento da produção útil.

Quanto à ventilação aplicada na máquina, constata-se que a sua pressão diminui quando a quantidade de produção útil aumenta e vice-versa. O contrário acontece com a temperatura da máquina. Estas correlações são espúrias, pois não se relacionam com a produção útil. Estas variáveis

são sem dúvida fundamentais na distribuição da temperatura do vidro nos moldes, no entanto devem ser estabelecidas conforme a variação da temperatura do ar ambiente pois este apresenta um comportamento oscilatório (as temperaturas do ar no Verão e no Inverno são diferentes) e deve ser ajustado consoante a estação do ano em que o artigo é produzido, como também tendo em conta o período noturno e diurno.

O rompimento, a pressão interna e o vácuo tendem a aumentar com o aumento da produção útil de uma forma moderada. Estas correlações não são diretamente relacionadas com a variável estudada pois possuem uma maior relação com o peso do artigo em estudo. O mesmo se aplica à pressão estabelecida na placa morta (ventilação da placa morta).

As correlações estabelecidas entre o tamanho dos funis, a compressão em conjunto com a variável resposta não possuem veracidade física, pelo que são insignificantes.

É lógico que se a produção útil sofre um aumento, as paletes bloqueadas, a variável saldo, tomam valores mais pequenos.

Por fim, tendo em foco os tratamentos superficiais aplicados, as correlações estabelecidas não detêm nenhum sentido físico sendo então desprezíveis.

Tabela 6 - Correlações de *Pearson* (M- Moderada, F – Fraca, D-Desprezável) obtidas entre as variáveis processuais e a produção útil do 4630S037 de 0,7cl

Correlações de <i>Pearson</i>					
T1102	0,60(M)	Vácuo	-0,38(F)	Carvão_fino	0,26(D)
kWh_totais	0,59(M)	Rompimento	0,46(F)	Compressão	-0,25(D)
Bomba_pressão	0,51(M)	Pressão_interna	0,45(F)	Funis	0,25(D)
Bomba_temperatura	-0,53(M)	Consumo_água_tesouras	0,45(F)	Rácio_água/óleo	-0,22(D)
Cadência	0,64(M)	Curso_tesouras	-0,44(F)	Y_perc	-0,21(D)
KCR	0,68(M)	Ar_combustão	0,35(F)	PI_mm_H2O	0,21(D)
Sulfato_Sódio	0,50(M)	Ar/gás_direito	0,43(F)	Tbase_direito	-0,20(D)
Atr_cal_colher_distribuidor	0,50(M)	Ar/gás_esquerdo	0,38(F)	NV_direito	-0,17(D)
Velocidade dos puxadores	-0,51(M)	C4	0,48(F)	Escórias	-0,17(D)
Altura_punção	-0,53(M)	D4	0,31(F)	Resíduos	-0,20(D)
Posição_centro_tesouras	-0,51(M)	NV_esquerdo	-0,40(F)	E_T_TSF	0,20(D)
Torque_manilha	0,54(M)	T1203	0,47(F)	Freq_TSQ	-0,22(D)
Velocidade_puxadores	-0,51(M)	Gas_Nm3_h	-0,37(F)	Saldo	-0,18(D)
Tamanho_tubo_guia	0,54(M)	Tbase_esquerdo	-0,36(F)	Densidade	0,17(D)
Pressão_pilotagem	0,57(M)	Murça	0,37(F)	Cruzamento_tesouras	0,14(D)
Curso_punção	-0,48(F)	Ventilação_placa_morta	0,28(D)	T_abóboda	-0,14(D)
Fase_punção	0,48(F)	Controlo_Nox	0,28(D)	Temperatura	-0,14(D)
Peso	0,47(F)	T_topo	-0,27(D)	Bolha	-0,14(D)
Pressão_ventilador	-0,46(F)	Altura_manilha	0,27(D)		

4.3.2 KCR

Esta variante tal como já foi explícita no capítulo 3.1, tem uma relação direta com o peso do artigo a produzir e com a velocidade com que este é distribuído.

As associações lineares obtidas são semelhantes ao da produção útil, contudo existem diferenças a nível da intensidade da força de correlação. As relações estabelecidas aqui ainda são mais fortes, ou seja, as que são em comum que eram moderadas passaram a fortes e as fracas passaram a moderadas. Este facto é relevante para ultimar que a produção útil é obviamente correlacionada com o *KCR*.

Deparou-se com a existência de associação entre as rotações dos electródos do forno com o *KCR*, embora fraca. Esta permite inferir que quando a variável resposta estudada aumenta, as rotações dos electródos também aumentam. Quando o *KCR* é aumentado, a tiragem do forno também aumenta, o que tem influência na potência associada ao boosting eléctrico e consequentemente às rotações dos electródos.

Surgem correlações espúrias, relacionadas com MP, que inferem o uso do carvão fino e feldspato como potenciadores de aumento de *KCR*, o que não é necessariamente verídico. O mesmo acontece com as percentagens de rejeição nas máquinas de inspecção, que são contraditórias, pelo que são desprezíveis.

Embora o casco branco externo tenha sido utilizado raramente na produção deste vidro ao longo dos diversos fabricos, existe uma relação fraca negativa entre ambas as variáveis.

Não obstante seja pretendido manter sempre o mesmo nível de vidro no forno, conjugando a tiragem com a cadência da máquina, por vezes este sofre pequenas oscilações. Antecipa-se o aumento deste com o aumento do *KCR*, para que o anterior seja mantido no valor pretendido.

No que se refere às correlações novas estabelecidas na fabricação, denotam-se as do sopro final e a de tamanho dos defletores por serem espúrias (o tamanho dos defletores toma um valor praticamente constante). A taxa de utilização das gotas no contramolde apresenta uma correlação moderada visto que quando é aumentada a percentagem do uso das gotas, o *KCR* aumenta também pois há maior quantidade de gotas a serem distribuídas.

Tabela 7 - Correlações de Pearson (For- Forte, M – Moderada, F – Fraca, D- Desprezável) obtidas entre as variáveis processuais e o KCR do 4630S037 de 0,7 cl.

Correlações de Pearson					
kWh_totais	0,81 (For)	Vácuo	-0,48 (F)	Taxa_utilização_MP	0,31 (F)
Torque_manilha	0,73 (For)	Consumo_água_tesouras	0,41 (F)	Altura da manilha	0,39 (F)
Curso_punção	-0,80 (For)	Rácio_água/óleo	-0,38 (F)	Densidade	0,24 (D)
Fase_punção	0,76 (For)	Temperatura	-0,38 (F)	Rotações AB	0,27 (D)
Curso_tesouras	-0,75 (For)	Controlo_Nox	0,41 (F)	Rotações CD	0,22 (D)
Tamanho_tubo_guia	0,82 (For)	D4	0,39 (F)	Carvao fino	0,28 (D)
C4	0,70 (M)	Bomba_pressão	0,43 (F)	Feldpsato	0,13 (D)
Rompimento	0,69 (M)	NV_Esquerdo	-0,38 (F)	Escorias	-0,16 (D)
Pressão_ventilador	-0,62 (M)	Murça	0,38 (F)	Casco branco externo	-0,15 (D)
Pressão_interna	0,63 (M)	Bolha	-0,26 (F)	Leitura manual do vidro	0,21 (D)
Velocidade_puxadores	-0,61 (M)	Peso	0,47 (F)	Tbase_direito	-0,19 (D)
T1102	0,59 (M)	Gas_Nm3_h	0,33 (F)	NV_direito	-0,18 (D)
T1203	0,52 (M)	Ar_combustão	0,38 (F)	Sopro final	-0,17 (D)
Bomba_temperatura	-0,50 (M)	Ar/gás_direito	0,46 (F)	Tamanho defletores	-0,17 (D)
Sulfato_Sódio	0,54 (M)	Ar/gás_esquerdo	0,37 (F)	Perc_Rej_MIL	0,16 (D)
Altura_punção	-0,56 (M)	Tbase_esquerdo	-0,43 (F)	Hot_End_Perc	-0,14 (D)
Ventilação_placa_morta	0,47 (F)	E_T_Esq	0,29 (F)	T hott	-0,14 (D)

4.3.3 Defeitos críticos

Os defeitos críticos foram divididos em duas categorias: os que tomam o valor de 1 que correspondem então à ocorrência dos defeitos críticos e os que tomam o valor de 0 que são por sua vez os que apresentam a não ocorrência dos mesmos, nos dias de fabrico respetivos. Assim sendo, embora a variável resposta tenha carácter categórico, foram aplicadas as correlações de *Pearson*. Na Tabela 8 apresentam-se as associações lineares então obtidas.

Tabela 8 - Correlações de Pearson (F – Fraca, D- Desprezável) obtidas entre as variáveis processuais e os defeitos críticos categorizados do 4630S037 de 0,7cl.

Correlações de Pearson							
Fase_punção	0,36 (F)	kWh_totais	0,23 (D)	T1203	0,21 (D)	Pressão_ventilador	-0,16 (D)
Torque_manilha	0,36 (F)	Pressão_interna	0,23 (D)	B4	0,21 (D)	Vácuo	-0,16 (D)
Peso	0,32 (F)	Rompimento	0,23 (D)	Altura_Punções	-0,21 (D)	E2	-0,16 (D)
Posição_centro_tesouras	-0,32 (F)	Atr_cal_colher_distribuidor	0,23 (D)	Murça	0,20 (D)	B1	0,15 (D)
Rácio_água/óleo	-0,35 (F)	ArComb_Nm3_h	0,23 (D)	Freq_TSQ	-0,19 (D)	D4	0,15 (D)
NV_Esquerdo	-0,30 (F)	C4	0,23 (D)	KCR	0,18 (D)	Curso_Punção	-0,15 (D)
Curso_tesouras	-0,29 (D)	NV_Direito	-0,23 (D)	T1102	0,17 (D)	Cadência	0,14 (D)
Velocidade_puxadores	-0,27 (D)	E4	0,22 (D)	C2	-0,17 (D)	Ar/gás_Esquerdo	0,14 (D)
Bomba_temperatura	-0,26 (D)	Ventilação_Placa_Morta	0,22 (D)	Casco_verde	-0,17 (D)	Y_perc	0,13 (D)
Tamanho_tubo_guia	0,26 (D)	Taxa_utilizacao_MP	0,22 (D)	Pressão_pilotagem	0,16 (D)	Def_3	-0,13 (D)
Hot_End_PERC	-0,25 (D)	Taxa_utilizacao_MF	0,21 (D)	Consumo_água_tesouras	0,16 (D)	Gas_Nm3_h	-0,13 (D)
Ar/gás_Direito	0,24			Bomba_pressão	0,16 (D)		

As correlações obtidas na tabela anterior são semelhantes às obtidas nas variáveis resposta anteriormente estudadas. Tanto o *KCR* como a produção útil relacionam-se com os defeitos críticos. A produção útil tem proporção direta com o *KCR* e assim sendo quando os defeitos críticos aumentam, estas diminuem. Apesar de as associações obtidas terem o mesmo sinal a nível das correlações estipuladas, denota-se o facto destas terem uma força menor. Isto ocorre porque como já foi visto acima, este tipo de defeitos é gerado sobretudo através de fatores térmicos e fatores mecânicos, que por sua vez estão intinicamente relacionados. Por exemplo, os parâmetros que dizem respeito à punção, são regulados conforme o tipo de gota pretendida. A gota de vidro é função da distribuição de temperatura tanto na ferramenta da máquina como no condicionamento de vidro no *forehearth*.

É importante notar que surgem correlações novas, embora de carácter desprezível, que sugerem um aumento de defeitos críticos com o aumento da taxa de utilização da ferramenta. A ferramenta principal (contramolde e molde final) tem um período de vida que por sua vez nem sempre é respeitado.

Surgem correlações espúrias com as posições dos electródos no *boosting* que não são indicativos dos defeitos analisados nesta secção.

De uma forma geral, quando se quer aumentar a cadência da máquina e por sua vez o *KCR* e consequentemente a produção útil, é necessário ter um cuidado acrescido na homogeneização da massa vítrea no forno como também à sua transferência de calor aquando da sua moldação.

4.4 Validação das correlações obtidas

Tal como já se tinha referido anteriormente, procurou-se validar as correlações estabelecidas no principal objeto em estudo através da mesma abordagem num artigo diferente. Foi escolhido o Havana Club de 1cL, produzido na mesma linha, L31, com algumas especificações diferentes das da garrafa em estudo. Os dados foram levantados das produções ocorridas entre 25/6/2016 até 16/1/2018 uma vez que apenas estes se apresentam completos.

Como é o mesmo forno, é suposto que a influência dos parâmetros do mesmo não seja diferente de uma forma global. Contudo, uma vez que a garrafa é diferente, as variáveis processuais na zona de fabricação também são diferentes o que serve de uma boa forma de comparação das correlações obtidas.

4.4.1 Produção útil

De uma forma análoga ao estudo da garrafa principal, verificou-se se as variáveis distribuem-se de uma forma normal e se são independentes. Visto que as variáveis processuais tidas em conta são as mesmas do capítulo 4.2., concluiu-se que as variáveis consideradas para a análise das correlações são as mesmas da tabela Tabela 5 à excepção do rácio água/óleo usado na máquina *I.S.*, pressão ar de alta e ar de baixa que são constantes na produção deste artigo e não constam na Tabela 4. Assim sendo, a produção útil foi dividida em dias com maior produção útil e dias de menor produção útil devido à instabilidade ocorrida no primeiro e no último dia de fabrico.

Na Tabela 9 podem-se verificar as correlações estabelecidas ao longo dos 66 dias de fabrico analisados.

Tabela 9 - Correlações de Pearson obtidas entre as variáveis processuais e a produção útil do 4930S037 de 1cL.

Correlações de Pearson							
Cadência	0,92	Curso_tesouras	-0,67	Tbase_esquerdo	-0,47	Murça	0,33
Atr_cal_colher_distribuidor	-0,90	Leitura_manual_vidro	0,64	Vácuo	-0,45	Consumo_água_tesouras	-0,32
Arrefecimento_marisa	-0,80	kWh_totais	0,62	Torque_manilha	0,44	Sopro_final	0,32
Pressão_pilotagem	0,78	T1103	0,61	Tamanho_tubo_guiá	0,44	Temperatura_óleo	0,32
Velocidade_puxadores	0,77	Rompimento	0,60	T_Parede	0,42	Hot_end_perc	0,31
KCR	0,72	Curso_punção	-0,59	Pressão_ventilador	0,39	C4	0,30
Bomba_pressão	0,71	Pressão_água_tesouras	-0,53	Ar/gás_esquerdo	0,37	Cruzamento_tesouras	0,30
Compressão	-0,71	Tbase_direito	-0,52	NV_esquerdo	-0,36	Feldspato	0,27
Pressão_interna	0,69	Gas_Nm3_h	-0,50	Sulfato_Sódio	0,36	Ventilação_placa_morta	-0,25
Posição_centro_tesouras	-0,67	Fase_punção	0,49	Carvão	0,34	Temperatura	-0,25
		Densidade	0,47	Altura_punção	0,34	Ar/gás_direito	0,24

Atendendo-se às correlações apresentadas, constata-se que as fortes e as moderadas são referentes à fabricação e ao forno tal como já se tinha visto nas associações estabelecidas na garrafa do Havana Club de 0,7 cL. É de notar que todas as correlações apresentam o mesmo sinal face às correlações estabelecidas na garrafa principal de estudo, à excepção da altura da colher do distribuidor. Esta apresenta-se como muito forte negativa o que significa que a produção útil diminui com o aumento desta. A existência desta associação deve-se ao facto de que a altura da colher do distribuidor é

regulada conforme o peso do artigo a produzir e, conseqüentemente o formato da gota. Como já foi mencionado anteriormente, o que se procura é uma gota perfeita. Quando esta é atingida, o rendimento da produção tende a aumentar. É apenas possível atingir este resultado quando todas as variáveis estão em linha, sobretudo aquelas que interferem na viscosidade da massa vítrea e na transferência do calor durante a fase de moldação.

Por fim, repara-se que a intensidade das correlações obtidas é diferente das do objeto principal de estudo. Isso acontece devido sobretudo ao número reduzido de observações recolhido, face à dimensão da amostra existente de variáveis processuais.

4.4.2 KCR

Tabela 10 - Correlações de Pearson obtidas entre as variáveis processuais e o KCR do 4930S037 de 1cl.

Correlações de Pearson							
kWh_totais	0,93	Torque_manilha	0,70	Peso	0,51	Pressão_interna	0,38
Posição_centro_tesouras	-0,93	Tamanho_tubo_guiá	0,70	Cruzamento_tesouras	0,49	Velocidade_puxadores	0,37
Pressão_bomba	0,90	C4	0,65	Hot_end_perc	0,49	T_topo	-0,37
Curso_tesouras	-0,89	Control_NoX	0,63	Casco_branco_externo	-0,49	Ar/gás_esquerdo	0,35
Fase_punção	0,84	T1102	0,62	Arrefecimento_marisa	-0,49	Gás_Nm3_h	-0,34
Cadência	0,83	Atr_cal_colher_distribuidor	-0,61	Sulfato_Sódio	0,46	Selenito_Zinco	-0,33
Produção_bruta	0,80	Carvão	0,58	Brilho	0,42	Casco_branco	0,32
Leitura_manual_vidro	0,79	Tbase_direito	-0,57	Resíduos_filtro_perc	0,39	T_Parede	0,31
Tbase_esquerdo	-0,79	Tamanho_defletores	0,56	Vácuo	-0,39	Temperatura	-0,26
Curso_punção	-0,76	Perc_rejeição	-0,55	Bomba_N	-0,39	Temperatura_óleo	0,28
Rompimento	0,75	Pressão_pilotagem	0,52	Rácio_água_óleo	-0,39		
Produção_útil	0,72	T1203	0,52	Ar/gás_direito	0,38		

As associações obtidas nesta garrafa em estudo são globalmente semelhantes às obtidas na Tabela 7, evidenciando-se apenas as suas diferenças a nível de intensidade, em que estas por sua vez são mais fortes. É de notar que as correlações respeitantes à moldação do vidro, mais concretamente as variáveis relacionadas a punção, têm uma força notória. Como já foi visto anteriormente, as variáveis da punção são ajustadas conforme a gota pretendida. O mesmo se sucede com as variáveis do forno, nomeadamente as temperaturas envolvidas, em que é evidente o papel destas na qualidade do produto final pretendido. Sublinham-se as temperaturas da base, que têm uma influência negativa no KCR obtido o que sugere que quando estas não são controladas conforme o valor pretendido, a produção sofre um impacto negativo. O mesmo ocorre com a temperatura do topo do forno.

Nas produções deste artigo foi utilizado o casco branco externo, tal como na produção do 4630S037 de 0,7cl, denotando-se então a sua influência negativa no rendimento.

Foram feitas também as correlações respeitantes aos defeitos críticos, contudo estas não foram estatisticamente significativas. Dado que o número de observações é pequeno, e as variáveis principais responsáveis dos defeitos críticos estão em falta, esse resultado já era expectável.

4.5 Modelação das variáveis resposta

4.5.1 Modelo de regressão linear

4.5.1.1 Produção útil

As variáveis escolhidas integrantes da previsão do comportamento da produção útil do 4630S037 foram seleccionadas com base nas associações/correlações obtidas. A sua triagem efectuou-se através de diversos métodos introduzidos no SPSS, nomeadamente:

- *Backward*: em que todas as variáveis inseridas são embutidas no modelo e vão sendo eliminadas conforme o maior valor p até que as que ficam são as que têm valor $p < 0,1$.

- *Forward*: em que a regressão linear começa sem qualquer variável e estas são adicionadas conforme o valor p possuído.

Para além dos métodos utilizados descritos acima, teve-se o devido cuidado de escolher variáveis que cumpram os seguintes requisitos:

- i) ter maior associação linear com a produção útil;
- ii) não apresentar multicolinearidade entre as variáveis independentes, isto é, o seu coeficiente de correlação de *Pearson*, não pode exceder $|0,8|$.

Foi tida em conta a variabilidade das variáveis em causa, confirmada pelos gráficos entre as variáveis processuais e a resposta, cujo exemplo pode ser encontrado em Anexo 7.5.

O input dos dados no SPSS, como já referido anteriormente, excluiu os dados referentes aos primeiro e último dia de produção por causa da instabilidade associada aos mesmos. Por outro lado, enquanto se procurava otimizar esta modelação, identificaram-se diversos *outliers*. Estes são baseados, portanto no desvio padrão associado à média da produção útil ao longo dos dias de fabrico analisados.

O resumo do modelo pode ser observado na Figura 66 caracteriza a regressão linear multivariada obtida.

Resumo do modelo^b

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa	Mudança de R quadrado	Estatísticas de mudança			Sig. Mudança F	Durbin-Watson
						Mudança F	df1	df2		
1	,845 ^a	,714	,701	2757,87715	,714	52,484	9	189	,000	1,684

a. Preditores: (Constante), Areia RM41/CR31, Altura_Punções, Rompimento, Curso_Punções, M_T1203, Fase_punção, PressãodoventiladorSP, M_T1102, Cadência

b. Variável Dependente: PROD_UTIL

Figura 66 - Resumo do modelo final obtido da regressão multivariada da produção útil.

Da figura anterior constata-se um coeficiente de determinação forte, com um valor de 0,845. É de ressalvar que o modelo apresentado é estatisticamente significativo. Por outro lado, o teste de *Durbin-Watson*, tal como dito anteriormente, prevê as autocorrelações entre os resíduos padronizados. Dado que este possui um valor de 1,684, situado na gama dos valores aceitáveis (entre 1,5-2,5) [42], as variáveis explicativas embutidas no modelo são independentes.

Ao observar a Figura 67, repara-se que os testes correspondentes às estatísticas de multicolinearidade são cumpridos, donde se conclui que as variáveis embutidas no modelo são

independentes entre si. Também estas são estatisticamente significativas, tal como pode ser observado pelo valor p inferior a 0,05.

		Coeficientes ^a								
		Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados		95,0% Intervalo de Confiança para B		Estatísticas de colinearidade		
Modelo		B	Erro Erro	Beta	t	Sig.	Limite inferior	Limite superior	Tolerância	VIF
1	(Constante)	-19924,099	58360,465		-,341	,733	-135030,293	95182,095		
	M_T1102	88,348	16,438	,455	5,374	,000	55,926	120,770	,233	4,290
	M_T1203	-118,253	48,375	-,174	-2,444	,015	-213,665	-22,841	,329	3,043
	Cadência	686,106	103,128	,790	6,653	,000	482,702	889,509	,119	8,420
	Altura_Punções	-540,500	201,676	-,294	-2,680	,008	-938,271	-142,728	,139	7,185
	Curso_Punções	401,579	89,805	,415	4,472	,000	224,453	578,704	,194	5,148
	Rompimento	12793,712	1840,008	,496	6,953	,000	9164,606	16422,819	,328	3,044
	Fase_punção	-45,954	18,217	-,179	-2,523	,012	-81,883	-10,024	,334	2,998
	PressãoodoventiladorSP	13,886	4,282	,268	3,243	,001	5,441	22,332	,245	4,085
	Areia RM41/CR31	-89,882	33,783	-,178	-2,661	,008	-156,513	-23,250	,372	2,686

a. Variável Dependente: PROD_UTIL

Figura 67 - Coeficientes de regressão multivariada obtidos da análise da produção útil.

Deparando-se com uma análise pormenorizada das variáveis, constata-se que as temperaturas do forno são preditoras da quantidade do vidro produzido como também da sua qualidade. As variáveis de fabricação, nomeadamente aquelas que estão relacionadas com a máquina IS, são também previsoras do modelo. Todas as variáveis acima explícitas relacionam-se directamente tanto com a qualidade do vidro produzido, isto é, a sua viscosidade, parâmetro fundamental para produzir uma garrafa conforme, como também com a distribuição do vidro a nível térmico na moldação. É importante ressaltar o facto de que as variáveis mencionadas têm uma relação direta com a forma de gota, cujos parâmetros não foram analisados.

Tendo em conta os resíduos padronizados do modelo apresentados na Figura 68, chega-se à conclusão de que os erros associados às variáveis utilizadas como previsoras, são independentes, normalmente distribuídos e têm a variância constante.

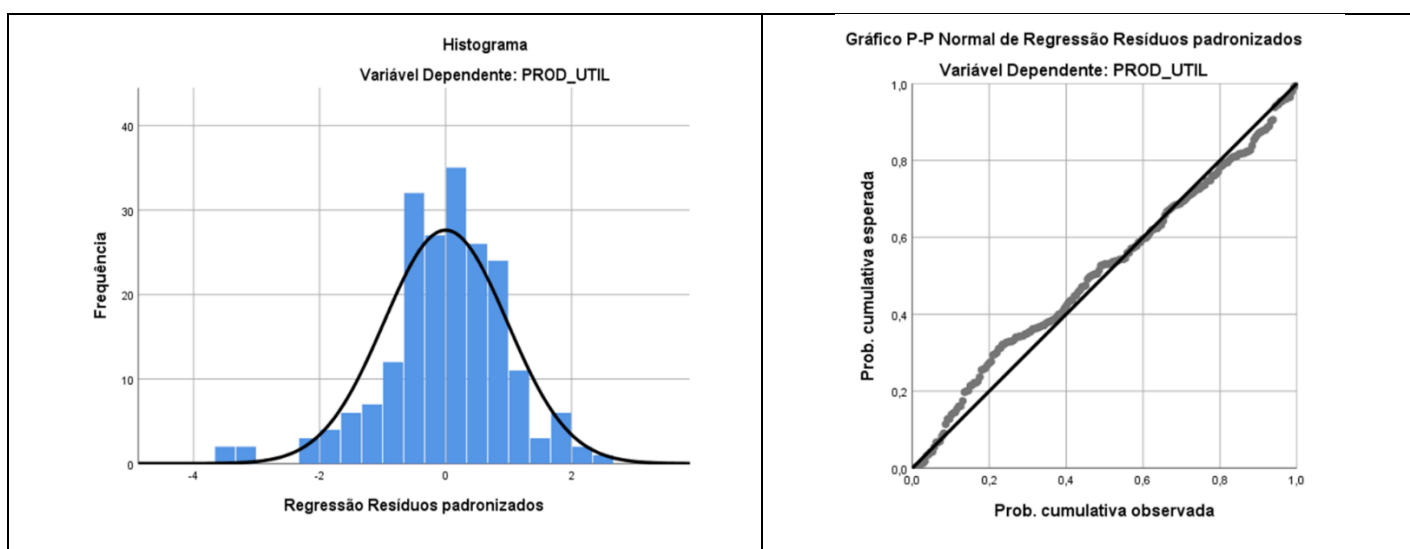


Figura 68 - Resíduos padronizados provenientes da regressão multivariada da produção útil.

Seguidamente, apresenta-se, portanto, o modelo obtido com os coeficientes de recta determinados a partir da Figura 67. Este modelo foi testado com base na última produção verificada em tempo útil de estágio. Os erros relativos associados à previsão estabelecida podem ser encontrados em anexo 7.5.

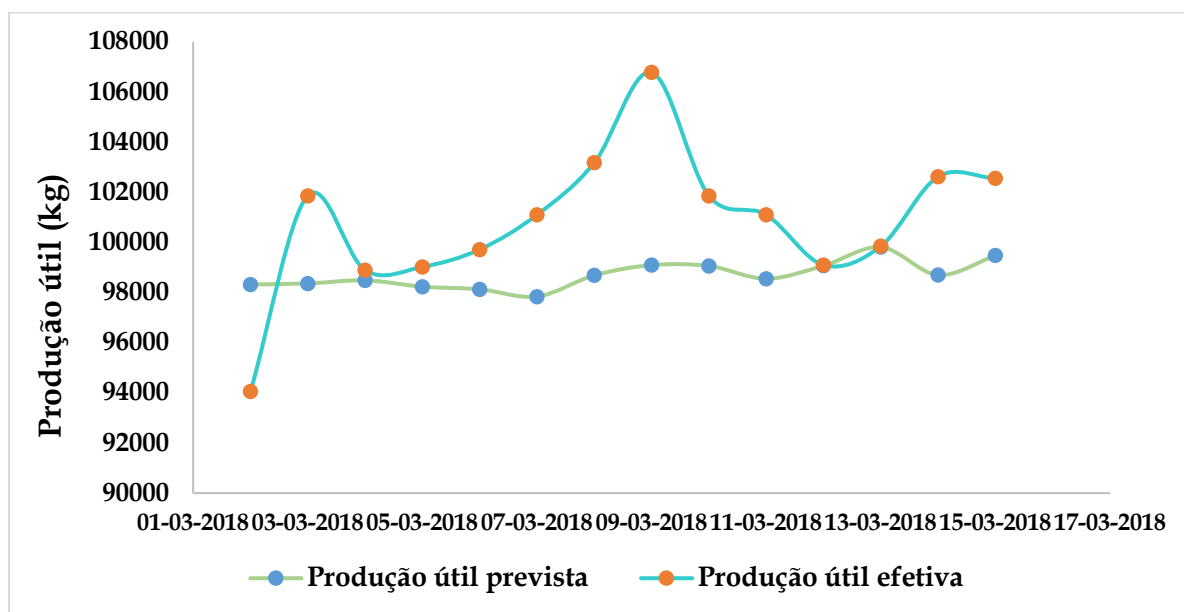


Figura 69 - Produção útil prevista e efetiva ao longo do fabrico de Março de 2018 do 4630S037 de 0,7 cL.

Na figura anterior nota-se um máximo absoluto no dia 9/3/2018 na produção efetiva, ligeiramente diferente da produção útil estimada. Ocorre então um indício de que embora o modelo tenha um coeficiente de determinação de 0,845, existem variáveis que possivelmente não foram contemplados no modelo. Por outro lado, a produção útil, ou por palavras fabris, rendimento, está dependente de praticamente todas as variáveis anteriores com intensidades diferentes. Dado que as variáveis de condicionamento térmico não foram incluídas, é óbvio que as variáveis resposta estudadas são influenciadas por esse factor. Fora a falta de registos a nível de variáveis, também entra em conta o número de observações utilizado. Uma vez que apenas estão em conta 241 observações fabris, seria adequado alargar o período da recolha de dados, para que houvesse um maior ajuste destas às inferências estatísticas estabelecidas.

4.5.1.2 KCR

Esta variável resposta, como já se tinha constatado anteriormente no capítulo 4.3, está relacionada com a produção útil. A triagem das variáveis a embutir no modelo efetuou-se de uma forma análoga ao processo referente à escolha das variáveis na análise da produção útil, incluindo a remoção de *outliers* com o fim de otimizar o modelo. Assim sendo, na próxima figura é, portanto, apresentado o resumo do modelo de regressão multivariada obtido. Constata-se que as variáveis não apresentam autocorrelações entre si e o modelo obtido é estatisticamente significativo. Apesar de que o coeficiente de determinação não é factor de causalidade, é de constatar que este possui um valor obtido elevado (0,946).

Resumo do modelo^b

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa	Mudança de R quadrado	Estatísticas de mudança			Sig. Mudança F	Durbin-Watson
						Mudança F	df1	df2		
1	,946 ^a	,894	,890	2,50296	,894	215,069	9	229	,000	1,392

a. Preditores: (Constante), Fase_punção, Rel_argas_DIR, M_T1102, Casco Banco Interno (Consumo proprio), Curso_Punções, Rompimento, M_T1203, C4, Areia RM41/CR31

b. Variável Dependente: KCR

Figura 70 - Resumo do modelo final obtido da regressão multivariada do KCR.

No que toca aos coeficientes resultantes desta análise, é de concluir que estes são estatisticamente significativos e são independentes, tal como se pode constatar na Figura 71. Nota-se que estes são referentes mais uma vez ao forno, nomeadamente às temperaturas da zona de fusão e de afinagem (T1102 e T1203); aos parâmetros do boosting, nomeadamente à posição mais próxima da garganta do forno, C4; ao uso das MP, mais concretamente ao Óxido Silício e casco branco e por fim à relação existente entre o ar/gás utilizados no forno. Conclui-se que estas variáveis processuais são fundamentais para que um maior *KCR* seja atingido, pois influenciam directamente a tiragem do forno tal como também o peso do artigo produzido. É necessário ter um controlo restrito nestas variáveis para que a massa vítrea seja distribuída corretamente tanto do ponto de vista termo-químico como físico. Fora as variáveis processuais do forno, também entram em conta as variáveis de fabricação, nomeadamente a fase da punção e o rompimento. Estas, mais uma vez, sugerem a importância do controlo da viscosidade do vidro, que condiciona as variáveis anteriormente mencionadas.

Coefficientes^a

Modelo		Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados		Sig.	95,0% Intervalo de Confiança para B		Estatísticas de colinearidade	
		B	Erro Erro	Beta	t		Limite inferior	Limite superior	Tolerância	VIF
1	(Constante)	-87,616	34,936		-1,935	,054	-136,453	1,220		
	M_T1102	,017	,011	,063	1,578	,116	-,004	,037	,291	3,441
	M_T1203	,148	,033	,160	4,432	,000	,082	,213	,354	2,828
	Curso_Punções	-,527	,050	-,397	-10,471	,000	-,626	-,428	,322	3,109
	C4	,005	,002	,118	2,771	,006	,001	,008	,257	3,897
	Rompimento	2,928	1,332	,081	2,198	,029	,303	5,553	,344	2,911
	Casco Banco Interno (Consumo proprio)	-,121	,032	-,188	-3,780	,000	-,184	-,058	,186	5,379
	Rel_argas_DIR	,060	,138	,018	,434	,664	-,212	,332	,281	3,552
	Areia RM41/CR31	,045	,038	,063	1,182	,039	-,030	,119	,163	6,143
	Fase_punção	,092	,011	,257	8,182	,000	,070	,114	,468	2,135

a. Variável Dependente: KCR

Figura 71 - Coeficientes de regressão multivariada obtidos da análise do KCR.

Atendendo-se aos gráficos dos resíduos distribuídos (ver Figura 73) é de notar que estes são normalmente distribuídos tal como também são independentes. Este facto conduz à conclusão de que as variáveis utilizadas para a descrição do modelo são adequadas, tal como se pode verificar o comportamento da variável em estudo na Figura 72. Por outro lado, as percentagens dos erros relativos obtidos encontram-se no capítulo 7.5.2 integrante dos Anexos. Estas nunca são superiores a 10%, o que é um bom indicador da taxa do sucesso da modelação exercida.

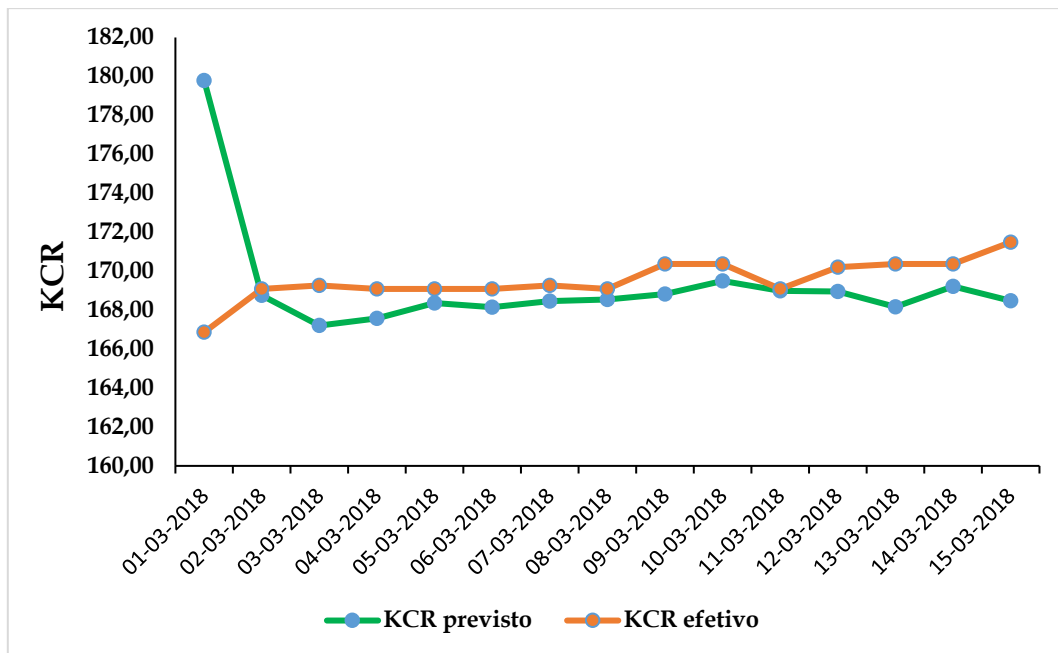


Figura 72 - KCR previsto e efetivo ao longo do fabrico de Março de 2018 do 4630S037 de 0,7 cl

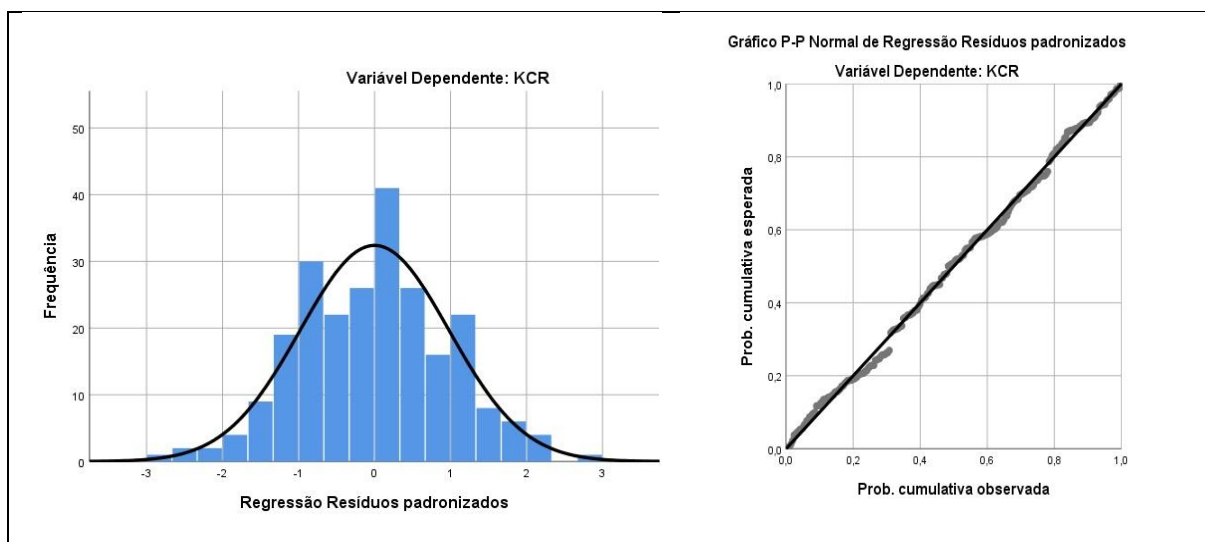


Figura 73 - Resíduos padronizados provenientes da regressão multivariada da produção útil.

4.5.2 Modelo de regressão logística

4.5.2.1 Defeitos críticos

Ao contrário daquilo que foi efetuado com as variáveis resposta anteriores, aqui procedeu-se a uma previsão através do modelo de regressão logística. Esta, tal como foi mencionado no capítulo 2.3, visa a categorizar a existência ou não existência dos defeitos, neste caso críticos.

Esta modelação foi feita de uma forma semelhante às anteriores, em se introduziram todas as variáveis correlacionadas com a variável resposta em *backward* e *forward*. A interpretação do modelo obtido na Figura 74 começa pela classificação dos casos verificados.

Tabela de Classificação^a

Passo 1	Observado	Def_2cate	Previsto		Porcentagem correta
			,00	1,00	
		,00	154	14	91,7
		1,00	36	30	45,5
	Porcentagem global				78,6

a. O valor de recorte é ,500

Figura 74 - Classificação dos defeitos críticos em função das categorias estabelecidas no modelo de regressão multivariada logística.

É notório que os casos mais bem classificados dizem respeito aos dias em que não existem defeitos críticos, o que é expectável visto que esse é o maior número de dias de fabrico. Por sua vez, dado que a amostragem dos dias em que ocorrem os defeitos críticos é mais pequena (36 dias face aos 241 totais), é natural que a percentagem de classificação face à previsão estabelecida seja mais baixa.

Resumo do modelo				Teste de Hosmer e Lemeshow			
Passo	Verossimilhança de log -2	R quadrado Cox & Snell	R quadrado Nagelkerke	Passo	Qui-quadrado	df	Sig.
1	197,049 ^a	,294	,422	1	6,160	8	,629

a. Estimativa finalizada no número de iteração 6 porque as estimativas de parâmetro mudaram foram alteradas para menos de ,001.

Figura 75 – Resumo do modelo obtido da previsão dos defeitos críticos referente ao fabrico do 4630S037 de 0,7cL.

Figura 76 - Teste de Hosmer e Lemeshow efetuado na regressão logística dos defeitos críticos do 4630S037 de 0,7 cL.

Com base no teste da significância do modelo, tendo em conta que o valor de *Sig* é superior a 0,05, conclui-se que o modelo obtido é estatisticamente significativo. Por outro lado, os pseudo *R* obtidos possuem valores baixos o que implica que a variância existente não é bem explicada pelas variáveis inseridas.

Variáveis na equação

Passo 1 ^a		B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% C.I. para EXP(B)	
								Inferior	Superior
	Fase_punção	,071	,018	14,910	1	,000	1,073	1,035	1,112
	M_NV_ESQ	-,078	,031	6,307	1	,012	,925	,871	,983
	Hot_End_PERC	-,125	,051	6,001	1	,014	,882	,798	,975
	Velocidade_puxadores	-,185	,088	4,368	1	,037	,831	,699	,989
	KCR	-,174	,054	10,280	1	,001	,840	,755	,935
	Pressão_pilotagem	6,849	2,843	5,803	1	,016	943,232	3,584	248269,669
	Constante	25,279	14,383	3,089	1	,079	9,520E+10		

a. Variável(is) inserida(s) no passo 1: Fase_punção, M_NV_ESQ, Hot_End_PERC, Velocidade_puxadores, KCR, Pressão_pilotagem.

Figura 77 – Coeficientes de regressão logística multivariada obtida da análise dos defeitos críticos.

O primeiro grupo de eventos corresponde aos dias em que não existem defeitos críticos enquanto que o segundo diz respeito à relação contrária. Assim sendo, dado o que já se referiu anteriormente no subcapítulo 2.3. acerca da razão de chances, é nítido que as variáveis da fase da punção como também as pressões de pilotagem correspondem então à ausência da existência de defeitos críticos. Contudo, as variáveis tais como o rendimento das garrafas à saída da máquina, a percentagem de enfora, a velocidade dos puxadores e o *KCR* correspondem pelo contrário ao grupo

dos defeitos propriamente ditos. Daqui se retira a conclusão de que quando a percentagem do rendimento a quente diminui, os defeitos críticos tendem a aumentar. Esta relação é expectável uma vez que o grupo dos defeitos aqui analisados provêm sobretudo do mau condicionamento da massa vítrea, tanto no canal distribuidor (forehearth) como na própria máquina de moldação.

Reparou-se que as variáveis utilizadas no modelo são todas estatisticamente significativas.

Na tabela seguinte apresentam-se então as previsões obtidas com base nos coeficientes obtidos anteriormente.

Tabela 11 - Previsão dos defeitos críticos do 4630S037 de 0,7 cL ao longo do fabrico de Março de 2018.

Data	p(x)	Defeito categórico previsto	Defeito categórico efetivo
01/03/2018	0,05	0	1
02/03/2018	0,35	0	0
03/03/2018	0,51	1	1
04/03/2018	0,33	0	0
05/03/2018	0,24	0	0
06/03/2018	0,25	0	0
07/03/2018	0,20	0	0
08/03/2018	0,25	0	0
09/03/2018	0,34	0	0
10/03/2018	0,38	0	0
11/03/2018	0,31	0	1
12/03/2018	0,39	0	0
13/03/2018	0,37	0	0
14/03/2018	0,57	1	0
15/03/2018	0,45	0	0

Tal como já era de prever, o modelo obtido não se adequa aos dados efetivos relativos aos defeitos críticos pois as variáveis chave que se relacionam com estes possuem falta de observações para poderem ser analisadas.

4.6 *Best Day*

Com base nas análises efetuadas anteriormente, constatou-se que o *Best Day* do fabrico do Havana Club de 0,7cL, analisado desde 22/7/2015 até 8/1/2018, ocorreu a 30/12/2017 em que a produção útil atingiu 107 ton.

Em termos de receita, constatou-se que no melhor fabrico (o de Dezembro de 2017) não se utilizou casco branco interno, tendo a areia uma percentagem de ~ 64% enquanto que no pior fabrico (o de fim de Outubro de 2017) está na gama dos 40%. Verificou-se a percentagem de casco branco utilizada no pior fabrico situou-se entre 19% a 32,5%. Assim sendo, embora o casco branco contribua para a reciclagem do vidro e abaixamento da temperatura de fusão da Sílica, o seu uso deve ser minucioso pois pode contribuir para uma produção menos eficiente.

As temperaturas do forno têm uma influência direta na pasta vítrea formada, e é de reparar que a *T1102* se apresenta 30°C mais baixa no pior fabrico face ao melhor. Nas restantes temperaturas do forno não se verificam diferenças significativas. O NO_x emitido no melhor fabrico tomou valores superiores do que no pior (~ 905,5 ppm no melhor e entre 160-808 ppm no pior). É de reparar que os restantes gases de combustão não foram analisados devido à falta de registos dos mesmos. Usaram-se rácios superiores de caudal ar/gás no pior fabrico (entre 15-19%) do que no melhor (12-15%).

No que toca às variáveis da fabricação, a cadência estabelecida no pior fabrico é de 143 embalagens por minuto enquanto que no melhor é de 150 embalagens por minuto. Isto significa que o tempo de residência no forno, foi ligeiramente mais baixo no melhor fabrico do que no pior. O *KCR* acompanha este comportamento pois o peso da garrafa em ambos os fabricos foi a mesma. Quanto às variáveis correspondentes à formação de gota, é de notar que a altura da punção foi 3 *cm* mais alta no melhor fabrico do que no pior. O resto das variáveis não teve diferenças significativas.

Salienta-se o facto de que as variáveis conducentes do condicionamento térmico no *forehearth*, as das temperaturas da ferramenta da máquina e os parâmetros directos relacionados com a forma de gota não foram analisados devido à falta de registos.

5 Conclusões e Recomendações

A competitividade no setor vidreiro tem sido crescente e produzir em larga escala, a baixo custo e sem defeitos é um requisito. Assim, tem-se apostado cada vez mais na melhoria contínua do processo. Esta dissertação serviu para se estender à optimização do processo do fabrico do vidro oco através da implementação do *Best Day*, na *BA Glass*, cuja fábrica pioneira é a da Venda Nova (Amadora). O projeto visa determinar o melhor dia de fabrico, que é obtido quando é produzida maior quantidade útil de um artigo ao longo de uma produção, sem defeitos críticos, e por fim sem reclamações por parte do cliente *a posteriori*. Desta forma, é possível comparar a produção de um dado artigo entre as diversas fábricas do grupo, pois existe um registo visível no *Matrix* de todas as variáveis processuais desde a zona do forno até ao TSF da garrafa.

Constatou-se que o melhor dia de fabrico na análise feita da garrafa do 4630S037 de 0,7 cL ao longo dos 3 anos fabris é o dia 30/12/2017. Concluiu-se que as variáveis resposta, isto é, o *KCR*, a produção útil e os defeitos críticos, que são parâmetros chave para uma produção mais eficiente, correlacionam-se com diversas variáveis processuais.

As associações lineares (correlações de *Pearson*) estabelecidas em relação às variáveis do forno focam-se essencialmente nas temperaturas do forno, nomeadamente nas T1102 e T1203, e na relação do ar/gás utilizados. No que se refere às variáveis processuais de fabricação, as mais importantes são os parâmetros relacionados com a punção (fase, curso e altura), as tesouras (curso das tesouras e consumo de água nas tesouras) como também os tamanhos dos tubos utilizados. Todos os parâmetros acima mencionados são fulcrais para a forma de gota, cuja formação correta é um dos passos fundamentais para produzir um artigo de qualidade. Sabe-se que a formação de gota do vidro é relacionada com o condicionamento térmico do *forehearth* como também com as temperaturas impostas na ferramenta da máquina *I.S.*, mais concretamente nos contramoldes, moldes finais e boquilhas. Como tal, recomenda-se que estas variáveis passem a ser registadas todos os dias, já que a ocorrência de falta de histórico é iminente. Por outro lado, é aconselhável o registo diário das velocidades da queda de gota como também do seu diâmetro e do comprimento. Estas variáveis também são de carácter fundamental para uma gota perfeita. Para além dos parâmetros de fabricação que condicionam a viscosidade da pasta vítrea distribuída pelas secções independentes, é necessário ter o devido cuidado com algumas das variáveis do forno. Destas, ressalva-se a importância de registo das emissões gasosas, nomeadamente CO, SO₂ e CO₂, indicadores da qualidade de combustão da MP no forno.

Por fim, neste primeiro estudo foi possível constatar que a modelação nos defeitos críticos não possui correlações fortes ou moderadas, devido à origem dos mesmos. É de salientar que a fábrica em estudo começou por ter um registo constante de todas as variáveis do processo a partir do fabrico ocorrido em Dezembro de 2017. Sugere-se assim um segundo estudo nesta variável, com os devidos dados relacionados com a distribuição da temperatura da pasta vítrea ao longo tanto do *forehearth* como também das secções independentes da máquina.

6 Referências bibliográficas

- [1] “BA Glass.” [Online]. Available: <http://www.bavidro.com/pt/>.
- [2] A. K. Varshneya, *Fundamentals of Inorganic Glassmaking*. 1994.
- [3] M. C. Gonçalves, “Vidros,” in *Ciência e Engenharia de materiais de construção*, IST Press., M. C. Gonçalves and F. Margarido, Eds. 2012, pp. 399–435.
- [4] J. M. F. Navarro, *El vidrio*, Tercera ed. Madrid: ARTEGRAF, S.A., 2003.
- [5] *The complete book on Glass Technology*. Delhi: Asia Pacific Business Press Inc.
- [6] M. K. Choudhary, “Recent Advances in Mathematical Modeling of Flow and Heat Transfer Phenomena in Glass Furnaces,” vol. 36, pp. 1030–1036, 2002.
- [7] S. Tangjitsitharoen, S. Ratanakuakangwan, M. Khonmeak, and N. Fuangworawong, “Investigation of Regenerative and Recuperative Burners for Different Sizes of Reheating Furnaces,” *Int. J. Mech. Aerospace, Ind. Mechatron. Manuf. Eng.*, vol. 7, no. 10, pp. 952–956, 2013.
- [8] “Tipos de fornos e a sua construção.” Documentos internos da BA Glass, 2009.
- [9] V. Sardeshpande, U. N. Gaitonde, and R. Banerjee, “Model based energy benchmarking for glass furnace,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 10, pp. 2718–2738, 2007.
- [10] H. Kai and N. Tobias, “Case Study: Gob Loading in a Glass Moulding Machine,” *Procedia CIRP*, vol. 39, pp. 203–208, 2016.
- [11] G. Containers, “Glass Forehearth Temperature,” pp. 1–2.
- [12] “Industrial Efficiency Technology Database.” [Online]. Available: <http://ietd.iipnetwork.org/content/conditioning-and-forming>.
- [13] M. Kovačec, A. Pilipović, and N. Štefanić, “Improving the quality of glass containers production with plunger process control,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 304–310, 2010.
- [14] Waster and Resources Action Programme, “The Future of Glass Forming Technology for the Manufacture of Lightweight Containers,” no. September, 2008.
- [15] R. Penlington, M. Sarwar, and D. B. Lewis, “Application of advanced coatings to narrow neck press and blow plungers in the glass container industry,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 76–77, pp. 81–85, 1995.
- [16] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 2003.
- [17] Analytics Vidhya, “Practical Guide to Principal Component Analysis (PCA) in R & Python,” vol. 20, pp. 1–57, 2016.
- [18] V. Dillingerova, T. Vaculovic, E. V. A. Cerna, and V. Kanicky, “CLASSIFICATION OF ARCHAEOLOGICAL GLASS SAMPLES USING LA-ICP-MS,” pp. 855–860, 2017.
- [19] R. A. Johnson and D. W. Wichern, “Applied multivariate statistical analysis.” 2007.
- [20] “Pearson’s Product-Moment Correlation using SPSS Statistics.” [Online]. Available: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/pearsons-product-moment-correlation-using-spss-statistics.php>.
- [21] “Pearson’s Correlation Coefficient.” [Online]. Available: <http://learntech.uwe.ac.uk/da/Default.aspx?pageid=1442>.
- [22] D. Pavanello, W. Zaaiman, A. Colli, J. Heiser, and S. Smith, “Statistical functions and relevant

- correlation coefficients of clearness index,” *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 130–131, pp. 142–150, 2015.
- [23] M. H. Kutner, *Applied Linear Statistical Models*. 2005.
- [24] “Point-Biserial Correlation using SPSS Statistics.” [Online]. Available: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/point-biserial-correlation-using-spss-statistics.php>.
- [25] M. T. Puth, M. Neuhäuser, and G. D. Ruxton, “Effective use of Spearman’s and Kendall’s correlation coefficients for association between two measured traits,” *Anim. Behav.*, vol. 102, pp. 77–84, 2015.
- [26] R. Beerkens, “Modeling of the melting process in industrial glass furnaces,” *Math. Simul. Glas. Technol. (Schott Ser. Glas. Glas. Ceram.)*, pp. 1–93, 2002.
- [27] M. Jebavá, P. Dyrčíková, and L. Němec, “Modelling of the controlled melt flow in a glass melting space - Its melting performance and heat losses,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 430, pp. 52–63, 2015.
- [28] M. K. Choudhary, R. Venuturumilli, and M. R. Hyre, “Mathematical Modeling of Flow and Heat Transfer Phenomena in Glass Melting, Delivery, and Forming Processes,” *Int. J. Appl. Glas. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 188–214, 2010.
- [29] A. Ponsich, C. Azzaro-Pantel, S. Domenech, L. Pibouleau, and F. Pigeonneau, “A systemic approach for glass manufacturing process modeling,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 48, no. 8, pp. 1310–1320, 2009.
- [30] S. Package and S. Science, “First steps in SPSS,” pp. 1–5.
- [31] D. Files *et al.*, “IBM SPSS Statistics 23 Part 1 : Descriptive Statistics Downloading the Data Files,” pp. 1–18, 2016.
- [32] S. Hosmer, David W; Lemeshow, *Applied Logistic Regression*. Canada, 2000.
- [33] “Binomial Logistic Regression using SPSS Statistics.” [Online]. Available: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/binomial-logistic-regression-using-spss-statistics.php#assumptions>.
- [34] B. Glass, “Defeitos VN,” 2017.
- [35] “Bucher emhart glass.” [Online]. Available: <http://www.bucheremhartglass.com/>.
- [36] “Defects forming.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=r4F4PZUHYeU>.
- [37] “Glass Container - Gob Forming Simulator Overview.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=LQIKUQz-QzU&t=121s>.
- [38] “Funny 3D Glass bottle forming animation.” [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=rlqSdfXZ_dk.
- [39] D. internos fornecidos pela B. Glass, “No Title.” Lisboa, 2017.
- [40] A. L. Sockloff, “Spurious product correlation,” *Educ. Psychol. Meas.*, vol. 36, no. 1, pp. 33–44, 1976.
- [41] B. D. Haig, “What Is a Spurious Correlation?,” *Understanding Statistics*, vol. 2, no. 2. p. 125, 2003.
- [42] D. C. M. Vining, E. A. Peck, and G. Geoffrey, *Introduction to Linear Regression Analysis*. 2012.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

7 Anexos

7.1 Estudo da arte

7.1.1 Zona fria do processo de fabrico do vidro de embalagem

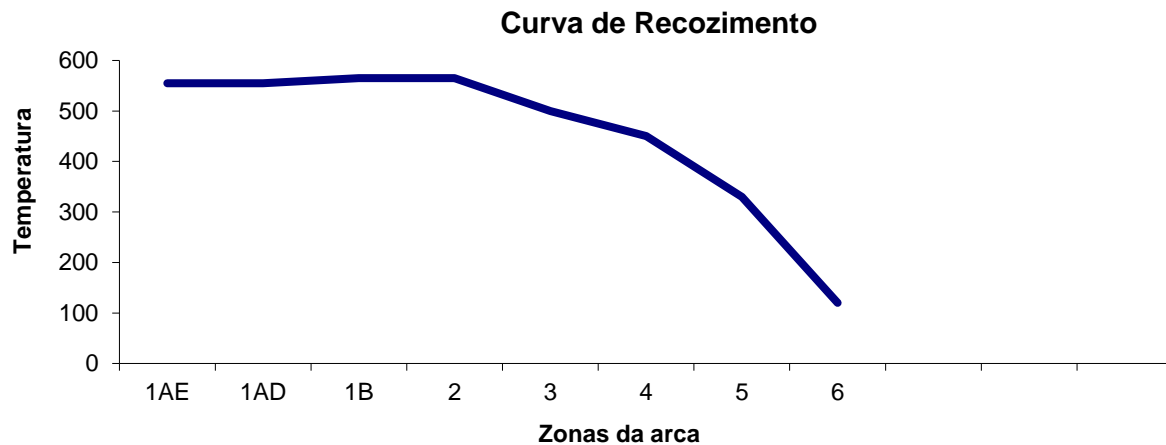


Figura 78 - Curva de recozimento aplicada no fabrico de 4630S037 de 0,7 cL.

7.2 Descrição das variáveis processuais de fabrico de vidro de embalagem

7.2.1 Defeitos



Figura 79 – Bolha (defeito crítico).

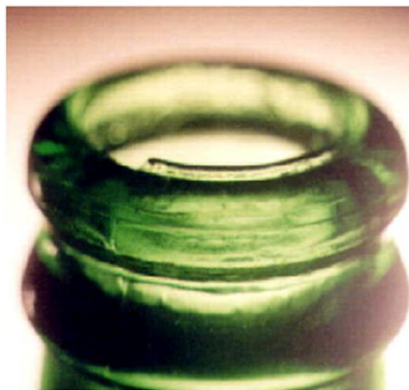


Figura 80 - Rebarba no topo da marisa (defeito crítico).

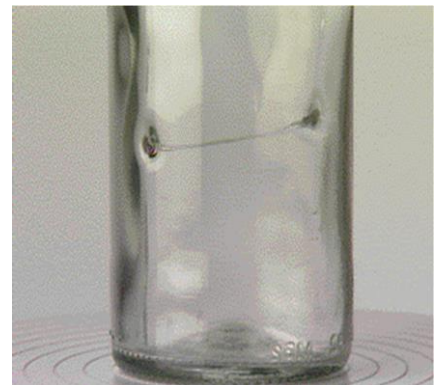


Figura 81 – Trapézio (defeito crítico).

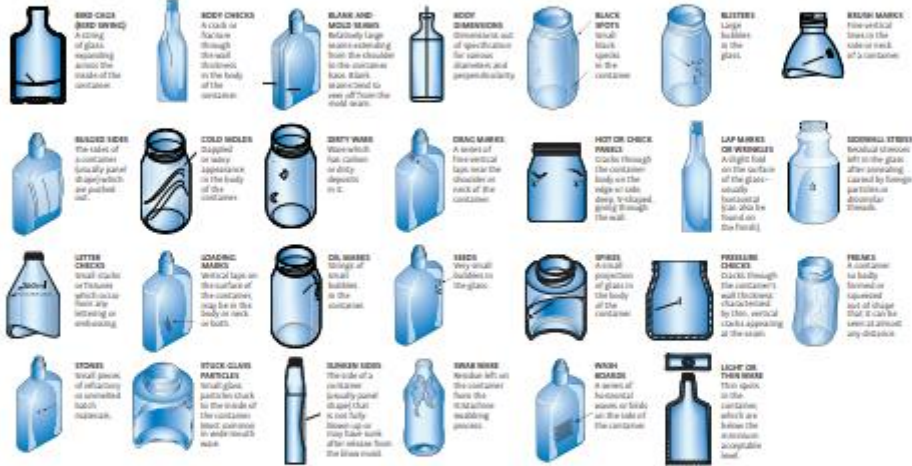
Neck Defects



Shoulder Defects



Sidewall & Body Defects



Base Defects



Other Defects

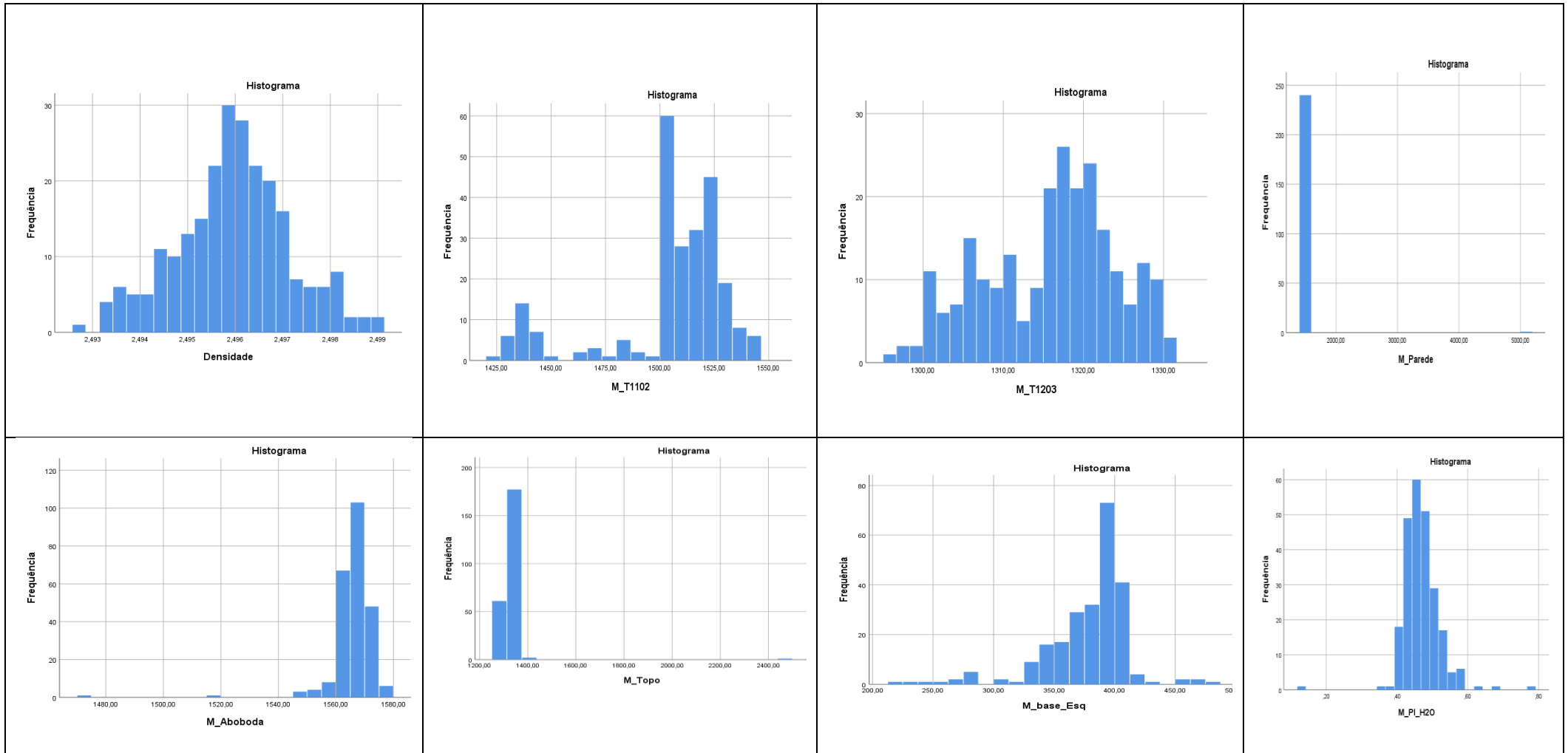


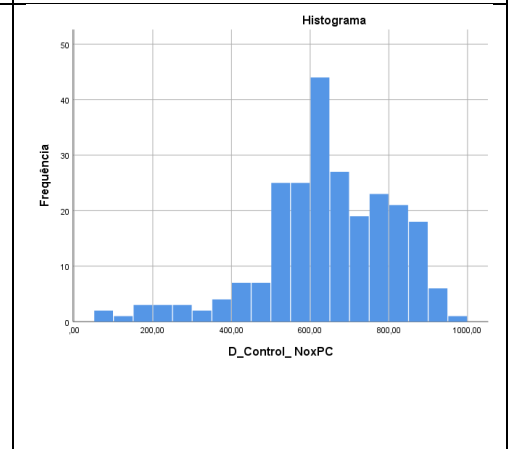
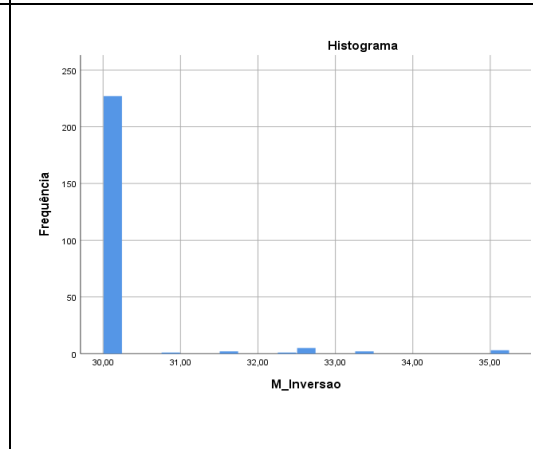
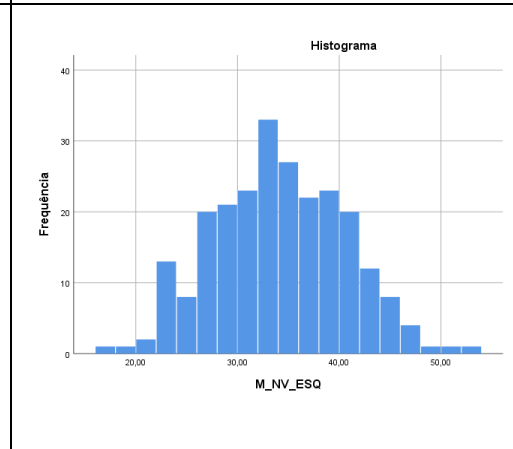
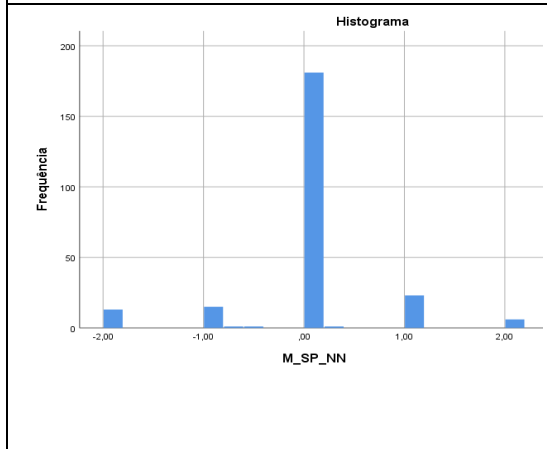
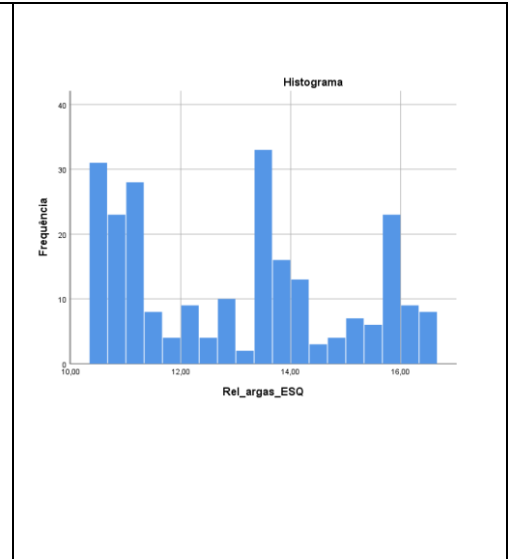
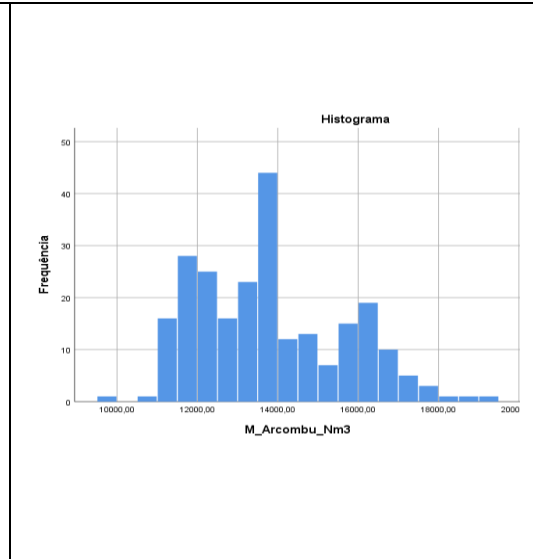
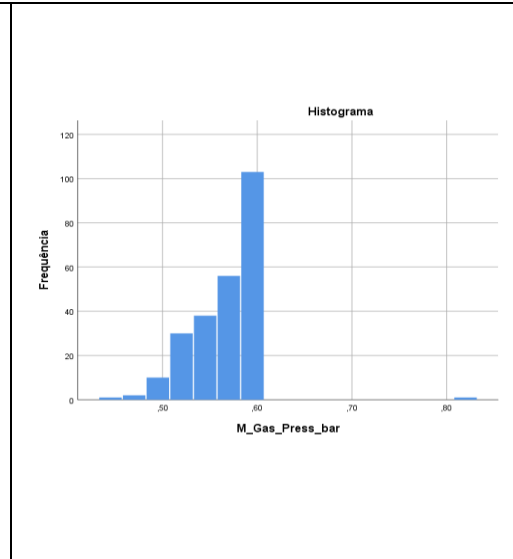
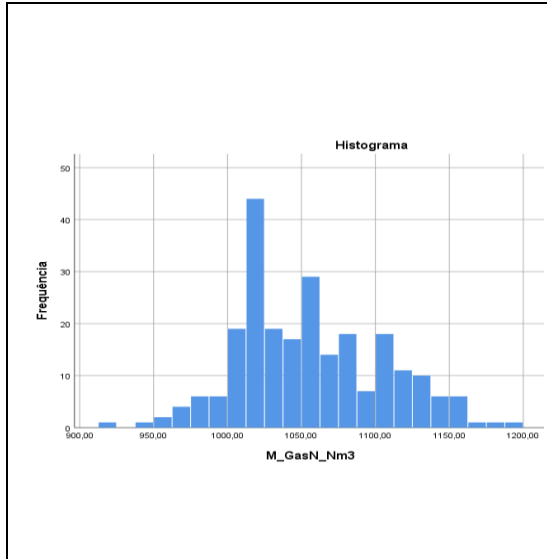
Figura 82 - Defeitos do tipo 1, 3 e 4 existentes nas embalagens de vidro.

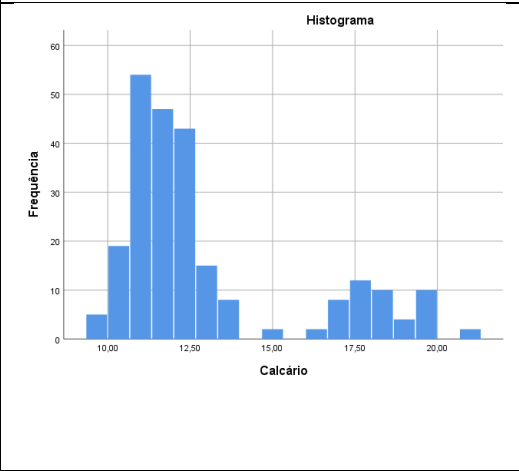
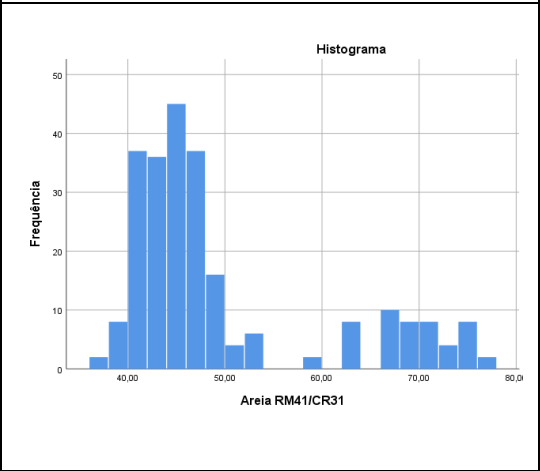
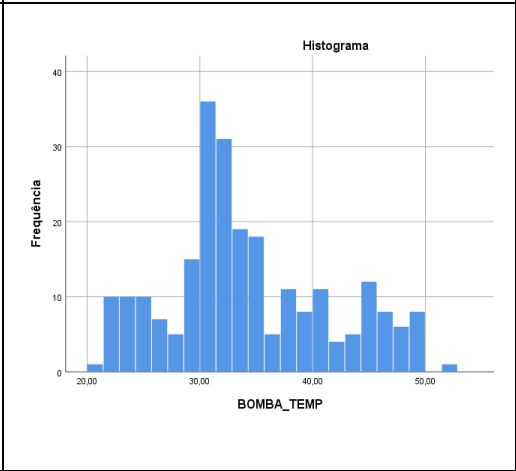
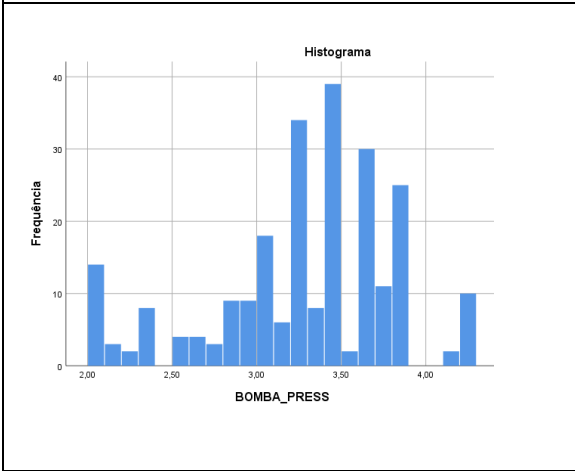
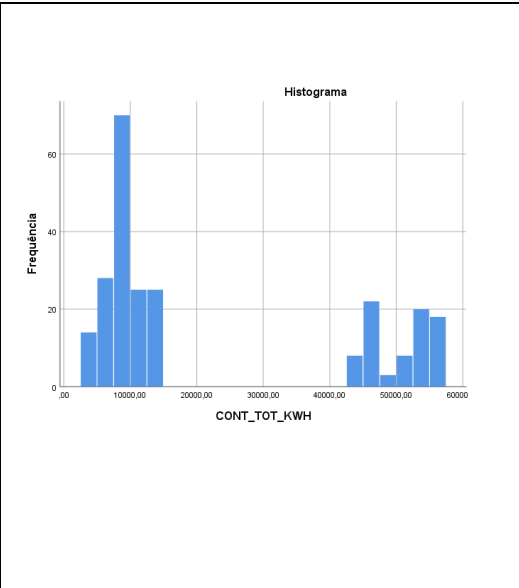
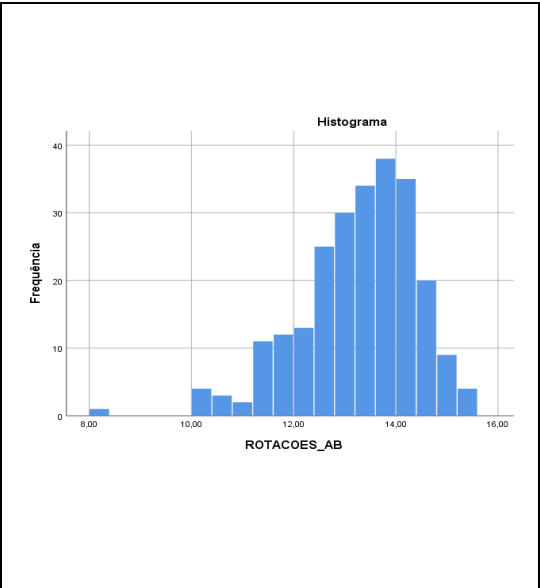
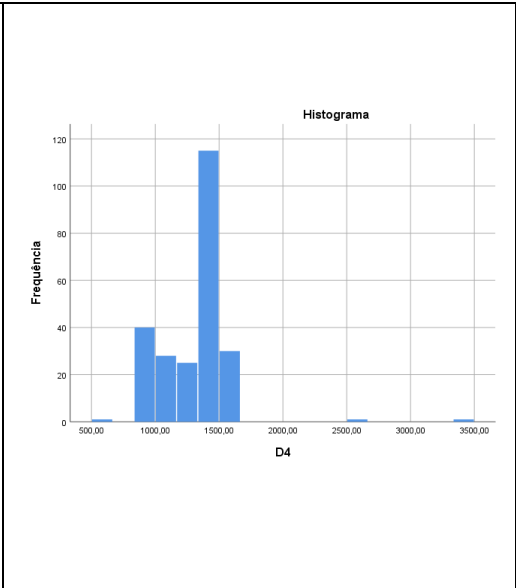
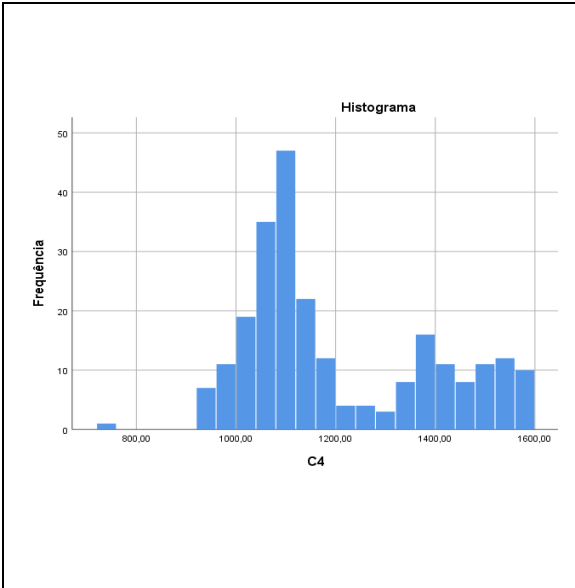
7.3 Análise exploratória das variáveis processuais

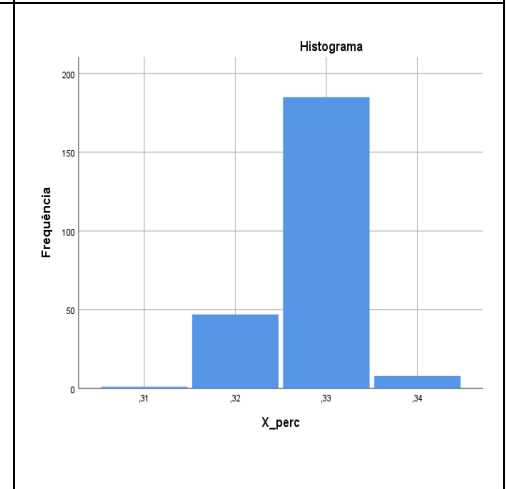
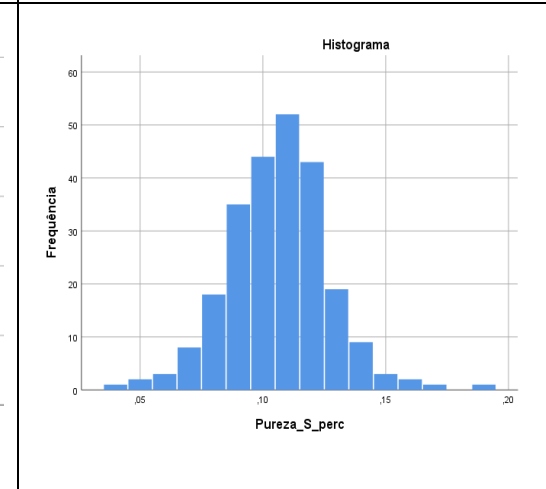
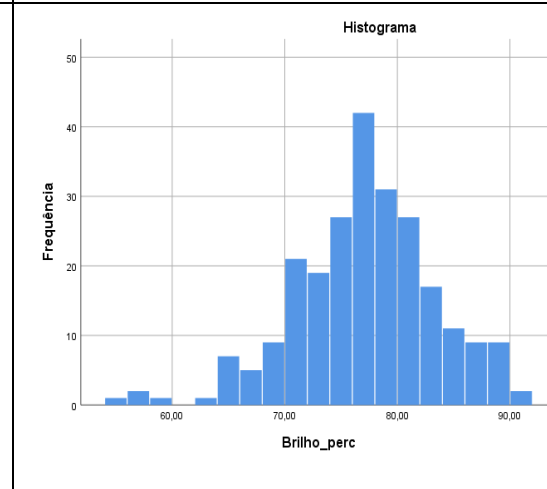
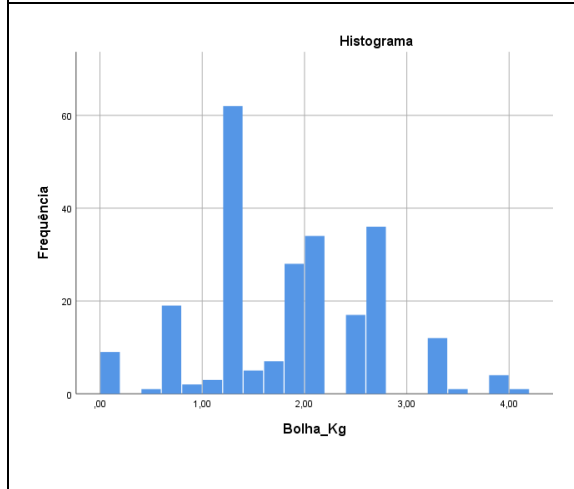
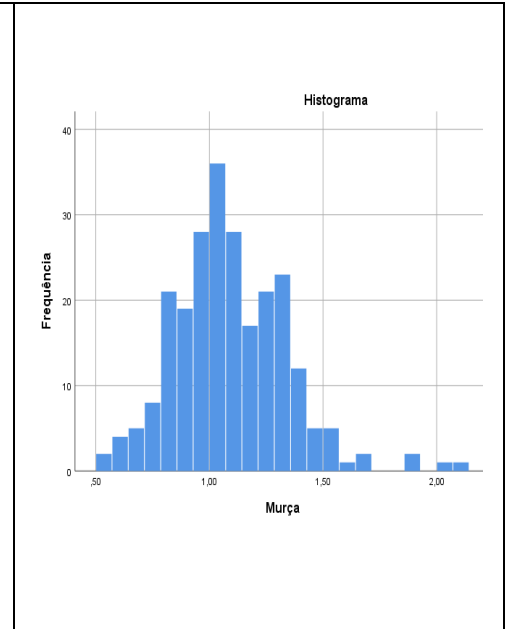
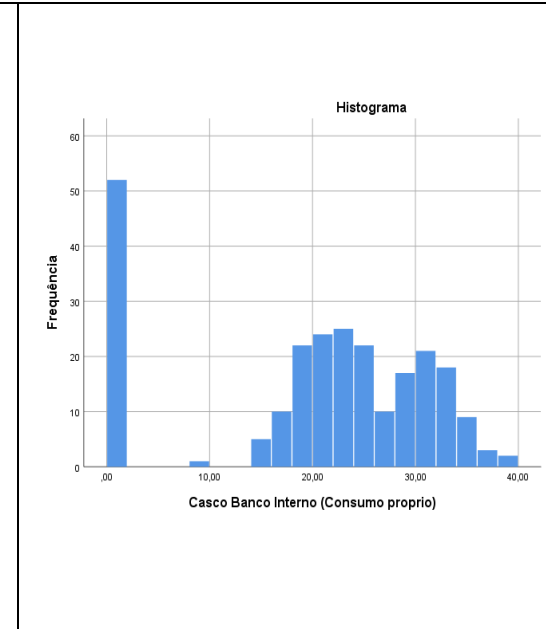
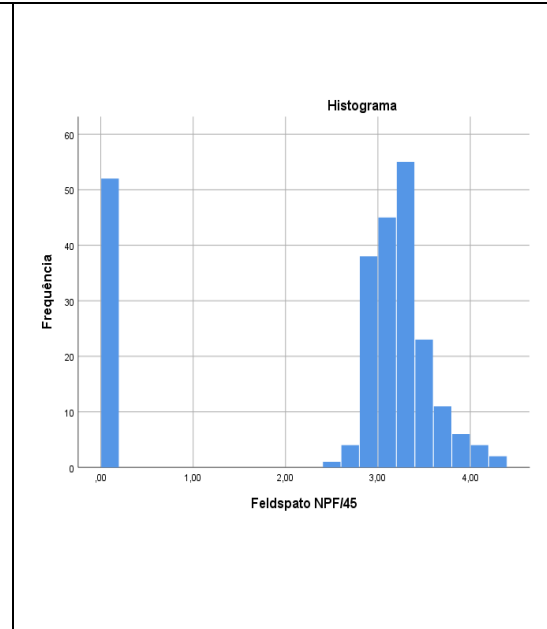
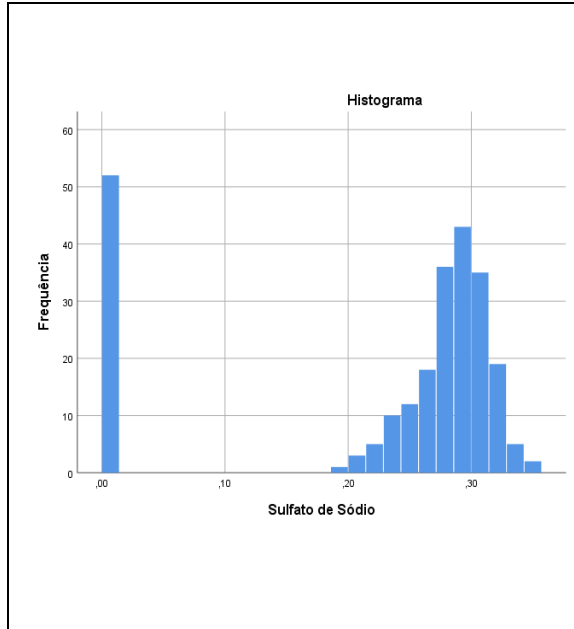
7.3.1 Distribuição normal das variáveis processuais

Tabela 12 - Verificação da distribuição das variáveis processuais no forno.









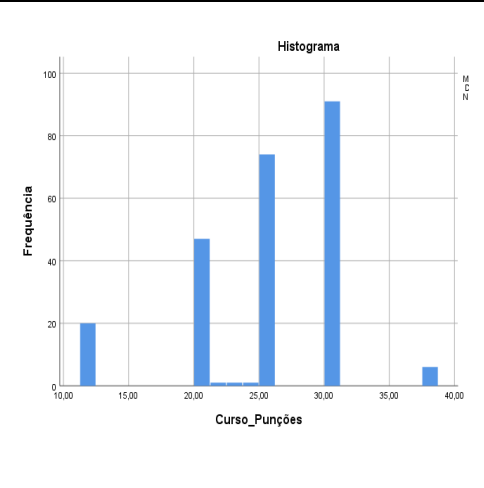
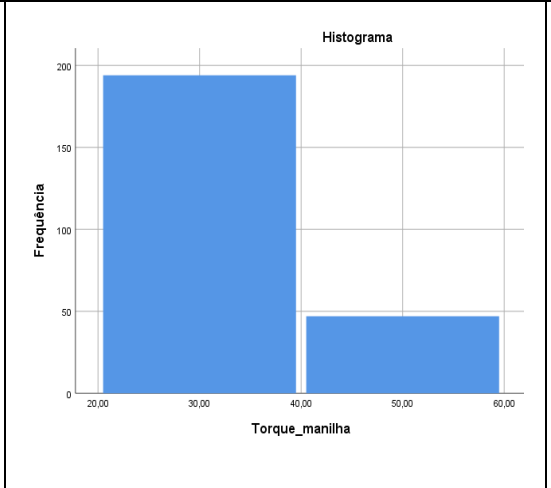
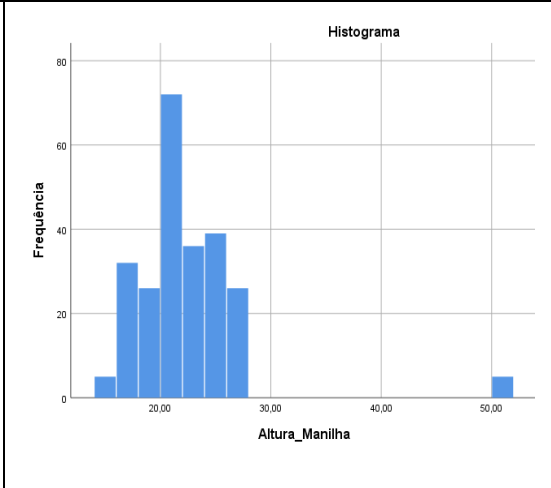
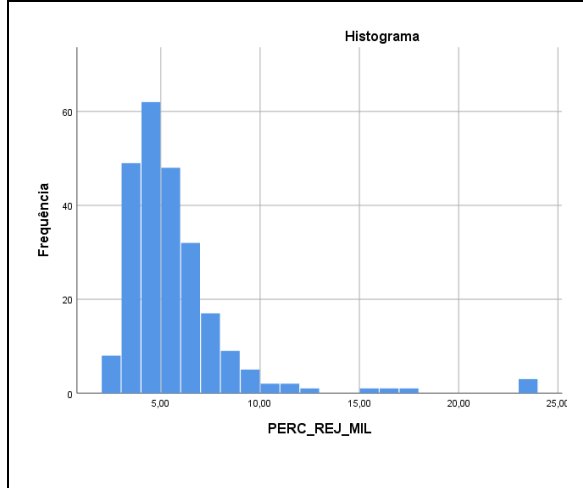
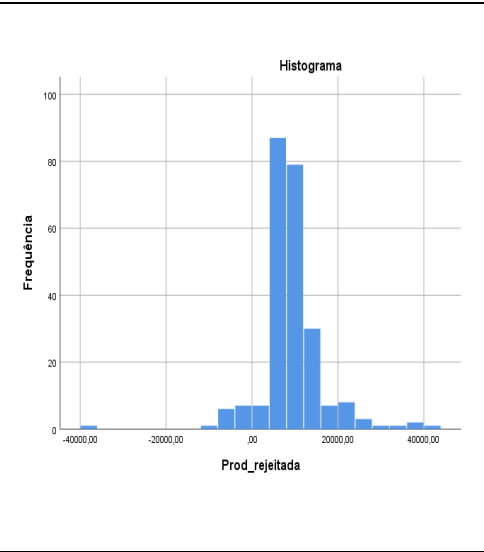
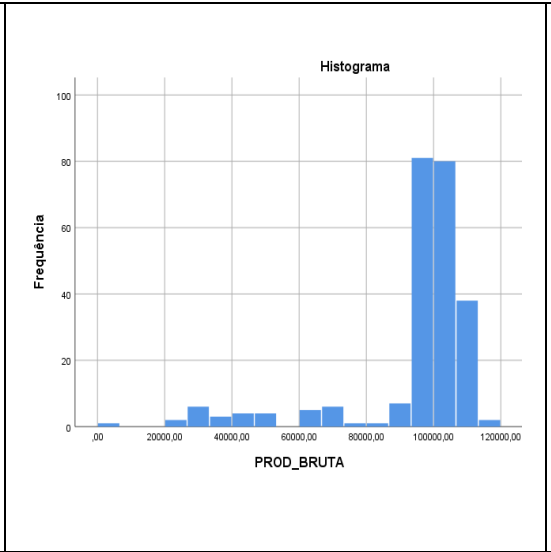
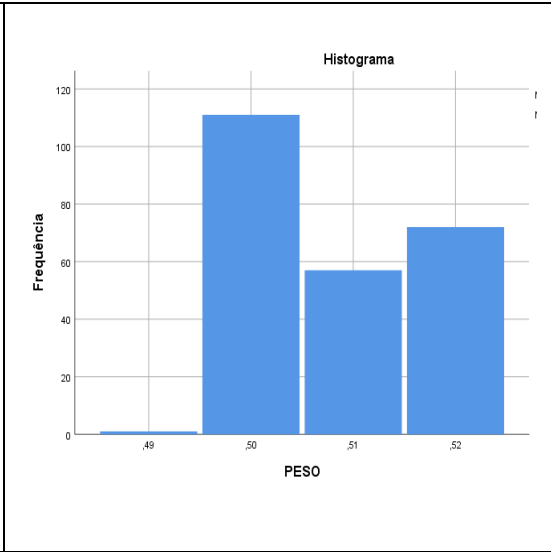
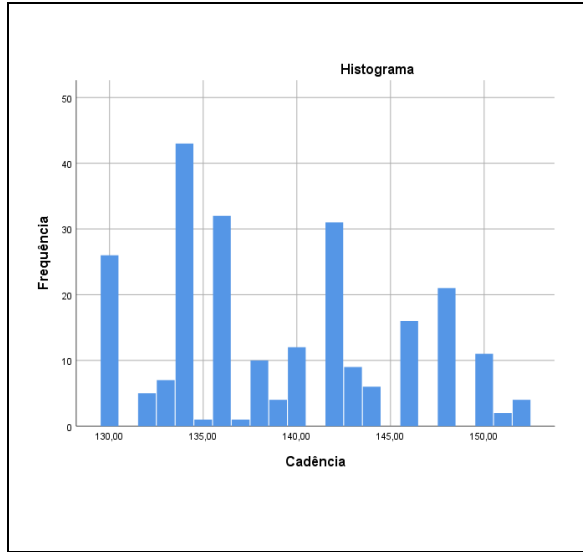
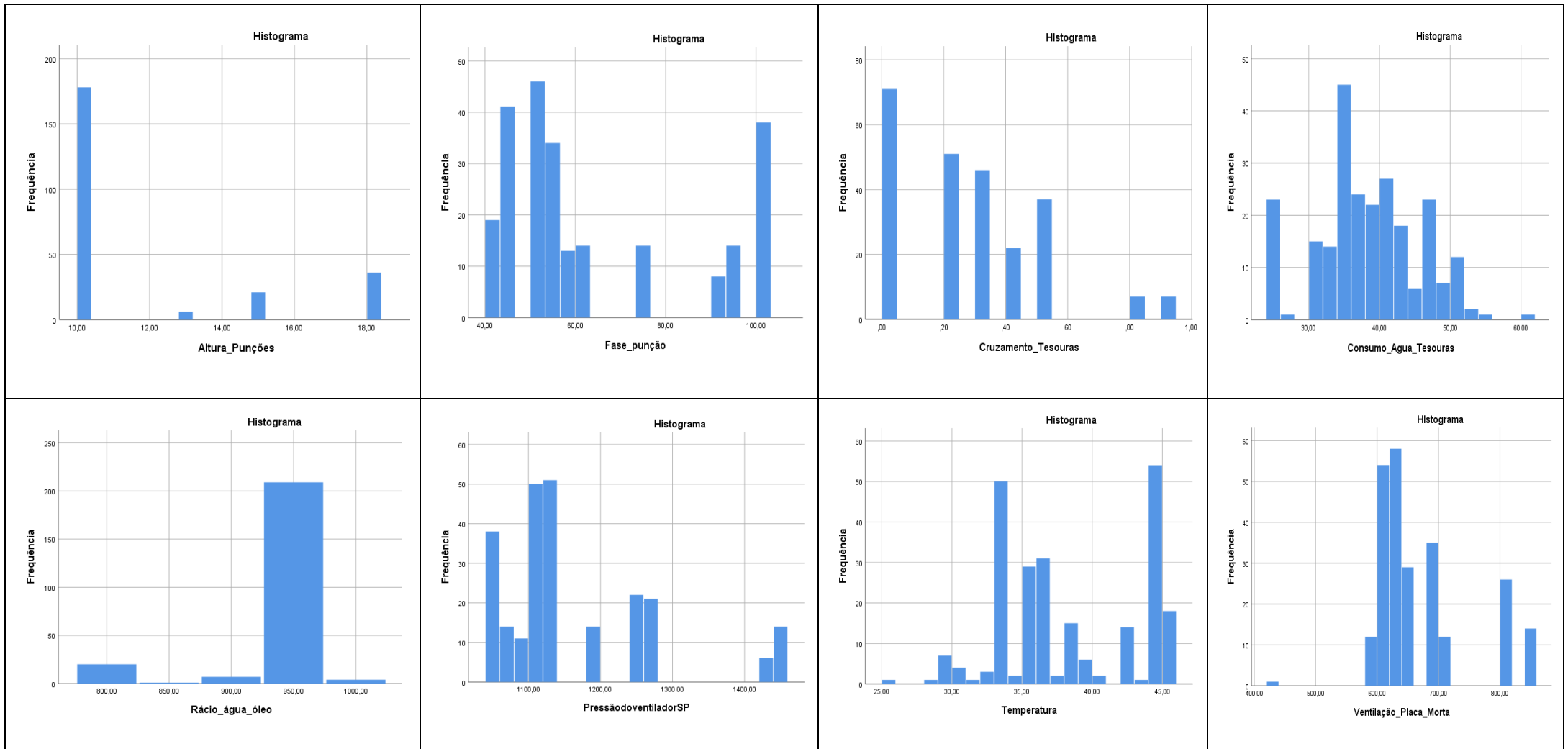
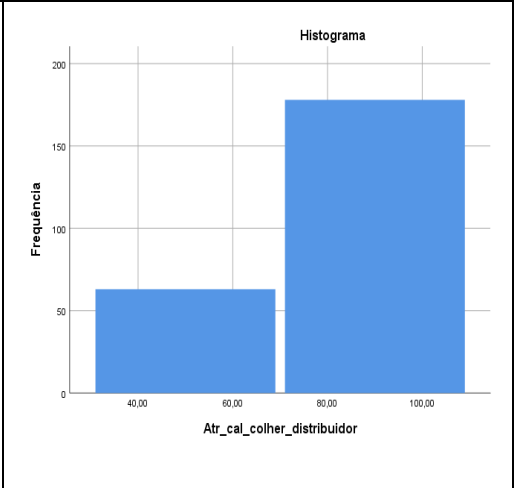
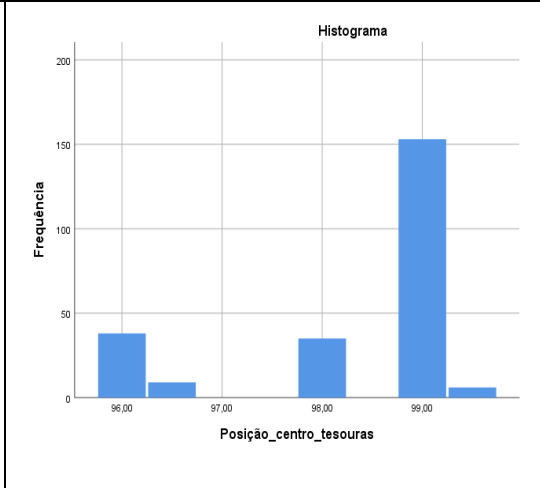
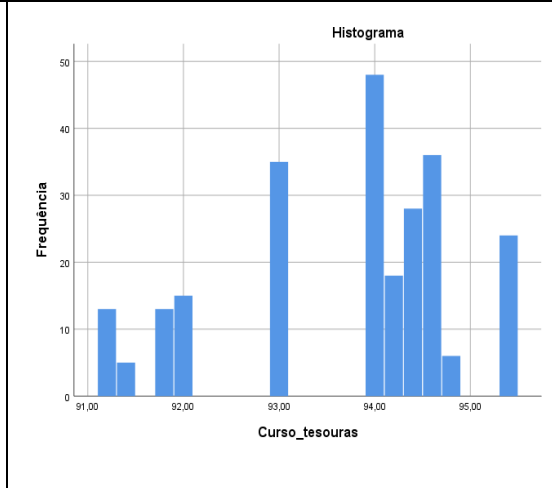
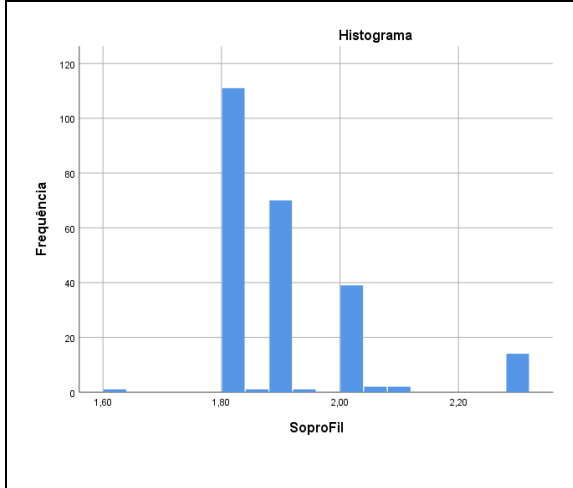
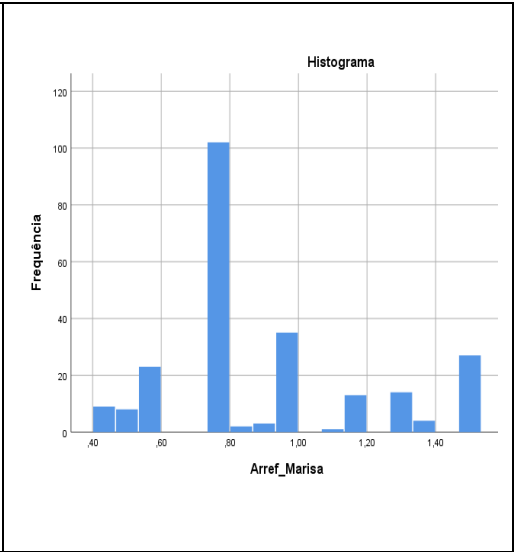
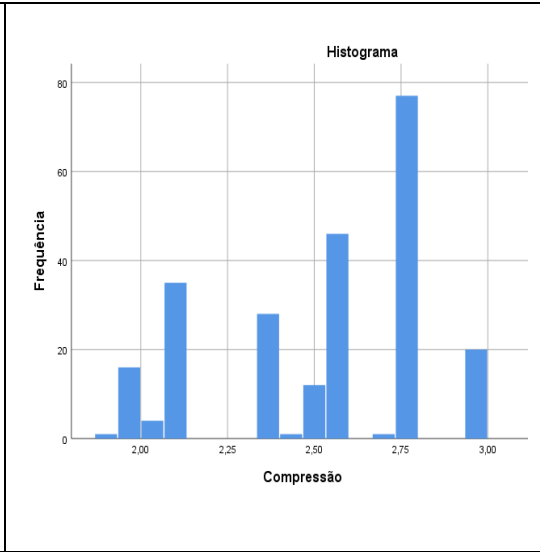
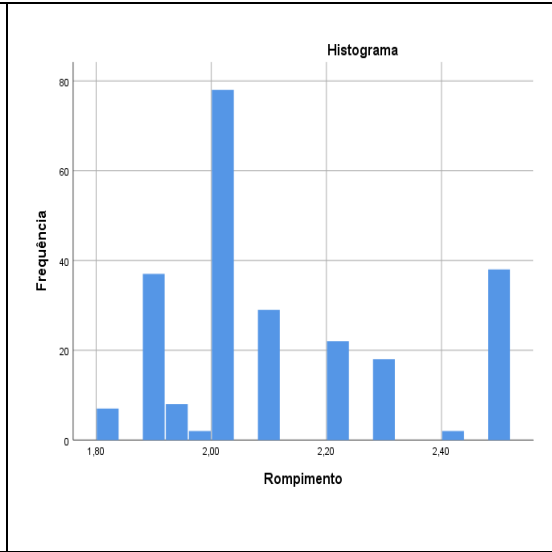
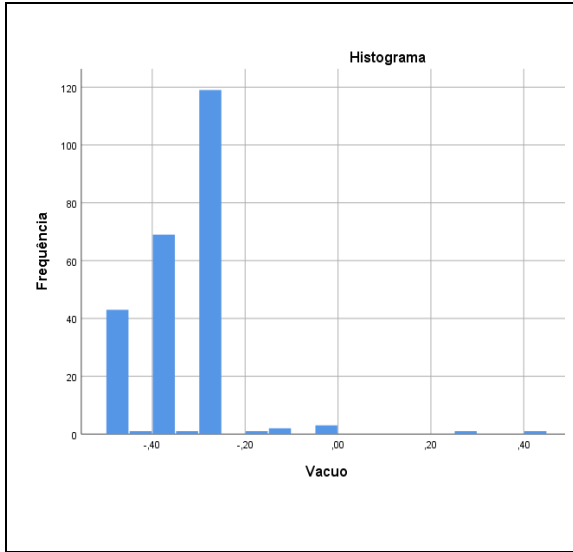


Tabela 13 - Verificação da distribuição das variáveis processuais da fabricação.





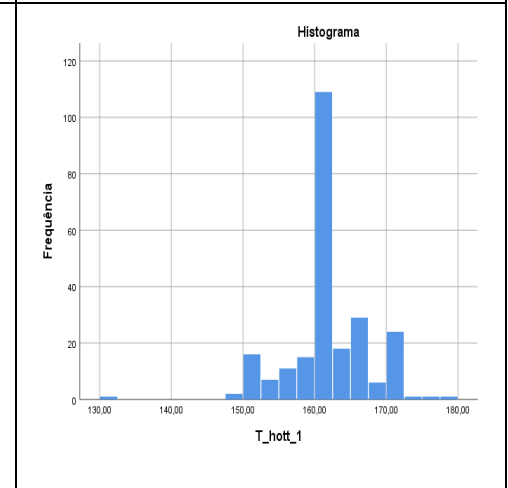
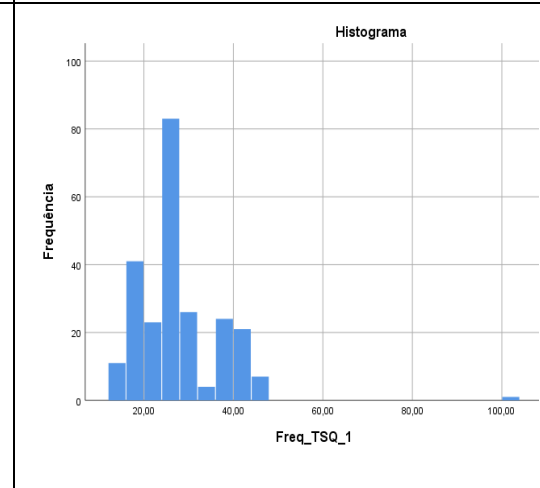
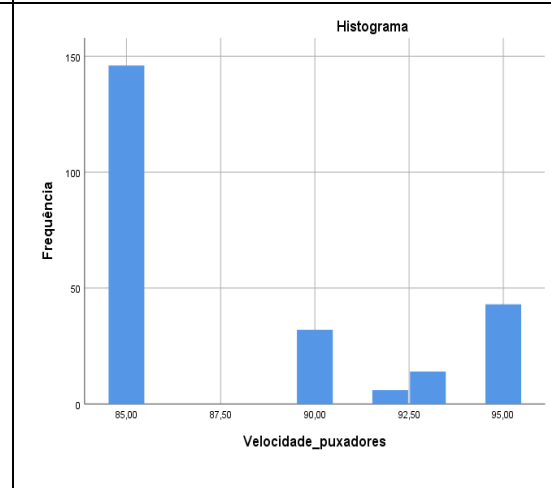
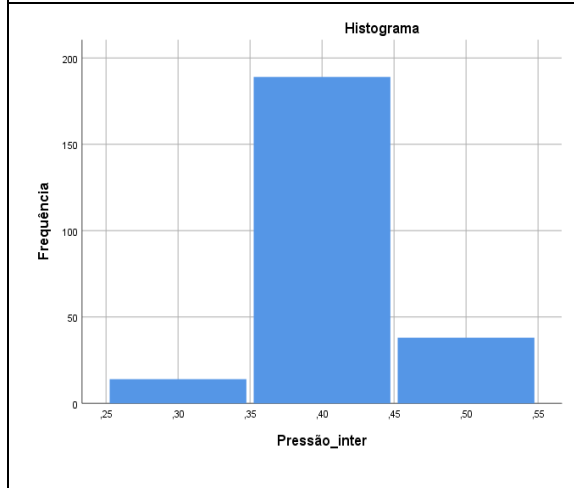
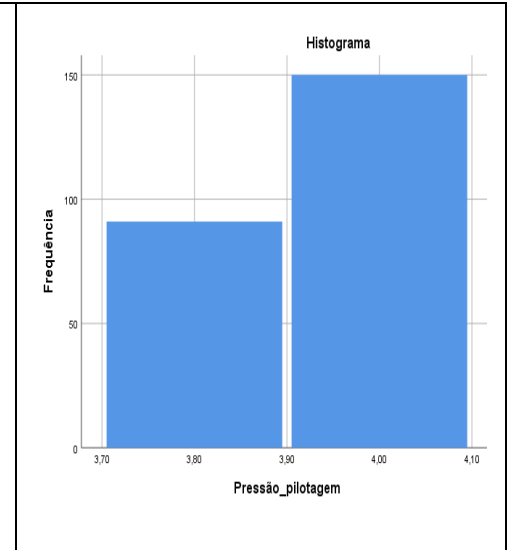
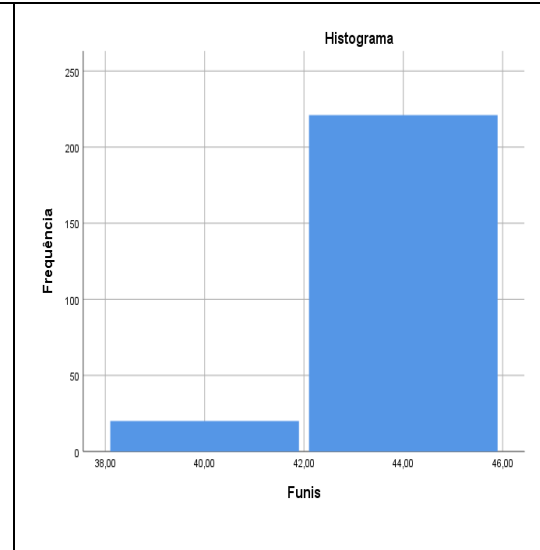
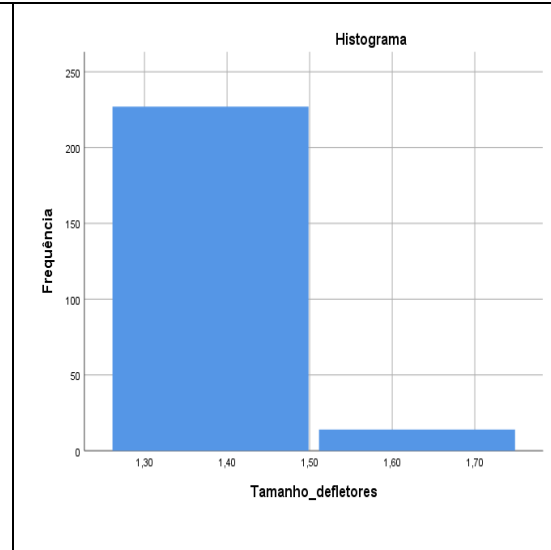
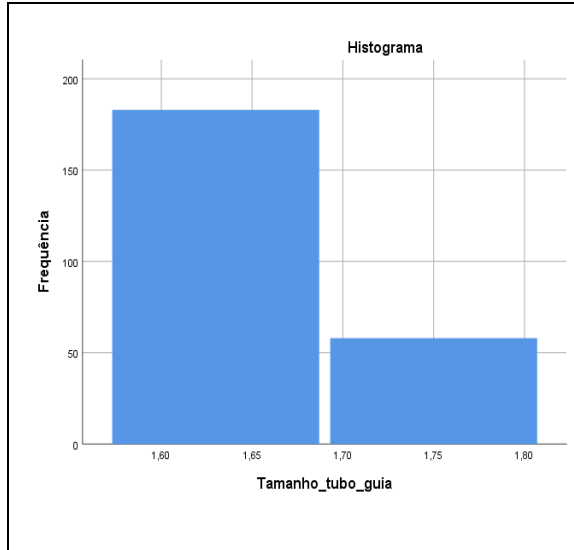


Tabela 14 - Verificação da distribuição das variáveis da zona fria.

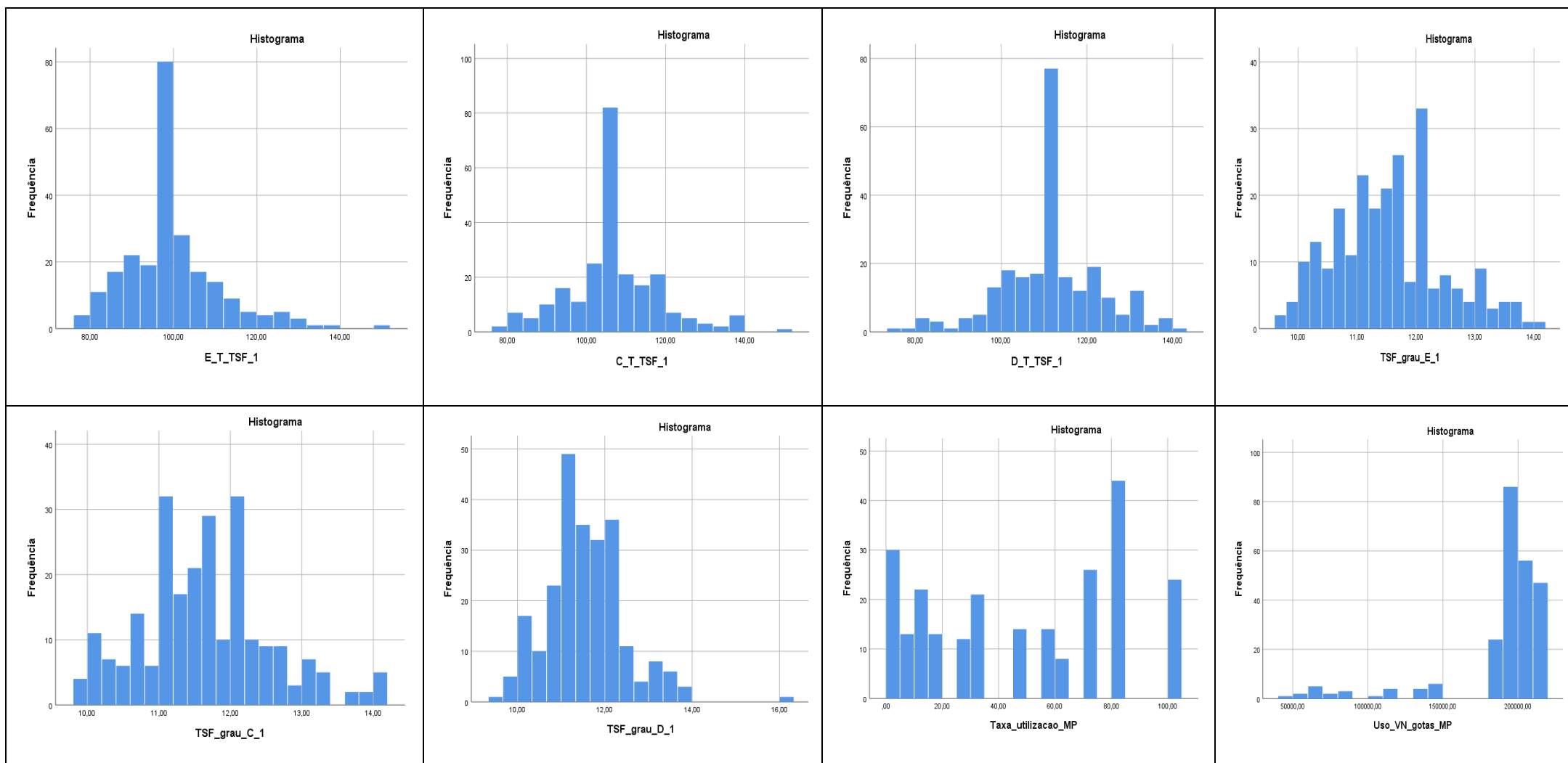
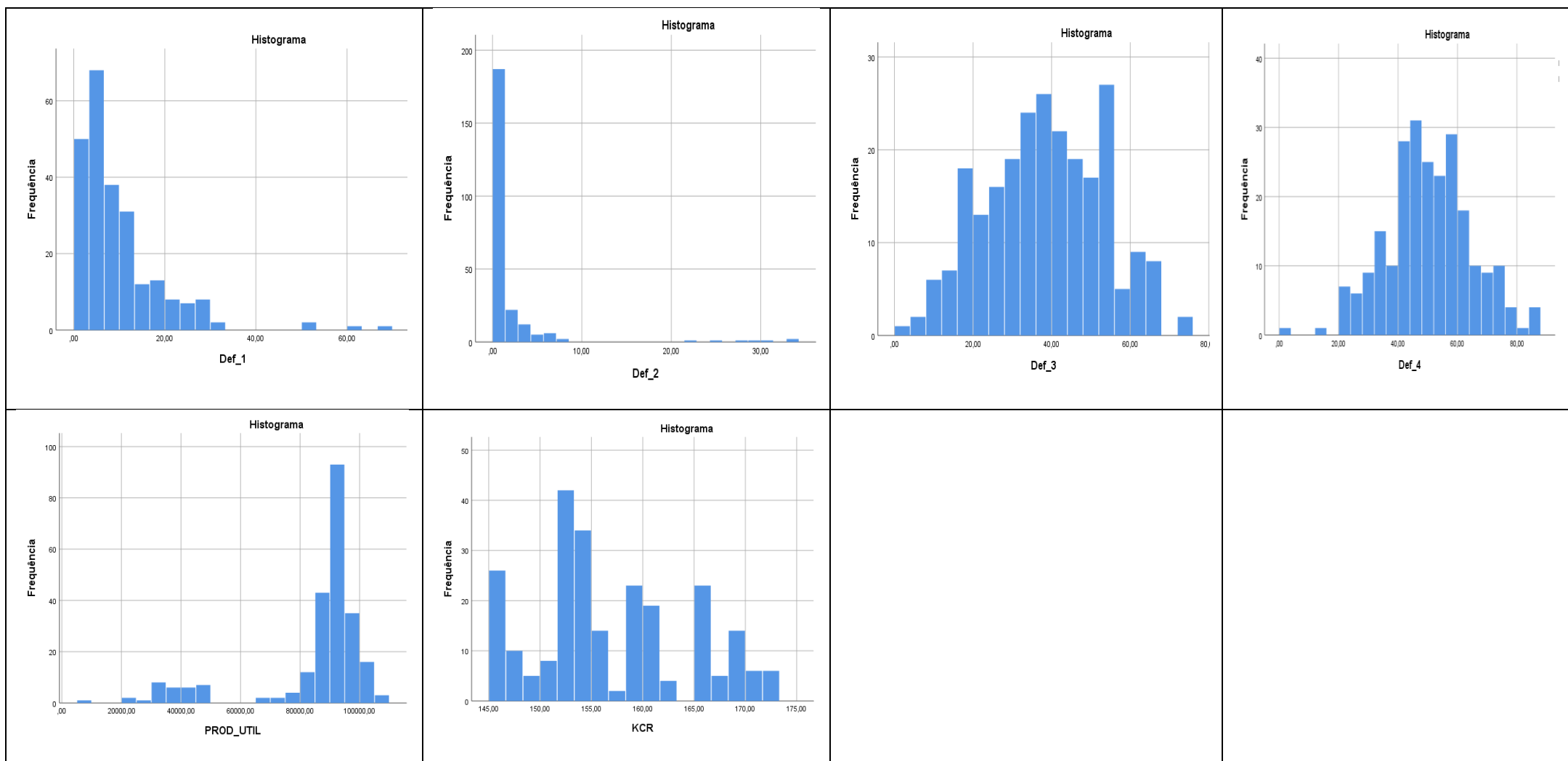


Tabela 15 - Verificação da distribuição das variáveis resposta.



7.3.2 Análise visual das variáveis processuais do Havana Club 0,7cL

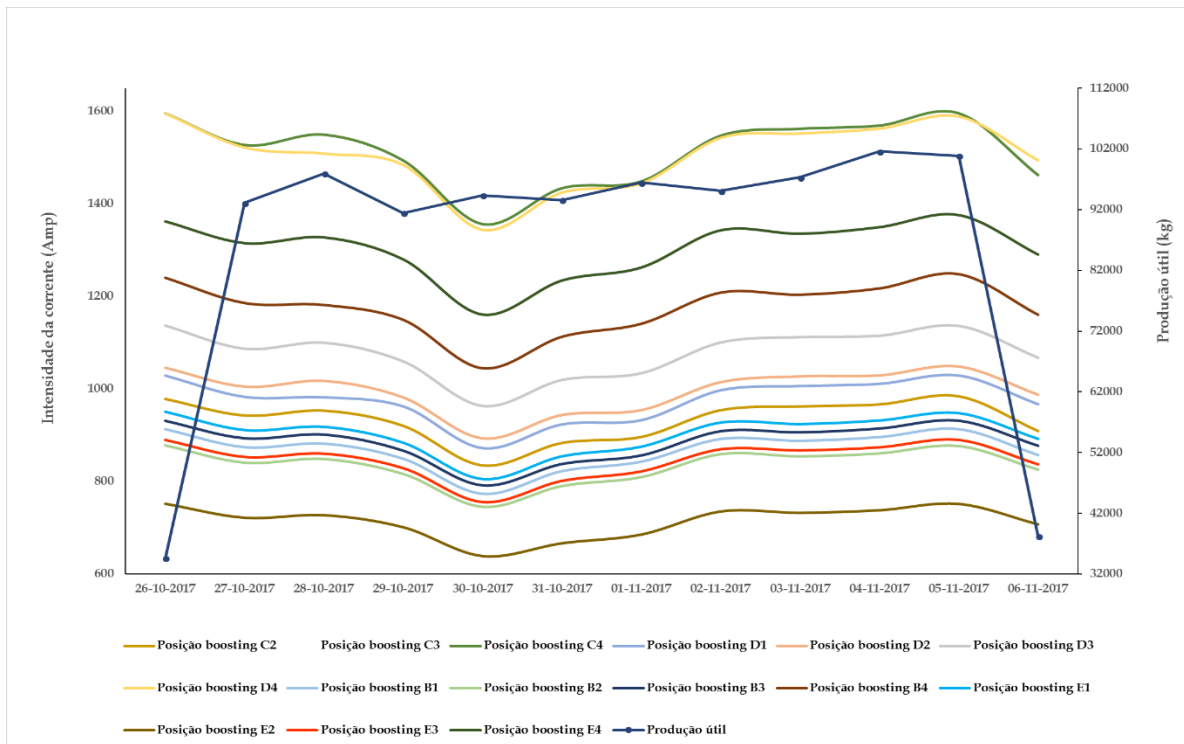


Figura 83 - Intensidade da corrente em diversas posições do boosting correspondente com a produção útil ao longo do pior fabrico do Havana Club de 0,7cL.

7.4 Correlações das variáveis processuais com as variáveis resposta

IBM SPSS Statistics - Visualizador do IBM SPSS Statistics

Correlações

	Densidade	M_T1102	M_T1203	M_Pareda	M_Aboboda	M_Topo	M_base_Esq	M_base_dir	M_PI_H2O	M_GasN_Nm3	M_C
Densidade	Correlação de Pearson	1	,007	,115	,033	,029	,191**	,071	,119	-,162*	-,097
	Sig. (2 extremidades)		,348	,104	,639	,685	,007	,316	,093	,022	,173
N		199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
M_T1102	Correlação de Pearson	,007	1	,714**	-,169*	-,236**	-,203**	-,137	-,149*	,139*	-,541**
	Sig. (2 extremidades)	,348		,000	,017	,001	,004	,054	,036	,050	,000
N		199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
M_T1203	Correlação de Pearson	,115	,714**	1	-,114	-,167*	-,126	-,106	-,205**	,178*	-,567**
	Sig. (2 extremidades)	,104	,000		,109	,018	,075	,138	,004	,012	,000
N		199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
M_Pareda	Correlação de Pearson	,033	-,169*	-,114	1	,102	,070	,025	,002	-,075	,139
	Sig. (2 extremidades)	,639	,017	,109		,150	,326	,724	,976	,295	,050
N		199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
M_Aboboda	Correlação de Pearson	,029	-,236**	-,167*	,102	1	,264**	,079	,084	-,316**	,378**
	Sig. (2 extremidades)	,685	,001	,018	,150	,000	,000	,266	,239	,000	,000
N		199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
M_Topo	Correlação de Pearson	,191**	-,203**	-,126	,070	,264**	1	,465**	,458**	-,086	,322**
	Sig. (2 extremidades)	,007	,004	,075	,326	,000	,000	,000	,000	,325	,000
N		199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
M_base_Esq	Correlação de Pearson	,071	-,137	-,106	,025	,079	,465**	1	-,296**	-,002	,156*
	Sig. (2 extremidades)	,316	,054	,138	,724	,266	,000	,000	,000	,981	,028
N		199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
M_base_dir	Correlação de Pearson	,119	-,149*	-,205**	,002	,084	,458**	-,296**	1	-,095	,106

Figura 84 - Amostragem das correlações obtidas na análise de produção útil com as variáveis processuais retiradas directamente do visualizador no SPSS.

7.5 Modelação das variáveis resposta

7.5.1 Verificação da variabilidade dos dados

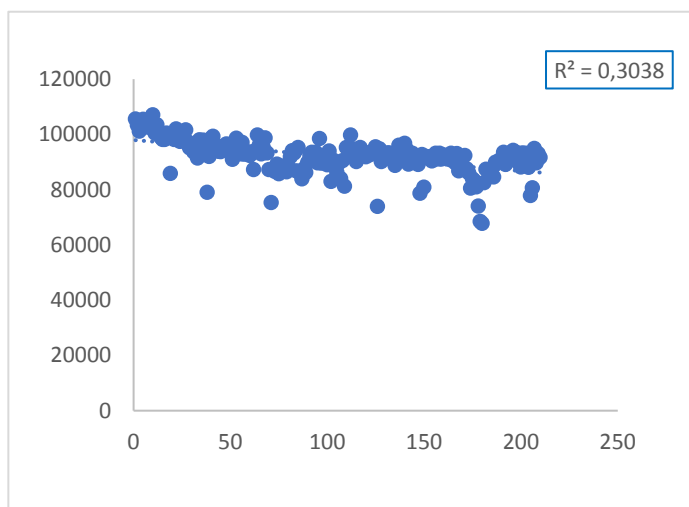


Figura 85 - T1203 vs Produção útil ao longo dos 241 dias de fabrico analisados da garrafa de 4630S037 de 0,7 cL.

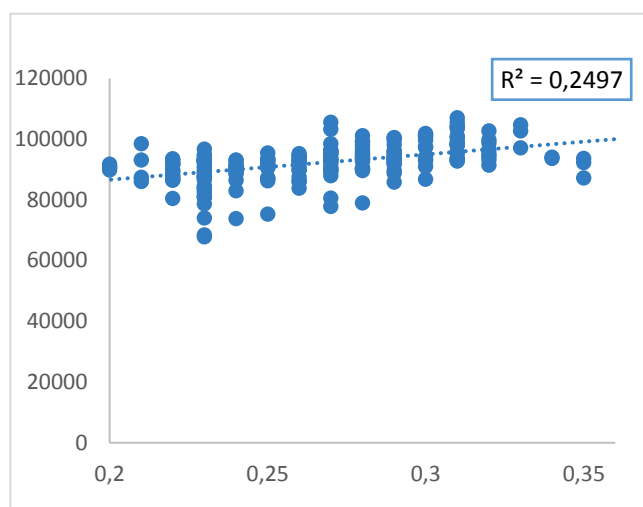


Figura 86 - Sulfato de Sódio vs Produção útil ao longo dos 241 dias de fabrico analisados da garrafa de 4630S037 de 0,7 cL.

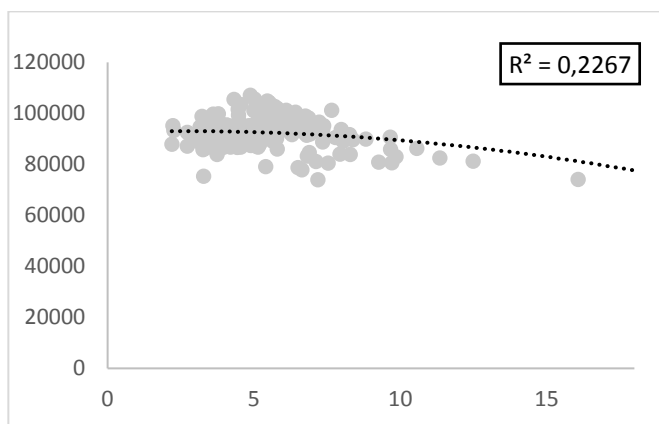


Figura 87 - Percentagem de rejeição nas máquinas de inspeção MIL vs Produção útil ao longo dos 241 dias de fabrico analisados da garrafa 4630S037 de 0,7 cL.

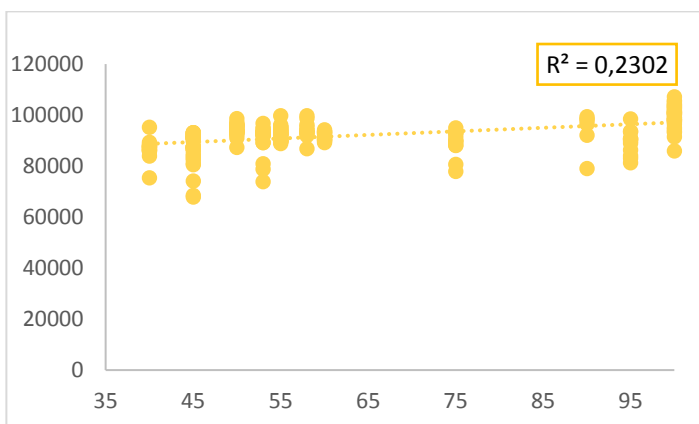


Figura 88 - Fase do punção vs Produção útil ao longo dos 241 dias de fabrico analisados da garrafa 4630S037 de 0,7 cL.

7.5.2 Erros associados às variáveis resposta previstas

Tabela 16 - Erros relativos associados à previsão da produção útil da garrafa de 4630S037 de 0,7 cL ao longo do fabrico de Março de 2018.

Data	Produção útil prevista	Produção útil efetiva	%erro associado	Data	Produção útil prevista	Produção útil efetiva	%erro associado
02/03/2018	98321	94049	-4,54	09/03/2018	99094	106785	7,20
03/03/2018	98364	101861	3,43	10/03/2018	99059	101860	2,75
04/03/2018	98485	98893	0,41	11/03/2018	98552	101102	2,52
05/03/2018	98234	99023	0,80	12/03/2018	99069	99093	0,02
06/03/2018	98129	99717	1,59	13/03/2018	99810	99851	0,04
07/03/2018	97841	101099	3,22	14/03/2018	98700	102624	3,82
08/03/2018	98686	103179	4,36	15/03/2018	99477	102554	3,00

Tabela 17 - Erros relativos associados à previsão do KCR da garrafa 4630S037 de 0,7 cL ao longo do fabrico de Março de 2018.

Data	KCR previsto	KCR efetivo	erro associado %	Data	KCR previsto	KCR efetivo	erro associado %
01/03/2018	179,79	166,86	7,75	09/03/2018	168,82	170,37	0,91
02/03/2018	168,76	169,09	0,20	10/03/2018	169,50	170,37	0,51
03/03/2018	167,21	169,26	1,21	11/03/2018	168,99	169,09	0,06
04/03/2018	167,58	169,09	0,89	12/03/2018	168,96	170,20	0,73
05/03/2018	168,37	169,09	0,42	13/03/2018	168,16	170,37	1,30
06/03/2018	168,14	169,09	0,56	14/03/2018	169,22	170,37	0,68
07/03/2018	168,46	169,26	0,47	15/03/2018	168,48	171,49	1,75
08/03/2018	168,55	169,09	0,32				