



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Bárbara Maria Calhau Pereira

**ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA AO  
DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE NUMA  
INDÚSTRIA CERÂMICA**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Química com  
especialização em Controlo de Qualidade e Ambiente orientada  
pelo Professor Doutor Jorge Luís Gabriel da Silva da Costa Pereira  
e apresentada ao Departamento de Química da Faculdade de  
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Setembro de 2022

Bárbara Maria Calhau Pereira

# Análise Multivariada aplicada ao Diagnóstico da Qualidade numa Indústria Cerâmica

Dissertação no âmbito do Mestrado em Química com especialização em Controlo de Qualidade e Ambiente apresentada ao Departamento de Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Professor Doutor Jorge Luís Gabriel da Silva da Costa Pereira

Engenheiro Miguel Ferreira

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Setembro de 2022

1 2  9 0

UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

# Agradecimentos

O findar desta etapa não teria sido possível sem a colaboração de várias pessoas envolvidas em todo o processo e das instituições que me acompanharam. Gostaria, assim, de agradecer a todos os que contribuíram para o término deste ciclo académico.

Ao Professor Doutor Jorge Costa Pereira, por toda a orientação e acompanhamento. Obrigada pelo apoio, pela disponibilidade e resiliência e por todos os ensinamentos ao longo destes dois anos de mestrado.

A todos os professores, colegas e demais pessoas que se cruzaram na minha jornada académica desde há 17 anos atrás, por todos os conhecimentos, competências e conselhos que me transmitiram, tendo sido fulcrais para o alcance deste objetivo.

À empresa CLiPER Cerâmica, em particular ao Engenheiro Carlos Pereira e à Doutora Milene Grilo, pela oportunidade de estágio, disponibilizando-me os meios e recursos necessários à elaboração do meu projeto.

Ao Engenheiro Miguel Ferreira, por toda a orientação na empresa, apoio e aprendizagem, tendo sido fundamental para a continuidade do meu trabalho.

Agradeço igualmente à Engenheira Susana Ferreira pelo acolhimento e apresentação da empresa. Um obrigada a todos os colaboradores da CLiPER pelo bom acolhimento, por toda a disponibilidade prestada e conhecimentos transmitidos.

Aos meus pais, irmão e avós por serem o meu suporte, por terem sempre acreditado em mim, nunca duvidando das minhas capacidades. Obrigada por lutarem pelo meu futuro a par comigo e por me darem a oportunidade de atingir este objetivo académico que tanto ansiava. Este acontecimento só é possível graças a vocês.

Às minhas quatro estrelinhas, que me acompanham sempre e me dão coragem para nunca desistir, principalmente à última que infelizmente partiu pouco antes de me ver concretizar este objetivo.

Ao Daniel, um pilar essencial, por toda a paciência que teve comigo durante esta temporada, pelos desabafos repetitivos e pelo apoio incondicional. Obrigada por todo o amor e carinho.

Aos meus amigos, por todo o apoio prestado e pela compreensão demonstrada com a minha falta de disponibilidade durante esta temporada.

A Coimbra, pelas amizades e pelas mil aventuras que me proporcionou. Obrigada por todas as lições e experiências vividas.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, o meu obrigada.

Esta conquista não é minha, é nossa.

“Não te digo adeus porque te levo sempre comigo. Obrigada, Coimbra!”

---

## Resumo

O presente estudo decorreu numa unidade fabril produtora de pavimentos e revestimentos em grés porcelânico e cujos objetivos foram a criação de um sistema de gestão de bases de dados relacionais para controlo do processo produtivo, culminando na implementação de uma abordagem sistemática para obtenção correta de dados que servem como suporte à tomada de decisão. A construção de uma outra base de dados contendo várias amostras e respetivas variáveis para uso da análise multivariada auxiliou no controlo de qualidade dos processos industriais - possibilitando a deteção e identificação de anomalias e faltas de conformidade, tendo em vista a melhoria do processo de fabrico.

A criação da base de dados para controlo da produção mostrou resultados favoráveis e integrou o plano de qualidade da empresa, tendo sido encarada como uma melhoria significativa da empresa no presente ano. Com este recurso, foi possível analisar os tempos de paragens mais críticos em cada uma das secções, sendo que a maioria encontra-se relacionada com limitações e respetiva manutenção dos equipamentos. Tendo em conta a eficiência global do equipamento, esta análise permitiu verificar que as secções de prensagem-linhas de vidragem e escolha encontram-se com valores abaixo do pretendido, sendo a eficiência o parâmetro mais crítico para ambas, e a secção de escolha a etapa mais deficitária, não conseguindo acompanhar o ritmo do processo. Este estudo também possibilitou identificar as maiores anomalias presentes nas peças porcelânicas, pelo que cerca de 50% dos defeitos resulta de problemas a nível de esquadria.

Relativamente à análise por modelação multivariada explícita, esta permitiu identificar variáveis que afetam negativamente a qualidade das peças cerâmicas - o pó atomizado é o parâmetro que requer uma maior atenção, pois as suas características (granulometria e percentagens de humidade, contração e absorção de água) e os processos que dependem das mesmas (relacionados com a cozedura) mostraram-se a influenciar negativamente a qualidade do material, bem como, na secção de prensagem e secagem, a pressão dos cunhos e a temperatura do queimador 1, na prensagem-linhas de vidragem a equipa que se encontra a laborar e, na etapa de cozedura a temperatura máxima do forno.

Em suma, a abordagem desenvolvida sobre este tipo de processo industrial, permitiu demonstrar a grande vantagem na análise integral das condições de laboração no sentido de obter informação processual sem afetar o normal decurso da operação. Sugere-se, assim, a incidência por parte da empresa sob os pontos negativos apresentados para uma melhoria e, conseqüentemente, um alcance dos objetivos idealizados por parte da mesma.

**Palavras-chave:** Indústria Cerâmica, Grés-Porcelânico, Controlo de Qualidade, Análise Multivariada, Modelação Multivariada

---

## Abstract

The present study took place in a factory that produces porcelain stoneware flooring and coverings and whose objectives were the creation of a relational database management system to control the production process, culminating in the implementation of a systematic approach to obtain the correct data that serve as support for decision making. The construction of another database containing several samples and respective variables for the use of multivariate analysis helped in the quality control of industrial processes - enabling the detection and identification of anomalies and lack of conformity, with a view to improving the manufacturing process.

The creation of the production control database showed favorable results and was part of the company's quality plan, having been seen as a significant improvement for the company this year. With this resource, it was possible to analyze the most critical downtimes in each of the sections, most of which are related to limitations and respective maintenance of the equipment. Taking into account the overall efficiency of the equipment, this analysis allowed us to verify that the pressing-glazing lines and selection sections are below the desired values, with efficiency being the most critical parameter for both, and the selection section the stage deficit, not being able to keep up with the pace of the process. This study also made it possible to identify the major anomalies present in porcelain pieces, so that about 50% of the defects result from problems at the level of miter.

Regarding the analysis by explicit multivariate modeling, this allowed the identification of variables that negatively affect the quality of ceramic pieces - the atomized powder is the parameter that requires greater attention, since its characteristics (granulometry and percentages of humidity, shrinkage and water absorption) and the processes that depend on them (related to firing) have been shown to negatively influence the quality of the material, as well as, in the pressing and drying section, the pressure of the dies and the temperature of burner 1, in the pressing-lines of glazing the team that is working and, in the firing stage, the maximum temperature of the oven.

In short, the approach developed on this type of industrial process allowed to demonstrate the great advantage in the integral analysis of the working conditions in order to obtain procedural information without affecting the normal course of the operation. Thus, it is suggested that the company focus on the negative points presented for an improvement and, consequently, a reach of the goals idealized by it.

**Keywords:** Ceramic Industry, Porcelain Stoneware, Quality Control, Multivariate Analysis, Multivariate Modeling

---

## Preâmbulo

O presente documento encontra-se organizado em cinco capítulos:

No primeiro capítulo, designado de introdução, faz-se uma apresentação da empresa CLiPER, abordando a sua história, o seu âmbito e alguns dos seus principais produtos.

No segundo capítulo surge um enquadramento ainda mais específico onde se apresenta, de forma esquemática e sucinta, o processo produtivo na CLiPER seguida de uma fundamentação teórica de alguns dos métodos de análise seguidos.

O terceiro capítulo explora as condições de trabalho bem como toda a metodologia e procedimentos utilizados neste estudo.

No quarto capítulo, análise e discussão dos resultados, são apresentados alguns dos resultados obtidos seguindo-se a sua análise e discussão.

E, por fim, no quinto capítulo, faz-se uma breve conclusão final cumulativa sobre o trabalho desenvolvido.

## Convenções

Para facilitar a transferência da informação numérica entre as ferramentas de cálculo utilizadas (Octave/R-studio/Excel) e o presente texto utilizou-se a notação científica segundo a convenção Inglesa onde o ponto “.” serve de indicador do separador decimal nos números reais.

---

## Abreviaturas

- AA – Absorção de Água
- AGV – Veículo Guiado Automaticamente (do inglês, Automated Guided Vehicle)
- AIC – Critério de Informação de Akaike (do inglês, Akaike Information Criteria)
- AL - Ligação média (do inglês, Average Linkage)
- ANOVA - Análise de Variância
- ASQ – Sociedade Americana da Qualidade (do inglês, American Society of Quality)
- BIC – Critério de Informação Bayesiano (do inglês, Bayesian Informative Criteria)
- CAE – Classificação Portuguesa das Atividades Económicas
- CL – Ligação Completa (do inglês, Complete Linkage)
- CMC – Carboximetilcelulose
- CSTB – Centro Científico e Técnico para a Construção (do francês, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)
- DDL – Linguagem de Definição de Dados
- DG – Desempenho Global
- FMEA – Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (do inglês, Failure Mode and Effect Analysis)
- FOFA - pontos Fortes, Oportunidades, pontos Fracos e Ameaças
- GSI – Gestão de Sistemas Integrados
- HCA – Análise Hierárquica de Agrupamentos (do inglês, Hierarchical Cluster Analysis)
- ISO – Organização Internacional da Normalização (do inglês, International Organization for Standardization)
- LL – Limite de Líquido (do inglês, Liquid Limit)
- MOLS – Mínimos Quadrados Multivariados (do inglês, Multivariate Ordinary Least Squares)
- MR – Módulo de Rutura
- MSAccess – Microsoft Office Access
- OEE – Eficiência Global do Equipamento (do inglês, Overall Equipment Effectiveness)
- PCA – Análise de Componentes Principais (do inglês, Principal Component Analysis)
- PDCA – Planear, Fazer, Verificar e Agir (do inglês, Plan-Do-Check-Act)
- PI – Índice de Plasticidade (do inglês, Plasticity Index)
- PL – Limite de Plástico (do inglês, Plastic Limit)
- PLS – Mínimos Quadrados Parciais (do inglês, Partial Least Squares)
- PR – Perda ao Rubro
- QA – Qualidade do Ajuste
- QAS – Qualidade, Ambiente e Segurança
- QP – Qualidade de Previsão
- SGBD – Sistema de Gestão de Bases de Dados (do inglês, DBMS, Database Management System)
- SGBDR – Sistema de Gestão de Bases de Dados Relacionais (do inglês, RDBMS, Relational Database Management System)
- SGQ – Sistema de Gestão da Qualidade
- SI – Sistema de informação
- SL – Ligação Simples (do inglês, Single Linkage)
- SQL – Structured Query Language
- STD – Padrão (do inglês, Standard)

---

SWOT – Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças (do inglês, Strengths, Opportunities, Weaknesses and Threats)

TPS – Sistema de Produção Toyota (do inglês, Toyota Production System)

VBA – Visual Basic for Applications

WL - Ligação de Ward (do inglês, Ward Linkage)

---



# Índice

<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do projeto e objetivos	1
1.2. Apresentação da empresa CLiPER Cerâmica S.A.	3
1.2.1. História da CLiPER	3
1.2.2. Visão, missão e política da qualidade	3
1.2.3. Âmbito da empresa no mercado	5
1.2.4. Tipo de produtos	5
1.3. Contextualização histórica	6
1.4. Indústria de cerâmica	7
1.5. Identificação do tipo de indústria cerâmica	7
<b>2. Fundamentação</b>	<b>9</b>
2.1. Matérias-primas cerâmicas	9
2.1.1. Materiais argilosos	10
2.1.2. Materiais não argilosos	11
2.2. Processo produtivo	13
2.2.1. Preparação da pasta	13
2.2.2. Conformação e secagem	17
2.2.3. Cozedura	27
2.2.4. Escolha e embalagem	29
2.2.5. Corte e retificação	33
2.3. Controlo de qualidade	34
2.3.1. Laboratório	35
2.3.2. Armazém de produto acabado	36
2.4. Melhoria contínua	36
2.4.1. <i>Lean</i>	36
2.4.2. Ferramentas da qualidade	37
2.5. Controlo estatístico do processo	46
2.5.1. Análise de variância	46
2.5.2. Análise multivariada	47
2.6. Controlo do processo produtivo	51
2.6.1. Sistema de informação	51
2.6.2. Base de dados	52
2.6.3. <i>Microsoft Office Access 365</i>	53
2.6.4. Estrutura da base de dados	54

<b>3. Metodologia e procedimentos</b>	<b>57</b>
3.1. Análise de desempenho	57
3.1.1. Recolha de informação	57
3.1.2. Construção de tabelas	58
3.1.3. Definição das tabelas	58
3.1.4. Tabelas base	58
3.1.5. Tabelas compostas	59
3.1.6. Introdução de registos através de formulários	59
3.2. Materiais e métodos	68
3.2.1. Recolha de dados referentes ao processo produtivo	68
3.2.2. Base de dados	72
3.2.3. Tratamento estatístico dos dados	73
<b>4. Análise e discussão dos resultados</b>	<b>77</b>
4.1. Análise de desempenho	77
4.1.1. Diagrama de causalidade	77
4.1.2. Paragens	79
4.1.3. Produtividade e quebras em cru	84
4.1.4. Qualidade do material e seus defeitos	86
4.1.5. Eficiência global do equipamento	88
4.2. Análise multivariada não supervisionada	89
4.2.1. Análise de componentes principais	89
4.2.2. Análise hierárquica de agrupamentos	98
4.3. Modelação multivariada	100
4.3.1. Interpretação dos melhores modelos	105
4.3.2. Perspetiva global	109
<b>5. Conclusão</b>	<b>113</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>116</b>
<b>A. Estimativas</b>	<b>121</b>
A.1. Equação do gás, em MWh, consumido por área, em m <sup>2</sup> (GCA)	121
A.2. Parâmetros relacionados com a eficiência global do equipamento	121
<b>B. Parâmetros dos modelos obtidos</b>	<b>123</b>
B.1. LY08	123
B.2. Y12	124
<b>C. Estudo das respostas em análise por modelação multivariada</b>	<b>125</b>
C.1. Resposta Y02	125
C.2. Resposta Y03	128
C.3. Resposta Y10	131
C.4. Resposta Y11	134

C.5. Resposta Y14 . . . . . 137

# 1. Introdução

A presente dissertação de mestrado surge como etapa final de avaliação da unidade curricular Projeto, coincidente com o último ano do Mestrado em Química com especialização em Controlo de Qualidade e Ambiente, do Departamento de Química, integrado na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, tendo sido desenvolvida em ambiente empresarial, na empresa CLiPER Cerâmica, S.A., ver sua fachada e respetivo logótipo na figura 1.1, com a orientação interna e externa, respetivamente, do Professor Doutor Jorge Costa Pereira e do Engenheiro Miguel Ferreira.



Figura 1.1.: Empresa CLiPER e seu respetivo logótipo.

## 1.1. Enquadramento do projeto e objetivos

O presente estágio decorreu na área da Produção e da Qualidade da empresa CLiPER Cerâmica, S.A., no Parque Industrial da Figueira da Foz, com a coordenação interna do Engenheiro Miguel Ferreira, o qual teve a duração de cerca de nove meses, tendo iniciado a 14 de setembro de 2021 e terminado a 1 de junho de 2022.

Este projeto, intitulado de “Análise Multivariada Aplicada ao Diagnóstico da Qualidade numa Indústria Cerâmica”, consistiu na implementação e recurso a ferramentas estatísticas que permitiram a análise e o controlo de diversas variáveis que se encontram ligadas ao processo produtivo da indústria de cerâmica, com vista à otimização de resultados, por meio da previsão.

O trabalho desenvolvido teve como objetivo descrever todas as atividades e procedimentos relevantes que se desenvolveram ao longo do estágio, ver figura 1.2.

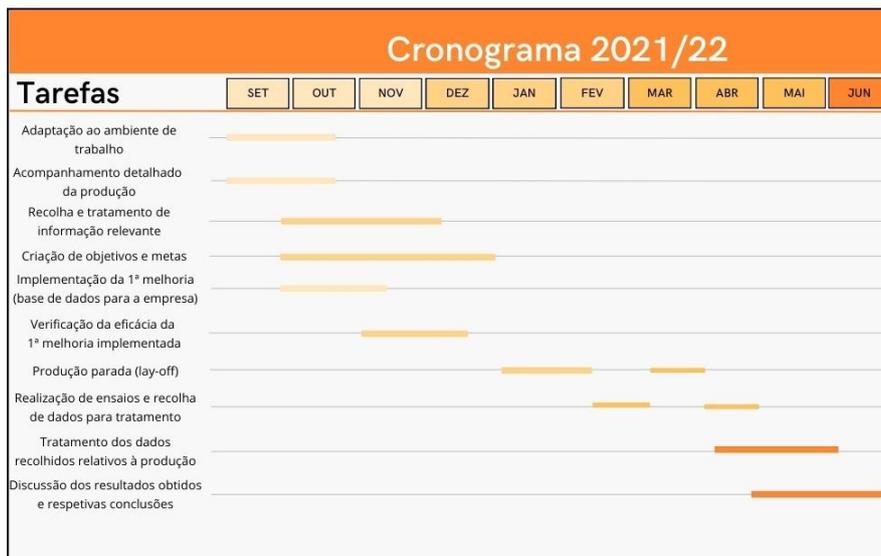


Figura 1.2.: Diagrama de Gantt do trabalho efetuado durante o período de estágio. De acordo com o diagrama apresentado, a fase inicial do projeto decorreu em setembro e outubro de 2021 e teve como objetivo a adaptação ao ambiente de trabalho e o acompanhamento minucioso das linhas de produção para conhecimento de todo o processo produtivo. Desde essa fase inicial até dezembro, houve sempre uma recolha constante de informação para posterior tratamento - este período de tempo coincidiu, também, com a criação de objetivos e metas para o presente estudo. No início de outubro, procedeu-se à elaboração da base de dados para controlo do processo produtivo da empresa, pelo que esta foi sendo implementada e foi sendo avaliada quanto à sua eficácia até final de dezembro. Em janeiro e até 14 de fevereiro de 2022, a CLiPER recorreu ao *lay-off* e a produção parou, pelo que neste momento foi realizado um aprimoramento da base de dados já construída, tendo sido desenvolvidos mais relatórios para apoio à tomada de decisão. Após a retoma da produção, procedeu-se aos ensaios necessários para a recolha de dados para tratamento estatístico por análise multivariada. A 15 de março, a CLiPER retomou o *lay-off* até 4 de abril - e, após esse período de tempo sem produção, efetuou-se o tratamento estatístico dos dados recolhidos relativos à produção. Entre maio e junho, foi feita a discussão dos resultados obtidos e retiraram-se as respetivas conclusões.

A fase inicial do estágio passou por um acompanhamento minucioso de todas as secções do processo produtivo da unidade industrial. Esta experiência permitiu não só uma melhor integração na empresa, como também a noção de todo o processo que decorre desde a receção das matérias-primas até ao armazenamento do produto final, o conhecimento dos vários termos, técnicas e equipamentos ligados à indústria em causa e o conhecimento de todos os registos que são efetuados com vista a controlar todo o decurso do procedimento, passando pelo controlo de qualidade de todas as etapas do processo produtivo, desde as matérias-primas até ao produto final. Durante os primeiros dois meses de estágio foram discutidas as informações recolhidas com vista a contornar possíveis limitações, bem como tentar encontrar sugestões para a resolução das já existentes. A partir de outubro, foi implementada a primeira melhoria relacionada com a criação de uma base de dados para controlo estatístico do processo que demonstrou ser uma mais-valia para a empresa. Posteriormente, após alguns meses sem produção devido à organização ter recorrido ao *lay-off*, procedeu-se à recolha e tratamento de dados relativos à produção para a aplicação da análise multivariada.

## 1.2. Apresentação da empresa CLiPER Cerâmica S.A.

Esta secção tem como objetivo apresentar a empresa onde decorreu o estágio, tendo como base documentação interna, particularmente o Manual de Acolhimento e o Manual da Qualidade da CLiPER.

### 1.2.1. História da CLiPER

A CLiPER Cerâmica S.A. é uma empresa produtora de pavimentos e revestimentos em grés porcelânico, que iniciou a sua atividade a 19 de junho de 2007, quando um grupo constituído por revendedores de materiais de construção, EMACOR, adquiriu uma unidade de produção situada no Parque Industrial da Figueira da Foz - surgindo, assim, a EMACOR II - Indústrias S.A., fazendo-se história em Portugal, dado que, pela primeira vez, revendedores de materiais de construção adquiriram uma unidade de produção [1].

A empresa iniciou o seu arranque cuidadosamente de forma a assumir e a garantir uma imagem de prestígio no mercado, oferecendo aos clientes produtos de alta qualidade, inovação e design, garantindo, simultaneamente, um nível de serviços elevado.

Foi em fevereiro de 2008 que surgiu a nova e atual marca: CLiPER Cerâmica, tendo esta sido assumida como a nova designação social da empresa em maio de 2009. A 9 de junho de 2020 alcançou a Certificação do Sistema de Gestão da Qualidade segundo a NP EN ISO 9001:2008.

Ao longo dos anos tem havido forte investimento quer a nível de infraestruturas quer a nível de processo produtivo.

Em 2011, com o objetivo de conseguir ter melhores prazos de entrega e alargar a oferta de soluções e serviços prestados ao cliente, houve um investimento num novo setor: o corte. Neste setor, o produto base é transformado em produtos complementares, nomeadamente rodapés, colados em rede e pré-corte.

A partir do ano de 2012, houve um esforço tecnológico inovador significativo ao nível dos processos de decoração com a introdução da tecnologia de impressão digital - *kerajet*. As duas linhas de produção foram equipadas com as máquinas de impressão digital.

Em 2013, houve o desenvolvimento de novas referências e de novos produtos em monoporosa. Ainda neste ano, o setor de corte passou a ter mais um equipamento: máquina de retificar, internalizando ainda mais os produtos oferecidos ao cliente.

Ao longo dos últimos anos, a preocupação da empresa tem sido na adequação às principais tendências de mercado, sempre com o cuidado de satisfazer integralmente as necessidades e expectativas de cada cliente.

No ano de 2016, procederam-se às alterações necessárias para a transição para a NP EN ISO 9001:2015.

O ano de 2017 foi um ano de significativos investimentos em equipamentos produtivos. Substituíram-se as duas máquinas de impressão digital por outras com tecnologia mais recente e adquiriu-se uma máquina de escolha automática que permitiu a produção no formato 20x80. Também em 2019, adquiriu-se mais um forno industrial, a gás, e uma nova prensa e linha de vidragem.

### 1.2.2. Visão, missão e política da qualidade

De acordo com a política da qualidade estabelecida pelas respetivas normas internacionais, esta empresa também apresenta padrões relativos à Visão, Missão e Qualidade [2].

### 1.2.2.1. Visão

Ser uma empresa de referência no setor dos materiais de construção, no mercado nacional e internacional, pautada pela qualidade e inovação dos seus produtos e serviços.

### 1.2.2.2. Missão

Produzir e comercializar produtos cerâmicos, que cumpram a legislação e as normas em vigor, complementando a oferta com uma gama de peças especiais, de forma a satisfazer e antecipar as expectativas dos clientes, inovando e melhorando continuamente os produtos.

### 1.2.2.3. Política da qualidade

A política da qualidade visa obter a satisfação dos clientes, atendendo às suas necessidades e expectativas, bem como ao bom desempenho da organização, havendo um compromisso com os valores de excelência, inovação, ética e respeito pelos recursos naturais e humanos.

A cultura de melhoria contínua está consolidada na CLiPER, encontrando-se o seu sistema de gestão certificado em conformidade com a NP EN ISO 9001.

Sendo uma empresa em que o controlo de qualidade que se encontra integrado no Gestão de Sistemas Integrados, GSI, o Departamento de Qualidade, Ambiente e Segurança, QAS, apresenta como funções: garantir o funcionamento do Sistema de Gestão da Qualidade da empresa, promover e supervisionar a realização de monitorização e subsequente elaboração de relatórios de modo a garantir e evidenciar o cumprimento da regulamentação em vigor, promover as condições de segurança dos trabalhadores e, ser responsável pela execução física da formação, ver figura 1.3.

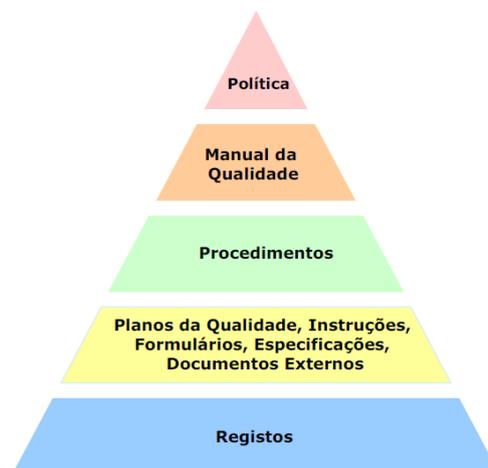


Figura 1.3.: Hierarquia documental do Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) da CLiPER Cerâmica. Como é possível observar pela figura, a documentação do SQG consiste em diferentes tipos de documentos e encontra-se estruturada da seguinte forma: no topo existe a política da qualidade que é descrita por um manual da qualidade; de seguida, existem os procedimentos que são descritos nos planos da qualidade, instruções, formulários, especificações e documentos externos; e, por fim, os registos que resultam das atividades descritas.

### 1.2.3. Âmbito da empresa no mercado

Desenvolvimento, produção e comercialização de pavimentos e revestimentos cerâmicos em grés porcelânico, revestimentos cerâmicos em monoporosa, pavimentos e revestimentos cerâmicos transformados por corte, polimento, retificação e decoração, e produtos decorativos complementares em diversos materiais [1].

### 1.2.4. Tipo de produtos

A CLiPER Cerâmica S.A. é uma empresa produtora de pavimentos em grés porcelânico e revestimentos em monoporosa. Os seus produtos são regidos pela Norma Europeia EN 14411 que define e especifica os requisitos e critérios de marcação para ladrilhos cerâmicos - de acordo com a Norma, um ladrilho caracteriza-se como “uma placa fina feita a partir de argilas e/ou outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizada como revestimento para pisos e paredes, usualmente conformada por extrusão ou prensagem à temperatura ambiente, mas pode também ser obtida por outros processos, sendo, de seguida, seca e depois cozida a temperatura suficiente para desenvolver as propriedades requeridas”. Segundo esta, os mosaicos podem depois ser vidrados ou não vidrados, sendo incombustíveis e não afetados pela luz.

A norma Europeia EN 14411 também classifica os mosaicos cerâmicos em diferentes grupos, consoante a absorção de água e o método de conformação utilizado (extrudido ou prensado a seco), ver tabela 1.1.

Tabela 1.1.: Divisão dos mosaicos cerâmicos por grupos, consoante a absorção de água, segundo a Norma Europeia EN 14411 que especifica os requisitos e critérios de marcação de ladrilhos cerâmicos produzidos por técnicas de extrusão e de prensagem a seco. De acordo com esta norma e tendo em conta a tabela, os produtos de pavimento e revestimento cerâmicos são classificados segundo o seu processo de fabrico (extrudidos ou prensados a seco) e da percentagem do nível de absorção de água que estes adquirem.

Conformação	Absorção de Água (AA)			
	Grupo I	Grupo II <sub>a</sub>	Grupo II <sub>b</sub>	Grupo III
	AA ≤ 3%	3% < AA ≤ 6%	6% < AA ≤ 10%	AA > 10%
Método A - Extrudidos	Grupo AI <sub>a</sub>	Grupo II <sub>a-1</sub>	Grupo AII <sub>b-1</sub>	Grupo AIII
	AA ≤ 0.5%			
	Grupo AI <sub>b</sub>	Grupo II <sub>a-2</sub>	Grupo AII <sub>b-2</sub>	
Método B - Prensados a seco	Grupo BI <sub>a</sub>	Grupo BII <sub>a</sub>	Grupo BII <sub>b</sub>	Grupo BII
	AA ≤ 0.5%			
	Grupo BI <sub>b</sub>			

Assim, de acordo com a tabela 1.1, os produtos produzidos na CLiPER pertencem aos grupos BI<sub>a</sub> (grés porcelânico) e BIII (revestimento), ambos prensados a seco - tendo que, cumprir, assim, as várias especificações descritas nos anexos da norma na qual se inserem (anexo G e L da Norma EN 14411, respetivamente).

Para além desta norma, alguns produtos fabricados na CLiPER têm de cumprir a Norma do *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB), no âmbito da marcação UPEC<sup>1</sup>. Esta norma, para além de obrigar a cumprir os requisitos da norma anterior, apresenta, ainda, outros requisitos para o produto.

<sup>1</sup>“U” de *usure*, é o índice que corresponde ao desgaste sofrido pelo material devido à mancha; “P” de *poinçonment*, é referente ao comportamento mecânico do material em situações que incluem o arrastamento de móveis e a queda de objetos; “E” de *eau*, é o índice que indica o comportamento do material na presença de água; “C” de *chimiques*, designa a resistência a químicos e manchas.

Em pavimentos, são comercializados diversos formatos, desde o 20x20 ao 60x120, existindo, também, na maior parte dos casos, os mesmos produtos em retificado e retificado e semi-polido. Em revestimento monoporosa, também são comercializados vários formatos, procurando, sempre, dar resposta às expectativas e necessidades dos clientes. A gama dos produtos comercializados é completada com rodapés, ripas, faixas, decorados e material nos formatos 25x75 e 30x90.

### 1.3. Contextualização histórica

A cerâmica é o material artificial mais antigo produzido pelo Homem, existindo há cerca de dez a quinze mil anos. A palavra deriva do termo grego *keramus* que significa argila e é usada para denominar todo o conjunto de atividades destinadas à elaboração de objetos que têm a argila como matéria-prima, isto é, qualquer classe de material sólido inorgânico, não metálico, que seja submetido a altas temperaturas na manufatura [3].

A cerâmica apresenta diferentes tipologias de acordo com a conjugação de diversas matérias-primas que a originam, bem como da manipulação ao longo do processo produtivo a que é sujeita. As diferentes espécies de cerâmica encontram-se apresentadas na tabela 1.2.

Tabela 1.2.: Espécies de cerâmica e suas características. As características das diferentes espécies de cerâmica (terracota, faiança, grés, louça de barro e porcelana) são obtidas pela combinação de várias matérias-primas e pelo uso de diferentes técnicas de manipulação para o seu tratamento.

Tipo	Pasta	Porosidade	Revestimento
Terracota	Pasta corada	Porosa	Sem revestimento
Faiança	Pasta corada	Porosa	Com revestimento
Grés	Pasta corada	Compacta	Com ou sem revestimento
Louça de barro	Pasta branca	Porosa	Com ou sem revestimento
Porcelana	Pasta branca	Compacta	Com ou sem revestimento

O grés é um material feito a partir de argila de grão fino, plástica, sedimentária e refratária que suporta altas temperaturas, como a cerâmica [4].

Os revestimentos de grés caracterizam-se pela sua baixa porosidade e, conseqüentemente, reduzida absorção de água. Desta forma, a resistência mecânica, a resistência química e a resistência ao desgaste, também dependem do vidrado que é aplicado superficialmente [5].

O adjetivo porcelânico, acrescentado ao substantivo grés e derivado do substantivo porcelana, é a melhor forma de definir e entender no que consiste este produto.

O grés porcelânico é o produto que se formula com critérios de composição muito semelhantes aos da porcelana, ou seja, misturas de areias de quartzo ou feldspáticas, feldspatos e argilas com um alto teor em caulino e, é caracterizado por se aproximar, mais do que nenhum outro produto cerâmico, do conceito de rochas, ou pedra natural. É um produto vitrificado em toda a sua massa e apresenta como característica essencial uma porosidade extremamente baixa, pelo que a capacidade de absorção de água é extremamente reduzida, o que lhe confere excelentes propriedades mecânicas, nomeadamente, resistência à flexão e ao desgaste, resistência ao ataque de produtos químicos, resistência a condições atmosféricas agressivas, porém com alguma fragilidade ao choque [6].

O processo de fabrico é muito rigoroso para garantir as suas características de excelência - pelo que devido à elevada resistência das peças em grés porcelânico, ao bom comportamento perante as mudanças

de temperatura e às suas qualidades estéticas, este produto tem um grande potencial na aplicação de revestimentos dos edifícios, tanto em paredes como em pavimentos, para espaços interiores ou exteriores. É utilizado, frequentemente, em zonas de grande exigência, como locais sujeitos a uma abrasão excessiva, em áreas de elevado tráfego pedonal ou em zonas extremamente frias e com condições térmicas extremas [7].

## 1.4. Indústria de cerâmica

A indústria de cerâmica é a atividade industrial ligada à confecção de material a partir da cerâmica. Este tipo de indústria encontra-se intimamente relacionada com a indústria mineral, uma vez que as matérias-primas cerâmicas apresentam na sua composição minerais ou suas misturas, sendo a argila o componente essencial.

Desta forma, a cerâmica pode ser definida como a técnica de produção de material por meio de transformações térmicas que ocorrem devido às propriedades da matéria-prima cerâmica. Quimicamente, pode ser tratada como um composto inorgânico de átomos metálicos, não metálicos ou metalóides que se mantêm juntos por meio de ligações químicas [8].

A cerâmica possui diversas propriedades, tais como altos pontos de fusão, sendo, por isso, resistentes ao calor; grande dureza e resistência, apresentando, por isso, uma boa durabilidade; baixa condutividade elétrica e térmica, sendo bons isolantes; e inércia química, pelo que não reagem com outros produtos químicos [8].

## 1.5. Identificação do tipo de indústria cerâmica

Existem dois grandes grupos referentes ao tipo de cerâmica: a Cerâmica Tradicional e a Cerâmica Avançada. A Cerâmica Tradicional inclui as cerâmicas de revestimento, como é o caso dos ladrilhos, azulejos, vasos, tijolos e outros objetos de olaria, que não têm requisitos tão elevados quando comparados com a Cerâmica Avançada. Os produtos cerâmicos do tipo Tradicional podem ser fabricados a partir de três tipos básicos de material cerâmico: argila, grés e porcelana. Por sua vez, a Cerâmica Avançada diz respeito aos materiais que requerem maiores exigências e que são obtidos a partir de matérias-primas mais puras, sendo exemplos os tijolos refratários para fornos [9].

No presente trabalho, os materiais em causa dizem respeito aos do tipo Tradicional, sendo estes bastante diversificados e podendo ser classificados de várias formas, apresentando-se uma proposta de sistematização de alguns desses produtos na tabela 1.3 [9].

Tabela 1.3.: Proposta de sistematização de alguns produtos cerâmicos clássicos. De acordo com a figura, a cerâmica pode ser dividida em utilitária e decorativa, de construção e de acabamento. A cerâmica de construção pode ser estrutural ou não estrutural e a cerâmica de acabamento inclui o revestimento que pode ser parede ou pavimento e a sanitária. Na última coluna, é possível visualizar os principais produtos comercializados dentro de cada tipo de cerâmica.

Cerâmica	Divisão	Principais produtos comerciais		
Cerâmica utilitária e decorativa	Utilitária	Produtos utilitários de terracota, olaria, faiança, grés e porcelana		
	Decorativa	Produtos decorativos de terracota, olaria, faiança, grés e porcelana		
Cerâmica de construção	Estrutural	Tijolo de furação vertical		
	Não estrutural	Tijolo de furação vertical, tijolo perfurado, abobadilha, telha e canalizações (fugas de chaminé, tubos e manilhas)		
		Refractário		
		Agregado leve de argila expandida		
Cerâmica de acabamento	Revestimento	Parede	Tijolo de face-à-vista	
		Ladrilhos: azulejo, tijoleira, grés e grés porcelânico		
	Sanitária	Pavimento	Ladrilhos: tijoleira, grés porcelânico e porcelanato	
		Sanita, bidé, lavatório, toalheiro, banheira, base de duche e acessórios (porta-rolos, saboneteira, etc.)		

A CAE, Classificação Portuguesa das Atividades Económicas, trata-se de um sistema de classificação e agrupamento das atividades económicas em unidades estatísticas de bens e serviços. A cada atividade económica e empresarial é atribuída um código de classificação específico - cada empresa, dependendo do seu objeto ou ramo de atividade, estará abrangida por um ou mais destes códigos [10].

Assim sendo, de acordo com a informação apresentada anteriormente, a empresa CLiPER é classificada como cerâmica de acabamento e de acordo com o CAE é C-23312 (fabricação de ladrilhos, mosaicos e placas de cerâmica), ver figura 1.4.

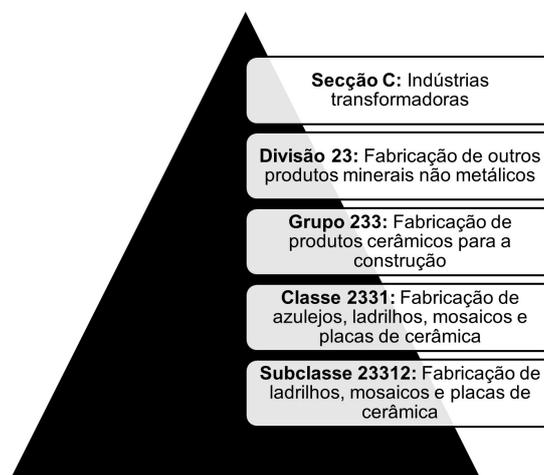


Figura 1.4.: Esquema da Classificação Portuguesa das Atividades Económicas da empresa CLiPER Cerâmica, S.A. O objetivo do CAE é classificar as indústrias com base no que produzem para permitir a identificação de qual a legislação a aplicar. De acordo com a figura, é possível observar que, a CLiPER pertence à secção C correspondente às indústrias transformadoras, sendo a sua divisão a 23 que diz respeito à fabricação de outros produtos minerais não metálicos, pertencendo ao grupo 233 relativo à fabricação de produtos cerâmicos para a construção, à classe 2331 por se tratar de fabricação de azulejos, ladrilhos, mosaicos e placas de cerâmica e, por último, à subclasse 23312 associada à fabricação de ladrilhos, mosaicos e placas de cerâmica.

## 2. Fundamentação

Neste capítulo há três partes essenciais a serem abordadas: matérias-primas cerâmicas, processo produtivo e controlo de qualidade.

### 2.1. Matérias-primas cerâmicas

As matérias-primas utilizadas na indústria de cerâmica são selecionadas tendo em conta as características que se pretende obter no produto final. Assim sendo, é de extrema importância efetuar a caracterização destas matérias-primas, de forma a conhecer a sua composição química e mineralógica, o seu comportamento no processo produtivo e as propriedades que conferem ao produto acabado.

A plasticidade é um conceito bastante utilizado quando falamos sobre matérias-primas usadas na indústria cerâmica, uma vez que esta particularidade é típica das argilas, a base principal dos materiais cerâmicos. A plasticidade pode ser definida como a capacidade de um material se deformar sob a ação de uma força externa sem perder a integridade física e reter a deformação após a remoção da forma e, por isso mesmo, trata-se de uma propriedade crítica para a indústria cerâmica, visto que determina a possibilidade de processar os materiais por extrusão e conformação plástica [11]. No caso da argila, esta propriedade refere-se à flexibilidade desta, isto é, à capacidade da argila ser moldada ou alterada, estando esta relacionada com a morfologia em forma de placa, das partículas minerais da argila, que deslizam umas sobre as outras quando é adicionada água [11].

O índice de plasticidade, PI, expressa-se em percentagem e é dado pela equação

$$PI = LL - PL \quad (2.1)$$

onde LL corresponde ao limite de líquido<sup>1</sup> e PL ao limite de plástico<sup>2</sup> e, representa a faixa de conteúdo de água sobre a qual o solo é plástico - solos argilosos tendem a apresentar um valor elevado de PI, solos silteosos tendem a ter um valor mais baixo de PI e, solos com pouco ou nenhum silte ou argila com um PI de 0 (não plástico).

Geralmente, o índice de plasticidade depende apenas da quantidade de argila presente e indica a espessura do solo e a capacidade de mudar a sua forma sem alterar o seu volume. Dependendo da natureza da argila, a plasticidade aumenta até ao máximo à medida que o conteúdo de água na argila aumenta. O PI juntamente com o teor de água no limite de líquido, wL, indica o quão sensível o solo é às mudanças no teor de humidade - com base nesses valores é possível classificar os solos em argilosos, silteosos e orgânicos [12].

As matérias-primas cerâmicas podem ser classificadas como plásticas ou não plásticas. As matérias-primas plásticas apresentam alguma plasticidade, o que torna possível conferir características essenciais na

---

<sup>1</sup>Teor de humidade que limita os estados líquido e plástico - a partir de teores de humidade abaixo do limite líquido, o solo tende a ser plástico e resistente a cisalhamento.

<sup>2</sup>Teor de humidade abaixo do qual o solo passa do estado plástico para o estado semi-sólido, perdendo a capacidade de ser moldado e passando a ser quebradiço.

fase de conformação do produto cerâmico, sendo exemplos deste tipo de matérias-primas as misturas de minerais argilosos (argilas, caulinos e outros filossilicatos). As matérias-primas não plásticas, constituídas por misturas de minerais fundentes e inertes (como é o caso do feldspato, calcários, entre outros), são usadas com o propósito de obter certas qualidades específicas das suas composições químicas, atuando também nas fases de conformação e de secagem, concedendo ao produto características como resistência mecânica e bom comportamento térmico [12].

### 2.1.1. Materiais argilosos

As argilas são materiais terrosos naturais plásticos que se encontram de forma abundante na natureza e que se originam por desagregação de rochas feldspáticas. [13].

As argilas podem ser classificadas em primárias e em secundárias, de acordo com a sua origem. As argilas primárias são as argilas formadas no mesmo local originalmente ocupado pela rocha-mãe, sendo um dos exemplos o caulino. Contrariamente, as argilas formadas, transportadas e depositadas em locais distintos do seu local de origem são denominadas de argilas secundárias.

Os minerais argilosos, por serem abundantes na natureza, pouco dispendiosos e facilmente manipuláveis, são comumente utilizados como matéria-prima básica para a produção de diversos produtos industriais, dos quais fazem parte os cerâmicos.

O grande interesse por este tipo de produto geológico na cerâmica deve-se ao facto de a argila desenvolver, geralmente, plasticidade em meio húmido, endurecendo depois de seca e ainda mais depois de cozida.

Esta propriedade única da argila resulta do facto de esta ser constituída por componentes de grão muito fino ( $< 2 \mu m$ ) e facilmente dispersáveis em água - os chamados minerais argilosos, como é o caso de certos filossilicatos hidratados de alumínio, magnésio, ferro, entre outros. Porém, a argila não apresenta na sua composição só este tipo de minerais, sendo também formada por minerais não argilosos, como é o caso do quartzo, feldspatos, micas, óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, etc. A plasticidade que certa argila possui está dependente da sua composição [13].

Na indústria cerâmica, é usual atribuir uma nomenclatura às argilas consoante as versatilidades a que estas se destinam, que são influenciadas pela sua origem e pela composição mineralógica do material, podendo ter designações como: caulino, argila refratária, argila plástica e bentonite [14].

#### 2.1.1.1. Caulino

O caulino, também conhecido por *china clay*, é constituído maioritariamente por caulinite ( $Al_4(Si_4O_{10}(OH)_8$ ), um silicato de alumínio hidratado, cuja composição teórica corresponde a 46.5% de dióxido de silício ( $SiO_2$ ); 39.5% de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ); e 14% de água ( $H_2O$ ). O caulino caracteriza-se por ser uma rocha de granulometria fina, constituída de material argiloso, normalmente com baixo teor de ferro, de cor branca ou quase branca que apresenta baixa plasticidade. É uma matéria-prima essencial na produção do corpo cerâmico que tem como função aumentar a refratariedade, principalmente para aumentar a intensidade da cor branca [15].

### 2.1.1.2. Argila refratária

A argila refratária (*fire clay*) é uma matéria-prima que pode ser classificada como silico-aluminosa, uma vez que apresenta, teoricamente, 46% de óxido de alumínio na sua composição. Geralmente, trata-se de argilas cauliníticas, com uma ordem estrutural média que, podem conter na sua constituição certos minerais como quartzo, mica, ilite e, também, matéria-orgânica. Este tipo de argilas é pouco plástica, a menos que seja sujeita a uma moagem prévia e intensa, sendo também dura e muito abrasiva, mas com elevada refratariedade, tornando-a resistente a fornos de altas temperaturas [16].

### 2.1.1.3. Argila plástica

A argila plástica (*ball clay*) é uma argila sedimentar, altamente plástica e com uma granulometria extremamente fina. Comparando com o caulino e com a argila refratária, este tipo de argila apresenta mais plasticidade, mas é menos refratária. A argila plástica é maioritariamente constituída por caulinite de baixo grau de ordem estrutural ou por caulinite desordenada e também apresenta na sua composição certos minerais como micas, quartzo, clorite, entre outros e, ainda alguma matéria-orgânica. A argila plástica, na sua forma natural, apresenta cores com tonalidades escuras consoante o teor em matéria orgânica que possui; porém, após a cozedura ou queima a altas temperaturas, esta passa a evidenciar cores mais claras, o que faz este tipo de argilas ser importante para a indústria de cerâmica quando o grau de brancura é um requisito essencial. Quando estas se encontram com um alto nível de pureza, apresentam elevada plasticidade, o que confere às peças uma alta resistência mecânica, quer quando secas, quer quando cozidas, permitindo que a cozedura possa ser realizada num amplo intervalo de temperaturas [15].

### 2.1.1.4. Bentonite

A bentonite é uma mistura de argilas geralmente impura e de grãos muito finos, constituída essencialmente por montmorillonite, podendo conter outras argilas em maior ou menor proporção, além de quartzo, feldspatos, entre outros minerais. Este tipo de argila apresenta-se gordurosa ao tacto, de cor variada, com granulometria muito fina, elevada porosidade, baixa refratariedade e possui uma propriedade especial que passa por conseguir aumentar dez a vinte vezes o seu volume quando em contacto com o meio aquoso [16].

## 2.1.2. Materiais não argilosos

As matérias-primas não argilosas (ou não plásticas) podem classificar-se em fundentes ou desengordurantes, consoante as suas funções e características particulares. Das principais matérias-primas não plásticas são exemplos os feldspatos, o quartzo, a calcite, o talco, entre outros.

Os materiais fundentes conduzem à formação de vidro no interior do corpo cerâmico depois de cozido, o que leva a uma aglomeração de todos os constituintes e, conseqüentemente, a uma redução na porosidade e a um aumento da resistência mecânica da peça. Este tipo de matérias-primas têm ainda a vantagem de permitirem reajustes a temperaturas mais baixas do que aquelas que seriam de esperar se não fossem utilizadas, causando uma economia energética durante o processo de cozedura [17].

### 2.1.2.1. Feldspato

Os feldspatos constituem o grupo de minerais mais abundante na crosta terrestre e são classificados em função da sua composição química, podendo ser aluminossilicatos de potássio, cálcio ou sódio. Os que apresentam constituição química intermédia entre Na e K são designados de feldspatos alcalinos, enquanto que os que apresentam constituição química intermédia entre Na e Ca são designados feldspatos sódico-cálcicos ou plagióclases. Na indústria cerâmica, o feldspato é, logo a seguir à argila, o segundo componente mais importante na composição das pastas cerâmicas e este atua como fundente, uma vez que contribui para a formação de vidro, através de aglutinação dos outros componentes. No grupo dos feldspatos, a indústria cerâmica utiliza, preferencialmente, a albita ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) e os feldspatos potássicos (microclínio e ortoclásio<sup>3</sup>) [18].

### 2.1.2.2. Quartzo

O quartzo é o segundo mineral mais abundante na crosta terrestre e surge em rochas formadas a elevadas pressões e temperaturas, em erupções vulcânicas e como subprodutos de alteração destas rochas devido à meteorização. É um mineral constituído por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e que possui elevada dureza, é refratário e apresenta elevado poder abrasivo. O quartzo costuma ser utilizado maioritariamente sob a forma de areias provenientes de depósitos sedimentares que resultam da deposição de partículas transportadas pela água e pelo vento, precipitando-se de forma seletiva em função da sua densidade; e, dado que este mineral é muito resistente, vai persistir e tornar-se um elemento predominante nas areias. Na indústria cerâmica, as areias quartzosas apresentam um papel fundamental, tendo como objetivos controlar as contrações excessivas das pastas cerâmicas verificadas durante a secagem e a cozedura e o coeficiente de expansão térmica que pode levar ao surgimento de defeitos, bem como desempenhar um papel de desengordurante nos processos de enchimento, contribuindo para uma melhor desfloculação da suspensão [18].

### 2.1.2.3. Calcite

A calcite é um carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que corresponde a um teor teórico de 54.5% de óxido de cálcio (CaO) e 45.5% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), possuindo características que permitem que esta seja utilizada como fundente na indústria cerâmica [18].

### 2.1.2.4. Talco

O talco é um silicato de magnésio hidratado cuja fórmula é  $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , correspondendo, teoricamente, a 31.8% de óxido de magnésio (MgO); 63.5% de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ); e 4.7%; de água. Geralmente, é utilizado como fundente em pastas cerâmicas e, devido à sua baixa condutividade térmica, é aplicado na fabricação de porcelana [18].

<sup>3</sup>De acordo com a classificação cristalográfica um mineral microclínio e um mineral ortoclásio são bastante semelhantes, pertencendo ao grupo dos tectossilicatos (maior dos grupos dos silicatos, apresentando armação tridimensional de tetraedros) e constituintes de rochas magmáticas. A única diferença química existente entre os dois é que um mineral microclínio cristaliza no sistema triclínico, sendo o ângulo prismático ligeiramente inferior a 90°C.

## 2.2. Processo produtivo

O processo produtivo<sup>4</sup> da cerâmica é bastante semelhante para os diversos e diferentes segmentos cerâmicos, sendo o vidro o setor que mais se diferencia quanto a este aspeto. De um modo geral, as etapas que fazem parte do processo de fabrico de materiais cerâmicos são: preparação da matéria-prima e da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento. Adicionalmente, muitos também são submetidos a esmaltação e decoração [19].

Na empresa CLiPER Cerâmica, o pó é adquirido externamente, pelo que o único processo que antecede a prensagem é a receção e o controlo das matérias-primas recebidas.

O processo produtivo da empresa CLiPER pode-se, de forma geral, resumir em cinco secções, ver figura 2.1.

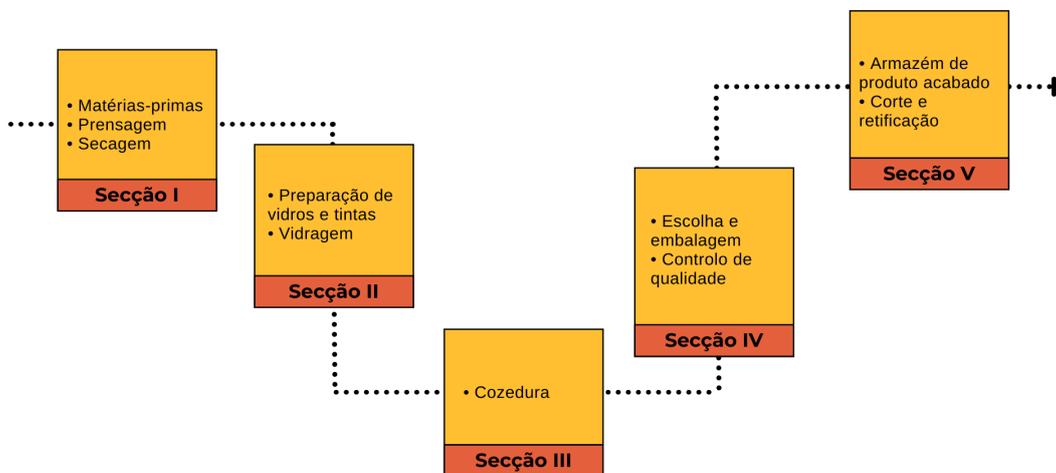


Figura 2.1.: Esquema das etapas do processo produtivo na empresa CLiPER. A primeira etapa corresponde à receção das matérias-primas, à prensagem e à secagem das peças cerâmicas (secção I). Seguidamente, dá-se a preparação dos vidros e das tintas para as peças seguirem para as linhas de vidragem (secção II). Após o processo de vidragem, as peças são armazenadas em vagonas e seguem para o forno para serem cozidas (secção III). Depois de cozidas, as peças são novamente armazenadas em vagonas e continuam para as linhas de escolha para serem classificadas quanto ao seu nível de qualidade e embaladas, sendo feito um controlo de qualidade às paletes produzidas (secção IV). Por fim, após paletização e respetivo controlo, as paletes seguem para o armazém de produto acabado para posteriormente seguirem para expedição - adicionalmente, algumas peças podem necessitar de sofrer transformação e seguem para a etapa de corte e retificação (secção V).

### 2.2.1. Preparação da pasta

A CLiPER Cerâmica adquire o pó atomizado externamente, pelo que a sua única função passa pela receção e controlo de alguns parâmetros do pó recebido. Contudo, devido à sua importância, são apresentadas, em seguida, as etapas realizadas para a preparação do pó atomizado, não sendo estas realizadas nas instalações da unidade industrial em estudo.

<sup>4</sup>Define-se um processo como uma sequência de etapas ou procedimentos que visam a transformação de matérias-primas em produto final.

### 2.2.1.1. Receção, armazenamento e dosagem

As matérias-primas chegam à unidade industrial em camiões, ver figura 2.2, e, após a sua receção, é retirada uma amostra a todas as cargas de pó recebidas, da qual é feito um controlo de qualidade que consiste nos seguintes ensaios laboratoriais: aspeto visual, percentagem de humidade, percentagem de resíduo a  $45\ \mu\text{m}$ , cor em cozido, percentagem de contração, percentagem de perda ao rubro, resistência mecânica seco/cozido e análise química. Este controlo tem como objetivo garantir que as matérias-primas estão de acordo com os parâmetros estabelecidos; caso não estejam, os fornecedores das mesmas são avisados e é feita uma correção na composição da pasta.

Seguidamente, os pós são armazenados separadamente em tulhas e, posteriormente, transportados para silos independentes com células de carga.

Após esta etapa, efetuar-se-á a dosagem das matérias-primas por peso. A dosagem é uma operação que determina as quantidades relativas das matérias-primas que farão parte da composição de uma massa. O *stock* da mistura dosada é feito, temporariamente, num silo de pré-carga localizado por cima do moinho (tremonha).

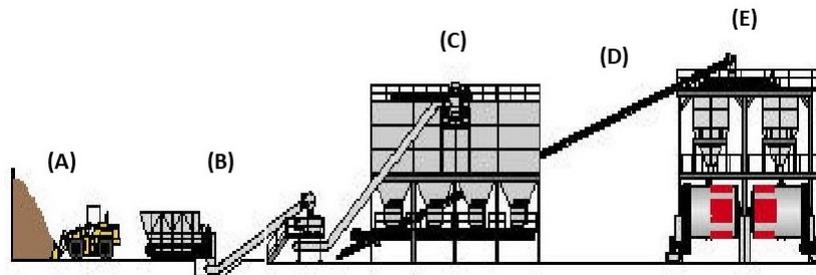


Figura 2.2.: Esquema da receção das matérias-primas na unidade fabril produtora de pó atomizado: (A) entulheira (local onde estão as matérias-primas selecionadas); (B) peneiragem e transporte do pó para os silos; (C) armazenamento do pó em silos; (D) transporte do pó para silos independentes com células de carga; (E) dosagem das matérias-primas por peso e entrada no moinho.

### 2.2.1.2. Moagem

A primeira etapa da preparação da pasta cerâmica diz respeito à moagem que pode ser realizada a seco ou a húmido, sendo a moagem por via húmida a mais frequentemente utilizada, visto que a água melhora o contacto entre as partículas e os diferentes materiais que constituem a carga do moinho, aumentando, assim, a homogeneidade da mistura e facilitando o processo.

A moagem tem a finalidade de reduzir o tamanho das partículas, aumentando a reatividade do sistema e a sua homogeneidade. A eficiência deste processo é fortemente influenciada pelas características das matérias-primas, tais como a dimensão e o formato inicial de partícula, a dureza, a humidade (na moagem em seco), a maior ou menor tendência de aglomeração e, também, da sensibilidade da suspensão (no caso da moagem em húmido) à variação da temperatura (uma vez que durante o referido processo existe um aumento considerável da temperatura).

Os equipamentos utilizados nesta secção são dotados de características técnicas de forma a proporcionar uma elevada eficiência na moagem. Dependendo da quantidade a produzir, a moagem por via húmida pode ser realizada em moinhos descontínuos, ver figura 2.3 (A), no caso de menores quantidades, ou em moinhos

contínuos, ver figura 2.3 (B), no caso de maiores quantidades.



Figura 2.3.: Ilustração dos dois tipos de moinhos utilizados para a moagem do pó, ambos constituídos por aço reforçado: (A) moinhos descontínuos cilíndricos; (B) moinho contínuo cilíndrico.

Os moinhos descontínuos são cilíndricos, construídos em aço, dotados de orifícios de alimentação e descarga de materiais e revestidos internamente com materiais, tais como alumina e borracha, ver figura 2.4 (A). A ação mecânica que ocorre durante a rotação do moinho e que origina a fragmentação das partículas, é conseguida através de corpos moentes que são colocados no seu interior - possuindo, estes, forma esférica (bolas de alumina), ver figura 2.4 (B), ou sub-esférica (seixo de sílex - pouco comum) de vários tamanhos. A carga a moer é introduzida no moinho juntamente com a quantidade de água e dispersantes específicos (desfloculantes). Quando a moagem se encontra finalizada, após o controlo da densidade, viscosidade e resíduo, a barbotina é peneirada, desferrizada e descarregada em tanques de armazenamento com agitação.

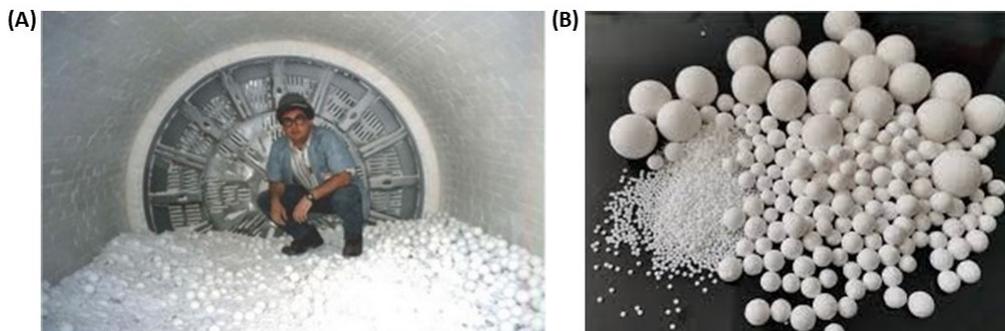


Figura 2.4.: Representação do interior de um moinho descontínuo (A) revestido com corpos moentes (bolas de alumina, (B), de forma esférica com diferentes granulometrias, capazes de fragmentar as partículas).

Relativamente aos moinhos contínuos, ver figura 2.4 (A), estes também são cilíndricos e são construídos em chapa de aço. O interior do moinho pode ser subdividido em duas ou três câmaras de moagem, separadas por um ou dos dois diafragmas. Neste caso, também são usados corpos de moagem de seixo de sílex ou alumina, figura 2.4 (B) que, vão sendo adicionados juntamente com a carga a moer. Na moagem contínua, geralmente, é usado um sistema de pesagem e dosagem contínuas, com armazenamento intermédio da carga doseada num silo que alimenta continuamente o moinho. Na descarga do moinho, efetua-se um controlo da barbotina, densidade, viscosidade e distribuição granulométrica do resíduo. A admissão de mais material fica assim dependente do teor do resíduo: se o resíduo estiver mais elevado do que o estipulado, a quantidade de matérias-primas a moer é diminuída; caso contrário, aumenta-se esta quantidade.

No final, a barbotina<sup>5</sup> é peneirada, desferrizada e descarregada em tanques de armazenamento com agitação.

### 2.2.1.3. Atomização

A atomização é um processo no qual a água contida na barbotina é removida por evaporação de maneira controlada, ver figura 2.5. A remoção não é total, já que uma certa quantidade de água residual deve permanecer nos grânulos formados para lhes conferir uma plasticidade adequada para a etapa seguinte - a prensagem. Tal quantidade de água que permanece varia, normalmente, de acordo com as características das matérias-primas, entre 4 e 8%;. No caso da CLiPER, a percentagem de humidade varia entre 5.8 e 7.0%;.



Figura 2.5.: Representação de um atomizador - câmara aquecida onde no seu interior ocorre a pulverização da suspensão (barbotina).

A operação de atomização é realizada por injeção da barbotina, de baixo para cima, através de bombas de elevada pressão (25 a 30 bar), ver figura 2.6 (A). No interior da câmara cilíndrica de secagem, ocorre a nebulização, através de bicos injetores de várias dimensões, dispostos num anel localizado ao centro da câmara principal do atomizador, ver figura 2.6 (B). Os bicos injetores são, normalmente, confeccionados em metal duro e distribuídos no anel em vários diâmetros (2 a 4 mm), dependendo da distribuição granulométrica desejada. O vapor gerado pelo calor desenvolvido por queimadores auxiliares a gás é injetado na parte superior do atomizador e distribuído tangencialmente a temperaturas que podem variar entre 650 e 750 °C, dependendo da produtividade e características finais desejadas dos pós atomizados. O pó seco cai sobre uma passadeira rolante sendo encaminhado para os silos de armazenamento. Lá, permanecem em repouso, pelo menos, 48 horas para a homogeneização e estabilização da humidade.

<sup>5</sup>Pasta cerâmica líquida - suspensão argilosa utilizada para produzir peças cerâmicas utilitárias.

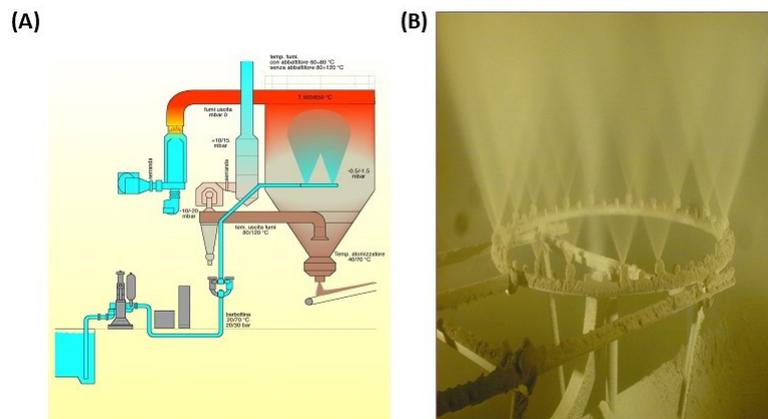


Figura 2.6.: Processo de atomização: (A) sequência ilustrativa da injeção de barbotina, através de bombas de elevada pressão, que vai sofrer nebulização no interior da câmara cilíndrica de secagem, através de bicos injetores de várias dimensões, dispostos num (B) anel localizado ao centro da câmara principal do atomizador.

Uma completa caracterização da barbotina no que diz respeito à sua densidade e viscosidade é vital para manter um bom processo de produção do pó atomizado. Uma vez que a atomização é um processo contínuo há tendência para originar facilmente oscilações na humidade e distribuição granulométrica do pó e, por esse motivo, é aconselhável controlar convenientemente todos os parâmetros de processamento de forma sistemática, principalmente durante o período em que é realizada a atomização propriamente dita.

### 2.2.2. Conformação e secagem

O processo produtivo da CLiPER Cerâmica inicia-se nesta etapa de conformação/prensagem e secagem.

O pó chega às instalações por meio de camiões dos fornecedores - e, enquanto que o pó de monoporosa<sup>6</sup> é bombeado por propulsor do camião para os silos, ver figura 2.7 (A), o pó porcelânico<sup>7</sup> é descarregado numa tremonha<sup>8</sup> e depois transportado por telas para silos de armazenamento, ver figura 2.7 (B).



Figura 2.7.: O pó atomizado chega às instalações da unidade industrial por meio de camiões dos fornecedores e, conforme a sua tipologia, é descarregado de forma diferente a fim de evitar possíveis contaminações: (A) o pó de monoporosa é bombeado por propulsor do camião para os silos; e (B) o pó de porcelânico é descarregado numa tremonha e é, seguidamente, transportado por telas para silos de armazenamentos. Ambos os tipos de pó são armazenados em (C) silos.

<sup>6</sup>Pó utilizado para a produção de peças de revestimento.

<sup>7</sup>Pó utilizado para a produção de peças de porcelanato.

<sup>8</sup>Utensílio de moinho em forma de pirâmide invertida por cuja extremidade passa a matéria-prima a ser moída.

Todas as cargas de pó recebidas são controladas pelo laboratório da CLiPER, sendo realizados os seguintes ensaios: percentagem de humidade, percentagem de distribuição granulométrica, percentagem de contração seco/cozido, percentagem de perda ao rubro e percentagem de absorção de água. Este controlo permite antecipar alguma correção que seja necessária de ser efetuada ao processo produtivo caso se detete algum desvio aos valores padrão e, também, para alertar os fornecedores para eventuais não conformidades.

A CLiPER Cerâmica possui oito silos, que têm a função de armazenar o pó. O pó atomizado pode ser corado ou não. Caso seja corado, o pó segue do silo onde se encontra armazenado para uma torre de mistura que permite a deposição de corantes em seco no pó e sua homogeneização, sendo este conduzido para silos que existem numa plataforma na zona superior de cada prensa. No caso do pó não ser corado, este corre diretamente dos silos de maior capacidade para os silos que se encontram acima da prensa.

A prensagem, ver figura 2.8, é a fase de produção onde os produtos cerâmicos tomam forma mediante a compactação do pó granulado e semi-seco. Realizam-se três operações fundamentais durante a prensagem: formação das peças, compactação e densificação do pó (redução de vazios existentes entre as partículas da massa).

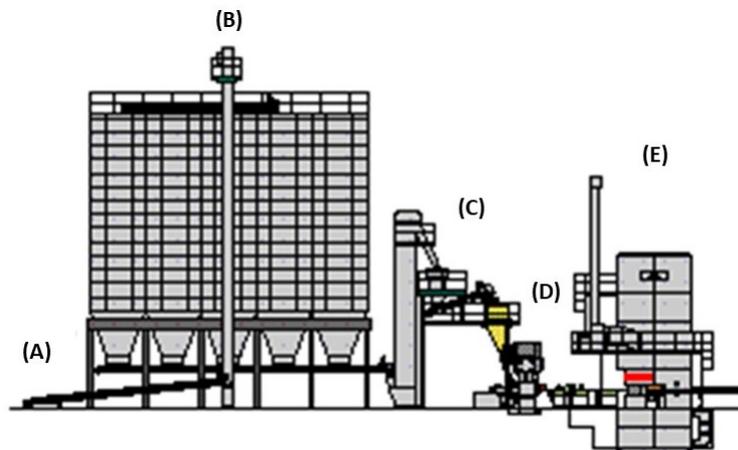


Figura 2.8.: Esquema da operação de prensagem: (A) rampa de admissão do pó para os silos; (B) os pós são armazenados em silos independentes; (C) o pó é transportado para um silo que abastece a prensa a ser usada; (D) processo de prensagem (conformação das peças cerâmicas); (E) secador vertical das peças após conformação.

A CLiPER possui três prensas hidráulicas equivalentes à representada na figura 2.9.



Figura 2.9.: Prensa existente nas instalações da CLiPER onde ocorre o processo de conformação das peças cerâmicas que inclui a produção de compactos com o formato e as dimensões desejadas e, também, a produção de compactos com máxima densidade e uniformidade.

Na prensagem, o objetivo é reduzir ao máximo a porosidade interna da peça, aplicando-se pressões de compactação que variam entre  $235$  e  $400 \text{ kg/cm}^2$  para o pavimento e entre  $217$  a  $280 \text{ kg/cm}^2$  para o revestimento, através de punções rígidas (cunhos). Os cunhos são, normalmente, revestidos com borracha para diminuir os tempos de limpeza. A utilização da borracha é, também, ideal para a obtenção de efeitos superficiais de tipo estruturado. Os cunhos podem ser rígidos ou isostáticos, sendo que este último permite uniformizar a densidade ao longo da placa cerâmica. Existem dois tipos de cunhos: o cunho face e cunho reverso, tecnicamente designado de tardez. Os cunhos face, ver figura 2.10 (A), são as ferramentas que trabalham no molde superior e, é através deles que, é exercida a pressão de prensagem, sendo, através dos mesmos, que se decalca o padrão de cada peça. Os cunhos tardez, ver figura 2.10 (B), são as ferramentas que trabalham no molde inferior, sendo estas as ferramentas que suportam a pressão de prensagem e, sendo através delas, que é decalcada a parte inferior das peças (parte não visível).

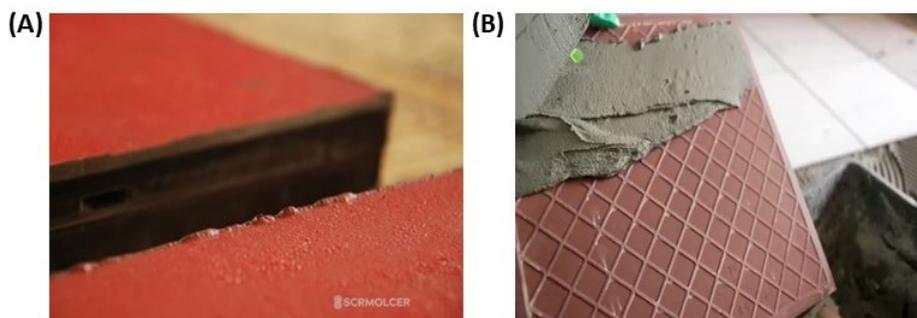


Figura 2.10.: Ilustração dos dois tipos de cunhos: (A) face - punção rígida que trabalha o molde superior, sendo através deste que se reproduz o padrão da peça; (B) tardez - punção rígida que trabalha no molde inferior, capaz de sustentar a pressão exercida na conformação e onde é reproduzida a parte inferior da peça.

Além dos aspetos referentes à pressão de compactação, é fundamental que o pó atomizado preencha uniformemente os alvéolos do molde. O pó atomizado que já foi alvo de controlo é, então, vazado para um molde e sujeito a uma força de consolidação através de uma punção, sendo, nesta etapa, que a peça

adquire a forma e parte das características mecânicas, ver figura 2.11.



Figura 2.11.: Moldes para consolidação da peça - etapa em que a peça adquire a forma e parte das suas características mecânicas.

Convencionalmente, a prensagem é feita em duas fases distintas - na primeira fase é aplicada uma menor pressão e na segunda uma maior pressão, sendo estes valores dependentes do formato e da espessura final pretendida. Esta sequência de duas fases de prensagem são separadas por um tempo de desaeração onde é feita uma pausa na força de prensagem, juntamente com a subida do cunho de face. Deste modo, o ar migra do interior da peça até às interfaces com o molde ou cunhos, evitando, assim, a possibilidade de aparecimento de folhado nas peças, ver figura 2.12.



Figura 2.12.: Ilustração de um defeito possível de ser originado no processo de prensagem: folhado na peça cerâmica. Este defeito surge quando as duas fases de prensagem não são devidamente separadas por um tempo de desaeração, evitando que o ar migre do interior da peça até às interfaces com o molde.

A distribuição granulométrica e a percentagem de humidade afetam a fluidez dos granulados atomizados durante o processo de preenchimento dos alvéolos dos moldes de prensagem, pelo que, carregamentos inadequados, normalmente, geram problemas de geometria nas peças obtidas, como falhas de ortogonalidade e/ou dimensões (incluindo as diferenças de espessura), ver figura 2.13. Assim, para minimizar qualquer variação das características do pó, deve-se trabalhar sempre, no mínimo, com dois silos em simultâneo. O pó, antes de chegar à tremonha da prensa, é desferrizado e peneirado.



Figura 2.13.: Exemplo de um defeito relacionado com a geometria na peça cerâmica obtido por uma falha no processo de preenchimento dos alvéolos dos moldes de prensagem.

Para que o processo esteja minimamente controlado até esta etapa são feitos os seguintes controlos: verificação da pressão de prensagem e determinação do peso, da espessura e da percentagem de humidade.

Segue-se a secagem das peças, uma fase muito importante no processo de fabricação de pavimentos cerâmicos que tem como objetivo eliminar o máximo possível de água contida nas peças após o processo de prensagem, de forma a reduzir o valor da humidade residual, até que ela atinja os valores pretendidos.

A CLiPER possui três secadores verticais contínuos, ver figura 2.14, cujo ar quente circula entre as peças a uma determinada temperatura e velocidade, de modo que seja retirada quase toda a humidade que ainda restou do processamento.



Figura 2.14.: Secador vertical contínuo existente nas instalações da CLiPER, por onde circula ar quente entre as peças cerâmicas a uma determinada temperatura e velocidade, possibilitando a remoção de quase toda a humidade que ainda restou do processo anterior.

Assim, as peças entram no secador e são carregadas sobre um plano de rolos. O secador possui dois queimadores que variam entre 110 e 120°C - desta forma, a humidade média é reduzida de 5.8/7.0% a 1%, o que permite que as peças adquiram resistência mecânica suficiente para serem processadas nas linhas de vidragem. Em relação à duração do ciclo, este depende das características da massa, da dimensão, da espessura das peças e da cadência da prensa. As peças saem para a linha de vidrar a cerca de 95°C.

No processo de secagem são realizados os seguintes controlos: determinação da resistência mecânica a seco, da humidade residual, das dimensões em cozido e das diferenças entre lados e verificação da

temperatura do secador.

### 2.2.2.1. Vidragem e decoração

Após a prensagem e secagem, as peças seguem para as linhas de vidragem, ver figura 2.15. Este é um setor de importância vital para o êxito da qualidade e quantidade da produção, uma vez que os produtos aplicados nas peças (vidros e tintas) constituem a face visível dos produtos e merecem, também por isso, um cuidado metucioso na sua preparação e aplicação.

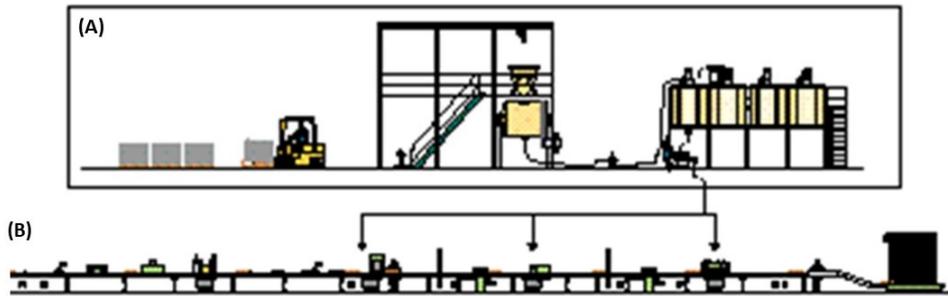


Figura 2.15.: Esquema do processo de vidragem: (A) etapa de preparação dos vidros onde ocorre o levantamento dos *big bags* para seguirem para moagem; (B) linha contínua de vidragem com vários sistemas de aplicação ao longo desta.

#### Preparação de vidros e tintas

O esmalte ou vidrado cerâmico é uma camada impermeável de uma substância vítrea que foi fundida a um corpo cerâmico por queima. Cada esmalte tem uma ou mais funções associadas e são utilizados com o objetivo de conferir certo tipo de características às peças cerâmicas, tais como: impermeabilidade, resistência ao desgaste e risco, resistência a agentes químicos, resistência às manchas, resistência mecânica e térmica, entre outras. Para além disto, condicionam o resultado estético do produto acabado: brilho, opacidade, transparência, cor e textura.

A tabela 2.1 possui a classificação dos esmaltes e suas respectivas funções que são utilizados na vidragem de mosaicos cerâmicos na CLiPER.

Tabela 2.1.: Classificação dos tipos de acabamento de acordo com o tipo de esmalte e respetiva função.

Tipo de esmalte	Função
Engobe	Limitar os riscos de defeitos nos vidrados;
	Mascarar a cor do suporte (pasta);
	Impermeabilizar a peça cerâmica a vidrar;
	Permitir aplicar camadas de vidrado menos espessas.
Vidro branco brilhante (opaco)	Conferir uma superfície opaca brilhante.
Vidro transparente brilhante (cristalino)	Conferir uma superfície transparente brilhante.
Vidro branco mate	Conferir uma superfície opaca mate.
Bases serigráficas (vidros atomizados: opaco, brilho, mate e transparente)	Usadas para o fabrico de tintas serigráficas (rotocolor).
Granilhas (aglomerado de vidro)	Permite dar dureza e/ou rugosidade à peça cerâmica.
Engobe tardoz (refratário)	Proteger os rolos do forno.

Das matérias-primas utilizadas para os vidrados, destacam-se as fritas, as matérias-primas cruas, os corantes e os aditivos. As fritas são materiais vítreos ou semi-vítreos, ver figura 2.16 (A), obtidos por meio de fusão e resfriamento brusco de misturas de minerais que conferem uma grande diversidade de óxidos à

composição do vidro formado. Apresenta como finalidade de, isoladamente ou com matérias-primas cruas, formular vidrados. As matérias-primas cruas, por sua vez, apresentam funções fundentes (sílica e feldspato, figura 2.16 (B) - C e D), opacificantes (zinco e zircónio, figura 2.16 (B) - A e B) e aumento da dureza (alumina e caulino, figura 2.16 (B) - E e F).

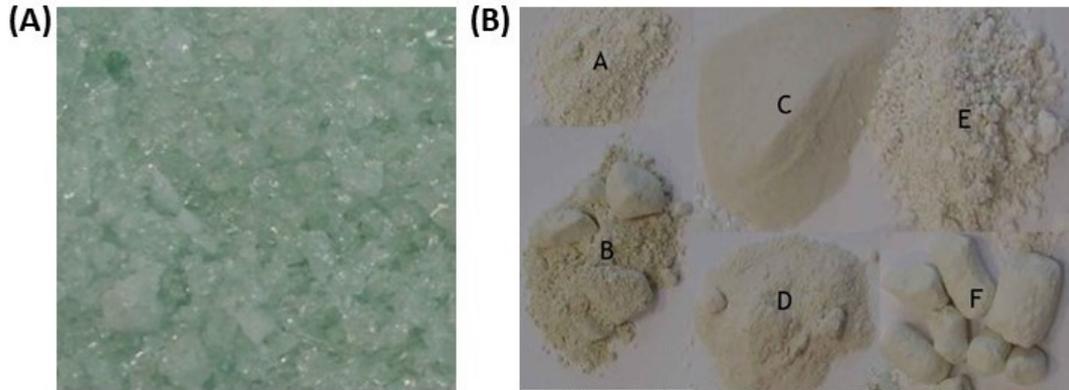


Figura 2.16.: Matérias-primas utilizadas para os vidrados: (A) fritas como constituinte de um material; (B) matérias-primas cruas - A: zinco, B: zircónio, C: zilica, D: feldspato, E: alumina, F: caulino.

Aos vidrados, podem ser adicionados corantes que proporcionam a coloração dos mesmos, figura 2.17 (A), e aditivos que são usados em vidrados como desfloculantes, figura 2.17 (B), lubrificantes, figura 2.17 (C), ligantes, figura 2.17 (D), suspensores e conservantes, podendo estes ser líquidos ou sólidos.



Figura 2.17.: Matérias-primas frequentemente adicionadas aos vidrados: (A) corantes; (B) desfloculantes; (C) lubrificantes; (D) ligantes - carboximetilcelulose, CMC.

Os engobes e os vidros são, normalmente, fornecidos à CLiPER na forma de composto (*big bags*<sup>9</sup>, ver figura 2.18) que, posteriormente, são moídos.



Figura 2.18.: Sacos de acondicionamento (*big bags*) contendo engobes e vidros na unidade industrial.

<sup>9</sup>*Big bags*: sacos industriais feitos com material flexível e resistente para transportar produtos a granel.

A moagem dos engobes e dos vidros é mais crítica do que a das pastas, uma vez que tem de haver um maior cuidado no que diz respeito a evitar contaminações, bem como um maior controlo do resíduo destes produtos.

Cada referência de engobe/vidro tem uma ficha de moagem que especifica a quantidade de água, tempo de moagem e percentagem de resíduo que este deve conter. O laboratório tem a função de controlar a densidade e o resíduo antes da descarga do moinho. A moagem é realizada num dos moinhos de bolas descontínuos, ver figura 2.19, existentes na secção de preparação de vidros. Pontualmente, os vidros também podem ser vendidos pelo respetivo fabricante na forma moída e nesse caso bastará ajustar apenas as suas propriedades reológicas<sup>10</sup>.



Figura 2.19.: Moinho de bolas descontínuo existente na secção de preparação de vidros que tem como finalidade a moagem dos vidros.

Após a aprovação do resíduo, o laboratório faz um controlo, do moinho ou da receção dos vidrados já moídos, à textura e tonalidade da suspensão - este controlo consiste em aplicar um molde de pintura (cacharreta), ver figura 2.20 (A), sobre uma peça entre o vidrado a controlar e um padrão (STD), ver figura 2.20 (B), nas mesmas condições de densidade.

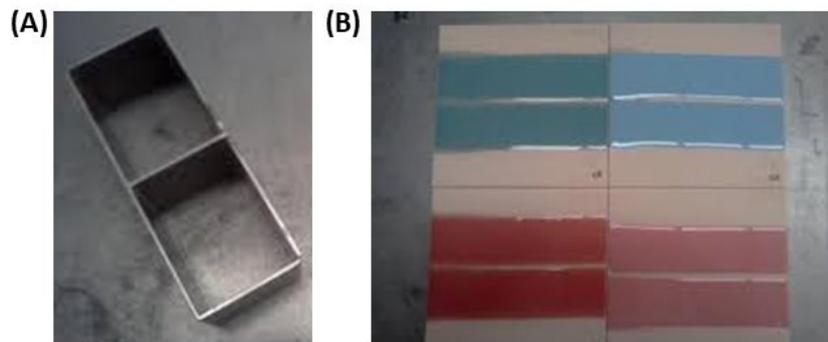


Figura 2.20.: Controlo dos vidrados após moagem é realizado por aplicação de um (A) molde de pintura, tecnicamente designado de cacharreta, sobre (B) uma peça cerâmica entre o vidrado de controlo e o vidrado definido como padrão.

De seguida a peça é cozida e procede-se a uma avaliação. Caso a tonalidade seja aprovada, o vidrado é descarregado para tinas ou tanques, passando por um peneiro de  $125\ \mu m$  e é desferrizado. Em relação aos vidros corados, estes não podem ser desferrizados, uma vez que são metálicos.

<sup>10</sup>Viscosidade e densidade.

## Vidragem

A vidragem/decoração consiste em aplicar, sobre o corpo cerâmico, uma ou mais camadas de vidro com espessura compreendida entre 75 e 500  $\mu\text{m}$ , conferindo às peças propriedades técnicas e estéticas. Cada referência a produzir tem uma ficha técnica que descreve as aplicações a efetuar, os vidrados e as condições dos mesmos.

A CLiPER Cerâmica possui três linhas de vidragem. Para haver versatilidade e se obter uma adaptação rápida das linhas de vidragem, é necessário a existência de numerosos sistemas de aplicação ao longo destas, com possibilidades de trocas rápidas para a produção de outra referência, o que requer o desenvolvimento de linhas de vidrar muito longas. Assim, para realizar o processo de vidragem, devem seguir-se algumas etapas de forma a garantir a qualidade do produto: pós-secagem, aplicação de água, aplicação de engobe, aplicação de esmalte e decoração serigráfica.

Inicialmente, as peças começam por passar no meio de rebarbadores que aperfeiçoam as suas arestas onde poderá exibir imperfeições. São, inicialmente, rebarbados dois lados opostos da peça e, posteriormente, estes giram 90º e o processo repete-se nos dois lados restantes.

Seguidamente, as peças deslocam-se por escovas rotativas que eliminam partículas e pó que se encontrem depositados na superfície devido às operações anteriores. Esta operação é de extrema importância, uma vez que há necessidade de garantir a aderência do vidro à peça de forma uniforme, evitando, ao máximo, qualquer tipo de defeito, como, por exemplo, a presença de poros após a cozedura.

Antes da primeira aplicação de vidro, a superfície é pulverizada com água, de forma a cobrir os poros do suporte, para que, desta forma, haja um controlo na consolidação da película de vidro numa fase posterior.

O primeiro vidro a ser aplicado nas peças é o engobe que trata-se de uma camada intermediária entre o suporte e o esmalte que tem como funções opacificar o suporte cerâmico, atenuar as diferenças físico-químicas entre o suporte e o esmalte e diminuir a quantidade de defeitos. Este procedimento proporciona diversas características funcionais, tais como: determinação e melhoria do aspeto estético da peça, impermeabilização do suporte cerâmico e fornecimento de um revestimento protetor ao suporte. Consoante a quantidade a aplicar sobre a peça, é definido o equipamento - para quantidades pequenas é aplicado sob a forma de pulverização a jato, ver figura 2.21 (A), e para quantidades maiores por cortina (campânula), ver figura 2.21 (B). No caso dos revestimentos de monoporosa, antes da decoração por rotocolor ou digital, são aplicados o engobe e o vidro por campânula.

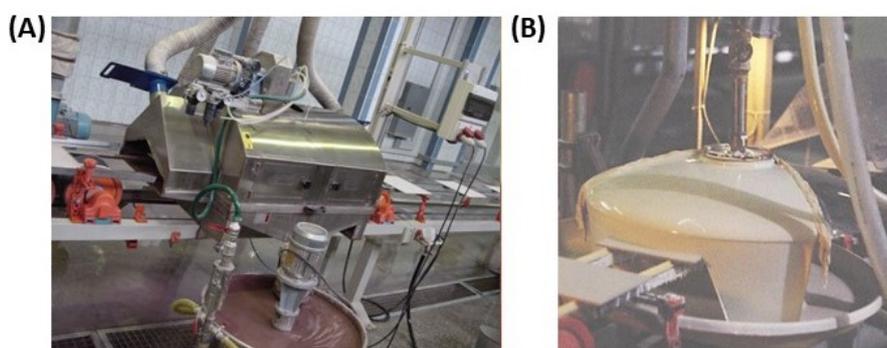


Figura 2.21.: O equipamento para aplicação do engobe nas peças cerâmicas é escolhido consoante a quantidade a aplicar no material: (A) jato, sob a forma de pulverização, para quantidades pequenas; (B) campânula, sob a forma de cortina, para quantidades maiores.

De seguida, a decoração serigráfica é realizada pela técnica de rotocolor e/ou impressão digital (*kerajet*). A decoração por rotocolor, ver figura 2.22 (A), consiste na impressão em rolos sequenciais que possuem alvéolos e transportam a tinta até às peças criando efeitos decorativos. No caso dos rolos rotocolor, estes consistem em rolos sequenciais que apresentam mangueiras de tinta, onde cada rolo faz um padrão específico na peça, isto é, cada rolo possui alvéolos que contêm tinta e que, posteriormente, são decalcados na peça. Esta tecnologia tem vindo a ser cada vez menos utilizada, dando lugar à impressão digital. A decoração por impressão digital *kerajet*, ver figura 2.22 (B), trata-se de uma técnica mais moderna, sendo, este equipamento, uma impressora digital que possui uma tecnologia de impressão a jato de tinta sem contacto com a peça. Possui barras de impressão onde as cabeças emitem micro gotas de tinta, combinando diretamente as várias cores para criar o que se pretende. A sobreposição das tintas base instaladas na máquina, gera uma gama de cores necessárias para a interpretação gráfica, ao contrário do sistema tradicional que utiliza várias serigrafias distintas. Esta tecnologia, a partir das cabeças de impressão, permite criar na peça uma imagem introduzida no computador.

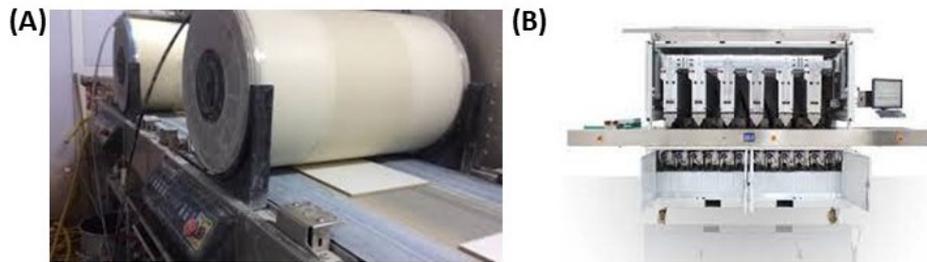


Figura 2.22.: A decoração serigráfica pode ser realizada por duas técnicas diferentes: (A) rotocolor - que consiste na impressão em rolos contínuos que possuem alvéolos que contêm tinta e que reproduzem a peça; (B) impressão digital (*kerajet*) - que consiste numa tecnologia de impressão a jato de tinta onde não há contacto com a peça e a partir das cabeças de térmicas é possível o decalque da peça por meio de uma imagem introduzida no computador.

Existem ainda peças que são decoradas com recurso a granilha que pretende criar um efeito de alto/baixo relevo e brilho na presença de luz. A granilha encontra-se numa tremonha que alimenta de forma regulada o tapete da linha - à medida que o tapete avança, a tremonha faz cair na linha uma cortina de granilha, pelo que, conseqüentemente, as peças que se encontrem no tapete adquirem essa granilha na sua superfície, ver figura 2.23. Nos intervalos entre as peças, a granilha cai numa rede que realimenta o processo. Antes da aplicação da granilha, a peça é pulverizada com uma cola própria que garante a fixação à peça.

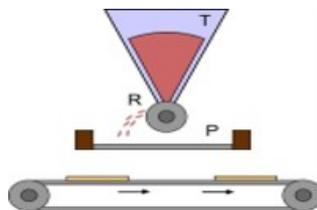


Figura 2.23.: Esquema representativo da aplicação da granilha: T corresponde ao depósito de granilhas, R ao rolo doseador de queda de granilhas e P ao peneiro vibratório.

No caso das peças destinadas a pavimento, a fim de se promover a resistência ao desgaste por abrasão e proteger a decoração, é aplicada uma cobertura (vidro) a uma determinada densidade e uma gramagem baixa por pulverização a jato.

Por fim, é aplicado o vidro primário da face reversa, também conhecido como engobe de tardez, ver figura 2.24, que se trata de uma mistura refratária que tem como funções "limpar" as áreas que contactaram com as correias sujas com vidro e evitar a aderência das peças aos rolos no forno, evitando desalinhamentos na carga e, conseqüentemente, danos no acabamento superficial das peças que se possam fundir umas com as outras. No final da linha de vidragem, as peças são armazenadas em vagonas<sup>11</sup>.



Figura 2.24.: Equipamento para aplicação do engobe de tardez - mistura refratária que tem como principal função evitar a aderência das peças aos rolos no forno, evitando, assim, desalinhamentos na carga.

São várias as fases de controlo do produto nesta etapa, tais como: determinação do peso de aplicações de linha, densidade e viscosidade dos vidros e tintas, controlo da aplicação do engobe de rolos e tardez, da impressão digital *kerajet* e de amostras.

### 2.2.3. Cozedura

A cozedura é a operação fundamental do processo tecnológico que dá origem à peça cerâmica final. Assim, as matérias-primas são transformadas em novos compostos cristalinos e vítreos que conferem ao produto cozido um conjunto de propriedades concretas, permitindo manter a sua forma, ter uma boa resistência mecânica, uma porosidade reduzida, boa resistência química, etc. Na figura 2.25 apresenta-se um esquema do processo de cozedura.

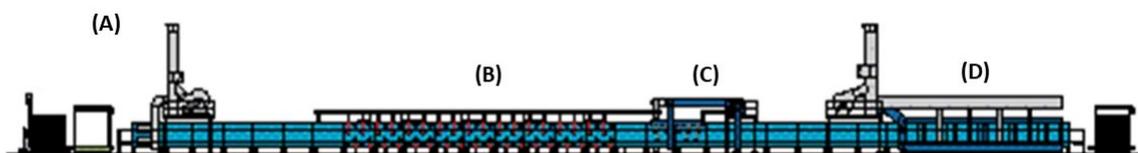


Figura 2.25.: Esquema do processo de cozedura: as vagonas são transportadas por meio de veículos guiados automaticamente (AGVs) das linhas de vidragem até serem (A) descarregadas no forno cerâmico; as peças passam por uma (B) zona de pré-aquecimento; seguida de uma (C) zona de queima; e, por fim, por uma (D) zona de arrefecimento.

A utilização de curvas de cozedura otimizadas permite que as reações de fusão e cristalização dos vários componentes da pasta e do vidro que constituem o produto se realizem de maneira adequada. Tais reações contribuem para a obtenção de peças cerâmicas com absorção de água, resistência mecânica, contração e planaridade dentro de especificações pré-determinadas, resultando em produtos com características técnicas pré-definidas (resistência química, resistência à abrasão e resistência ao desliz) melhoradas com valorização estética da superfície esmaltada.

Atualmente, os parâmetros de cozedura são estabelecidos com base no conhecimento químico e no comportamento físico-químico das matérias-primas utilizadas. Os fornos, hoje disponíveis, permitem reproduzir

<sup>11</sup>Sistemas de carga que transportam o material de uma zona para outra para carregar e/ou descarregar as peças cerâmicas.

as condições de funcionamento de uma forma cada vez mais precisa, realizando uma cozedura extremamente controlada. De um modo geral, as condições de cozedura de uma pasta cerâmica dependem da sua natureza física e química, do seu grau de moagem, da densidade aparente do compacto (pressão de prensagem) e da temperatura máxima e tempo de ciclo de cozedura a que vai ser sujeita. Assim, dependendo das várias condições, a velocidade das reações que acontecem na pasta não são sempre iguais; contudo, geralmente, à medida que a temperatura aumenta, a percentagem de absorção de água diminui e a contração e resistência mecânica aumentam. Porém, a uma certa altura, a pasta começa a entrar em expansão devido à fusão, levando à deformação do material.

A empresa CLiPER Cerâmica possui dois fornos de rolos a gás. Na cozedura de peças de pavimento, a temperatura pode ir até aos 1220°C e os ciclos de cozedura podem ir dos 50 aos 68 minutos, dependendo dos formatos que se encontrem a ser produzidos e, na cozedura de peças de revestimento, a temperatura máxima que pode ser atingida é de 1145°C e os ciclos de cozedura são da ordem dos 80 minutos.

Os fornos de rolos apresentam três zonas distintas: pré-aquecimento, zona de queima e zona de arrefecimento, conforme o esquema indicado na figura 2.26. Na zona de queima estão instalados queimadores que transferem calor para as peças na forma de chama, além de produzirem ar quente que aquece as peças na zona de pré-aquecimento. Já na zona de arrefecimento, há a adição de ar frio e é nesta zona que há um ajuste da planaridade do material, pelo que é nesta etapa que é realizado um controlo ao empeno do material.

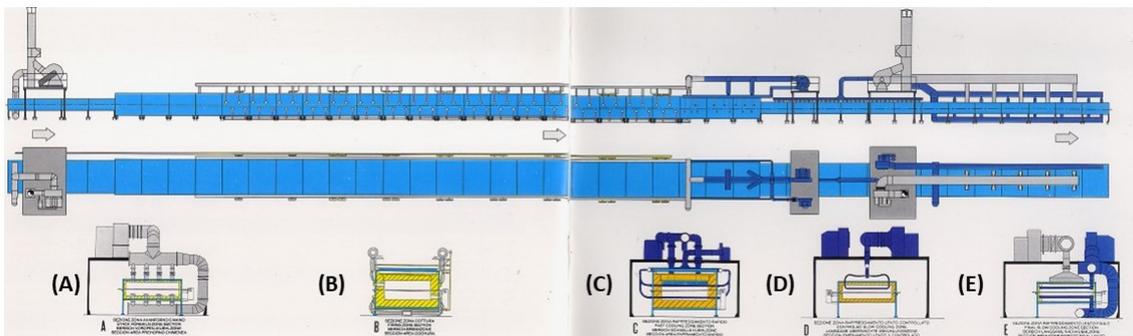


Figura 2.26.: Esquema de um forno cerâmico de rolos: (A) secção da área frontal da chaminé; (B) secção da zona de queima; (C) secção da zona de resfriamento rápido; (D) secção da zona de resfriamento lento e controlado; (E) secção final da zona de resfriamento lento.

A deformação das peças existe devido a tensões de compressão que o vidro provoca ao solidificar e retrair durante a cozedura, bem como à diferença entre os coeficientes de dilatação existentes entre este e a pasta, podendo este defeito ser controlado durante a cozedura. A esta deformação no material dá-se o nome de empeno. Se o empeno for desfavorável (incremento positivo), ver figura 2.27 (A), aumenta-se a injeção de ar na zona superior das peças, para que seja o vidro a exercer essa força; se, pelo contrário, o empeno for favorável (incremento negativo), ver figura 2.27 (B), aumenta-se a quantidade de ar injetado na zona inferior das peças para que, o suporte arrefeça primeiramente e exerça uma força de compressão na camada do vidro. No caso da monoporosa, o material tem de sair do forno com uma tendência favorável, enquanto que, no grés porcelânico, com a forma correta ou ligeiramente desfavorável. Ao fim de uns dias, estes ficam com a sua forma correta devido às tensões no material diminuírem.

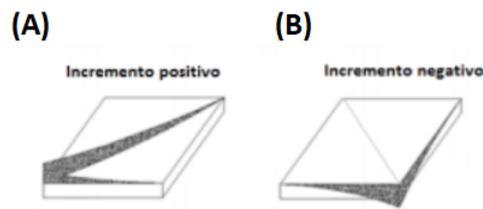


Figura 2.27.: O empeno é um defeito relacionado com a planaridade das peças cerâmicas e pode ser dividido em empeno: (A) positivo (desfavorável) e (B) negativo (favorável). Atendendo a este tipo de anomalia, o necessário a fazer para corrigir este defeito é aumentar ou diminuir a quantidade de ar na zona superior ou inferior das peças.

A homogeneidade da temperatura dentro de uma mesma região depende de uma série de fatores, dentro dos quais podemos destacar: o fluxo de gases no interior do forno, a posição em relação à chama, a condutividade térmica das várias regiões do forno, a posição em relação à chama, a condutividade térmica das várias regiões do forno, a distribuição das peças, entre outros. O forno possui para cada zona dois termopares, um por cima e outro por baixo dos rolos, que registam as temperaturas ao redor das suas extremidades. Ainda que as temperaturas registadas não variem consideravelmente, isso não garante que, noutras regiões da mesma zona do forno, a temperatura seja a mesma.

Nesta secção, para que o processo seja minimamente controlado, procede-se ao controlo dos defeitos de forma visual, à determinação das diferenças entre lados/diagonais, à percentagem de absorção de água e à aplicação do engobe de tardo. À saída do forno, as peças são diretamente armazenadas em vagonas.



Figura 2.28.: Peças cerâmicas finais, após cozedura, que vão seguir até às vagonas para serem armazenadas. Após o armazenamento, serão transportadas por veículos automaticamente guiados até à etapa de escolha.

#### 2.2.4. Escolha e embalagem

A etapa final do processo produtivo diz respeito à escolha e embalagem. A secção de escolha está localizada no final do processo quando o produto já possui as características finais.

A função fundamental da escolha é realizar uma subdivisão do produto, com a embalagem correspondente, feita de acordo com os parâmetros qualitativamente definidos (dimensões e planaridade), bem como pelos critérios de classificação da superfície, a serem impostos de acordo com a relação que a cerâmica quer manter junto do cliente, cumprindo sempre critérios normativos (norma Europeia EN 14411 e NF UPEC).

A CLiPER dispõe de dois tipos de equipamentos para verificar e classificar a superfície das peças cerâmicas: automático, ver figura 2.29 (A), onde a operação é realizada sem intervenção do colaborador; ou semi-automático, ver figura 2.29 (B), em que é necessário a atuação de um escolhedor para a seleção de peças

com defeitos visuais, sendo automática a rejeição por outros defeitos. Na presente unidade industrial, existem duas máquinas semi-automáticas e uma automática.

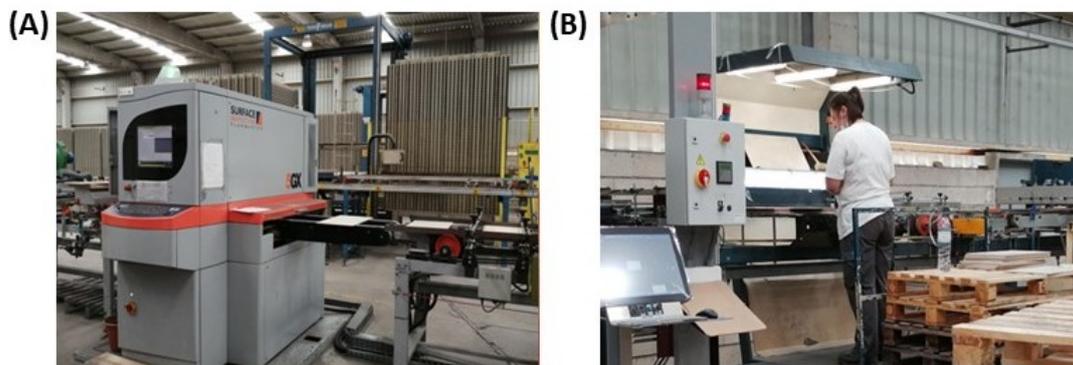


Figura 2.29.: Equipamentos para verificação e classificação das peças cerâmicas existentes na secção de escolha da CLiPER: (A) automático - sem intervenção do colaborador; (B) semi-automático - necessita da atuação de um escolhedor para a seleção de peças com defeitos visuais, sendo automática a rejeição por outros defeitos.

Em ambos os modos de escolha, antes de iniciar o processo de seleção do material, é montado um painel de quatro a seis peças, no chão, para definir o lote, sendo este procedimento de extrema importância. O lote, ou tonalidade, é uma característica fundamental para o fabricante na altura de aplicar as peças cerâmicas. A variação da tonalidade é algo que também acontece regularmente, pois é próprio do processo produtivo, uma vez que é quase impossível que dois lotes possuam a mesma tonalidade devido a várias causas, tais como a composição da massa, a queima, a composição da pigmentação, entre outros. Desta forma, as cores das peças cerâmicas são classificadas em faixas de tonalidade próximas e identificadas com uma letra seguida de um código numérico nas embalagens. Cada conjunto de caixa identificado com o mesmo número de tonalidade forma um lote de produção para um determinado produto.

Seguidamente, procede-se à classificação do material consoante graus de qualidade, podendo este ser dividido em: primeira qualidade (sem defeitos estéticos e sem diferenças de tonalidade), comercial (pequenas diferenças de tonalidade e pequenos defeitos visíveis a olho nu) e terceira qualidade (variações de tonalidade e defeitos visíveis a olho nu). No caso de o material não ter qualquer tipo de aproveitamento devido à presença de defeitos de grandes dimensões, este é desclassificado, representando o caco<sup>12</sup>. A aprovação ou não aprovação das peças é determinada, no caso das máquinas semi-automáticas, pela colocação, por parte do escolhedor, de uma marca a tinta fluorescente, onde determinada posição vai corresponder a uma determinada classificação da qualidade do produto. Esta marca vai permitir a desclassificação do material quando este é lido no sensor. No caso das máquinas automáticas, é necessário instruir a máquina do que é ou não é defeito.

Em relação aos defeitos dimensionais, calibres e planaridade, estes são avaliados por equipamentos automáticos (calibrador e planar), ver figura 2.30 (A), instalados nas linhas de escolha e que efetuam a sua desclassificação caso o material não esteja conforme, ao mesmo tempo que separam o material por calibres. O calibrador é aferido por uma peça metálica, ver figura 2.30 (B), do mesmo formato do material a selecionar antes de iniciar o processo de escolha. O calibre é uma característica muito importante, pois trata-se dos limites de especificação definidos pelo fabricante para agrupar os pavimentos e/ou revestimentos

<sup>12</sup>Produto não conforme que é posteriormente reciclado.

de um mesmo lote que apenas têm alguns milímetros de diferença entre si. A separação por calibres é fundamental<sup>13</sup>, pois não se pode assentar produtos de diferentes calibres num mesmo local, uma vez que as juntas não ficarão com um alinhamento adequado.

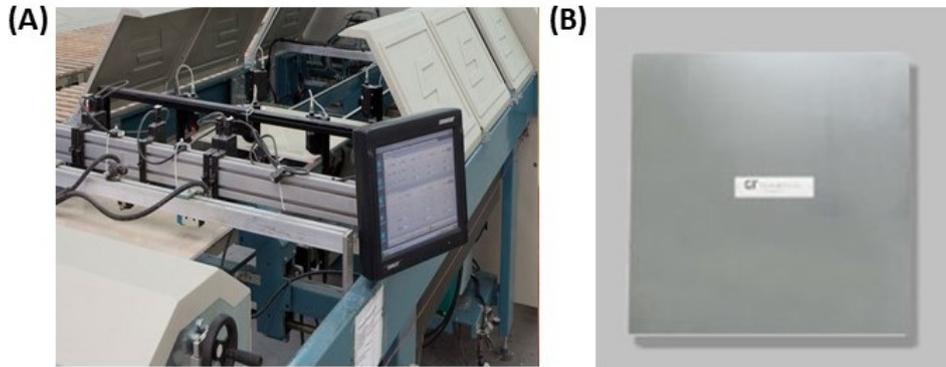


Figura 2.30.: Os defeitos dimensionais, calibre e planaridade, são avaliados por (A) equipamentos automáticos constituídos por sensores de calibre e planaridade, instalados nas linhas de escolha, que efetuam a desclassificação do material caso este não esteja conforme, ao mesmo tempo que separam o material por calibres. Para padronizar o calibrador é necessário uma (B) peça metálica do mesmo formato do material a escolher antes do início do processo de escolha.

De seguida, o material é distribuído em vários empilhadores, ver figura 2.31 - cada um representa a qualidade das peças cerâmicas (primeira, comercial ou terceira) e o calibre.

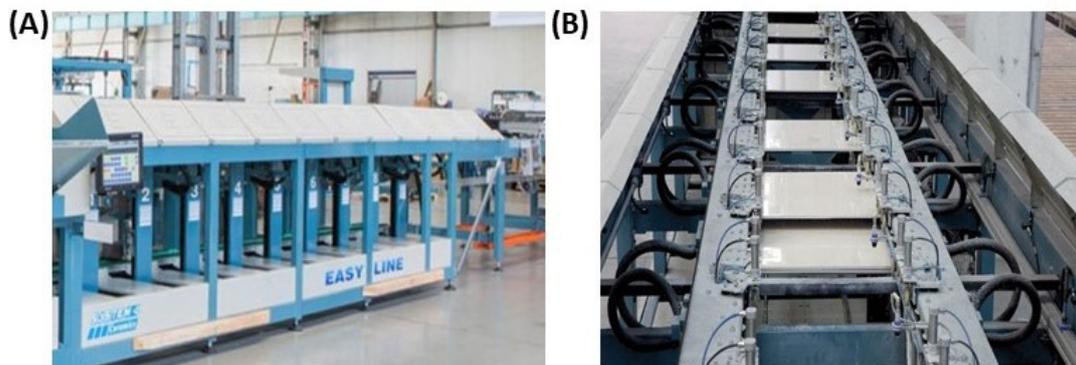


Figura 2.31.: Operação automática que consiste em distribuir o material por vários empilhadores, cada um representando a qualidade das peças e o calibre, no final da linha de escolha (A) número um; (B) número dois da CLiPER.

Posteriormente, o material é dividido, de modo a que cada monte de peças tenha o número de peças correspondente à caixa e embalado, ver figura 2.32.

<sup>13</sup>Entre as peças cerâmicas vão sempre existir variações de tamanho que são próprias do processo produtivo, por exemplo, das pequenas diferenças de temperatura do forno e de pequenas variações de granulometria da pasta, por isso, a Norma aceita a existência de uma certa variação.

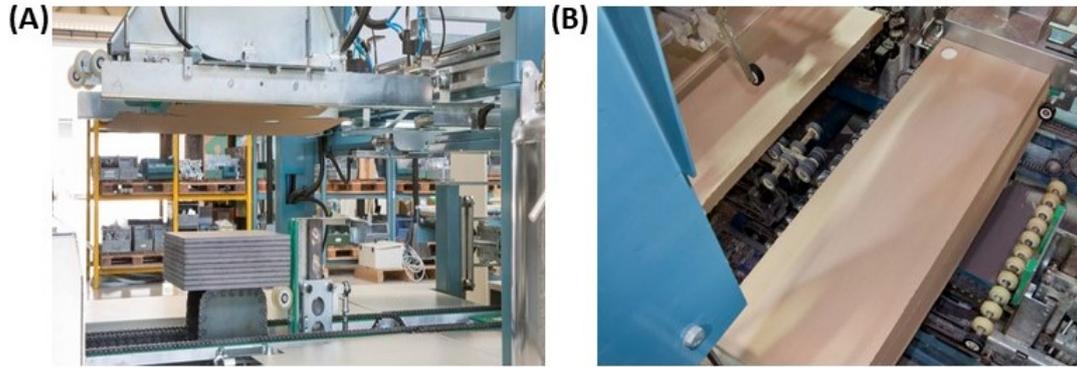


Figura 2.32.: Após o embalagem e respetiva separação das peças cerâmicas por qualidade e calibre, o material é dividido, ao longo da linha de escolha (A) número um (B) número dois - de modo a que cada monte de peças tenha o número de peças correspondente à caixa para ser embalado.

O embalagem é feito em caixas de cartão que, são impressas com: código de barras, referência, grau de qualidade, lote, calibre, data de escolha e marcação UPEC (CSTB) caso o produto seja certificado, ver figura 2.33.

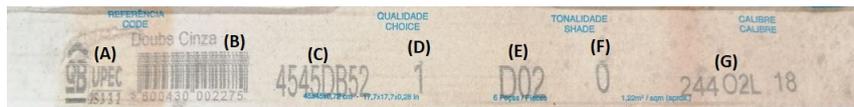


Figura 2.33.: Exemplo da identificação de uma caixa de produto da CLiPER: (A) Marcação UPEC (CSTB), caso o produto seja certificado; (B) Código de barras; (C) Referência do produto; (D) Classificação quanto à qualidade; (E) Lote/tonalidade; (F) Calibre; (G) Data de escolha.

Por fim, o material é acoplado já embalado, com mangas e cintas plásticas e dá-se a respetiva paletização, ver figura 2.34.



Figura 2.34.: Processo de paletização na CLiPER, após correto embalagem.

As paletes são plastificadas e seguem para o armazém, onde mais tarde são enviadas para o cliente, ver figura 2.35.



Figura 2.35.: Paletes plastificadas para seguir para o armazém de produto acabado e posteriormente seguir para expedição para o cliente.

A qualidade à saída da escolha e embalagem é bastante importante, sendo esta da responsabilidade do colaborador que tem a função de colar as etiquetas com os respetivos códigos de barras. Este controlo tem como objetivo garantir que todas as caixas se encontram devidamente identificadas.

### 2.2.5. Corte e retificação

Neste setor, para complemento das opções oferecidas aos clientes, o material é transformado em rodapés, ripas, degraus ou pastilha e retificado.

Para um melhor acabamento do produto, este pode ser sujeito a polimento e/ou retificação. O processo de polimento tem como objetivo melhorar as características estéticas da peça, pelo que, a superfície do mosaico cerâmico sofre várias transformações até chegar ao seu estado polido. Ao longo do processo de polimento ocorrem três principais transformações na peça: a perda de massa, o aumento do brilho e a diminuição da rugosidade do porcelanato. Durante este procedimento, as peças vão sofrer desgaste superficial, ver figura 2.36 (A), para nivelar a peça; de seguida, vão ser polidas com grupos de mós, ver figura 2.36 (B), que começam do grão mais grosso até ao mais fino; e, por fim, é lhes aplicado um impermeabilizante com a finalidade do material não ficar manchado. O polimento é um procedimento que não é realizado na CLiPER, mas sim, subcontratado. Já em relação à retificação, na secção de corte, encontra-se instalada uma retificadora, ver figura 2.36 (C), que permite o acabamento das partes laterais da peça, nomeadamente das arestas, tornando-as lisas e conferindo-lhes acabamento. A retificadora, de cada lado, possui motores de arestas e de bisel. À medida que as peças percorrem a linha e passam de uma retificadora para outra, rondam 90°C, sendo retificados nos dois lados paralelos, simultaneamente. Por último, as peças passam por uma zona de lavagem e secagem.



Figura 2.36.: Corte e retificação do material para um melhor acabamento do produto. O processo de polimento é usado com o objetivo de melhorar as características estéticas da peça e os procedimentos principais que ocorrem são o (A) desgaste superficial para nivelar a peça; e, seguidamente, o polimento em si com recurso a (B) grupos de mós. A retificação permite o acabamento das partes laterais da peça, sendo executada por uma (C) retificadora, instalada na secção de corte na CLiPER.

Após as etapas de polimento e/ou retificação, as peças voltam a ser sujeitas a um processo de escolha idêntico ao anteriormente descrito.

### 2.3. Controlo de qualidade

O controlo de qualidade envolve todo o processo produtivo (desde a receção de matérias-primas até ao produto acabado) e tem a função de atestar a adequação do produto aos padrões e normas pré-estabelecidas. Os produtos comercializados pela empresa só dão entrada no armazém de produto acabado após aprovação emitida pelo controlo de qualidade.

O controlador tem a função de verificar se a impressão das caixas está correta, isto é, se as informações que dizem respeito ao lote, calibre, formato, referência, etc., se encontram conformes. De seguida, de cada palete, são abertas algumas caixas para controlo da qualidade do material.

As paletes em que o controlador verifique que a sua classificação não está conforme são rejeitadas e reencaminhadas para a etapa de escolha, onde o material terá que ser desembalado e re-escolhido. Caso haja problemas na impressão das caixas, o material também regressa para a escolha para ser re-embalado. Para além disso, o controlador inspeciona algumas paletes de comercial e/ou terceira e regista os defeitos, com o propósito de ser feito um controlo estatístico para determinar quais os defeitos mais significativos de cada referência, de modo que, sejam feitas possíveis correções em futuras produções. Alguns dos defeitos mais comuns encontram-se representados na figura 2.37.

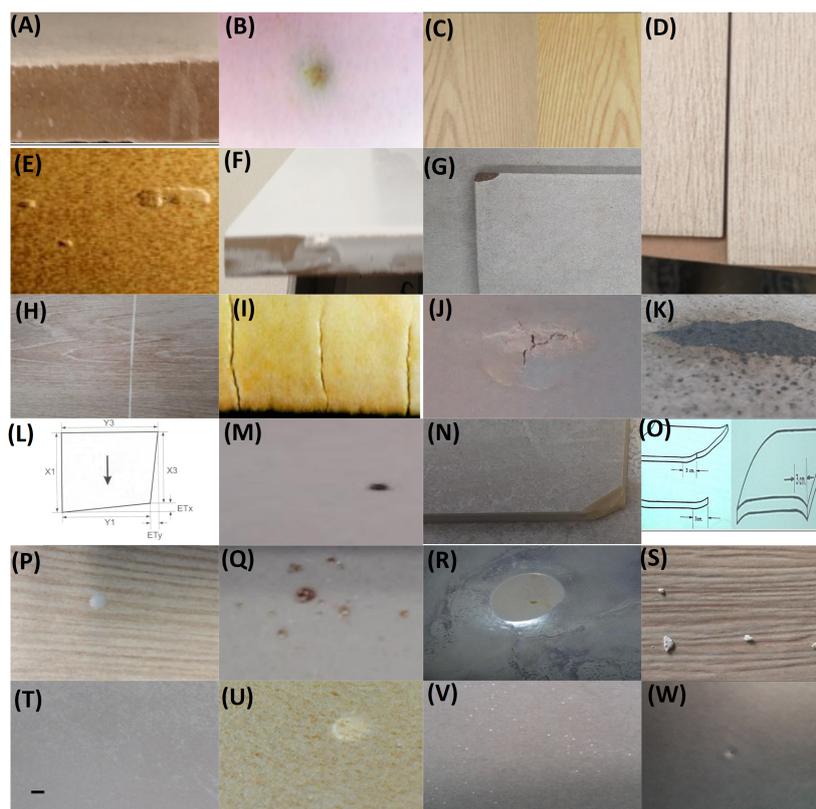


Figura 2.37.: Tipos de defeitos mais comuns encontrados nas peças: (A) Cunho gripado; (B) Pinta verde; (C) Diferença de tonalidade; (D) Problemas de geometria; (E) Rebarba prensada; (F) Mal rebarbado; (G) Canto cru; (H) Defeito digital; (I) Racha; (J) Folhado; (K) Pingo de tinta digital; (L) Esquadria; (M) Pinta preta; (N) Canto cozido; (O) Empeno; (P) Pingo de cristalina; (Q) Pinta do forno; (R) Bolha de ar no vidro; (S) Partículas de chacota; (T) Falha de granilha; (U) Pingo de engobe; (V) Picado; (W) Cova.

### 2.3.1. Laboratório

Para além dos controlos realizados pelos colaboradores do laboratório durante o processo de fabrico, também é necessário a realização de alguns ensaios ao produto acabado a fim de cumprir a norma Europeia EN 14411 e NF UPEC.

Os ensaios são efetuados de acordo com as normas de ensaio EN 10545 e pelo caderno do CSTB (NF UPEC) em vigor, sendo estes:

- a) controlo dimensional (EN 10545 – 2);
- b) resistência à abrasão superficial dos produtos vidrados (EN 10545 – 7);
- c) resistência à abrasão profunda (EN 10545 – 6 e anexo 3 do Cahier do CSTB);
- d) força de ruptura e resistência à flexão (EN 10545 – 4);
- e) determinação da percentagem de absorção de água (EN 10545 – 3);
- f) resistência aos químicos (EN 10545 – 13 e anexo 8 do Cahier do CSTB);
- g) resistência às manchas (EN 10545 – 14 e anexo 8 do Cahier do CSTB).

### 2.3.2. Armazém de produto acabado

Após as operações mencionadas anteriormente, o produto entra no armazém de produto acabado, onde é realizado o controlo do *stock* físico de produtos acabados - entrada e saída. Controla-se a movimentação, a transferência de produtos dentro do *stock* para facilitar toda a operação de separação, armazenamento e o embarque de produtos para os clientes.

## 2.4. Melhoria contínua

São várias as empresas das mais diversas áreas que trabalham arduamente para alcançar os seus objetivos com vista a melhorar a qualidade dos seus produtos. Contudo, durante todo este processo, encontram muitos desafios que, regularmente, as colocam numa posição onde se vêem na "obrigação" de melhorar o seu desempenho para, conseqüentemente, conseguirem obter a satisfação e preferência do cliente, de modo a garantir o escoamento dos seus produtos de fabrico.

O mundo industrial está repleto de questões que exigem respostas, pelo que a Gestão da Qualidade Total tem como função resolver os problemas de forma a evitar que os mesmos se repitam, levando à melhoria do produto e/ou processo.

Segundo a *American Society of Quality* (ASQ), a melhoria contínua é definida como o progresso da melhoria de produtos, serviços ou processos, por meio do incremento e notável avanço de melhorias. Para além disso, a ASQ também considera como melhoria contínua da qualidade, a filosofia e atitude para analisar as capacidades, processos e melhorias, com o objetivo de obter repetidamente a satisfação do cliente [20].

### 2.4.1. Lean

O conceito *Lean Thinking* trata-se de uma filosofia de gestão relacionada com a melhoria contínua dos processos que resultou do Sistema de Produção Toyota (*Toyota Production System*, TPS), criado por Taiichi Ohno em 1988, no Japão, cujo pressuposto é focar na redução de sete desperdícios, sendo esses: a sobreprodução, o tempo de espera, o transporte, o excesso de processamento, o inventário, os movimentos e os defeitos [21]. Assim, o pensamento *Lean* é praticado com os objetivos de alcançar uma maior eficiência produtiva, aumentar a qualidade, reduzir o tempo, minimizar os custos e desenvolver o pensamento e as capacidades da equipa para os alcançar como parte do seu trabalho diário [22].

A ideologia *Lean* possui cinco princípios para a otimização de uma produção, sendo estes [23]:

1. Especificação do valor – este ponto é a base para uma implementação da filosofia *Lean*, sendo que o valor é definido pelos clientes;
2. Identificação da cadeia de valor – depois de identificado o valor, é essencial identificar as atividades que agregam valor ao produto final;
3. Fluxo de valor – os processos devem estar alinhados, de forma a criarem um fluxo contínuo de materiais e informação;
4. Sistema *pull* – sistema de produção onde quem dá a ordem de fabrico é o cliente final e percorrem, no sentido inverso, todo o fluxo de valor;
5. Busca da perfeição – o principal objetivo do *Lean* é a perfeição, ou seja, fazer bem à primeira, conduzindo ao mínimo de desperdício possível.

De uma maneira geral, esta filosofia deve ser vista pelos trabalhadores como uma melhoria no ambiente de trabalho que exige mudança de atitude quer por parte dos colaboradores quer por parte dos gestores;

já o conceito *Lean Manufacturing* encontra-se relacionado com as ferramentas *Lean* que, são vistas como mecanismos para encontrar problemas e não soluções, devendo estar presentes em toda a cadeia de valor [24]. Estas ferramentas incluem análises contínuas (*Kaizen*), produção *pull* (no sentido de *Kanban*) e técnicas à prova de falhas (*Poka-Yoka*) [24].

### ***Kaizen***

*Kaizen* é uma palavra japonesa que significa “mudança para melhor”, sendo um conceito muito aplicado na indústria, mas também em outras áreas de negócio [25]. Este pressupõe a correção rápida de um problema que é pontual, mas necessita de uma ação imediata.

A filosofia *Kaizen* tem como objetivo ser um método mais económico para criar bens e serviços, tendo como propósito final gerar fluxos contínuos de material e informações, utilizando o mínimo de recursos possíveis, minimizando o desperdício, a irregularidade e a irracionalidade.

Segundo *Kaizen*, o trabalho trata-se de um conjunto de processos e todos os processos podem ser melhorados - posto isto, a base para a resolução de problemas assenta no próprio trabalho que, se encontra diretamente relacionado com os custos e lucros da empresa, sendo a missão satisfazer as necessidades dos clientes.

### ***Kanban***

*Kanban*, em japonês, significa “sinal visual” e, tal como o nome indica, trata-se de um método relacionado com a gestão visual que é utilizado, muitas vezes, para sinalizar etapas dos processos [26].

O sistema *Kanban* assenta no princípio de gestão de toda a produção nas diferentes etapas de uma operação industrial. O seu objetivo é conhecer a quantidade exata necessária de ser produzida, consoante o pedido do cliente, com o objetivo de eliminar o desperdício e evitar a produção em excesso.

Esta ferramenta *Lean* tem como benefícios o facto de que todos os colaboradores conhecem as prioridades que se encontram relacionadas com a produção, o que, conseqüentemente, permite uma melhoria do processo, tornando-o mais eficiente, pois não há a necessidade de esperar por novas instruções; e, também possibilita a redução do desperdício, quer pela diminuição do *stock* quer pelo impedimento de excesso de produção [27].

### ***Poka-Yoka***

Do japonês, *Poka-Yoka* significa “à prova de erros”, tratando-se de qualquer mecanismo no processo de produção *Lean* que impeça o aparecimento de erros [28].

Este método tem como objetivo a eliminação de defeitos no produto, pela garantia das condições corretas antes que um procedimento seja executado e pela comunicação constante de erros conforme estes vão surgindo. Assim, as maiores vantagens da utilização desta ferramenta *Lean* são a facilidade com que esta reduz riscos, custos, desperdícios e a possibilidade de contribuir para processos mais eficientes [29].

## **2.4.2. Ferramentas da qualidade**

A qualidade é um dos fatores de decisão mais importantes no que diz respeito à seleção de produtos e serviços. Assim sendo, a qualidade é um elemento chave no sucesso de qualquer negócio, levando ao crescimento e ao aumento da competitividade das empresas, além de melhorar o ambiente de trabalho.

Deste modo, é essencial recorrer a técnicas que permitam a garantia da qualidade. Por efeito, surgem as ferramentas da qualidade que são definidas como um conjunto de metodologias utilizadas para definir, medir, analisar e resolver problemas que surgem e que têm relação com o conceito de qualidade, auxiliando na tomada de decisões [30].

### 2.4.2.1. Folha de verificação

A folha de verificação, ou *checklist*, é uma ferramenta da qualidade simples, mas muito útil, pois trata-se de um formulário que tem como objetivo coletar facilmente informações necessárias que têm de ser, posteriormente, analisadas [31].

Na indústria, este método de verificação é frequentemente utilizado para verificar a distribuição de determinados processos de produção, verificar a frequência de situações, bem como localizar e classificar defeitos.

A folha de verificação é uma ótima ferramenta para identificar causas dos problemas e a frequência com que estes ocorrem, sendo útil, também, para a recolha de dados, tratando-se de uma ferramenta organizada e padronizada que é fácil de ser interpretada - possibilitando uma análise inicial para, posteriormente, ser investigado, de forma mais profunda, problemas e soluções; contudo, trata-se de um processo lento, caso estejamos perante uma amostra muito extensa.

Na CLiPER, as folhas de verificação encontram-se presentes em todas as secções, sendo um poderoso auxílio aos registos que têm de ser efetuados pelos colaboradores, como, por exemplo, os registos de paragens durante o turno.

No decorrer do trabalho, também se procedeu à elaboração de folhas de verificação, quer para acrescentar a algumas secções do processo produtivo, quer na base de dados construída de raiz para controlo estatístico da produção.

### 2.4.2.2. Histograma

O histograma é um gráfico de barras que surgiu em 1895 pelo matemático Karl Pearson, sendo também conhecido como distribuição de frequência, uma vez que representa a população de valores obtidos, facultando uma boa representação para efetuar estimativas de posição, dispersão, assimetria e forma da distribuição dos valores apresentados. [32].

O uso deste tipo de representação tem como objetivo a visualização da distribuição de um grande conjunto de dados de forma clara e objetiva, podendo ser útil em diversas situações distintas, auxiliando na previsão do desempenho futuro dos processos.

Graficamente, o eixo horizontal do histograma corresponde à característica em análise; cada uma das barras representa a frequência de valores dentro dessa classe; e o eixo vertical representa a quantidade ou frequência absoluta com que o valor de cada classe ocorre no conjunto de dados.

No presente estudo recorreu-se à histogramação para comparar resultados e resumir grandes conjuntos de dados de forma visual, facilitando a comunicação das informações obtidas.

### 2.4.2.3. Diagrama de pareto

O diagrama de pareto foi, originalmente, desenvolvido pelo economista italiano Vilfredo Pareto, no século XIX, com o objetivo de estudar e evidenciar as assimetrias económicas no seu país – surgindo, assim, o Princípio de Pareto que, afirma que “80% das consequências advêm de 20% das causas”; contudo, mais tarde, no início da década de 90, um dos pioneiros em estudos na área da qualidade, Joseph Juran, encontrou um padrão semelhante ao evidenciado por Pareto relacionado com a distribuição dos tipos de defeitos de um determinado produto, comprovando assim, que o comportamento dos problemas é semelhante [33].

Deste modo, o diagrama de pareto passou a ser utilizado em diversas áreas e pode ser definido como uma ferramenta gráfica que tem como função expressar o significado relativo de características, questões ou fontes de problemas por ordem de priorização [33].

Neste tipo de análise, há a distinção entre as questões mais críticas e as menos significantes, focando-se nos tópicos onde a melhoria máxima da qualidade pode ser rapidamente alcançada.

Este diagrama tem o aspeto de um gráfico de barras e representa a contribuição relativa de cada causa para o problema por ordem decrescente de influência ou de ocorrência. A contribuição relativa pode ser baseada em frequência, custo ou qualquer outra métrica de influência. As contribuições são apresentadas na forma de gráfico de barras – e, por vezes, é adicionada uma linha cumulativa para reflexão acerca da contribuição total.

O diagrama de pareto apresenta como vantagens o facto de identificar as principais causas de falhas recorrentes, classificar os problemas por ordem de gravidade - auxiliando, assim, na resolução de problemas prioritários, contribuir para a tomada de decisão pela exposição de informações verdadeiras, possibilitar o alcance de ótimos resultados com recurso a poucas ações e, permitir uma melhor utilização dos recursos; ainda assim, apresenta como desvantagens o facto de não ser uma ferramenta de fácil aplicação - possibilidade de gerar erros durante a aplicação de medidas, não apresentar a gravidade do problemas - mas sim, apenas dados qualitativos, refletir percepções qualitativas - tornando-o não muito útil para resumir soluções quantitativas e, ser uma análise limitada que apenas pode ser usada em alguns casos.

No decorrer do trabalho este tipo de gráfico foi utilizado nos contextos de análise de defeitos e de paragens, com o intuito de verificar quais eram os defeitos e as causas, respetivamente, que se encontravam a ter uma maior influência negativa no processo de fabrico das peças cerâmicas.

#### 2.4.2.4. Indicador de eficiência global do equipamento

O indicador de eficiência global do equipamento (*Overall Equipment Effectiveness*, OEE) foi introduzido por Seiichi Nakajima e trata-se de uma ferramenta muito importante que permite o acompanhamento do desempenho das linhas de produção, possibilitando a compreensão da existência de tendências, bem como a deteção das linhas que se encontram a trabalhar abaixo do pretendido – sendo, assim, possível atuar rapidamente para melhorar o processo produtivo [34].

O OEE é uma métrica fundamental e amplamente utilizada no ramo industrial, visto que, de forma simples e direta, permite mensurar a eficiência dos equipamentos, através da identificação de perdas em produtividade, desempenho e qualidade.

O cálculo do OEE é realizado pelo produto de três fatores relacionados com a eficiência do equipamento – disponibilidade, desempenho e qualidade - e expresso em percentagem, de acordo com a seguinte fórmula:

$$OEE(\%) = Disponibilidade \times Desempenho \times Qualidade \quad (2.2)$$

A disponibilidade diz respeito ao tempo em que o equipamento esteve efetivamente a trabalhar quando comparado ao tempo total que teve disponível para ser utilizado.

A qualidade é o indicador que avalia as perdas geradas na produção do material, pelo que tem em conta o número de peças defeituosas que foram produzidas.

O desempenho ou *performance* avalia a taxa de fabrico relativamente à capacidade máxima de produção.

Os valores destes três índices permitem mensurar as perdas no equipamento, pelo que a identificação destas perdas é considerada a atividade mais importante no processo de cálculo do OEE, dado que a limitação da empresa em identificar as suas perdas impede que a mesma atue no estabelecimento das condições originais dos equipamentos [35].

Assim sendo, o OEE proporciona uma avaliação separada das ações que influenciam a eficiência global do equipamento, pelo que o aperfeiçoamento destas variáveis resulta numa melhoria da qualidade e da produtividade, da redução de custos, da satisfação do cliente, da segurança no trabalho, entre outros.

No presente trabalho, procedeu-se ao cálculo do OEE para as diferentes secções com vista a verificar qual dos fatores se encontrava a influenciar mais negativamente a produção.

O OEE apresenta como vantagens a possibilidade de facilitar a gestão da produção e a tomada de decisão, permitir um melhor aproveitamento dos equipamentos existentes, assim como a identificação de problemas de forma simples, rápida e objetiva - contribuindo para uma redução dos custos operacionais; contudo, trata-se de um método pouco abrangente, o que o torna ineficiente em caso de envolvimento de vários equipamentos e, pouco específico, não considerando interações além do equipamento.

#### 2.4.2.5. Fluxograma

O fluxograma surgiu em 1921 através de uma apresentação do engenheiro Frank Gilberth e consiste na representação esquemática de um determinado processo através de símbolos gráficos que auxiliam na descrição de cada etapa desse mesmo procedimento [33].

O principal objetivo do fluxograma é evidenciar, de forma simples, a sequência detalhada de um processo. Para tal, recorre-se a uma simbologia própria da metodologia.

Esta metodologia é muito utilizada no meio industrial, visto que permite representar, de forma resumida, como um processo funciona e tudo o que nele se encontra envolvido – possibilitando, assim, a identificação de desperdícios e, conseqüentemente, contribuindo para a melhoria da empresa [36].

Na CLiPER o uso do fluxograma está frequentemente patente na documentação relacionada com as instruções de trabalho.

No início do estágio, procedeu-se à elaboração de um fluxograma desde a receção das matérias-primas até à entrega do produto final ao cliente, com o objetivo de facilitar a aquisição de informação detalhada sobre as diferentes etapas de todo o procedimento, nos diferentes sectores.

#### 2.4.2.6. Diagrama de casualidade

O diagrama de Ishikawa, também denominado de diagrama de causa e efeito ou diagrama em espinha de peixe, foi proposto pelo engenheiro químico Kaoru Ishikawa em 1943, tendo sofrido aperfeiçoamento ao longo dos anos seguintes [37].

Este tipo de gráfico pertence às ferramentas tradicionais da qualidade, sendo muito utilizado em ambientes industriais, e consiste num método de análise que permite a identificação de fatores (causas) que estão na origem de determinado(s) problema(s) (efeitos).

As causas dos efeitos podem ser classificadas de acordo com a metodologia “6M” [38]:

- Método: causas que envolvem o método que estava a ser executado no decorrer do trabalho;

- Material: causas que envolvem o material que estava a ser utilizado no decorrer do trabalho;
- Mão-de-obra: causas que envolvem a atitude do colaborador;
- Máquina: causas que envolvem a máquina que estava a operar no decorrer do trabalho;
- Medida: causas que envolvem os instrumentos de medida, como a calibração;
- Meio ambiente: causas que envolvem o meio ambiente em si e o ambiente de trabalho.

Para a elaboração de um diagrama de Ishikawa, as seguintes etapas devem ser executadas [38]:

1. Definição do objetivo a ser estudado e propósito final;
2. Estudar para entender todo o processo envolvido;
3. Reunir todas as informações úteis, seja através de observação, documentação e/ou reuniões com todas as pessoas envolvidas;
4. Organizar as informações recolhidas, agrupando-as em causas «6M»: a mão-de-obra, método, material, medida, meio ambiente e máquina;
5. Construir o diagrama de acordo com a situação atual;
6. Determinar o que é mais importante com vista a alcançar o objetivo que se pretende atingir.

Esta excelente ferramenta de sistematização de causas e efeito é muito útil, apresentando duas grandes vantagens: o facto de poder ser aplicada a quase todos os projetos de melhoria e, ainda, o facto de o diagrama proporcionar uma conexão visual entre o efeito observado e todos os possíveis fatores que contribuem para o mesmo [39].

O diagrama de causalidade apresenta como vantagens o facto de ser uma ferramenta visual objetiva e transparente, o que facilita a visibilidade dos problemas e análises futuras; organiza as ideias geradas num *brainstorming*, estimulando o trabalho em equipa; hierarquiza as causas encontradas; e, chega às soluções que possibilitam a diminuição de ocorrência do problema. No entanto, existem, também, alguns inconvenientes associados a esta ferramenta, como a falta de critério para definir o problema e as suas causas, seguindo um paradigma de categorização; e não apresenta quadro evolutivo ou comparativo histórico.

No diagrama, existe uma linha central horizontal (representativa da coluna central) que leva à consequência em estudo; dela partem espinhas principais que traduzem as causas primárias do problema e as ramificações dessas espinhas representam as causas secundárias - permitindo, assim, conseguir obter uma noção das causas reais e específicas do que está a causar aquele efeito.

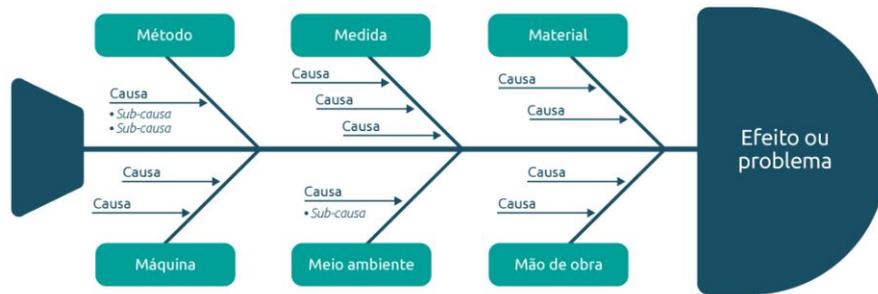


Figura 2.38.: Esquema representativo de um exemplo do diagrama de causalidade. Para a construção do diagrama de Ishikawa é necessário, primeiramente definir o problema a ser estudado; seguidamente realizar um *brainstorming* para levantar as possíveis causas que possam estar na origem do problema, dividindo-as por categorias; e, por fim, determinar os fatores que levaram ao acontecimento daquela causa.

### 2.4.2.7. Ciclo da qualidade

O ciclo *Plan-Do-Check-Act* (PDCA), também conhecido como o ciclo de Deming ou ciclo da qualidade, figura 2.39, é uma ferramenta de gestão direcionada à melhoria contínua que, auxilia o diagnóstico de problemas, no mapeamento para sua posterior resolução e estabelecimento de novos padrões. Com este tipo de metodologia, pretende-se alcançar de forma mais eficaz o aperfeiçoamento de processos e métodos. Este tipo de estratégia de resolução de problemas é um dos mais conhecidos, sendo empregue numa variedade de situações, fazendo já parte da Norma ISO 9001 : 2015 [40].

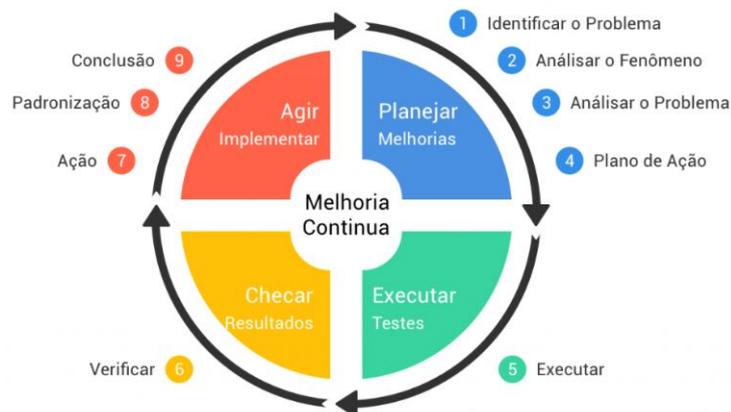


Figura 2.39.: Esquema representativo do ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*). A azul encontra-se a fase inicial do planeamento onde há a definição das metas e dos objetivos; a verde a fase de execução que diz respeito ao estabelecimento de um plano de ação; a amarelo a fase de verificação que corresponde à implementação do plano de ação; e, a laranja a fase de ação que reflete a ação em si.

As etapas do ciclo têm como objetivo auxiliar na solução de problemas, começando por um planeamento, seguido da execução das ações e, posterior, verificação da eficácia das mesmas, findando na padronização. O ciclo PDCA, como um ciclo que é, não tem fim, pelo que deve ser continuado indefinidamente com o foco de um progresso contínuo [41].

As etapas básicas que compõe esta ferramenta são quatro, sendo que, cada uma delas, pode ser dividida em tarefas essenciais para a resolução de problemas, passo a passo [40]:

1. **Planeamento (*Plan*):** é a primeira etapa do ciclo PDCA, tendo como objetivo o diagnóstico dos problemas através da reunião de todos os dados essenciais. Em seguida, a equipa deve determinar as causas fundamentais dos problemas encontrados para projetar uma abordagem possível de ser executada e testada. Também é importante tentar compreender as expectativas dos clientes, uma vez que estes são prioridade para as empresas. Torna-se, assim, necessário, a formação de uma equipa multidisciplinar e multifuncional, uma vez que são várias as tarefas a serem desenvolvidas e realizadas com vista a atingir um objetivo geral. A fase do planeamento é a que leva mais tempo, em razão da necessidade de descrever muito detalhadamente o problema, bem como localizá-lo, avaliar as suas principais causas e criar soluções para o resolver.
2. **Execução (*Do*):** o objetivo da fase de execução, tal como o nome indica, é colocar o plano elaborado na etapa anterior em prática. Todas as ocorrências inesperadas, os ensinamentos e as informações obtidas devem ser consideradas e documentadas.
3. **Verificação (*Check*):** a etapa de verificação tem o intuito de verificar, testar e determinar se as soluções implementadas anteriormente produziram os resultados esperados e adequados. Nesta fase, são feitas medições e os resultados são comparados com os valores do plano. Caso as respostas obtidas sejam consideradas adequadas, segue-se a etapa de ação; caso contrário, se os resultados não forem os esperados, deve-se voltar ao início do ciclo e repetir as etapas de planeamento e execução, pois são as etapas críticas no processo.
4. **Ação (*Action*):** na etapa ação, são utilizadas as soluções implementadas que provocaram os resultados pretendidos no processo, demonstrados na etapa anterior. Assim, inicia-se a padronização e monitoramento das ações. Neste procedimento, são definidos de forma criteriosa os métodos de resolução dos problemas identificados, bem como os responsáveis pela sua execução, para que, desta forma, toda a documentação necessária seja cumprida e sejam transmitidas as novas instruções de forma clara aos funcionários.

O ciclo PDCA apresenta como vantagens a efetividade, alcançando um maior desempenho nos projetos, tarefas e processos - levando a um aprimoramento contínuo dos processos, a reduções de custos e sendo possível de ser aplicado a situações ilimitadas; contudo, apresenta como desvantagens o facto de que, uma má análise e planeamento, logo nas etapas iniciais, vai comprometer o fracasso da sua implementação, não produzindo nenhum resultado benéfico para a empresa.

#### 2.4.2.8. Análise SWOT

A análise SWOT (*Strengths, Opportunities, Weaknesses and Threats*)<sup>14</sup> é uma técnica de planeamento estratégico que é utilizada com o objetivo de avaliar os pontos internos fortes e fracos de uma empresa, bem como as ameaças e oportunidades externas [42].

A análise interna é realizada com vista a descobrir os recursos, habilidades, competências essenciais e vantagens competitivas da organização; já a análise externa pretende encontrar possibilidades e riscos de mercado, tendo por base a examinação dos recursos dos rivais, o ambiente industrial e o ambiente geral [43].

<sup>14</sup>Ou, em português, FOFA (pontos Fortes, Oportunidades, pontos Fracos e Ameaças).

Assim, esta análise diz respeito a um sistema simples para posicionar ou verificar a posição estratégica de uma organização num ambiente em questão – deste modo, tem como objetivo incentivar a organização a compreender os seus ambientes interno e externo para, então, determinar a sua estratégia [44].

Numa matriz SWOT, há o cruzamento entre as oportunidades e ameaças dentro do ambiente externo da organização com os pontos fortes e fracos existentes no ambiente interno dessa mesma organização, representando, assim, a situação organizacional da empresa.

Esta ferramenta auxilia o gestor a ter noção da posição da empresa no mercado atual, proporciona a identificação de melhorias nos mais variados níveis da organização, serve de apoio à tomada de decisão, reduz ameaças e oferece oportunidades e, ainda, possibilita a análise das estratégias realizadas; porém, representa apenas uma pequena etapa de todo o processo que é o planeamento, necessita de ser realizada uma investigação mais complexa para a tomada de decisões relativamente a outras ferramentas e não possibilita a priorização de problemas.

Na CLiPER, o contexto da organização é entendido de forma abrangente, englobando os fatores internos e externos que podem afetar o propósito da organização, a sua intenção estratégica e a sua capacidade de alcançar os objetivos do SGQ – isto é, objetivos associados à conformidade nos produtos e serviços fornecidos ao cliente, bem como a satisfação do cliente em relação aos seus requisitos. Por essa razão, anualmente, o Diretor Geral tem a função de reunir os responsáveis dos processos e promover a sua participação na elaboração de uma análise SWOT com a finalidade de identificar os fatores internos e externos que afetam a organização.

A análise SWOT realizada na CLiPER permite identificar, tanto no plano interno como no plano externo, quais as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças que, no momento da análise, são importantes e condicionam as decisões da gestão de topo, sendo nessa mesma ocasião que, é decidido quem são as partes interessadas relevantes e que são identificados quais são os seus requisitos. Esta análise é estendida aos processos da “cadeia de valor” da empresa, ou seja, desde o aprovisionamento, passando pelo processo produtivo e finalizando com o cliente.

#### 2.4.2.9. Análise FMEA

A análise FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*)<sup>15</sup> é uma metodologia que surgiu em 1949, numa abordagem relacionada com um procedimento militar e, permite identificar e analisar possíveis falhas, prevenindo erros no processo ou produto. O uso correto deste tipo de técnica numa organização permite a melhoria contínua e a redução de custos [45].

O uso da análise FMEA tem como objetivo determinar o modo de falha de um produto ou processo, sendo este composto por três elementos: efeito, causa e deteção. Após a identificação das falhas, estas são classificadas de acordo com a criticidade dos seus efeitos e a sua probabilidade de ocorrência para que, conseqüentemente, sejam atribuídas ações corretivas a cada uma delas com o propósito de reduzir o risco de erro ou de corrigir antecipadamente possíveis falhas [46].

A atribuição de um valor a cada modo de falha varia de 1 a 10, de acordo com um índice de risco crescente.

Este método é regularmente utilizado no meio industrial, pois demonstrou ser uma ferramenta útil no que diz respeito a garantir segurança e eficiência nos produtos e nos processos – sendo, por isso, aplicado sobre

<sup>15</sup>Ou, em português, AMFE (Análise de Modos de Falha e seus Efeitos).

as falhas de produtos, ou seja, sobre os produtos que não seguem o padrão e as especificações definidas para os mesmos; e, sobre as falhas de processos, ou seja, sobre os erros que são identificados após observação das não conformidades dos produtos. A análise FMEA possibilita o desenvolvimento de um método de trabalho, contribui para a integração dos departamentos envolvidos e aumenta a qualidade dos processos e/ou produtos; contudo, não é útil para sistemas onde podem ocorrer falhas simultâneas, uma vez que não apresenta a causalidade nem a correlação entre as diversas falhas.

Esta ferramenta trata-se de uma análise simples que identifica e avalia os modos de falha<sup>16</sup>, mas, ainda assim, é um processo lento na medida em que necessita do envolvimento de vários profissionais.

Na CLiPER é elaborada uma matriz de gestão de risco de acordo com a Análise FMEA, onde são analisados e avaliados os riscos. A decisão de implementação de ações para reduzir os efeitos indesejáveis é tomada tendo em conta o impacto que os riscos têm nos resultados do SGQ, uma vez que estes influenciam a capacidade de fornecer produtos e serviços conformes, bem como satisfazer os clientes.

#### 2.4.2.10. Tempestade de ideias

*Brainstorming*, ou tempestade de ideias, é uma técnica que permite reunir um grupo com o objetivo de estimular o surgimento de ideias e, conseqüentemente, extrair possíveis soluções para os problemas encontrados. Deste modo, é conveniente que a sessão de *brainstorming* envolva vários participantes que sejam ativos na empresa e que demonstrem perspectivas diferentes, sendo esta pluralidade de ideias o pilar desta metodologia [31].

De acordo com a teoria do pensamento criativo, a melhor forma de chegar a uma ideia brilhante é ter muitas ideias e, é aqui que assenta o conceito de *brainstorming* que, tem em conta todas as ideias, desprovidas de críticas, uma vez que todas elas podem ser lapidadas com vista ao surgimento de uma solução criativa para a resolução do problema em questão [31].

O *brainstorming* oferece inúmeras ideias num curto intervalo de tempo, levando ao surgimento de soluções para os problemas - viabilizando, assim, um efeito positivo na produtividade das equipas (valorização dos colaboradores), melhoria no ambiente de trabalho e otimização da comunicação interna; embora apresente como desvantagens o facto de que, se as reuniões não forem devidamente organizadas, podem levar a uma desordem total, pelo surgimento de demasiado pensamento de grupo e poucas ideias originais e conversas dominadas por poucas pessoas levando à não participação das restantes.

Na CLiPER, por exemplo, esta técnica é utilizada em reuniões semanais que decorrem em conjunto com os responsáveis das várias secções de produção.

#### 2.4.2.11. Metodologia 5S

“Consciência por si só não basta. Para mudar, o Homem precisa da vontade”, foi este o pensamento que se manifestou nos japoneses que decidiram criar a Metodologia 5S, tendo esta surgido em meados do século XX no Japão, tornando-se um dos instrumentos mais eficazes do *Lean Manufacturing*. O seu princípio é melhorar de forma constante o ambiente de trabalho, através do empenho dos colaboradores em organizar, limpar e padronizar – resultando, assim, num espaço mais eficiente e com qualidade elevada [47].

<sup>16</sup>Os modos de falha são ordenados por probabilidade de ocorrência e por gravidade e englobam três fatores: índice de gravidade, nível de ocorrência e probabilidade de deteção de falha - que possuem o mesmo peso para o cálculo de risco.

O nome 5S resulta das iniciais de cinco palavras japonesas que correspondem aos cinco princípios fundamentais da organização: *Seiri* (senso de utilização, arrumação, organização e seleção), *Seiton* (senso de ordenação, sistematização e classificação), *Seiso* (senso de limpeza, zelo), *Seiketsu* (senso de asseio, higiene, saúde e integridade) e *Shitsuke* (senso de autodisciplina, educação e compromisso) [48].

O fundamento desta técnica assenta em três dimensões: física (*layout*), intelectual (realização de tarefas) e social (relacionamentos) – encontrando-se estas inter-relacionadas e dependentes umas das outras. Por essa razão, alguma alteração que ocorra numa delas, provoca uma reação nas outras [49].

A metodologia 5S permite uma melhoria no ambiente de trabalho, facilita a identificação de problemas, proporciona um maior controlo do stock - reduzindo, assim, o tempo de procura pelos objetos necessários, contribui para o aumento da produtividade e, conseqüentemente, facilita o alcance dos objetivos; contudo, a aceitação por parte dos colaboradores para a adoção deste método é um processo complicado, uma vez que se trata de uma prática que busca constantemente a qualidade e requer excelentes práticas de trabalho.

A CLiPER adotou a Certificação 5S em toda a sua organização.

## 2.5. Controlo estatístico do processo

O controlo estatístico do processo consiste no uso de um conjunto de métodos estatísticos com o objetivo de avaliar e acompanhar processos, permitindo o seu diagnóstico e controlo.

Esta ferramenta, aliada a uma boa gestão interna, é muito útil, pois permite detetar problemas e prevenir os que possam vir a surgir, auxiliando, assim, numa resolução mais eficaz – o que permite o aumento da produtividade e a redução do desperdício [50].

Na CLiPER, sempre existiram registos diários que são preenchidos pelos colaboradores de todas as secções do processo produtivo, desde as matérias-primas até ao produto final; contudo, os dados destes registos não sofriam qualquer tipo de tratamento, pelo que os responsáveis apenas se focavam em certos valores muito redundantes e sem significado. Assim, um dos objetivos do presente trabalho, que é discutido em pormenor no próximo capítulo, consistiu na criação de uma base de dados para acompanhamento de todo o processo de fabrico. Com esta nova ferramenta, é possível introduzir os dados que são registados, tratá-los estatisticamente e, posteriormente, gerar relatórios diários, semanais, mensais e anuais que são enviados para todos os responsáveis da empresa.

### 2.5.1. Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) é uma ferramenta estatística que permite, com base na avaliação da variabilidade das distribuições, inferir o efeito de fatores ao detetar eventuais desvios de posição entre níveis do fator em estudo.

Neste tipo de técnica realiza-se um teste de hipóteses que tem como objetivo testar a igualdade entre duas médias. Existem dois tipos de hipóteses: nula e alternativa. A hipótese nula ( $H_0$ ) refere que as médias populacionais são iguais (sem efeito do tratamento); contrariamente, a hipótese alternativa ( $H_1$ ) refere que as médias populacionais são diferentes (existe efeito do tratamento).

Na ANOVA, os dados amostrais separam-se em grupos segundo uma determinada característica (factor<sup>17</sup>).

A análise de variância pode ser de fator único ou fator duplo. A ANOVA de fator único contém uma única variável independente e trata-se de uma análise de variância simples dos valores de dois ou mais grupos; já

<sup>17</sup>Característica que permite distinguir diferentes populações umas das outras, contendo cada factor dois ou mais grupos.

a ANOVA de fator duplo é aplicada quando coexiste um efeito simultâneo de dois fatores.

### 2.5.2. Análise multivariada

O recurso a métodos estatísticos é fundamental no setor do controlo de qualidade de processos industriais, uma vez que estes permitem auxiliar o gestor da qualidade a detetar e identificar anomalias permitindo minimizar as faltas de conformidade, contribuindo na manutenção e melhoria dos processos produtivos. Contudo, devido ao seu elevado grau de complexidade, a estatística convencional, muitas vezes, não consegue ser uma ferramenta muito útil para ser usada em tempo real na avaliação dos parâmetros da qualidade na resposta da produção. Com o intuito de enfrentar esta complexidade acrescida de um sistema com inúmeras variáveis de controlo e diferentes respostas foi desenvolvida a análise multivariada que permite, de uma forma integrada, por exemplo, representar os sistemas em poucas dimensões (ex.:  $2D$  ou  $3D$ ), reconhecer e representar similaridades encontradas no processo, classificar amostras em grupos e descrever as respostas através de modelos multivariados, podendo, ainda, evidenciar a relevância de fatores e suas eventuais interações. As abordagens multivariadas mais frequentemente utilizadas na área do controlo da qualidade são a análise de componentes principais, a análise de agregados e a modelação multivariada [51].

Para se poder efetuar uma análise multivariada adequada, alguns pressupostos têm de ser seguidos, sendo os mais importantes a rastreabilidade<sup>18</sup>, a ausência de omissões<sup>19</sup> e a ausência de valores anómalos<sup>20</sup>. Esta informação numérica tem de ser devidamente organizada em matrizes de forma a preservar e combinar a informação relativa à identidade da amostra (circunstância processual) e resultados obtidos (respostas medidas) em relação ao conjunto de variáveis em estudo.

A forma mais simples de efetuar esta combinação é através da sistematização da informação em matrizes de valores – cada amostra corresponde a uma linha da matriz e cada coluna corresponde a cada variável processual ou resposta em estudo. Em termos de notação matemática, a matriz global de dados,  $D(n \times m)$  pode ser vista como resultado da concatenação de duas sub-matrizes,  $X(n \times p)$  que contém toda a informação relativa a matérias-primas incorporadas e condições do respetivo processo de fabrico, e  $Y(n \times r)$  que contém a qualidade do processo e das peças cerâmicas que se pretendem otimizar. Deste modo, quando necessário, é possível analisar, de forma independente, quer o sub-espço dos preditores ( $X(n \times p)$ ) ou das respostas ( $Y(n \times r)$ ) ou, de forma integrada ( $D(n \times m)$ ,  $m = p + r$ ) toda a informação, garantindo a rastreabilidade da informação.

Neste estudo, foi efetuada uma avaliação inicial do processo com vista à identificação do máximo de variáveis que se encontram envolvidas no processo produtivo e que possam explicar a influencia que possam ter na qualidade dos produtos.

Assim, o estudo foi realizado seguindo três etapas: a primeira foi a identificação de eventuais parâmetros da produção que pudessem estar relacionados com a qualidade das peças cerâmicas; a segunda foi a recolha e armazenamento sistemático de dados, através de diversas medições e ensaios às diferentes peças cerâmicas de porcelanato das diferentes referências e formatos; e, por fim, a terceira e última etapa correspondeu ao tratamento dos dados estatisticamente e sua análise conjunta.

<sup>18</sup>Garantir a correta correspondência e identificação de valores.

<sup>19</sup>Não pode haver falta de informação em nenhuma das amostras em análise.

<sup>20</sup>Não pode haver valores demasiados discrepantes e completamente aleatórios.

### 2.5.2.1. Análise exploratória de dados

A análise multivariada não supervisionada possibilita a observação de padrões, tendências e comportamentos do conjunto de dados que se pretende analisar.

#### a) Análise de componentes principais

A análise de componentes principais (*Principal Component Analysis*, PCA) permite compactar a informação contida num sistema multivariado em poucas contribuições tornando possível a representação da situação em análise em gráficos bi- e/ou tri-dimensionais ou matrizes de gráficos bidimensionais. No sentido de obter um resultado simples e independente, este algoritmo requer um prévio pré-processamento das variáveis. A operação mais simples consiste na centragem (anulamento da média de cada variável) mas, no caso de haver uma grande disparidade de ordens de grandeza nas variáveis recomenda-se a normalização (anulamento da média e escalamento unitário da respetiva variabilidade). A análise PCA permite decompor a matriz de valores ( $D_{(n \times l)}$ ) em

$$D_{(n \times l)} = S_{(n \times f)} \cdot L_{(f \times f)} \cdot Q_{(f \times l)}^T + E_{(n \times l)} \quad (2.3)$$

onde  $Q_{(f \times l)}^T$  representa a matriz de *loadings*<sup>21</sup>,  $L_{(f \times f)}$  a matriz de valores próprios<sup>22</sup>,  $S_{(n \times f)}$  a matriz de *scores* e  $E_{(n \times l)}$  corresponde à matriz de erro que contém a informação residual do sistema que não foi descrita através das  $f$  ( $f < l$ ) componentes principais selecionadas.

#### Matriz de projeto

Tendo uma base de dados genérica  $D_{(n \times m)}$  com  $n$  amostras e  $m$  variáveis, a matriz de projeto corresponde ao produto matricial

$$A_{(m \times m)} = D_{(m \times n)}^T \cdot D_{(n \times m)} \quad (2.4)$$

onde  $D^T$  corresponde à matriz transposta da base de dados.

Esta matriz de projeto pode ser uma matriz de covariância<sup>23</sup> ou de correlação<sup>24</sup> e serve para o PCA avaliar a variabilidade do sistema em análise (informação contida na base de dados a analisar), possibilitando o cálculo dos valores próprios ( $\lambda$ )<sup>25</sup>. Estes valores traduzem a quantidade de informação decomposta em cada componente de variabilidade e são muito importantes para definir o número mínimo de componentes relevantes necessárias a maximizar a informação recolhida.

#### Seleção das componentes principais

Após a decomposição da matriz de projeto é feita a avaliação das componentes principais. Inicialmente, os valores próprios são ordenados por ordem decrescente e, de seguida, existem três métodos usualmente utilizados para selecionar as componentes principais mais relevantes: critério de Pearson, critério de Kaiser e representação gráfica do decaimento dos valores próprios com o número de componentes (*Scree plot*).

<sup>21</sup> Coeficientes que expressam a contribuição relativa de cada variável original no sub-espaco dos fatores latentes encontrados pelo algoritmo PCA.

<sup>22</sup> Refletem a quantidade de informação que cada fator latente (componente principal) consegue descrever.

<sup>23</sup> Matriz quadrada simétrica onde os elementos que se encontram nas diagonais contêm as variâncias das variáveis e os elementos fora da diagonal contêm as covariâncias entre todos os pares de variáveis possíveis. Esta matriz surge no caso de as variáveis terem sido previamente centradas na respetiva média.

<sup>24</sup> Matriz quadrada simétrica cujos elementos são valores de correlação de Pearson que medem o grau de relação linear entre cada par de variáveis, podendo estes variar de -1 a 1. Esta matriz surge no caso de cada variável ter sido previamente centrada na média e escalada com a respetiva variabilidade.

<sup>25</sup> Valores obtidos a partir das matrizes de projeto cujo objetivo é obter um conjunto de vetores independentes, não correlacionados, que expliquem o máximo da variabilidade dos dados - indicando o total da variância causado por cada fator (componente principal).

O critério de Pearson, ou regra dos 80%, considera que para representar o sistema é suficiente reter o número de componentes mínimas que descrevem, pelo menos, 80% da informação.

O critério de Kaiser assume que o número de contribuições relevantes são aquelas que se encontram acima da média. No caso de se optar por uma matriz de correlação, a média igual a 1, uma vez que estamos perante variáveis padronizadas; já caso se opte por uma matriz de covariância, é necessário proceder à normalização dos valores próprios ( $\lambda^*$ ).

Na representação gráfica do decaimento dos valores próprios em função no número de factores (conhecido por *Scree plot*) procura-se um número de quebra em relação à tendência basal, correspondendo essa quebra ao número de componentes a analisar.

## b) Análise hierárquica de agrupamentos

A análise hierárquica de agrupamentos (*Hierarchical Cluster Analysis*, HCA) permite, de uma forma não-supervisionada, construir um diagrama de associação (dendrograma) que organiza as amostras em análise segundo a sua relativa similaridade. Como regra de associação usa-se geralmente um critério de similaridade como, por exemplo, a correlação, contudo, também se pode usar uma medida de “dissimilaridade” na formação dos agregados – a distância Euclidiana num espaço multidimensional tem sido usada com sucesso para estabelecer estas comparações.

### Cálculo da distância

O primeiro passo para a construção do dendrograma é determinar as distâncias entre os objetos que, posteriormente, irão criar os agregados.

A matriz de distância Euclidiana é a mais utilizada, sendo esta dada pela distância mínima entre dois pontos. A sua fórmula é dada por:

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (2.5)$$

onde  $x_i$  e  $x_j$  correspondem a vetores de valores reais de dimensão  $m$ .

### Método de associação

O método de associação também é um dos passos que necessita de ser realizado para a construção do HCA - tratando-se do modo como ocorre a ligação de um objeto a um *cluster* já existente ou a ligação de um *cluster* a outro de acordo com a similaridade.

Os tipos mais comuns de métodos de ligação são a ligação simples (*single linkage*, SL), que define que a medida de similaridade entre dois *clusters* é definida pela menor distância de qualquer ponto do 1º *cluster* para qualquer ponto do 2º *cluster*; a ligação completa (*complete linkage*, CL), que estabelece que a medida de similaridade entre dois *clusters* é definida pela maior distância de qualquer ponto do 1º *cluster* para qualquer ponto do 2º *cluster*; a ligação pela média das distâncias (*average linkage*, AL), que determina que a proximidade entre dois *clusters* é a média aritmética de todas as proximidades entre os objetos de um, de um lado, e os objetos do outro, do outro; e ainda, a ligação *Ward* (*Ward linkage*, WL), ou método da mínima variância, que estabelece que a medida de distância entre dois *clusters* é a soma das distâncias ao quadrado entre os dois *clusters*.

### 2.5.2.2. Modelação multivariada

A modelação multivariada permite evidenciar, de uma forma independente, o efeito de variáveis relevantes que contribuem, de forma autónoma ou combinada, para o conjunto de respostas em estudo. Este conjunto de abordagens matemático-estatísticas estabelece, por via funcional, um modelo capaz de descrever e prever a resposta em estudo. Através dos coeficientes do modelo pode-se inferir o impacto de cada variável sobre a resposta e, deste modo, avaliar o efeito direto ou combinado sobre a resposta.

Há duas perspetivas distintas de efetuar a modelação de sistemas multivariados – por modelação explícita e por modelação implícita.

O método de mínimos quadrados multivariado (*Multivariate Ordinary Least Squares*, MOLS) recorre a funções do tipo polinomial multivariado com grau variável para definir o modelo explícito de ajuste. Esta abordagem polinomial tem as vantagens de conferir uma adequada perspetiva estatística, utilizar funções lineares (polinómios) que fornecem suporte estatístico e apresentar uma forma funcional de maneira a que facilita o entendimento da causa (preditores) sobre o efeito (resposta); contudo, depende dos graus de liberdade pelo que pode conduzir a dificuldades de estimativa quando o número de variáveis é muito elevado comparativamente ao número de amostras processadas, a multicolinearidade de preditores dificulta a estimativa paramétrica, os sistemas reais com resposta não-linear são difíceis de ser conseguidos com dependências polinomiais, os sistemas reais com interação de factores são difíceis de modelar (aproximação de 2º grau com termos cruzados) e em caso de modelos desconhecido é necessário testar com diferentes modelos (processo iterativo construtivo com retorno).

Uma vez que o MOLS tem dificuldades de convergência e estimativa com sistemas muito complexos, a abordagem a seguir é iterativa e construtiva – recorrendo-se a critérios de diagnóstico de ajuste, tais como os critérios de Akaike (*Akaike Information Criteria*, AIC) ou critério Bayesiano (*Bayesian Informative Criteria*, BIC), equações 2.6 e 2.7, iniciando-se o modelo com apenas uma variável (ou constante) e progredindo-se, sucessivamente, na sua complexidade por inclusão de novas variáveis que permitem minimizar o critério de melhor ajuste (AIC ou BIC).

$$AIC = 2p - 2\ln(\sigma_{fit}) \quad (2.6)$$

$$BIC = p\ln(n) - 2\ln(\sigma_{fit}) \quad (2.7)$$

onde  $n$  corresponde ao número de amostras,  $p$  representa o número de parâmetros do modelo e  $\sigma_{fit}$  corresponde ao desvio-padrão do ajuste, equação 2.8:

$$\sigma_{fit} = \sqrt{\frac{SS}{(n-p)}} \quad (2.8)$$

sendo  $SS$  a soma de quadrados dos resíduos resultante do ajuste da função aos valores experimentais.

A convergência também não costuma ser consensual e, por isso, numa fase posterior, os modelos obtidos serão, de novo, escrutinados através da validação cruzada para eleger o melhor modelo (aquele que não só ajusta bem os valores, como consegue prever melhor novos resultados).

Em oposição, o método de mínimos quadrados parciais (*Partial Least Squares*, PLS) é um método de ajuste implícito<sup>26</sup> que procura usar a informação contida no sub-espço preditor para descrever a resposta em

<sup>26</sup>Segundo este tipo de modelação, o modelo a seguir não é previamente conhecido sob a forma de uma equação explícita.

estudo. Neste caso, não existe um modelo explícito (uma função matemática), mas antes uma combinação linear de variáveis que se manifesta em conjunto para descrever uma determinada resposta – este conjunto de variáveis designa-se, neste caso, de fator latente. Esta abordagem, além de robusta, não apresenta muitas dificuldades de cálculo como acontece com MOLS; contudo, também apresenta algumas desvantagens: não tem suporte estatístico tão bem definido como MOLS e é uma metodologia iterativa (extração de um fator latente de cada vez), sendo necessário o uso de critérios pouco explícitos para estabelecer o número de fatores latentes sem efetuar uma sobre parametrização do modelo. Para além disso, a interpretação do modelo definido com vários fatores latentes dificulta muito a racionalização do fenómeno em causa.

## 2.6. Controlo do processo produtivo

A informação e a forma como esta é tratada é extremamente importante em todas as áreas e, uma vez que a quantidade de dados que é necessário gerir tem vindo a aumentar cada vez mais, é necessário encontrar soluções mais eficientes que permitam uma maior facilidade na obtenção de informação e segurança dos dados.

A necessidade de proceder à gestão de um grande volume de dados com vista a acompanhar todo o processo produtivo de forma indireta, para que desta forma não se prejudique o normal decurso das operações, conduziu à criação de um sistema de gestão de base de dados para o tratamento estatístico do processo produtivo, algo inexistente na CLiPER até ao momento.

Com esta secção pretende-se abordar algumas temáticas relacionadas com os sistemas de informação, a criação de uma base de dados, bem como a sua descrição e metodologia utilizada.

### 2.6.1. Sistema de informação

Um Sistema de Informação (SI) pode ser definido como um conjunto de componentes que se encontram relacionados com o objetivo de recolher, recuperar, processar, armazenar e distribuir informações com a finalidade de facilitar o planeamento, o controlo, a coordenação, a análise e o processo de decisão em organizações [52].

Assim, como todos os sistemas, um SI inclui: uma entrada (*input*) que envolve a recolha de dados em bruto dentro do ambiente que se encontra a trabalhar; um processamento que permite a conversão desses dados brutos numa forma mais útil e apropriada; e, uma saída (*output*) que envolve a transferência da informação processada às pessoas ou atividades que a usarão, isto é, processa as entradas e produz as saídas que são enviadas para o usuário ou para outros sistemas [53].

Atualmente, o uso de um SI com recurso a tecnologia em computadores é cada vez mais frequente, tratando-se de um elemento vital para qualquer empresa ou organização. Um SI informatizado é composto por seis componentes principais: *hardware*, que tem como função processar, armazenar e permitir a visualização dos dados; *software*, que se trata de um conjunto de programas que permite ao *hardware* executar a sua função; pessoas, que são usuários e operadores do *hardware* e *software*; banco de dados, que se trata de uma coleção de dados armazenados e organizados; redes, que é um sistema de ligação que permite o compartilhamento de recursos entre diversos computadores; e, procedimentos, que dizem respeito ao conjunto de instruções que permitem ao sistema executar as suas funções [53].

Existem quatro níveis de classificação dos SI de acordo com as suas respetivas funções: nível operacional, nível do conhecimento, nível de gestão e nível estratégico. O nível operacional fornece suporte aos gerentes

operacionais, no sentido de responder a questões de rotina através do acompanhamento de atividades e transações; o nível do conhecimento auxilia a organização a integrar novas tecnologias, assim como organizar e controlar o fluxo de documentos; o nível de gestão desenvolve atividades de monitorização, controlo e tomada de decisão, destacando-se os sistemas de apoio à decisão e o sistema de informações gerenciais; e, por fim, o nível estratégico está ligado à gerência sénior, sendo capaz de analisar questões estratégicas e tendências da organização e do ambiente externo.

Resumindo, a principal função de um SI é representar o ambiente de uma organização por meio de bases de dados - possibilitando, deste modo, o processamento e apresentação dos dados de forma eficiente a todos os utilizadores. Assim, é de realçar que a implementação correta de um SI traz imensos benefícios para as empresas, visto que permite uma otimização do fluxo de informação e, conseqüentemente, uma possível tomada de decisão mais rápida e adequada em resposta aos problemas que possam surgir [52].

### 2.6.2. Base de dados

Uma base de dados é uma ferramenta capaz de recolher e organizar dados, isto é, armazenar diversas informações respeitantes a um determinado assunto, sendo um componente essencial e central de qualquer sistema de informação [54].

Quando se pretende tratar um elevado número de dados, torna-se difícil o recurso a apenas folhas de cálculo, uma vez que há mais dificuldades em pesquisar, selecionar e compreender os dados devido a inconstâncias e repetições dos mesmos, tornando o trabalho mais limitado e passível de erros. Assim, surge como solução a transferência dos dados para uma base de dados criada por um sistema de gestão de bases de dados.

#### 2.6.2.1. Sistema de gestão de bases de dados

Um Sistema de Gestão de Bases de Dados, SGBD é um conjunto de programas para computador (*software*) que tem a função de gerir a informação que se encontra em uma ou mais bases de dados. Um SGBD implica a criação, gestão, armazenamento e manutenção dos dados; a disponibilização de ferramentas que permitem a atualização, integridade e consulta dos dados; e, ainda, o estabelecimento de medidas de segurança e níveis de acesso à informação. De uma forma geral, são três os componentes de um SGBD: a linguagem de definição de dados, a linguagem de manipulação de dados e o dicionário de dados que, estão relacionados, respetivamente, com a estruturação, a alteração e a descrição dos dados [55].

Um modelo de SGBD define como os dados podem ser armazenados e atualizados numa ou em mais bases de dados, sendo os quatro modelos mais conhecidos: hierárquico, em rede, relacional e orientado a objetos [56].

##### **SGBD hierárquico**

O modelo hierárquico é o mais antigo e representa uma estrutura em árvore invertida, onde cada registo é uma coleção de atributos (campos), pelo que cada um contém apenas uma informação, encontrando-se os registos conectados através de ligações.

##### **SGBD em rede**

As bases de dados em rede possuem uma organização semelhante às do modelo hierárquico; contudo, ao contrário deste, permitem que um mesmo registo esteja envolvido em várias associações, o que cria

conexões bastante complexas, mas também confere uma estrutura mais completa, suportando, assim, uma relação do tipo um-para-muitos.

### **SGBD relacional**

O modelo relacional é um banco de dados que modela os dados de maneira que estes sejam percebidos pelo usuário como relações. As bases de dados relacionais são as mais utilizadas e serão, posteriormente, descritas de forma mais detalhada.

### **SGBD orientado a objetos**

Uma base de dados orientada a objetos representa os dados na forma de objetos, permitindo, aos responsáveis pela sua criação, tratar de todos os aspetos, incluindo as operações que levam à manipulação dos dados. Este tipo de modelo tem a desvantagem de ser de difícil utilização, pelo que o torna menos usual quando comparado às bases de dados relacionais.

## **2.6.2.2. Base de dados relacional**

Atualmente, os Sistemas de Gestão de Base de Dados Relacionais, SGBDR são os mais utilizados.

Uma base de dados relacional encontra-se organizada em tabelas (relações), sendo cada tabela formada por diferentes conjuntos de linhas (registos<sup>27</sup>) e colunas (campos ou atributos). Desta forma, cada registo pode ser composto por um ou mais campos que correspondem às colunas das tabelas. Os registos não necessitam de conter informações em todas as colunas, podendo assumir valores nulos quando necessário - pelo que um registo é considerado uma instância de uma tabela, devendo esta instância ser única para evitar a ocorrência de duplicação de dados [57]. Qualquer tipo de informação que seja igual, só vai ser armazenada uma única vez numa tabela específica - sendo este processo denominado de normalização.

As tabelas relacionam-se entre si por meio de regras de relacionamentos que, consistem em associar um ou vários atributos de uma tabela com um ou vários atributos de outra tabela, por meio de chaves. Uma chave é o conjunto de um ou mais atributos que determinam a unicidade de cada registo. Assim, um SGBDR deve garantir que: cada tabela possui uma chave primária exclusiva, a qual não pode possuir valores nulos; a chave estrangeira, que é usada para se relacionar com duas tabelas, é preservada e refere-se à chave primária de outra tabela; e, por fim, nenhuma coluna possui um valor nulo, isto é, uma célula vazia [58].

### **2.6.3. Microsoft Office Access 365**

O *Microsoft Office Access 365* (MSAccess) é um SGBDR da *Microsoft*, para *Windows*, bastante versátil e poderoso no sentido de que fornece funcionalidades avançadas no que diz respeito ao desenvolvimento de aplicações de base de dados - combinando a gestão de dados e a lógica aplicacional num só ficheiro [59].

Este SGBDR informatizado permite adicionar, editar e eliminar dados, bem como organizar, visualizar e partilhá-los de várias formas diferentes.

Através do *Visual Basic for Applications* (VBA) pode-se programar ferramentas de análise no *MSAccess*. O VBA é uma linguagem de programação interna do *MSAccess* e é vital no que diz respeito a oferecer inúmeras possibilidades de controlo, manipulação e personalização da base de dados.

Relativamente à obtenção de registos de uma base de dados, o *MSAccess* tem como recurso a Linguagem de Consulta Estruturada (*Structured Query Language*, SQL), que permite aceder à informação de uma base de dados relacional e manipular a sua estrutura. O uso de SQL implica a utilização de uma sintaxe correta,

---

<sup>27</sup>Ou tuplos.

isto é, de um conjunto de regras pelas quais os elementos de uma língua são combinados de forma correta. A sintaxe SQL baseia-se na língua Inglesa e utiliza uma série de elementos semelhantes à do VBA. Para além de o SQL ser utilizado para manipular dados, também serve para criar e alterar o design de objetos de base de dados, como tabelas. Neste caso em que o SQL possui essa função, este passa a ser chamado de Linguagem de Definição de Dados, DDL.

Uma base de dados do *MSAccess* possui seis componentes essenciais: tabelas, formulários, relatórios, consultas, macros e módulos.

A principal diferença entre o aspeto de uma base de dados e de uma folha de cálculo estende-se à forma como os dados se encontram organizados. No sentido de obter uma maior flexibilidade e uma menor redundância, os dados pertencentes a uma base de dados são organizados em tabelas, que funcionam como o seu pilar fundamental.

Os formulários no *MSAccess* são objetos através dos quais é permitido estabelecer uma interface de utilizador, conferindo-lhe a possibilidade de adicionar, editar ou visualizar os dados armazenados na base de dados. É possível criar uma base de dados sem recurso a formulários, pois é possível realizar as mesmas funções diretamente nas folhas de dados da tabela; contudo, esta funcionalidade é de extrema importância no que diz respeito a proteger os dados e a assegurar que estes são introduzidos adequadamente, pois dá a possibilidade de acesso à base de dados, sem que estes fiquem comprometidos.

Os relatórios permitem formatar, resumir e visualizar a informação necessária na base de dados. A formatação individual de cada relatório permite a apresentação de informações o mais correto e detalhadamente possível.

As consultas representam objetos que possuem diversas funcionalidades, sendo a obtenção de dados específicos das tabelas a sua principal função. Esta funcionalidade permite a apresentação dos dados que se encontram distribuídos em várias tabelas numa única folha de dados. Existe a possibilidade de adicionar critérios às consultas com o intuito de filtrar os dados e, desta forma, visualizar apenas os registos que se pretendem. Existem três tipos de consultas: a de atualização, que permite a edição dos dados nas tabelas subjacentes através da folha de dados da consulta; a de seleção, que permite obter os dados, disponibilizando-os para utilização; e, a de ação, que desempenha uma tarefa com os dados, podendo ser utilizada para criar novas tabelas, adicionar dados a tabelas existentes e atualizar ou eliminar dados.

As macros no *MSAccess* funcionam como uma linguagem de programação simples que pode ser utilizada para adicionar funcionalidades a uma base de dados, uma vez que estas possuem uma lista de ações que desempenham tarefas mais rapidamente comparativamente com a execução manual das operações.

Assim como as macros, os módulos são objetos que permitem adicionar funcionalidades à base de dados; porém, no caso dos módulos, as ações têm de ser escritas pelo utilizador na linguagem de programação VBA, funcionando como uma coleção de instruções e procedimentos. Existem dois tipos de módulos: o módulo de classe, que normalmente contém procedimentos que são específicos para o formulário ou relatório ao qual se encontram anexados; e, o módulo padrão, que contém procedimentos gerais que não estão associados a nenhum objeto.

#### 2.6.4. Estrutura da base de dados

As bases de dados devem ser desenhadas de forma cuidada e devidamente estruturada com vista a cumprir os objetivos a que estas se propõem, mantendo a integridade dos dados e facilitando o acesso a informações precisas e atualizadas [56].

O processo de estruturação de uma base de dados deve seguir alguns princípios, tais como: evitar dados redundantes, pois estes aumentam a probabilidade de erros e incoerências; e apelar à exatidão e à integridade dos dados, para que sejam obtidas informações fidedignas e válidas e, para que, conseqüentemente, sejam tomadas decisões corretas [57].

Uma base de dados bem estruturada deve: ter as informações divididas por assunto, neste caso, por tabelas, de forma a evitar a redundância dos dados; transmitir ao *MSAccess* as informações precisas, de modo que este seja capaz de associar as informações, mantendo sempre a integridade dos dados; e, corresponder às necessidades de criação de relatórios e processamento de dados [57].



## 3. Metodologia e procedimentos

Neste capítulo aborda-se diversas questões relacionadas com a aquisição e sistematização dos dados bem como respetivos pré-processamentos e análises efetuadas.

### 3.1. Análise de desempenho

Como já foi referido anteriormente, foi necessário criar um sistema de apoio para os dados do processo produtivo da empresa. Em virtude desta situação, recorreu-se ao *Microsoft Office Access 365* [60] a fim de criar e desenvolver um sistema de base de dados relacional apto para tratamento estatístico de toda a informação relacionada com o processo de fabrico da unidade industrial, ver figura 3.1.



Figura 3.1.: Menu inicial do sistema de base de dados relacional da CLIPER Cerâmica.

#### 3.1.1. Recolha de informação

Inicialmente, como auxílio ao projeto da base de dados de raiz, foi construído um diagrama que retratasse visualmente a base de dados. Este passo inicial foi de extrema importância para definir o objetivo, escolher e analisar quais os dados que deveriam ser armazenados e como estes iriam se relacionar entre eles.

Para a construção deste diagrama foi necessário, antecipadamente, proceder à identificação do objetivo, recolher as informações acerca dos registos existentes e conhecer os utilizadores que iriam beneficiar da base de dados. O perfil dos utilizadores é um parâmetro bastante importante na construção de raiz de uma base de dados, principalmente quando esta é bastante complexa, pois cada um irá exercer uma tarefa diferente e, por sua vez, irá precisar de diferentes informações.

### 3.1.2. Construção de tabelas

Após o processo referido anteriormente (subsecção 3.1.1), dividiram-se as informações e criaram-se as respetivas tabelas, introduzindo-se os campos necessários a cada uma delas. Cada tabela contém um identificador (ID), sendo este, geralmente, a chave primária da tabela na qual está inserido. O ID é criado de forma automática pelo programa e tem como função permitir a relação entre tabelas, associando e comparando-as, assim como servir de contador.

### 3.1.3. Definição das tabelas

Toda a informação existente e necessária encontra-se em tabelas, a qual se encontra dividida pelas demais, encontrando-se, por isso, cada tabela associada a um determinado assunto.

Para uma melhor explicação e compreensão, passa-se a dividir as tabelas em dois tipos: tabelas base e tabelas compostas.

As tabelas base compreendem o pilar da base de dados, contendo toda a informação necessária, isto é, são as tabelas fundamentais para a construção das tabelas compostas. Este tipo de tabelas permite evitar a redundância dos dados.

As tabelas compostas são, geralmente, tabelas que se encontram acopladas a um formulário. Este tipo de tabelas armazena os registos que foram introduzidos num formulário, salvaguardando a integridade dos dados.

### 3.1.4. Tabelas base

As tabelas principais, que se encontram na base de toda a base de dados, são as tabelas "formato" e "produtos".

A tabela "formato" é composta pelos campos: tipologia, que se refere à categoria de porosidade de cada item, podendo ser porcelânico (pavimento) ou porosa (revestimento); formato, relativo às dimensões da peça; percentagem de qualidade que refere-se ao valor que é visto como objetivo para a percentagem de 1ª qualidade (92% para pavimento e 90% para revestimento); percentagem de quebras, que se refere ao valor que é visto como objetivo para a percentagem de quebras quer em cru quer em cozido (2.5%); número de peças por área disponível ( $m^2$ ); número de peças por vagona; superfície disponível ( $m^2$ ) por vagona; e, número de saídas por prensa.

A tabela "produtos", tal como o nome indica, contém todos os tipos de produtos existentes na CLiPER. Esta tabela contém os seguintes campos: referência, que diz respeito ao código específico que a empresa atribui a cada produto; descrição, que se trata de uma breve caracterização do produto; e, tipologia, que é o campo que está relacionado ao ID da tabela "formato"<sup>1</sup>.

A base de dados, uma vez que é referente ao processo produtivo, engloba quatro secções: prensas e linhas de vidragem que funcionam como uma só secção<sup>2</sup>, forno, escolha e, por fim, controlo de qualidade. Por essa razão, foi necessário criar as seguintes tabelas base que irão ser solicitadas na construção de tabelas compostas: "equipa", "turno", "linha e escolha", "intervalos de produção", "tipo de escolha", "tipo de qualidade", "tipo de pós", "cadência da escolha" e "cadência da prensa".

<sup>1</sup>O que faz com que o programa, para além de trazer a informação respeitante à tipologia do produto, traga também toda a informação que está associada a uma linha da tabela "formato" para a coluna indicada da tabela "produtos"

<sup>2</sup>A secção de prensagem e linhas de vidragem é, geralmente, assumida na CLiPER como uma só secção na medida em que partilham a mesma passadeira, ou seja, a passadeira é contínua e conduz a peça prensada até ao final da linha de vidragem.

### 3.1.5. Tabelas compostas

As tabelas compostas têm como função armazenar os dados que são introduzidos num formulário que se encontra vinculado.

Os formulários onde são introduzidos os dados tem por base as tabelas base, pelo que vão retomar dados que já se encontram inseridos na base de dados, evitando, assim, a repetição de informação.

Foram criados oito formulários e, conseqüentemente, tabelas compostas, que seriam fundamentais para o acompanhamento de todo o processo produtivo: "planeamento", "produção prensa-linha", "registo de paragens: prensa-linha", "registo: forno", "registo: escolha", "registo de paragens: escolha", "registo de defeitos: controlo de qualidade" e "ordens de fabrico fechadas".

No ponto seguinte, serão abordados cada um dos formulários pormenorizadamente.

### 3.1.6. Introdução de registos através de formulários

No seguimento da linha de produção, das diferentes secções, existem sensores que monitorizam o número de peças, o que permite aos operadores fazer uma leitura dos contadores e registar os valores observados - sendo, esses valores, os introduzidos na base de dados. Assim, é de realçar que os valores inseridos são meramente indicativos; contudo, são de extrema importância, uma vez que conferem a possibilidade de acompanhar praticamente todo o processo produtivo, sem qualquer interferência direta que possa prejudicar a produção, permitindo a atuação imediata em caso de ocorrências de anomalias e, conseqüentemente, implementação de melhorias de forma mais ativa e eficaz.

#### 3.1.6.1. Programa de produção

Inicialmente, como primeira etapa, foi necessário criar um formulário - "planeamento" - onde é possível introduzir o programa de produção.

Este formulário, ver figura 3.2, contém os campos necessários à introdução de: data, número de ordem de fabrico, referência e  $m^2$  planeados. Através da referência, o programa, automaticamente, irá buscar toda a informação relativa à mesma (tipologia, formato, número de peças por  $m^2$ , número de vagonas por  $m^2$ , etc.) e irá armazenar na tabela "planeamento".

Figura 3.2.: Formulário relativo ao planeamento construído na base de dados: é necessária a introdução de dados nos campos referentes à ordem de fabrico, referência e  $m^2$  planeados.

### 3.1.6.2. Secção de prensagem e linhas de vidragem

Seguidamente, foi necessário criar um formulário para introduzir os dados dos contadores relativos à prensagem e vidragem.

Neste formulário, ver figura 3.3, são introduzidos dados (nos espaços em branco) com base em registos de leitura dos contadores por parte dos operadores e, automaticamente, surgem valores (nos espaços a cinzento) - estes valores surgem a partir de informações que a base de dados já armazenou referentes a algum/alguns dado(s) introduzido(s) ou, então, por expressões/instruções impostas para o programa executar cálculos.

Figura 3.3.: Formulário relativo à produção nas secções de prensagem e linhas de vidragem construído na base de dados onde são introduzidos, nos campos a branco, os registos efetuados pelos operadores através da leitura de contadores existentes nestas secções.

Com os valores introduzidos, também houve a possibilidade de se calcularem a percentagem de quebras por prensa-secador (%QPS), por linha (%QL) e totais em cru (%QTC), de acordo com as seguintes equações:

$$\% QPS = \frac{P - S}{P} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\% QL = \frac{S - V}{S} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\% QTC = \frac{P - V}{P} \times 100 \quad (3.3)$$

onde P corresponde ao número de peças prensadas, S ao número de peças secas e V ao número de peças vidradas.

Os operadores também têm o dever de registar os tempos de paragem e, como tal, foram vários os registos lidos com o objetivo de recolher as paragens que mais ocorriam e, assim, seleccionar algumas para serem a base de um novo formulário, ver figura 3.4.

Figura 3.4.: Formulário relativo às paragens das secções de prensagem e linhas de vidragem construído na base de dados onde são introduzidos os tempos de paragens registados pelos operadores consoante a respetiva causa.

O formulário referido indica os tempos de paragens, quer por prensa quer por linha, que mais ocorreram por formato em cada uma das equipas.

Com base nos dados introduzidos, realizou-se o cálculo automático do total de paragens por prensa e por linha (soma de paragens na prensa e soma de paragens na linha, respetivamente) e o total de paragens na secção (soma de total de paragens na prensa e na linha).

Uma vez que é introduzido o tempo do turno que, geralmente, são 480 minutos (correspondente às 8 horas de trabalho) e sabendo o total de tempo de paragens (registado pelos operadores), também foi possível realizar o cálculo do tempo disponível a laborar (TDL), isto é, o tempo que os trabalhadores efetivamente estiveram a laborar, dado por:

$$TDL = TT - TPR \tag{3.4}$$

onde TT corresponde ao tempo do turno e TPR ao tempo de paragens registadas.

### 3.1.6.3. Secção do forno

A secção do forno só possui um sensor inicial, pelo que só é possível saber o número de peças que vão cozer, mas não as cozidas - não sendo possível, assim, o cálculo das quebras que ocorrem exatamente durante a cozedura.

Os dados recolhidos sobre a secção de forno são relativos à área cozida (em  $m^2$ ), ao gás consumido por área cozida (em  $m^3$ ) e ao tempo em que ocorreram paragens no forno, ver figura 3.5.

Figura 3.5.: Formulário relativo à secção do forno construído na base de dados com o objetivo de calcular o gás consumido por área cozida e os tempos de paragens que ocorreram.

### 3.1.6.4. Secção de escolha

Os dados introduzidos acerca da secção de escolha têm por base folhas de estatística geradas pelas máquinas de escolha e registos por parte dos colaboradores.

Recorrendo a esses registos, foi possível introduzir os valores necessários aos campos que constam no formulário da figura 3.6.

Figura 3.6.: Formulário relativo à secção de escolha construído na base de dados onde são introduzidos, nos campos a branco, os registos efetuados pelos operadores através da leitura de contadores existentes nesta secção.

Após a introdução do número de peças referente aos diferentes graus de qualidade e ao caco, o programa converte automaticamente o número de peças por área ( $Pn_k$ , em  $m^2$ ), dado por:

$$Pn_k = \frac{n_k}{N} \quad (3.5)$$

onde  $n_k$  representa o número de peças de acordo com os índices das classes de qualidade atribuídas às peças cerâmicas: 1 para peças de primeira qualidade (sem defeitos), 2 para peças de nível comercial (ligeiros defeitos visuais), 3 para peças de terceira qualidade (defeitos visíveis) e 4 para peças de caco (refugo e peças quebradas que são posteriormente recicláveis); e  $N$  ao número de peças por área disponível ( $m^2$ ).

O número total de área escolhida (em  $m^2$ ) é o resultado da soma dos  $m^2$  de 1ª, comercial, 3ª e caco.

A percentagem de quebras em cozido (%QC) é um parâmetro importante e que merece destaque, pelo que deveria ser calculado neste formulário; contudo, como já referido anteriormente, era necessário haver contadores na secção do forno, para que através da seguinte fórmula, tal indicador pudesse ser calculado:

$$\%QC = \frac{NEF - NSF}{NEF} \times 100 \quad (3.6)$$

onde NEF corresponde ao número de peças à entrada do forno e NSF ao número de peças à saída do forno.

Uma vez que não é possível ter a contagem do número de peças que saem do forno, recorreu-se a outro modo de calcular a percentagem de quebras em cozido (valor muito menos fiável do que o obtido caso se utilizasse a fórmula referida), que será abordado mais à frente, no ponto das ordens de produção fechadas.

Tal como aconteceu na secção de prensagem e linhas de vidragem, também foram recolhidas as informações relativas às paragens que mais ocorriam na escolha para, assim, serem seleccionadas algumas para servirem de base num novo formulário, ver figura 3.7.

Figura 3.7.: Formulário relativo às paragens da secção de escolha construído na base de dados onde são introduzidos os tempos de paragens registados pelos operadores consoante a respetiva causa.

### 3.1.6.5. Controlo de qualidade

A existência de um registo na secção do controlo de qualidade permite conhecer quais são os defeitos identificados pelos colaboradores nas diferentes referências e a desclassificação (comercial ou terceira qualidade) que lhes é atribuída posteriormente.

Assim, é possível a introdução direta dos valores apresentados nos registos nos diferentes campos do formulário para o registo de defeitos, ver figura 3.8.

Figura 3.8.: Formulário construído na base de dados e relativo à introdução do número de defeitos consoante a sua tipologia pelo controlo de qualidade.

Após a introdução dos dados, é possível gerar um gráfico dos maiores defeitos identificados de acordo com um intervalo de datas específico (a escolher pelo utilizador).

### 3.1.6.6. Ordens de fabrico fechadas

No final do material estar todo empacotado e devidamente etiquetado com o respetivo código de barras, as ordens de fabricos são fechadas.

Após esse processo, são registados os valores de área escolhida (em  $m^2$ ) de cada ordem de fabrico, as respetivas quantidades por graus de qualidade (1ª, comercial ou 3ª), o número de tonalidades e o número de calibres atribuídos.

Assim, com base nessa documentação, procedeu-se à criação de um formulário para as ordens de fabrico fechadas, ver figura 3.9.

Figura 3.9.: Formulário relativo às ordens de fabrico fechadas construído na base de dados que permite resumir a informação estatística relativamente à produção de determinada ordem de fabrico.

No formulário apresentado, introduz-se a ordem de fabrico, a data na qual foi fechada, o valor da área prensada e vidrada (que surge automaticamente, pois o programa já tem essa informação), a área escolhida (que é introduzida e não surge automaticamente devido à re-escolha de material que não é inserida no programa), as respetivas percentagens de qualidade e o número de calibres e de tonalidades. Os resultados das últimas produções também são consultados e introduzidos para comparação.

Com a introdução do valor da área escolhida, procede-se às quebras em cozido (%QC), com base na seguinte fórmula:

$$\%QC = \frac{(V - E)}{V} \times 100 \quad (3.7)$$

onde V corresponde à área vidrada e E à área escolhida.

Como já foi referido anteriormente, o valor de percentagem de quebras em cozido resultante deste cálculo não é o mais correto, uma vez que não possui as quebras resultantes do forno; contudo, consegue fornecer alguma orientação do que se passa entre as secções das linhas de vidragem até à escolha.

### 3.1.6.7. Consultas, relatórios e gráficos

As consultas permitem a obtenção de todos os relatórios<sup>3</sup> e gráficos necessários.

Para cada formulário que foi apresentado relativo à introdução diária de registos, foi criada uma consulta que, posteriormente, gera o respetivo relatório. Todos os dias são introduzidos dados acerca do número de peças, vagonas produzidas, paragens e defeitos com o intuito de acompanhar a produção (por data, por equipa, por turno e/ou por ordem de fabrico) para as secções de prensagem-linhas de vidragem, forno e escolha, sendo todos os relatórios gerados enviados diariamente para os responsáveis das diferentes secções da CLiPER.

Um dos relatórios diz respeito à gestão de vagonas produzidas e tem como objetivo ter um melhor conhecimento acerca das vagonas que já foram produzidas e das que ainda faltam produzir de acordo com o planeamento.

Também se procedeu à criação de consultas para, posteriormente, serem gerados relatórios acerca das paragens nas secções de prensagem-linhas de vidragem e escolha. Nestas consultas, foram criadas algumas expressões tendo em vista a descoberta dos tempos de paragem que não eram registados por cada equipa por prensa-linha de vidrar e por linha de escolha. Em relação ao máximo de peças que são produzidas e escolhidas por prensa e por linha de escolha (MPP e MPE, respetivamente), estas são calculadas de acordo com as seguintes fórmulas:

$$MPP = CP \times TT \quad (3.8)$$

$$MPE = CME \times TT \quad (3.9)$$

onde CP à cadência da prensa, TT ao tempo de turno e CME à cadência da máquina de escolha.

Relativamente ao número máximo de peças por área produzidas e escolhidas (AP e AE, respetivamente), basta converter o número de peças para  $m^2$ , dado por:

$$AP = \frac{MPP}{NA} \quad (3.10)$$

<sup>3</sup>A existência de um relatório que abrange o programa de produção é essencial para a consulta do número da ordem de fabrico de determinada referência e vice-versa.

$$AE = \frac{MPE}{NA} \quad (3.11)$$

onde MPP corresponde ao número máximo de peças produzidas, MPE ao número máximo de peças escolhidas e NA ao número de peças por área (em  $m^2$ ).

No que se refere à produção real, esta é dada automaticamente pelo número de peças vidradas por superfície vidrada na secção de prensagem-linhas de vidragem e pelo número de peças escolhidas por superfície escolhida na secção de escolha.

O tempo de trabalho real na secção de prensagem-linhas de vidragem (TTRPL) é dado por:

$$TTRPL = \frac{TT \times ATV}{MAP} \quad (3.12)$$

onde TT corresponde ao tempo de turno, ATV à área total vidrada e MAP ao máximo de área produzida.

O tempo de trabalho real na secção de escolha (TTRE) é dado por:

$$TTRE = \frac{TT \times ATE}{MAE} \quad (3.13)$$

onde TT corresponde ao tempo de turno, ATE à área total escolhida e MAE ao máximo de área escolhida.

Após todos os cálculos anteriores, é possível obter o valor acerca do tempo de paragens que não foram registadas (PNR):

$$PNR = \frac{TT}{TTR} \quad (3.14)$$

onde TT corresponde ao tempo de turno e TTR ao tempo de trabalho real.

Com base nos valores calculados anteriormente, foi possível criar consultas e relatórios que fornecem dados acerca da produtividade das diferentes secções por data, equipa e turno. A percentagem de produtividade na prensa-linha de vidragem e na escolhida (%PPL e %PE, respetivamente) é calculada pelas seguintes fórmulas:

$$\% PPL = \frac{ATV}{MAP} \times 100 \quad (3.15)$$

$$\% PE = \frac{ATE}{MAE} \times 100 \quad (3.16)$$

onde ATV corresponde à área total vidrada, MAP ao máximo de área produzida, ATE à área total escolhida e MAE ao máximo de área escolhida.

Quanto à secção de cozedura, após introdução dos valores relativos à mesma, foi possível calcular o gás que era consumido por área (GCA, em  $m^3$ ), pela equação

$$GCA = \frac{QGC}{AC} \quad (3.17)$$

onde QGC corresponde à quantidade de gás consumida e AC ao valor da área cozida.

O cálculo do gás consumido por área em MWh também foi realizado, ver anexo A.1.

Através de uma consulta, também foi possível proceder à criação de um relatório que demonstre o número de peças por área perdidas diariamente (AP, em  $m^2$ ), sendo este valor calculado por:

$$AP = MAP - ATV \quad (3.18)$$

onde MAP corresponde ao máximo de área produzida e ATV à área total vidrada.

Com base no formulário da introdução do número e tipo de defeitos identificados pelo controlo de qualidade, foi criada uma consulta para produzir um relatório e gráficos que demonstrem os defeitos encontrados por ordem de fabrico.

### 3.1.6.8. Eficiência global do equipamento

Procedeu-se à criação de consultas onde foram adicionadas várias expressões para o cálculo da percentagem de OEE para cada uma das secções, com o objetivo de monitorizar o desempenho das linhas de produção.

O cálculo do OEE para a secção de prensagem e linhas de vidragem foi realizada em conjunto e em separado, isto é, calculou-se a eficiência global das prensas, das linhas de vidragem e das prensas e das linhas de vidragem como um todo.

Para o cálculo da percentagem de OEE para cada uma das prensas e cada uma das linhas, em separado, foi necessário criar as seguintes fórmulas:

$$\%OEE(P) = (DP \times EP \times QP) \times 100 \quad (3.19)$$

$$\%OEE(L) = (DL \times EL \times QL) \times 100 \quad (3.20)$$

onde P corresponde a prensa, L a linha, D a disponibilidade, E a eficiência e Q a qualidade.

As equações para a determinação de cada um dos parâmetros mencionados nas fórmulas anteriores encontram-se no anexo A.2.

É de realçar que, a percentagem de OEE calculada anteriormente quer para as prensas quer para as linhas, não é um valor muito preciso, uma vez que o tempo a produzir na prensa não engloba os tempos de paragens que não foram registados, uma vez que é impossível saber se tais paragens que não foram registadas ocorreram nas prensas ou nas linhas.

Para o cálculo da percentagem de OEE para as três prensas-linhas de vidragem, funcionando como um só equipamento, foi necessário criar a seguinte expressão:

$$\%OEE(PL) = (DPL \times EPL \times QPL) \times 100 \quad (3.21)$$

onde PL corresponde a prensa-linha de vidragem, D a disponibilidade, E a eficiência e Q a qualidade.

As equações dos respetivos parâmetros da expressão anteriormente mencionada encontram-se no anexo A.2.

Neste caso, o valor da percentagem de OEE já apresenta uma maior precisão, visto que é utilizado o tempo de trabalho real como um dos parâmetros para o cálculo da disponibilidade, onde estão incluídos os tempos de paragem não registados nesta secção.

Em relação ao cálculo do OEE para a secção de escolha foi realizado para cada uma das linhas de escolha, através de uma consulta onde foi adicionada a seguinte expressão:

$$\%OEE (LE) = (D LE \times E LE \times Q LE) \times 100 \quad (3.22)$$

onde LE corresponde à linha de escolha, D à disponibilidade, E à eficiência e Q à qualidade.

As fórmulas de cada um dos parâmetros da equação anteriormente mencionada encontram-se no anexo A.2.

## 3.2. Materiais e métodos

Nesta secção pretende-se sistematizar, de forma resumida e abreviada, os procedimentos que permitiram conduzir toda a análise numérica e estatística desde a aquisição dos dados até à obtenção dos resultados finais.

### 3.2.1. Recolha de dados referentes ao processo produtivo

Após a identificação dos parâmetros que poderiam estar relacionados com a qualidade dos produtos, procedeu-se à recolha de dados referente aos mesmos. Esta recolha de informação passou por um acompanhamento minucioso e diário das linhas de produção.

Durante esta etapa, foram realizadas diversas medições e ensaios, pelo que, seguidamente, pretende-se descrever as metodologias utilizadas para a recolha de dados que serviram de suporte estatístico para o uso da análise multivariada no presente estudo.

#### 3.2.1.1. Controlo do pó atomizado porcelânico

##### Determinação da humidade do pó atomizado

O objetivo deste ensaio é determinar a humidade do pó atomizado recorrendo a uma balança determinadora de humidade que possui um sistema de aquecimento por lâmpada tubular de halogéneo, modelo *MS-70*.

Neste procedimento, primeiramente, pressiona-se *reset* para aparecer o valor zero no *display* e, seguidamente, é introduzida no prato da balança uma quantidade de pó atomizado a analisar compreendida entre 8 a 12 g. Pressiona-se o botão para iniciar o ensaio e baixa-se a tampa da balança. Após atingir uma diferença de humidade igual ou inferior a 0.05% por minuto, a balança desliga-se automaticamente e regista-se o valor do *display*. Este valor representa o valor percentual de humidade.

##### Determinação da análise granulométrica do pó atomizado

Para a realização do ensaio da análise granulométrica<sup>4</sup>recorre-se a uma peneiradora para preparação de amostras, modelo *VS-Y325*. Inicialmente, é necessário pesar cerca de 100 g da amostra e colocar os peneiros empilhados com malha mais grossa no topo e mais fina na base (600  $\mu m$ , 425  $\mu m$ , 300  $\mu m$ , 250  $\mu m$ , 180  $\mu m$ , 125  $\mu m$  e base). Introduce-se o produto no primeiro dos peneiros e regula-se a amplitude de vibração para o valor 70 rpm e o tempo de funcionamento para 10 minutos. Após a peneiração, retira-se o resíduo de cada peneiro e procede-se à respetiva pesagem. O valor de material retido em percentagem ( $\%R$ ), em cada peneiro, é dado por:

<sup>4</sup>Tem como objetivo conhecer o tamanho e a distribuição do tamanho das partículas, uma vez que diversas propriedades que as peças vão adquirir no decorrer do processo produtivo encontram-se relacionadas com a dimensão, a distribuição e a forma do grão. Este controlo deve ser devidamente cumprido para que se garantam as condições de compactação e as características do produto após a cozedura.

$$\%R = \frac{m_{A-1} - m_{rp}}{m_T} \times 100 \quad (3.23)$$

onde  $m_{A-1}$  corresponde à massa de amostra introduzida num determinado peneiro e  $m_{rp}$  à massa retida nesse mesmo peneiro.

Os valores obtidos da distribuição granulométrica são analisados com vista a verificar se se encontram dentro dos parâmetros de funcionamento do equipamento que seguem uma determinada especificação, quer para o pó porcelânico quer para o pó de revestimento.

#### Preparação de provetes para controlo da pasta

Para a determinação das percentagens de contração, perda ao rubro e de absorção de água é necessário preparar provetes do pó recebido.

Nesta preparação é necessário pesar cerca de 50 g de pó e proceder à sua conformação com o auxílio de uma prensa de laboratório, modelo *M24T*. Após a prensagem, regista-se no provete a data, o tipo de pó, o lote do pó recebido e o silo. Seguidamente, os provetes devem ser secos na estufa a 70°C, durante um período mínimo de duas horas e, posteriormente, cozidos no forno industrial juntamente com as peças cerâmicas.

#### Determinação da contração

No ensaio da determinação da contração<sup>5</sup>, os provetes são retirados da estufa e procede-se à sua medição recorrendo a um paquímetro. Seguidamente, colocam-se os provetes junto com um anel de *Buller*<sup>6</sup> ver figura 3.10, sobre uma placa refratária e leva-se ao forno, registando-se o ciclo a que este se encontra. Após o tempo do ciclo do forno, retira-se a placa à saída do forno e mede-se os provetes e o diâmetro do anel.

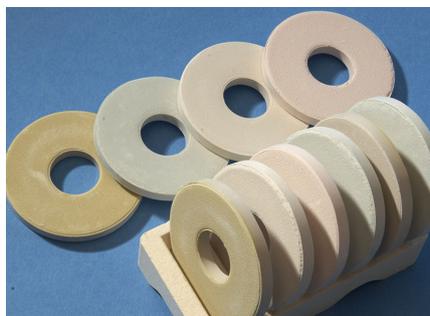


Figura 3.10.: Anel cerâmico, conhecido como anel de *Buller*, serve como indicador do efeito de cozedura num forno industrial cerâmico. Este anel retrai consoante as condições existentes no interior do forno, pelo que a medição do seu diâmetro expõe o calor que foi absorvido pelo mesmo e por todo o material que foi cozido juntamente com este.

O valor da percentagem de contração ( $\%C$ ) é dado pela seguinte equação:

$$\%C = \left( \frac{X_s - X_c}{X_s} \right) \times 100 \quad (3.24)$$

onde  $X_s$  corresponde à média dos lados do tamanho em seco e  $X_c$  à média dos lados do tamanho em cozido.

<sup>5</sup>Tem como finalidade averiguar a existência de uma diminuição de tamanho após a cozedura.

<sup>6</sup>Anel cerâmico que permite ter um indicador do efeito da cozedura na cerâmica, sendo usado para controlo das condições de temperatura dos fornos industriais. A medição do seu diâmetro após cozedura permite conhecer a temperatura a que foram sujeitos.

**Determinação da perda ao rubro**

Neste ensaio<sup>7</sup>, procede-se à pesagem dos provetes depois de terem estado em estufa a 70 °C durante cerca de duas horas, numa balança analítica até à segunda casa decimal. Posteriormente, os provetes são cozidos no forno, no ciclo normal de cozedura, sobre uma placa refratária. Retiram-se os provetes do forno e deixam-se arrefecer. Depois de frios, pesa-se novamente na mesma balança.

O valor da percentagem de perda ao rubro (%PR) é dado pela seguinte equação:

$$\%PR = \left( \frac{P_s - P_c}{P_s} \right) \times 100 \quad (3.25)$$

onde  $P_s$  corresponde ao peso seco e  $P_c$  ao peso cozido.

**Determinação da taxa de absorção de água**

A determinação da taxa absorção de água<sup>8</sup> é realizada pelo método a vácuo segundo a norma internacional ISO 10545-3:2018.

Neste método, após o processo de cozedura, pesam-se os provetes e registam-se os valores de massa em seco numa balança analítica centesimal. Seguidamente, colocam-se dentro da câmara de vácuo e a máquina é programada para o modo automático. Após este ciclo estar finalizado, retiram-se os provetes do equipamento e limpam-se com um pano seco para eliminar apenas a humidade superficial. Pesam-se os provetes e regista-se o valor obtido (peso húmido).

A percentagem de absorção de água (%AA) é dada pela seguinte equação:

$$\%AA = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_2} \right) \times 100 \quad (3.26)$$

onde  $m_1$  corresponde ao peso da amostra seca em gramas e  $m_2$  ao peso da amostra submetida ao vácuo em gramas.

**3.2.1.2. Controlo na prensagem e secagem****Determinação da humidade do pó**

Neste ensaio, é necessário retirar uma amostra de pó do silo que se encontra a alimentar a respetiva prensa e proceder à determinação da humidade do pó tal como já foi descrito na subsubsecção 3.2.1.1. Regista-se o valor obtido, bem como o silo do qual foi retirado a amostra.

**Registo da pressão de compactação**

O controlo da pressão das prensas é feito uma vez por turno pelo colaborador responsável pelas prensas, pelo que, neste caso, apenas foi necessário registar quais os valores de pressão, em  $kg/cm^2$ , que se encontravam a ser aplicados nos materiais a produzir. Também se registou o número de ciclos por minuto.

**Registo da temperatura do secador**

O controlo das temperaturas dos dois queimadores do secador foi realizado pela verificação dessas mesmas temperaturas no painel do secador e seu registo.

<sup>7</sup>Determina a percentagem de massa de amostra perdida após cozedura. Realizado apenas para controlo do pó porcelânico, tal como na determinação da contração.

<sup>8</sup>Analisa a porosidade, uma vez que a absorção de água é uma medida indireta da porosidade aberta do corpo cerâmico e corresponde ao volume de poros abertos que são suscetíveis de serem preenchidos por um fluido.

**Determinação das dimensões, espessura e respetiva pesagem das peças em verde e em seco**

Para as referidas determinações, recolhem-se peças em verde à saída da prensa e em seco à saída do secador.

Para a determinação das dimensões, faz-se a medição das peças a meio de cada lado perpendicular e a 5 mm de cada um dos cantos, sendo o resultado a diferença entre o valor maior e o valor menor, ver figura 3.11. Esta medição é realizada com recurso a um paquímetro.

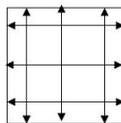


Figura 3.11.: Esquema representativo dos lados escolhidos para a determinação das dimensões de uma peça cerâmica.

No caso da espessura, mede-se, também com o auxílio de um paquímetro, a espessura entre a parte lisa da face e a parte lisa (saliente) do tardo, junto a cada canto da peça, ver figura 3.12. Se a peça apresentar diferenças anormais na espessura, tal acontecimento pode dever-se ao facto dos cunhos já se encontrarem desgastados, bem como por alterações na velocidade de escoamento do pó, afetada pela humidade do mesmo.

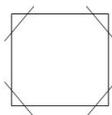


Figura 3.12.: Esquema representativo de como se procede para a medição da espessura em cada canto de uma peça cerâmica.

Em relação à pesagem, determina-se o peso das peças recorrendo a uma balança analítica centesimal. Após os registos dos valores correspondentes ao peso em verde<sup>9</sup> e em seco<sup>10</sup>, procede-se ao cálculo da diferença entre os dois.

**Determinação da humidade residual após secagem**

Para a determinação da humidade residual<sup>11</sup>, é necessário recolher uma peça em seco e partir os seus quatro cantos. De seguida, com a ajuda de um martelo, desfaz-se os cantos em pó num tabuleiro. O restante procedimento é igual ao realizado para a determinação da humidade do pó.

**Determinação da resistência mecânica**

A determinação da resistência mecânica à flexão em seco tem como objetivo determinar o módulo de rutura e a resistência à flexão de peças secas.

Neste procedimento, é necessário colocar a peça a ensaiar sobre os roletes de apoio do tensómetro *Gabbrielli MR053*, com a superfície da fase principal virada para cima. Posiciona-se a peça, de modo que a célula de carga de 50 kgf fique equidistante dos dois roletes de apoio. De seguida, verifica-se que a base inferior do tensómetro se vai deslocar para cima até partir a peça e no painel vai aparecer a carga de rutura em kg. O valor do módulo de rutura médio, em  $kg/cm^2$ , é registado, bem como os valores da espessura mais fina do lado da quebra, a largura e a distância entre apoios, em cm.

<sup>9</sup>Peso da peça após prensagem.

<sup>10</sup>Peso das peças após prensagem e secagem.

<sup>11</sup>Ensaio que tem como objetivos aumentar a resistência mecânica das peças e garantir uma uniformidade térmica superficial e distribuição homogênea da humidade nas peças - parâmetros cruciais nas etapas que se sucedem do processo de fabrico.

O valor do módulo de rutura,  $MR$  ( $kg/cm^2$ ), é calculado aplicando a seguinte expressão:

$$MR = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{F \times D}{L \times E^2}\right) \quad (3.27)$$

onde  $F$  corresponde à carga de rutura (kg),  $D$  à distância entre apoios (cm),  $L$  à largura das peças (cm) e  $E$  à espessura mais fina do lado da quebra da peça (cm).

### 3.2.1.3. Controlo na cozedura/forno

#### Registo do ciclo do forno e de temperatura máxima

No forno, procede-se à verificação e registo da temperatura máxima, bem como do ciclo de cozedura.

#### Determinação da absorção de água nas peças cozidas

Este ensaio é realizado às peças após cozedura e o seu procedimento já se encontra descrito anteriormente.

#### Determinação das dimensões, espessura e diferença de diagonais das peças cozidas

As metodologias utilizadas para os ensaios mencionados já foram descritas, à exceção da diferença de diagonais.

Em relação à determinação da diferença de diagonais, esta também é efetuada com o auxílio de um paquímetro. O cálculo da diferença de diagonais é obtido, em mm, pela diferença entre a diagonal um e a diagonal dois.

### 3.2.1.4. Controlo na escolha

#### Classificação da qualidade das diferentes peças cerâmicas

Durante a etapa de escolha, recolheram-se os dados relativos à classificação do material em estudo nos diferentes graus de qualidade.

#### Desclassificação por *liner* das peças cerâmicas

A desclassificação por *liner* do material está relacionado com a defectologia a nível de esquadria na peça. Este é um valor dado automaticamente pelas máquinas de escolha e, uma vez que representa o maior defeito, também foi considerado.

### 3.2.2. Base de dados

A base de dados utilizada neste estudo é composta por uma matriz

$$D_{(n \times m)} = [X_{(n \times p)} Y_{(n \times r)}] \quad (3.28)$$

onde  $n=150$  amostras (fabricos registados),  $p=66$  preditores e  $r=17$  respostas, num total de  $m=83$  variáveis.

Este conjunto de resultados inclui dois tipos de variáveis independentes ( $X$ ) – algumas variáveis estão relacionadas com as matérias-primas, enquanto que, as restantes referem-se às condições de fabrico; e, três tipos de variáveis dependentes ( $Y$ ) relacionadas com as quebras, com os graus de qualidade das diferentes peças de cerâmica produzidas e com a desclassificação por *liner*<sup>12</sup>.

<sup>12</sup>Desclassificação por *liner*: desclassificação, pelo equipamento de calibração automático, da peça ao nível da esquadria.

### 3.2.3. Tratamento estatístico dos dados

Antes de se poder utilizar a informação reunida em tabelas, foi necessário efetuar diversos processamentos desde verificações até ao pré-acondicionamento da informação a ser processada, quer por PCA, HCA, PLS ou MOLS.

#### 3.2.3.1. Verificações

Na etapa de verificação, procedeu-se à identificação das variáveis independentes (preditores,  $X$ ) e das variáveis dependentes (respostas,  $Y$ ). Seguidamente, foi necessário verificar se existiam omissões de valores na matriz em estudo – as amostras incompletas foram removidas do conjunto.

Após esta verificação, teve-se o cuidado de analisar a presença de tipos de variáveis que estavam em causa, nomeadamente variáveis qualitativas (nominais ou ordinais), pois se tal se verificasse, teríamos de transformá-las em quantitativas. Procedeu-se também à identificação e remoção de eventuais variáveis invariantes, já que estas não contribuem para justificar a variabilidade da resposta.

#### 3.2.3.2. Ordens de grandeza

Foi efetuado um diagnóstico de ordens de grandeza das variáveis. Caso fosse encontrada alguma variável em que os seus valores diferissem muito dos restantes, mais de duas ordens de grandeza, proceder-se-ia à inclusão de uma nova coluna com a logaritmização decimal desses mesmos valores. Deste modo, pretende-se fornecer ao algoritmo de processamento (ex.: PCA, MOLS) uma nova variável que, eventualmente, seja capaz de descrever melhor, e de forma compacta, a variável que se encontra em escala expandida.

#### 3.2.3.3. Pré-processamento

De seguida, para tratar os dados com vista a contornar problemas relacionados com a escala, realizou-se o auto-escalamento dos preditores e das respostas, através da fórmula:

$$x_i^* = \frac{(x_i - x_0)}{(x_1 - x_0)} \quad (3.29)$$

onde  $x_i$  representa a variável a escalar e  $x_0$  e  $x_1$  correspondem aos valores extremos (mínimo e máximo, respetivamente) referentes a cada variável.

#### 3.2.3.4. Análise de componentes principais

O método PCA foi aplicado, quer para os preditores e respostas em separado quer para as duas combinações, com o objetivo de permitir identificar e interpretar relações entre as variáveis e as variáveis e os objetos.

##### Matriz de projeto

No presente estudo, optou-se pelo uso da matriz de covariância como matriz de projeto, uma vez que esta tem a vantagem de permitir evitar a influência de uma ou mais variáveis sobre as outras no momento da determinação do número de componentes principais.

### Seleção das componentes principais

Dado que o critério de Pearson tem tendência a ser demasiado conservativo, conduzindo a uma compactação excessiva da informação, as componentes principais com maior interesse foram selecionadas de acordo com a representação gráfica do decaimento dos valores próprios e o critério de *Kaiser*.

### Proporção das componentes principais e contribuição das variáveis nas mesmas

Estudou-se a contribuição<sup>13</sup> relativa das variáveis nas componentes principais. Para tal, construíram-se gráficos que representassem visualmente a contribuição que as variáveis apresentam nas componentes principais.

### Representação gráfica

Após todos os procedimentos anteriores, os dados foram representados em gráficos de duas dimensões, cujos eixos são as componentes principais que possuem maior variância. Estes gráficos permitiram a observação, em separado, da distribuição das *loadings* e dos *scores*.

## 3.2.3.5. Análise de agregados

A metodologia HCA foi aplicada com o objetivo de poder reconhecer similaridades de amostras quanto às condições de produção (análise do sub-espço preditor), quanto às respostas obtidas na qualidade (análise do sub-espço da resposta) e quanto ao conjunto global (todo o *dataset*). O HCA agrupa a informação (objetos) em agregados (*clusters*<sup>14</sup>) através de um dendrograma - gráfico que exhibe a evolução da agregação dos objetos em função da distância, por níveis de similaridade, encontrando-se a distância representada ao longo do eixo vertical e as diferentes observações ao longo do eixo horizontal.

Foi considerada a distância euclidiana de acordo com a equação 2.5 e para verificar a similaridade dos objetos usaram-se os métodos de associação AL e WL. A representação gráfica dos dados foi feita através de um dendrograma, cujo eixo vertical diz respeito à distância e o eixo horizontal às observações - quanto menor o valor da distância entre os objetos, maior é a semelhança entre eles. A representação gráfica do dendrograma está dependente do método escolhido para o cálculo da distância e para o tipo de ligação.

## 3.2.3.6. Modelação multivariada explícita

Nesta subsecção do trabalho, é focado, mais em detalhe, alguns dos pormenores mais relevantes na modelação explícita com MOLS.

### Prospecção inicial de preditores

O estudo da relação entre as respostas e os preditores foi realizado por via direta e indireta - a via direta consistiu no cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre cada resposta ( $Y$ ) e cada preditor ( $X$ ), recorrendo ao GNU Octave [61]; já a via indireta, recorreu ao PLS para, através da informação relevante contida nos primeiros  $k = 5$  fatores latentes obter uma listagem das variáveis mais relevantes encontradas no sub-espço preditor que melhor justificam cada resposta estudada. No final, ambas as listagens foram confrontadas, permitindo selecionar alguns preditores com elevada interdependência.

<sup>13</sup>Relativa à proporção, o peso relativo de cada componente principal na variabilidade total dos dados, e à proporção cumulativa, que indica o total da variância explicada por 1 a  $n$  componentes.

<sup>14</sup>Entenda-se por *cluster* a forma de agrupar dados numa base de dados com o objetivo de criar classes com elementos que se aproximam o máximo possível entre os elementos de uma classe e são o mais distantes possíveis dos elementos de outra classe.

### Desenvolvimento de modelos

Os modelos estatísticos foram desenvolvidos recorrendo à modelação multivariada explícita (MOLS) com recurso ao RStudio [62]. Com base em cada um dos melhores preditores previamente encontrado, usou-se um algoritmo iterativo de ajuste por MOLS misto construtivo-destrutivo (*forward & backward*). Para avaliar a qualidade de cada modelo estatístico obtido em cada iteração usaram-se dois critérios distintos - o Critério de Informação de *Akaike* (AIC) e o Critério de Informação *Bayesiano* (BIC), equações 2.6 e 2.7.

### Seleção de modelos

Como seria previsível, a metodologia MOLS iterativa permite encontrar diversas sugestões de modelos que melhor seguem os critérios de ajuste (AIC ou BIC), podendo encontrar modelos similares.

Assim sendo, numa fase posterior, os modelos obtidos foram sistematizados de acordo com a complexidade crescente do modelo (maior número de parâmetros) permitindo-nos suprimir modelos idênticos e reduzir a listagem para modelos independentes.

De seguida, foi verificado o significado estatístico de cada parâmetro dos modelos listados – no caso de haver parâmetros sem significado (com valor de prova superior a 0.05), estes parâmetros foram sucessivamente eliminados para obter um novo modelo (mais simples), optando por remover primeiro o parâmetro com maior probabilidade de ser nulo (maior valor de prova). O modelo parcimonioso final corresponde ao modelo mais simples cujos parâmetros têm todos significado estatístico (valor de prova inferior a 0.01).

### Qualidade do ajuste

Um modelo adequado deve permitir ajustar os valores experimentais o melhor possível. Diversos parâmetros foram estimados para caracterizar a qualidade do ajuste: desvio padrão do ajuste (eq. 2.8), AIC (eq. 2.6), BIC (eq. 2.7), coeficiente de determinação de *Pearson* e coeficiente de determinação ajustado ( $R_{adj}^2$ ),

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \left( \frac{n - 1}{n - p} \right) \quad (3.30)$$

Dado que melhor ajuste implica maiores valores dos coeficientes de determinação e menores valores do desvio padrão do ajuste e de AIC e BIC, para avaliar o desempenho da qualidade do ajuste (QA) utilizou-se a seguinte função,

$$QA = \frac{R^2 \times R_{adj}^2}{\sigma_{fit} \times AIC \times BIC} \quad (3.31)$$

### Qualidade de previsão

O melhor modelo é aquele que permite estimar novos valores com base num conjunto adequado de valores de referência (conjunto de treino). No sentido de seguir uma perspetiva mais conservadora e bem comportada, optou-se por seguir a abordagem *jackknife*, também conhecida de *leave-one-out*, onde todas as amostras são testadas, caso a caso. O erro de previsão (RMSPE) pode ser estimado de acordo com

$$RMSPE = \sqrt{\frac{\sum(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3.32)$$

onde  $\hat{y}_i$  representa o valor estimado para a variável dependente no ponto correspondente a  $y_i$ .

Dado que a abordagem *jackknife* é demasiado conservativa, é usual expandir esta incerteza com o fator de escala populacional,

$$PE = \sqrt{n} \cdot (RMSPE) \quad (3.33)$$

Para fazer face à variação do número de parâmetros na comparação de modelos distintos, o erro de previsão ajustado ( $PE_{adj}$ ) segue uma lógica similar de cálculo:

$$PE_{adj} = \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n-p)}} \right) \cdot PE \quad (3.34)$$

De modo similar, para caracterizar o desempenho da qualidade preditiva (QP) dos modelos usou-se a estimativa:

$$QP = \left( \frac{1}{PE \times PE_{adj}} \right) \quad (3.35)$$

### Qualidade global

Para ter a certeza de que se escolhe o modelo que otimiza em simultâneo a qualidade de ajuste (QA) e a qualidade de previsão (QP) estimou-se a respetiva qualidade global da qualidade (QG) através do quociente

$$QG = QA \times QP \quad (3.36)$$

dado que se pretende maximizar a qualidade do ajuste e minimizar o respetivo erro de previsão. O modelo que apresente a melhor qualidade global (QG) será o escolhido.

### 3.2.3.7. Teste de recuperação

Quando se obtinham modelos para as diferentes respostas que se apresentavam com um mau ajuste e dificuldades de previsão, procedeu-se à verificação da existência de erro sistemático através da função de recuperação

$$Y_p = b_0 + b_1 \times Y_e \quad (3.37)$$

onde  $Y_p$  corresponde ao valor previsto,  $b_0$  a ordenada na origem,  $b_1$  o declive e  $Y_e$  o valor experimental.

Se a função de recuperação apresentar ordenada na origem nula e declive unitário isso significa que não existe erro sistemático constante ( $b_0 = 0$ ) nem erro sistemático proporcional ( $b_1 = 1$ ), evidenciando que o modelo em causa está a reproduzir fielmente a resposta em estudo.

### 3.2.3.8. Interpretação

A modelação explícita tem como maior vantagem a tradução de uma resposta através de uma função polinomial aproximada. Deste modo, perante o modelo escolhido, foi realizada a interpretação do impacto de cada um dos preditores encontrados. De uma forma muito sucinta, preditores que apresentem parâmetros com valores negativos revelam efeitos adversos (contribuições negativas que contrariam o crescimento da resposta em causa); contrariamente, valores positivos revelam contribuições positivas (o aumento deste preditor tende a contribuir para o aumento da resposta). Os valores mais elevados, quer sejam negativos, quer sejam positivos, indicam os preditores que apresentam maior efeito sobre a resposta descrita.

## 4. Análise e discussão dos resultados

Neste capítulo vamos apresentar e comentar os resultados obtidos ao longo do trabalho desenvolvido, iniciando pela verificação de anomalias na produção da indústria cerâmica e passando sucessivamente para a análise multivariada.

### 4.1. Análise de desempenho

Nesta secção faz-se uma revisão dos parâmetros da qualidade da produção, de acordo com os normativos vigentes da empresa. Assim sendo, serão abordados tópicos como: diagrama de causalidade e análise de tempos de paragens, produtividade, quebras em cru, qualidade do material e seus defeitos e eficiência global do equipamento.

#### 4.1.1. Diagrama de causalidade

Após um acompanhamento cauteloso de todo o processo produtivo e de comunicação com os colaboradores, foi possível recolher um série de informações que auxiliaram na deteção de algumas falhas existentes na unidade fabril. Assim, procurou-se identificar e categorizar as possíveis causas para a existência de um baixo rendimento operacional e de uma baixa qualidade do produto - por meio de um diagrama de causalidade que se encontra representado na figura 4.1.

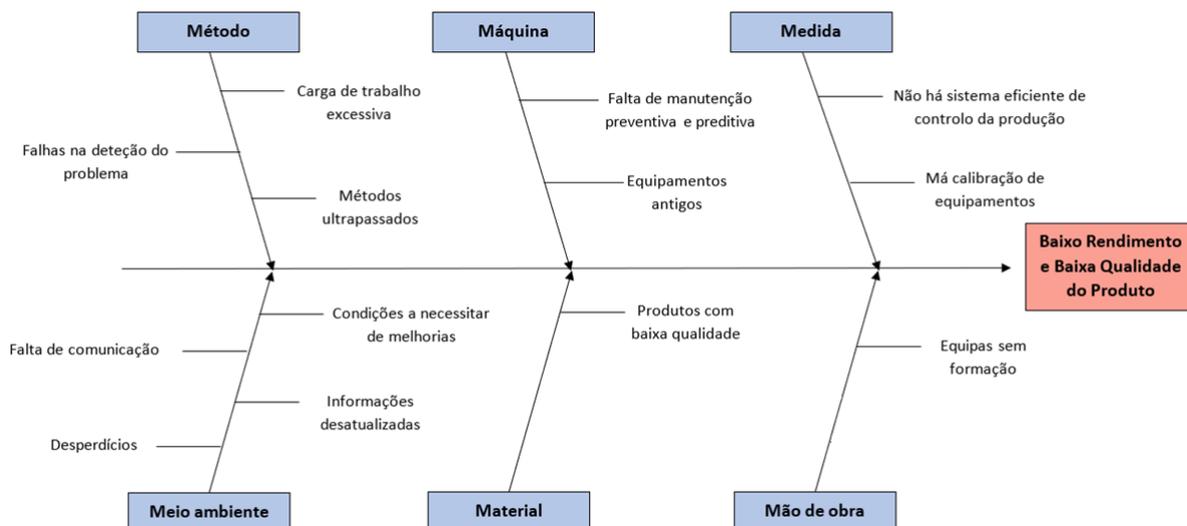


Figura 4.1.: Diagrama de Ishikawa para o processo produtivo da CLiPER que apresenta como problemas principais o baixo rendimento e a baixa qualidade do produto. As falhas encontradas foram categorizadas de acordo com os 6Ms: relativamente ao método, verifica-se a existência de métodos ultrapassados, falhas na deteção do problema e uma carga de trabalho excessiva; em relação à máquina, a presença de equipamentos antigos e a falta de manutenção preventiva e preditiva; no que diz respeito à medida, o facto de não haver um sistema eficiente de controlo da produção e o não cumprimento do plano de calibração para certos equipamentos; relativamente ao meio ambiente, existem condições a necessitar de melhorias, há falta de comunicação entre postos de trabalho, informações afixadas que se encontram desatualizadas e desperdício em termos de material; acerca do material, o aparecimento constante de produtos com baixa qualidade; e, por fim, sobre a mão de obra, o facto das equipas se encontrarem incompletas e desmotivadas, bem como não haver uma formação inicial adequada para os novos colaboradores.

Com base na figura 4.1, podemos visualizar que foram encontradas quinze falhas para o problema central.

**Carga de trabalho excessiva:** a falta de mão-de-obra nas linhas produtivas é recorrente, pelo que existe uma sobrecarga de trabalho para os colaboradores presentes. Para além disso, o facto dos equipamentos serem obsoletos, necessitando de constantes manutenções corretivas, e as falhas que ocorrem serem tardiamente identificadas, gera uma maior carga sobre a produção, visto que o planeamento de produção tem de ser cumprido, apesar de todas as adversidades existentes.

**Falhas na deteção do problema:** de forma geral, verificou-se, várias vezes, que havia uma deteção tardia de anomalias, o que leva, por exemplo, ao surgimento de peças de baixa qualidade que, poderiam ser evitadas, caso o problema fosse atempadamente identificado. Os motivos que podem explicar este facto são a falta de controlo, quer através do registo de dados quer através do processo em si, a falta de comunicação e a ineficiente formação dos colaboradores.

**Métodos ultrapassados:** a indústria de cerâmica apresenta como característica o facto de ser bastante artesanal; contudo, já existe alguma inovação tecnológica e essa inovação deve ser acompanhada, não só para criar melhores condições de trabalho, como para suportar as exigências atuais do mercado - o que, na verdade, não se encontra a ser praticado na empresa.

**Equipamentos antigos:** os equipamentos presentes na unidade fabril já são bastante antigos, pelo que exigem manutenções bastante recorrentes, o que, conseqüentemente, prejudica a produção.

**Falta de manutenção preventiva e preditiva:** o plano de manutenção não se encontra a ser cumprido, isto é, a manutenção preventiva não se encontra a ser aplicada na unidade, o que leva ao aumento de paragens da produção para diversas manutenções corretivas aos equipamentos.

**Sistema ineficiente de controlo da produção:** os dados que se encontram a ser registados pelos colaboradores não têm qualquer tipo de verificação e não sofrem nenhum tratamento, pelo que não há qualquer proveito útil dos mesmos. O presente estudo, auxiliou a empresa neste ponto - quer pela criação de uma base de dados onde esses dados são introduzidos diariamente e sofrem tratamento com vista à elaboração de relatórios que permitem o acompanhamento do processo de fabrico, bem como pelo tratamento estatístico dos mesmos com vista à verificação das variáveis que se encontram a contribuir quer positivamente quer negativamente para os resultados obtidos.

**Má calibração de equipamentos:** os equipamentos existentes não são periodicamente analisados com o intuito de apurar se se encontram bem calibrados, não estando a ser cumprido o plano de calibração atual da empresa - pelo que, no decorrer do estudo, verificou-se o aparecimento de dados incertos, o que gera desperdício, tanto a nível de controlo do produto, como a nível de equipamento pelo aumento do seu desgaste.

**Condições a necessitar de melhorias:** percorrendo a unidade fabril, é notável a falta de algumas condições necessárias às boas práticas de trabalho, tais como a limpeza e a organização.

**Falta de comunicação:** A perda de informação entre postos de trabalho e até dentro do mesmo setor é evidente, o que gera erros sistemáticos, nomeadamente falhas no controlo de *stocks*, levando à falta de material necessário para abastecimento das linhas produtivas, o que, conseqüentemente, compromete toda a produção.

**Informações desatualizadas:** a existência de informações desatualizadas nas diversas secções é evidente, pelo que os documentos expostos necessitam de ser revistos e atualizados para consulta dos colaboradores.

**Desperdícios:** os maiores desperdícios observados na unidade fabril encontram-se relacionados com o pó, o cartão e o filme plástico. Na secção de prensagem, os tubos que transportam o pó dos silos de armazenamento para alimentarem as prensas encontram-se com perfurações, o que leva à perda de uma grande quantidade de pó. A má gestão do material no armazém, também leva a com que grande parte das paletes produzidas recentemente sejam armazenadas no exterior da unidade, sem qualquer proteção contra condições climatéricas adversas, surgindo a necessidade de re-embalamento do material por este já se encontrar bastante danificado e em condições impróprias de comercialização, levando a consumos desnecessários de cartão, cintas e filme plástico.

**Produtos com baixa qualidade:** os produtos que se encontram a ser produzidos na CLiPER encontram-se abaixo dos objetivos pretendidos e o maior percentual de defeitos associados à baixa qualidade dos mesmos relaciona-se com defeitos que podem ser evitados caso haja um maior controlo das variáveis do processo.

**Equipas sem formação:** a formação a novos colaboradores é concedida por colegas que já se encontram na empresa há alguns anos durante o decorrer da atividade. Esta situação demonstrou ser improdutiva, uma vez que o elevado ritmo de trabalho conduz a uma má aprendizagem.

#### 4.1.2. Paragens

A base de dados para o estudo acerca das paragens é composta por 721 linhas com 92 colunas. Com o auxílio desta base de dados, foi possível o cálculo dos tempos de paragens nas diferentes linhas de produção, bem como a identificação das maiores causas de paragens registadas.

Os gráficos que dizem respeito às prensas-linhas de vidragem encontram-se representados nas figuras 4.2 e 4.3.

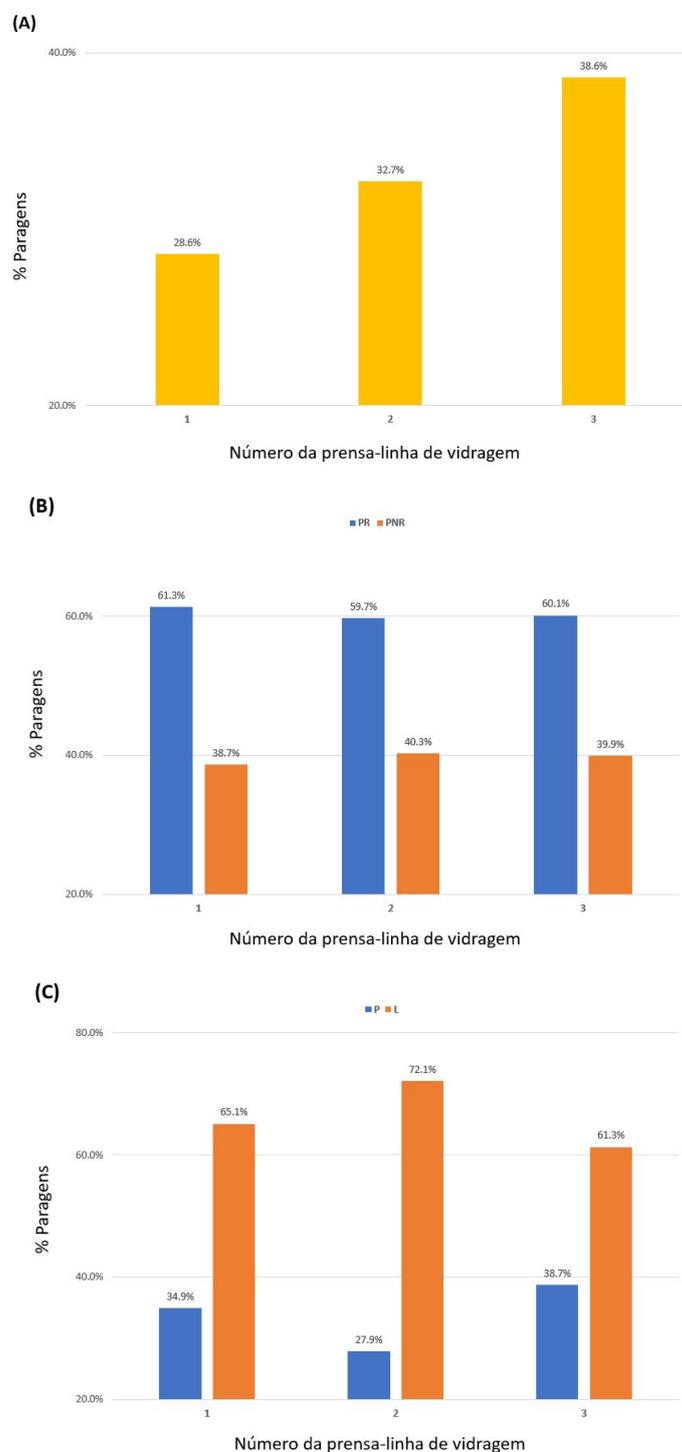


Figura 4.2.: Representação gráfica da percentagem de paragens ocorridas na secção de prensagem-linhas de vidragem: (A) paragens totais; (B) paragens registadas (R) e não registadas (NR) ocorridas no conjunto prensa-linha de vidragem (1, 2 e 3); (C) paragens registadas ocorridas por prensa (P) e por linha (L), em separado.

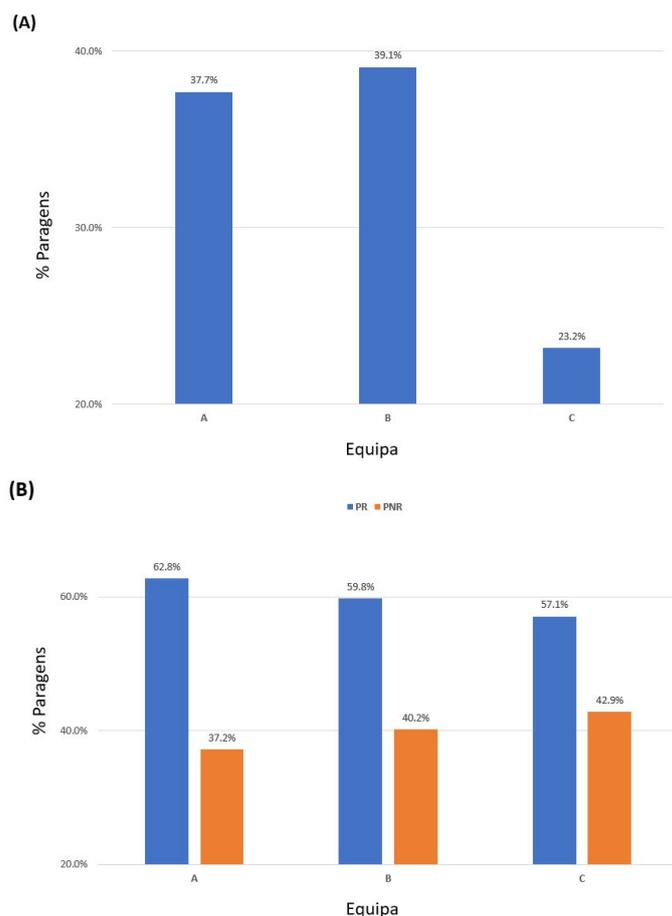


Figura 4.3.: Representação gráfica da percentagem de paragens ocorridas por equipa na secção de prensagem-linhas de vidragem: (A) paragens totais; (B) paragens registadas (R) e não registadas (NR).

De acordo com a figura 4.2 (A), a prensa-linha de vidragem que possui um maior número total de paragens (incluindo as registadas e não registadas) é a prensa-linha 3 (38.6%), seguida da prensa-linha 2 (32.7%) e, por fim, prensa-linha 1 (28.6%). Dentro do número total de paragens, e com base na figura 4.2 (B), é possível verificar que a prensa-linha 1 é a que possui um maior número de paragens registadas (61.3%) e a prensa-linha 2 a que se encontra com um maior número de paragens por registar (40.3%). Efectuou-se uma análise de variância ANOVA sob os dados das paragens registadas e não registadas nas diferentes prensas-linhas, da qual se chegou à conclusão que existem diferenças entre as paragens nas diferentes linhas de produção ( $p\text{-value}=0.006$ ) e também há diferença quanto às paragens que são registadas e não registadas ( $p\text{-value}=0.001$ ).

Em relação à comparação entre as paragens ocorridas e registadas nas prensas e nas linhas, figura 4.2 (C), em separado, foi possível concluir que as linhas são mais afetadas no que diz respeito a tempos de paragens, possuindo uma média de 66.2%. Após uma análise de variância ANOVA, foi possível concluir que existe de facto uma diferença quanto às paragens que ocorrem nas prensas e nas linhas de vidragem ( $p\text{-value}=0.000$ ).

Relativamente às equipas, figura 4.3, a equipa B é a equipa que possui maior número de paragens totais (39.1%), seguida da equipa A (37.7%) e C (23.2%). A equipa C é a que possui um maior número de paragens não registadas (42.9%); por sua vez, a equipa A é a equipa que regista um maior número de paragens (62.8%). A análise de variância pela ANOVA permitiu verificar que não existem diferenças entre

as equipas ( $p\text{-value}=0.119$ ) nem em relação aos tipos de paragens ( $p\text{-value}=0.067$ ). É de realçar que este tempo de paragem afeta apenas a qualidade da produção, sendo um parâmetro da produtividade, e não a qualidade das peças - uma vez que a qualidade do material encontra-se relacionada com o aparecimento ou não de defeitos.

As paragens não registadas que ocorrem nas prensas-linhas de vidragem representam cerca de 40% das paragens totais. Em relação às paragens registadas, procedeu-se à sua análise através do diagrama de Pareto, figura 4.4.

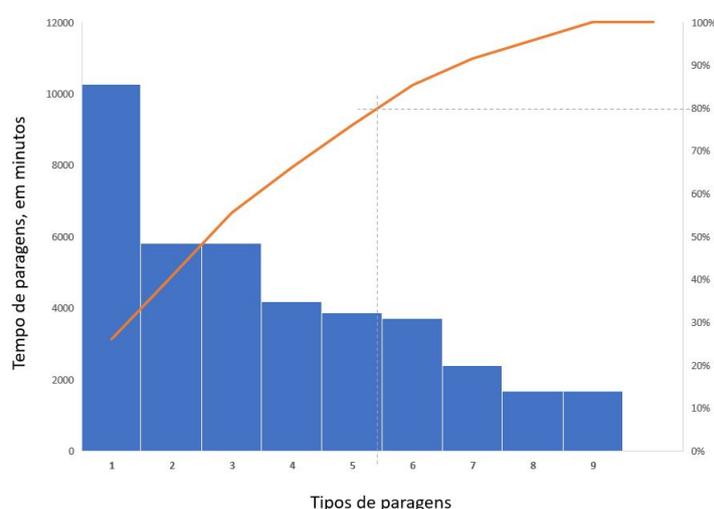


Figura 4.4.: Averiguação das causas mais relevantes nas paragens registadas que ocorrem nas prensas-linhas de vidragem através da análise de Pareto: 1- Mudança/Regulação da ferramenta; 2- Falta de vagonas; 3- Mudança de padrão; 4- Tempo de arranque; 5- Despoeiramento; 6- Ensaios; 7- Avaria mecânica na prensa/secador; 8- Falta de pó (nas prensas); 9- Avaria elétrica na prensa/secador.

Através do diagrama de Pareto da figura 4.4, é possível inferir que, cerca de 80% das causas de paragens registadas devem-se à mudança/regulação da ferramenta na prensa, seguida da falta de vagonas, mudança de padrão, tempo de arranque e despoeiramento - que totalizam um tempo de paragens de 29951 minutos, o equivalente a cerca de 62 turnos, isto é, 21 dias, onde não houve produção no intervalo de tempo analisado.

Relativamente à secção de escolha, as paragens não registadas representam cerca de 45% do total de paragens, e também foi efetuado o mesmo procedimento anterior, obtendo-se os gráficos da figura 4.5.

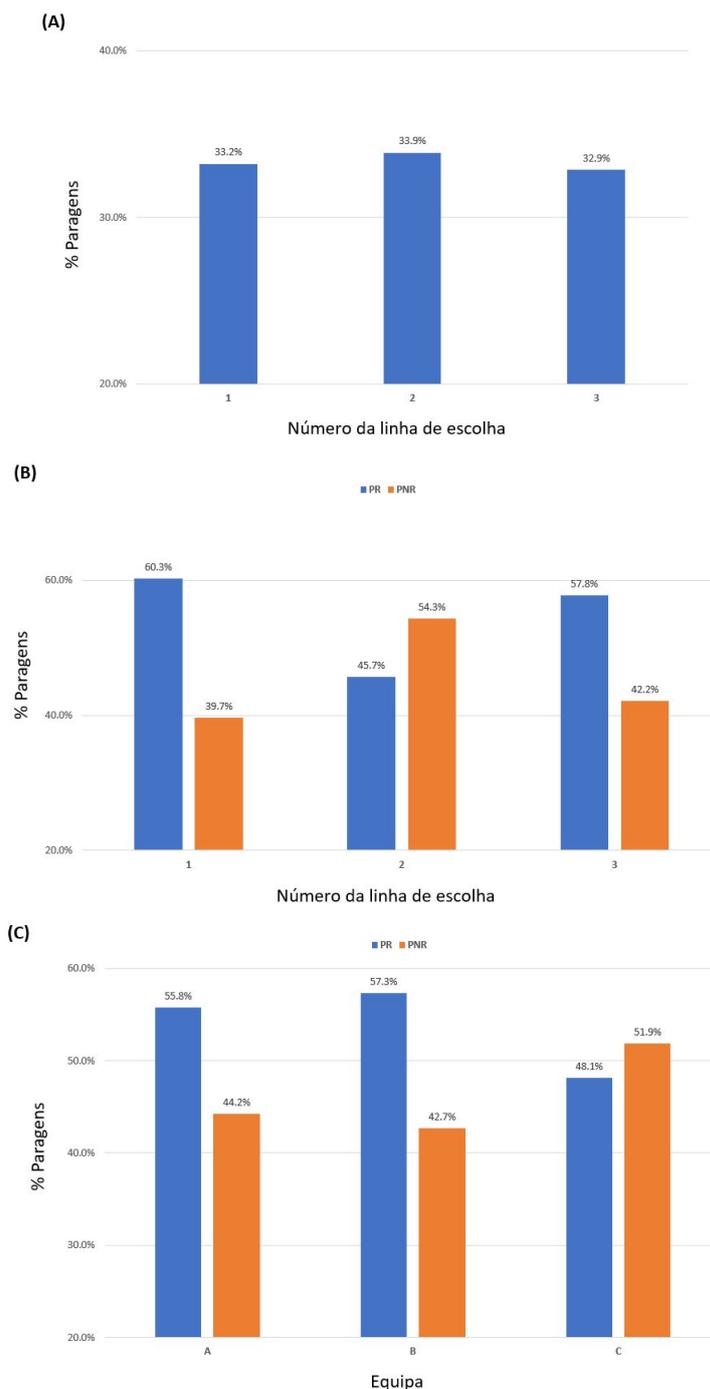


Figura 4.5.: Representação gráfica da percentagem de paragens ocorridas na secção de escolha: (A) paragens totais; (B) paragens registadas (R) e não registadas (NR) por linha de escolha (1, 2 e 3); (C) paragens registadas (R) e não registadas (NR) por equipa (A, B e C).

No que diz respeito às paragens nas linhas de escolha, figura 4.5 (A), o maior número de paragens, quer registadas quer não registadas, ocorre na linha de escolha 2, seguida da linha 1 e, por fim, linha 3. Dentro de cada uma das linhas de escolha, apenas a 2 apresenta um percentual de paragens não registadas mais elevado do que as registadas (54.3% e 45.7%, respetivamente), figura 4.5 (B). Contudo, a análise de variância ANOVA demonstrou que não existem diferenças entre as paragens que ocorrem nas diferentes linhas ( $p\text{-value}=0.990$ ) nem entre os diferentes tipos de paragens ( $p\text{-value}=0.423$ ).

No que concerne às equipas da secção de escolha, 4.5 (C), a que totaliza um maior número de paragens é a equipa B, seguida da equipa C e, por fim, da Equipa A. A Equipa C, por sua vez, é a equipa que não regista tantas paragens (48.1% em relação às 51.9% não registadas); contrariamente à equipa B, que é a que regista mais (57.3%). Mais uma vez, a análise de variância ANOVA permitiu verificar que afinal não existem diferenças entre as equipas ( $p\text{-value}=0.676$ ) nem entre os tipos de paragens ( $p\text{-value}=0.316$ ). É de salientar que o tempo de paragens encontra-se apenas a afetar a produção, isto é, a produtividade em si, e não a qualidade das peças - até porque a secção de escolha já não tem qualquer influência na qualidade do material, uma vez que o produto quando chega às linhas de escolha já se encontra finalizado e este setor tem apenas como objetivo a desclassificação do material por níveis de qualidade.

As paragens não registadas que ocorrem na secção de escolha representam, em média, cerca de 45% das paragens totais. Considerando apenas as paragens registadas, averiguou-se, por análise de Pareto, quais as causas mais relevantes que ocorrem nas linhas de escolha, figura 4.6.

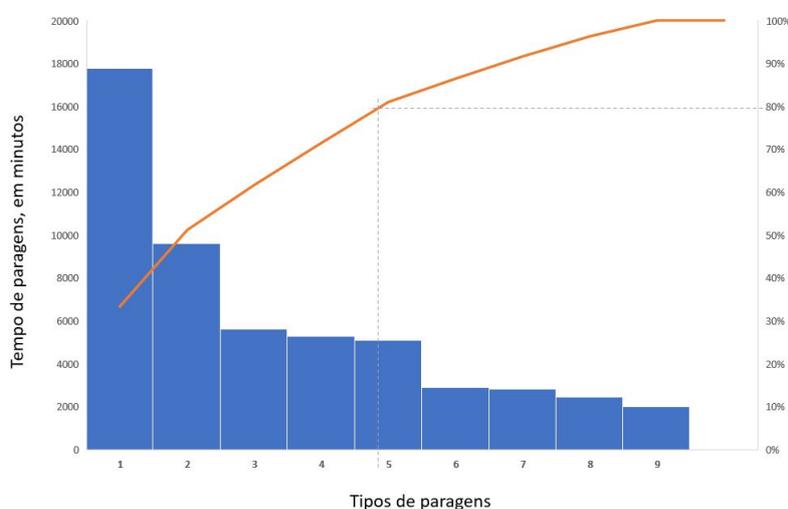


Figura 4.6.: Averiguação das causas mais relevantes nas paragens registadas que ocorrem nas linhas de escolha através da análise de Pareto: 1- Sem material para escolher; 2- Tempo de manutenção programada; 3- Outras paragens; 4- Tempo de re-escolha; 5- Tempo de mudança de formato; 6- Avaria no cartão; 7- Avaria na máquina de descarga; 8- Avaria no CPK; 9- Paragem para calibrar/planar.

Através do diagrama de Pareto da figura 4.6, é possível inferir que, cerca de 80% das causas de paragens incidem no facto de não haver material para escolher, o tempo de manutenção programada, as outras paragens, o tempo de re-escolha e o tempo de mudança de formato - que totalizam um tempo de paragens de 43350 minutos, o equivalente a 90 turnos, isto é, cerca de 30 dias, onde não houve produção no intervalo de tempo analisado.

#### 4.1.3. Produtividade e quebras em cru

A base de dados utilizada para a análise da produtividade por equipa é constituída por 840 linhas com 25 colunas. Com recurso a esta base de dados, foi possível concluir acerca da equipa que apresenta uma maior produtividade nas secções de prensas-linhas de vidragem e de escolha, de acordo com as equações 3.15 e 3.16, respetivamente. Os gráficos referentes à produtividade por equipa por secção prensagem-linhas de vidragem e escolha encontram-se ilustrados na figura 4.7.

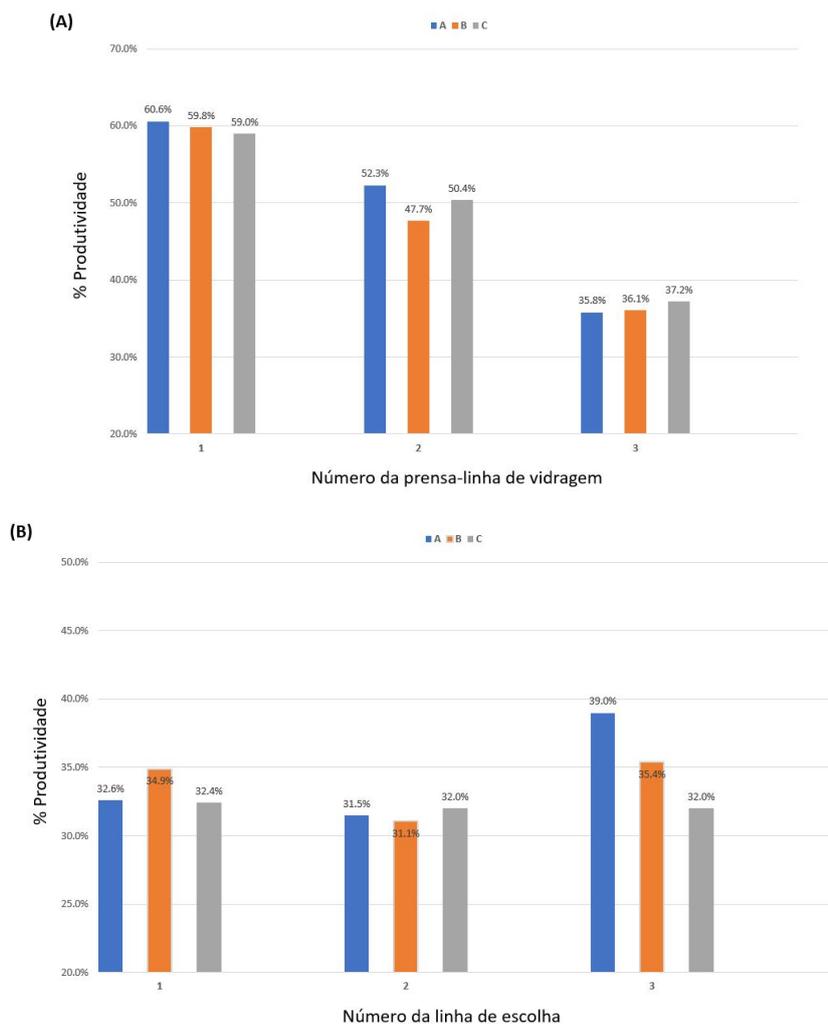


Figura 4.7.: Representação gráfica da percentagem de produtividade, por equipa (A, B e C) na: (A) prensa-linha de vidragem (1, 2 e 3); (B) linha de escolha (1, 2 e 3).

De acordo com a figura 4.7 (A), e tendo em conta que as equipas trabalham com todas as linhas de produção durante o seu turno, a equipa A foi a equipa que se mostrou mais produtiva nas prensas-linhas de vidragem (uma média de 49.6%), seguida da C (48.9%) e da B (47.9%). Quanto à equipa que se apresenta mais produtiva nas prensas-linhas, a A é a que apresenta uma maior produtividade nas prensas-linhas 1 e 2 (60.6% e 52.3%, respetivamente) e, a equipa C na prensa-linha 3 (37.2%). Apesar destas constatações, a ANOVA apenas detetou diferença significativa na produtividade de cada uma das prensas-linhas de vidragem ( $p\text{-value}=0.000$ ).

Com base na figura 4.7 (B), e tendo em conta que as equipas trabalham com todas as linhas de produção durante o seu turno, a equipa A também foi a equipa que se mostrou mais produtiva nas linhas de escolha (uma média de 34.4%), seguida da B (33.8%) e da C (32.1%). Em relação à equipa com maior produtividade por linha de escolha, a B é a que apresenta uma maior produtividade na linha de escolha 1 (34.9%), a C na linha de escolha 2 (32%) e a A na linha de escolha 3 (39%). É de realçar que a produtividade encontra-se relacionada com a qualidade da produção, no sentido em que significa fazer o máximo de produção no menor tempo possível. A ANOVA permitiu verificar que não existem diferenças entre as equipas ( $p\text{-value}=0.517$ ) nem entre as linhas de escolha ( $p\text{-value}=0.221$ ).

Uma base de dados composta de 163 linhas com 6 colunas foi criada com o objetivo de analisar a percentagem de quebras em cru nas prensas-linhas de vidragem. Este cálculo foi feito com base na equação 3.3. Os resultados obtidos encontram-se representados graficamente na figura 4.8.

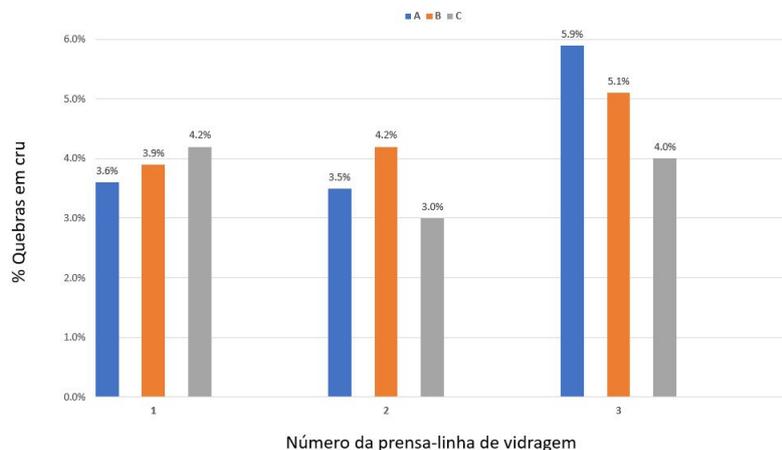


Figura 4.8.: Representação gráfica da percentagem de quebras em cru, por prensa-linha de vidragem (1, 2 e 3) e por equipa (A, B e C).

Conforme o gráfico da figura 4.8, é possível observar que, a percentagem de quebras em cru é similar para as três equipas, não havendo uma grande discrepância de valores e encontrando-se as três com quebras acima do pretendido (2.5%). Em relação à linha que apresenta o maior número de quebras e, conseqüentemente, prejudica mais a produção, esta trata-se da prensa-linha 3. Contudo, a análise ANOVA revelou que, neste caso, não existem diferenças entre as equipas ( $p\text{-value}=0.495$ ) nem entre as prensas-linhas de vidragem ( $p\text{-value}=0.131$ ).

#### 4.1.4. Qualidade do material e seus defeitos

Com o auxílio da base de dados construída, sendo esta composta por 578 linhas com 38 colunas, procedeu-se à análise das classificações atribuídas às peças porcelânicas de acordo com os seus respetivos níveis de qualidade, assim como os maiores defeitos encontrados nas mesmas, figuras 4.9 e 4.10, respetivamente.

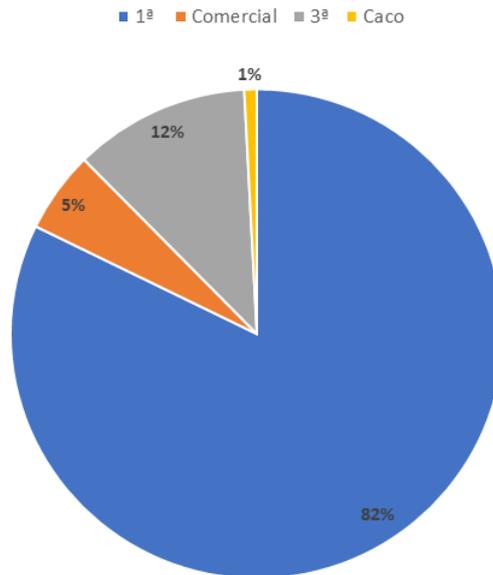


Figura 4.9.: Representação gráfica da percentagem de qualidade das peças de porcelanato, de acordo com as classificações atribuídas por níveis de qualidade às peças produzidas: primeira qualidade, comercial, terceira qualidade e caco.

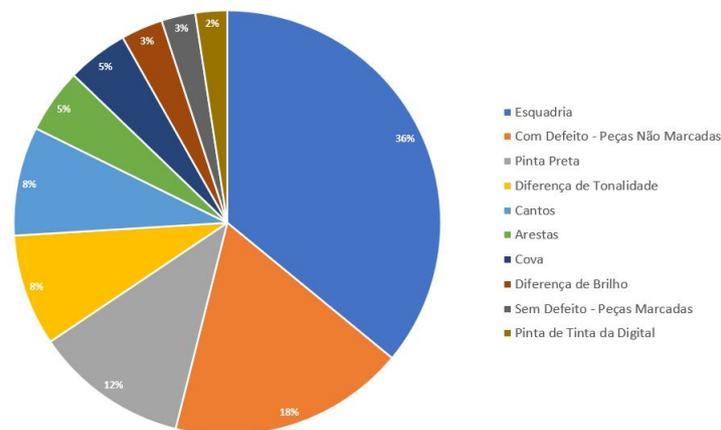


Figura 4.10.: Representação gráfica da percentagem dos dez principais defeitos identificados nas peças porcelânicas produzidas.

Relativamente à qualidade dos produtos e, tendo em conta a figura 4.9, é possível observar que, a percentagem de 1ª qualidade encontra-se bastante abaixo do objetivo (92%) e a percentagem de 3ª qualidade também tem um número considerável que deve ser minimizado.

No que diz respeito aos defeitos, figura 4.10, o maior percentual está relacionado com a esquadria (36%), figura 2.37 (L), seguido das peças que apresentam defeito e não se encontram marcadas (18%) e da pinta preta (12%), figura 2.37 (M).

#### 4.1.5. Eficiência global do equipamento

Com o auxílio da base de dados construída, de dimensão 708 linhas com 34 colunas, foi calculado a eficiência global do equipamento com base nas equações 3.21 e 3.22, respetivamente, quer para as prensas-linhas de vidragem quer para as linhas de escolha.

O gráfico com a representação da eficiência global do equipamento para as prensas, linhas e para o conjunto prensas-linhas de vidragem encontra-se representado na figura 4.11.

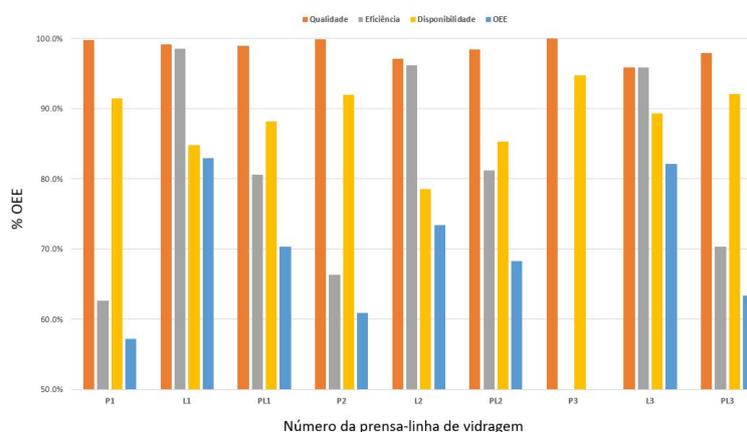


Figura 4.11.: Representação gráfica da percentagem de eficiência global do equipamento, com respetivos parâmetros de qualidade, eficiência e disponibilidade, para as prensas (P1, P2 e P3), linhas (L1, L2 e L3) e conjuntos prensa-linha de vidragem (PL1, PL2 e PL3).

Com base na figura 4.11 e relativamente à qualidade, é de realçar que o valor correspondente à prensa 3 não representa a realidade, uma vez que não existe contador após o secador e, por essa razão, quando introduzimos os valores na base de dados, assumimos o contador da prensa igual ao contador do secador, não resultando em qualquer tipo de quebras. Assumindo que um valor ideal de qualidade é maior ou igual a 99%, podemos observar que a linha 2, a prensa-linha 2, a linha 3 e a prensa-linha 3 possuem valores abaixo do objetivo. Em relação à eficiência, o valor ideal é ser maior ou igual a 95%, pelo que os equipamentos que se encontram abaixo do pretendido são a prensa 1, a prensa-linha 1, a prensa 2, a prensa-linha 2, a prensa 3 e a prensa-linha 3. Relativamente à disponibilidade, o valor considerado como ideal tem de ser maior ou igual a 90%, pelo que é necessário ter em atenção a linha 1, a prensa-linha 1, a linha 2, a prensa-linha 2 e a linha 3. O resultado final, sendo o de maior interesse e que corresponde à percentagem da eficiência global do equipamento, foi desfavorável para todos os equipamentos. A análise de variância ANOVA permitiu concluir que não existem diferenças entre as diferentes prensas, linhas e conjunto prensas-linhas ( $p\text{-value} > 0.010$ ); contudo, existem diferenças quanto aos parâmetros de desempenho ( $p\text{-value} = 0.000$ ).

Na figura 4.12 encontra-se representado o gráfico da eficiência global do equipamento para as linhas de escolha.

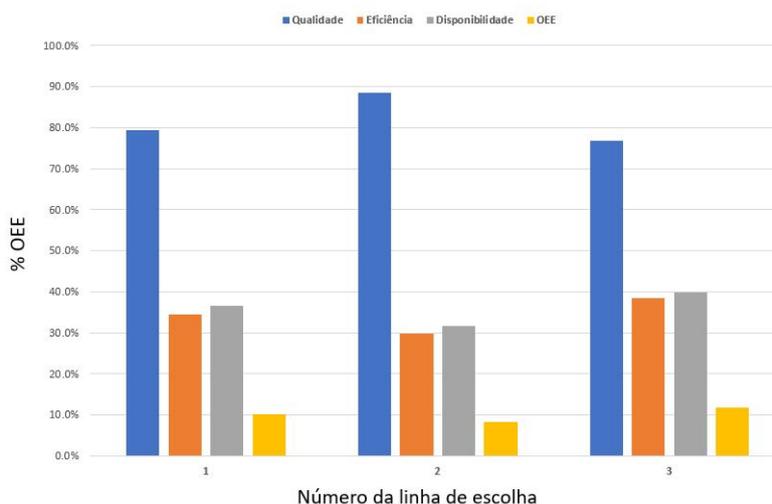


Figura 4.12.: Representação gráfica da percentagem de eficiência global do equipamento, com respetivos parâmetros de qualidade, eficiência e disponibilidade, para as linhas de escolha (1, 2 e 3).

De acordo com a figura 4.12, é possível inferir que todos os parâmetros (qualidade, eficiência e disponibilidade) encontram-se abaixo do padrão ideal, pelo que, como é de esperar, a eficiência global do equipamento encontra-se abaixo do pretendido para as três linhas de escolha, apresentando-se com valores muito críticos, principalmente derivados dos parâmetros de disponibilidade e eficiência. A análise de variância ANOVA permitiu verificar que não existem diferenças entre as linhas de escolha ( $p\text{-value}=0.815$ ); contudo, verifica-se diferenças entre os valores obtidos nos parâmetros de desempenho ( $p\text{-value}=0.000$ ).

## 4.2. Análise multivariada não supervisionada

As bases de dados utilizadas para as referidas análises são compostas de 150 amostras, sendo que para a análise sub-espaco preditor e resposta foram usadas, respetivamente, 66 e 17 variáveis; já para a análise global preditor-resposta, utilizou-se a totalidade das 83 variáveis.

### 4.2.1. Análise de componentes principais

Foi efetuada a análise PCA sob três perspetivas distintas - isoladamente em cada um dos sub-espacos dos preditores e das respostas e em conjunto sobre a base de dados global preditor-resposta. Com este estudo pretendeu-se ter uma noção de a) como é que as amostras recolhidas se encontravam distribuídas em cada espaco analisado, b) tentar encontrar grupos expectáveis e c) verificar singularidades em agrupamentos, tendo em conta as propriedades de cada tipo de peça fabricada, nomeadamente no que diz respeito à área/formato da peça porcelânica em estudo.

#### 4.2.1.1. Sub-espacos preditor e resposta

Primeiramente, procedeu-se à determinação da matriz de covariância quer para o sub-espaco preditor quer para o da resposta com o objetivo de normalizar as variáveis.

A quantidade de informação recuperada por cada fator encontra-se sistematizada para os sub-espacos preditor e resposta na tabela 4.1.

Tabela 4.1.: Resultado do PCA para o sub-espço preditor e para o sub-espço resposta relativamente aos valores próprios e quantidade de informação recuperada por cada componente principal.

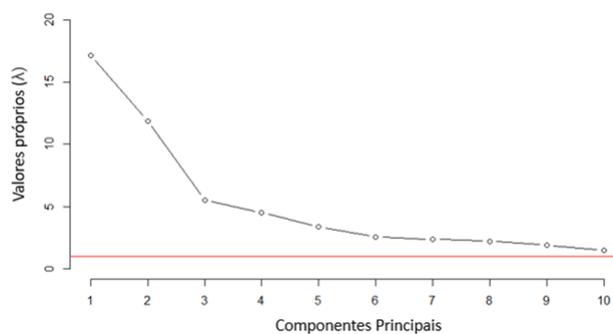
#	Preditor			Resposta		
	$\lambda^*$	VarX%	TotVarX%	$\lambda^*$	VarX%	TotVarX%
1	17.2	26.00	26.00	5.36	31.55	31.55
2	11.9	18.00	44.00	3.70	21.76	53.31
3	5.54	8.39	52.39	2.08	12.26	65.57
4	4.52	6.85	59.25	1.56	9.16	74.72
5	3.37	5.11	64.36	1.37	8.09	82.81
6	2.56	3.87	68.23	1.09	6.41	89.23
7	2.37	3.59	71.83	0.57	3.33	92.55
8	2.22	3.36	75.19	0.42	2.46	95.02
9	1.90	2.88	78.07	0.25	1.44	96.46
10	1.46	2.22	80.29	0.17	1.02	97.47
11	1.41	2.14	82.42	0.13	0.80	98.28
12	1.17	1.77	84.19	0.10	0.06	98.86
13	1.14	1.07	85.93	0.09	0.05	99.37
14	1.08	1.04	87.57	0.07	0.04	99.76
15	0.94	0.97	90.31	0.04	0.02	100.00

# - Índice da componente;  $\lambda^*$  - Valor próprio; VarX% - Variância explicada (%); TotVarX% - Variância explicada cumulativa (%).

De acordo com a tabela 4.1, podemos verificar que para se obter uma recuperação de informação de, aproximadamente, 80% são necessários dez fatores para o sub-espço dos preditores e cinco fatores para o sub-espço das respostas. Já em relação ao número de componentes principais a reter, seguindo o critério de Kaiser, abordado na subsubsecção 3.2.1.1, é possível observar que, para o sub-espço preditor devem ser selecionadas catorze e para o sub-espço resposta seis componentes.

Seguidamente, com vista a especificar o número de contribuições mais relevantes, procedeu-se à determinação dos gráficos de decaimento dos valores próprios com o número de componentes (*scree plot*) para os sub-espços preditor e resposta, respetivamente, figura 4.13.

(A)



(B)

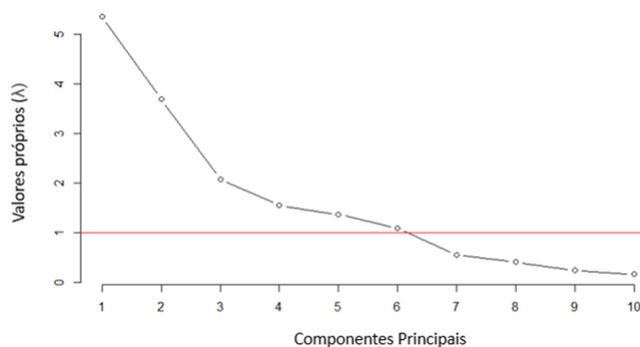
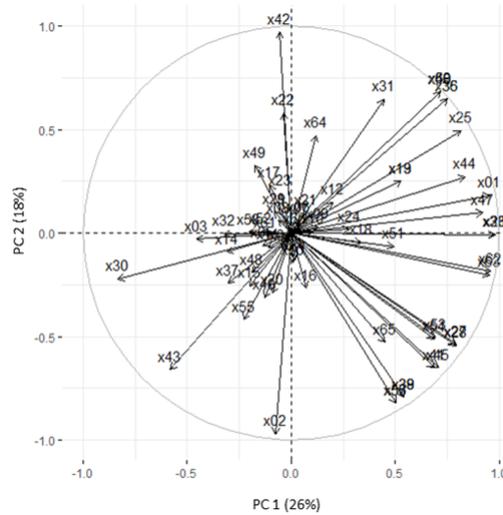


Figura 4.13.: Representação gráfica do decaimento dos valores próprios com o número de componentes (*scree plot*) para os sub-espaços: (A) preditor; (B) resposta.

Analisando o gráfico da figura 4.13, confirma-se o resultado obtido anteriormente seguindo o critério de Kaiser e tendo em conta a tabela 4.1, pelo que podemos considerar como componentes mais importantes as catorze primeiras componentes para o sub-espaço dos preditores, figura 4.13 (A), e as seis primeiras componentes para o sub-espaço das respostas, figura 4.13 (B), dado que este é o número de valores próprios acima do valor médio estimado.

Para uma análise acerca das variáveis dos sub-espaços preditor e resposta no novo sistema de eixos, foram elaborados os gráficos da figura 4.14, respetivamente.

(A)



(B)

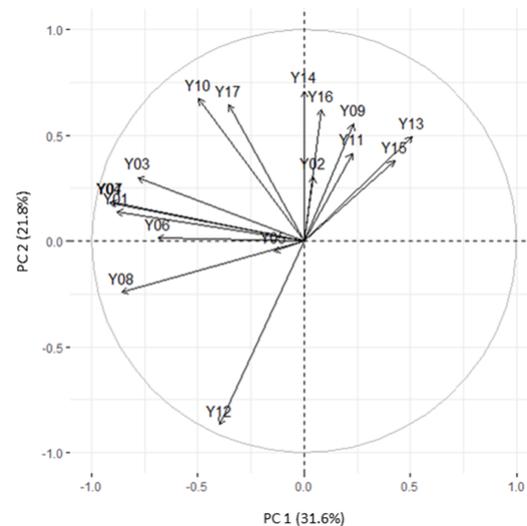


Figura 4.14.: Representação gráfica da posição das variáveis (*loadings*) em relação às duas primeiras componentes principais para os sub-espacos: (A) preditor - o eixo PC1 corresponde à primeira componente que apresenta uma recuperação de informação de 26% e o eixo PC2 corresponde à segunda componente principal que apresenta uma recuperação de informação de 18%, correspondendo a 44% da informação total; (B) resposta - o eixo PC1 corresponde à primeira componente que apresenta uma recuperação de informação de 31.6% e o eixo PC2 corresponde à segunda componente principal que apresenta uma recuperação de informação de 21.8%, correspondendo a 53.4% da informação total.

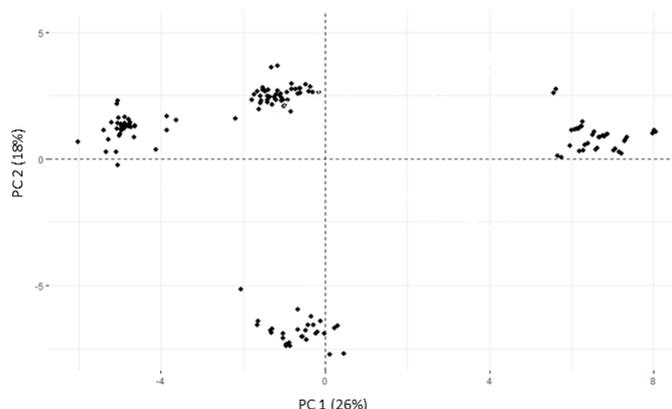
Com base na figura 4.14, é possível observar que as duas primeiras componentes, PC1 e PC2, exprimem uma recuperação de informação de apenas 44% para o sub-espaco dos preditores, figura 4.14 (A), e 53.31% para o sub-espaco das respostas, 4.14 (B) - na medida em que, a interpretação da representação gráfica em duas dimensões não poderá ser muito fidedigna, uma vez que a quantidade de informação recuperada pelas duas primeiras componentes principais é baixa.

Ainda assim, numa tentativa de interpretar os gráficos da figura 4.14, é possível constatar que, no sub-espaco dos preditores, figura 4.14 (A), as variáveis x02, x26, x33 e x42 são as mais relevantes em termos

de armazenamento de informação do sub-espço preditor; em relação ao sub-espço das respostas, figura 4.14 (B), as variáveis que se apresentam mais relevantes são a Y04, Y07 e Y12.

Seguidamente, procedeu-se à representação gráfica da distribuição das observações (*scores*) num gráfico de duas dimensões, figura 4.15.

(A)



(B)

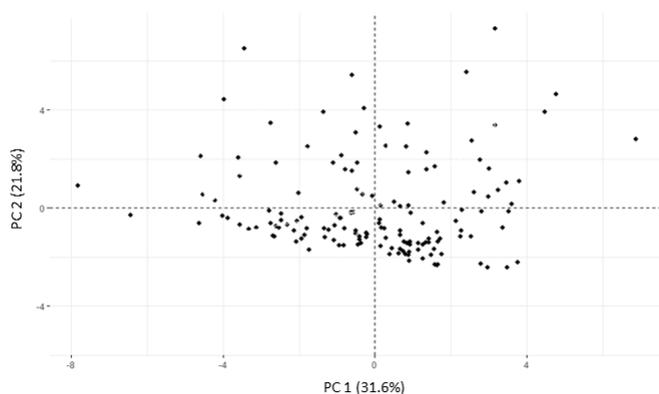


Figura 4.15.: Representação gráfica dos objetos (*scores*) no novo sistema de eixos a duas dimensões para os sub-espços: (A) preditor - o eixo PC1 corresponde à primeira componente que apresenta uma recuperação de informação de 26% e o eixo PC2 corresponde à segunda componente principal que apresenta uma recuperação de informação de 18%, correspondendo a 44% da informação total; (B) resposta - o eixo PC1 corresponde à primeira componente que apresenta uma recuperação de informação de 31.6% e o eixo PC2 corresponde à segunda componente principal que apresenta uma recuperação de informação de 21.8%, correspondendo a 53.4% da informação total.

A representação gráfica da figura 4.15 (A) sugere a existência de quatro agrupamentos no que diz respeito à representação dos objetos para o sub-espço dos preditores; contudo, esta análise é pouco válida apenas pela observação do gráfico, uma vez que a informação recuperada pelas componentes nele representadas totaliza apenas 44% da informação. Relativamente à figura 4.15 (B), é possível observar um padrão de distribuição tendencialmente aleatório, em nada similar ao obtido no caso dos preditores, indicando que as respostas não apresentam qualquer dependência.

### 4.2.1.2. Espaço global preditor-resposta

Primeiramente, procedeu-se à determinação da matriz de covariância para o espaço global preditor-resposta com o objetivo de normalizar as variáveis.

A sistematização da quantidade de informação recuperada por cada fator encontra-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2.: Resultado do PCA para o espaço global preditor-resposta relativamente aos valores próprios e quantidade de informação recuperada por cada componente principal.

#	$\lambda^*$	VarX%	TotVarX%
1	19.5	23.51	23.52
2	12.9	15.52	39.05
3	6.64	8.08	47.05
4	5.24	6.31	53.37
5	3.86	4.60	58.01
6	3.41	4.13	62.12
7	3.11	3.70	65.87
8	2.53	3.10	68.92
9	2.40	2.91	71.81
10	2.20	2.63	74.46
11	2.13	2.61	77.02
12	1.66	2.07	79.02
13	1.61	1.94	80.96
14	1.41	1.76	82.65
15	1.29	1.61	84.21
16	1.09	1.30	85.52
17	1.03	1.20	86.76
18	0.95	1.11	87.91

# - Índice de componente;  $\lambda^*$  - Valor próprio; VarX% - Variância explicada (%); TotVarX% - Variância explicada cumulativa (%).

De acordo com a tabela 4.2, podemos verificar que são necessárias treze componentes para haver uma recuperação de informação de, aproximadamente, 80% e que com apenas duas componentes só é possível representar cerca de 39% da informação original.

Seguidamente, com vista a especificar o número de contribuições mais relevantes, procedeu-se à determinação do gráfico de decaimento dos valores próprios com o número de componentes (*scree plot*), figura 4.16.

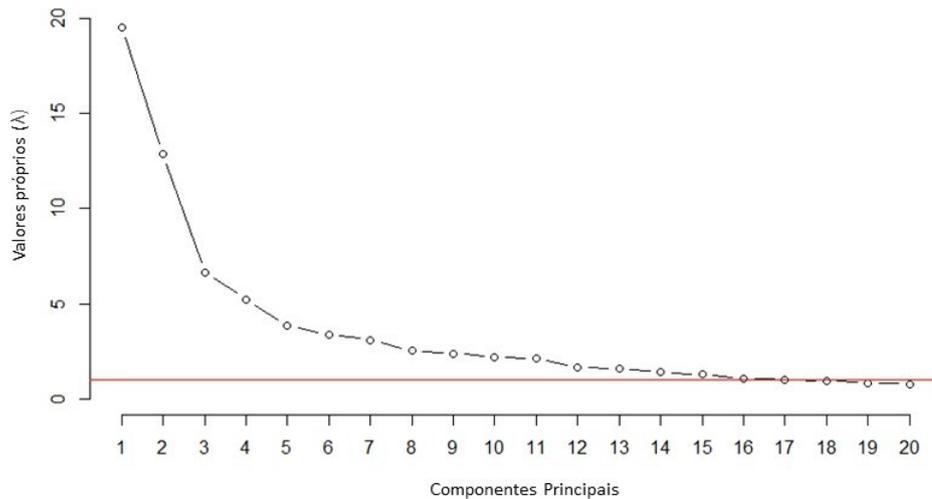
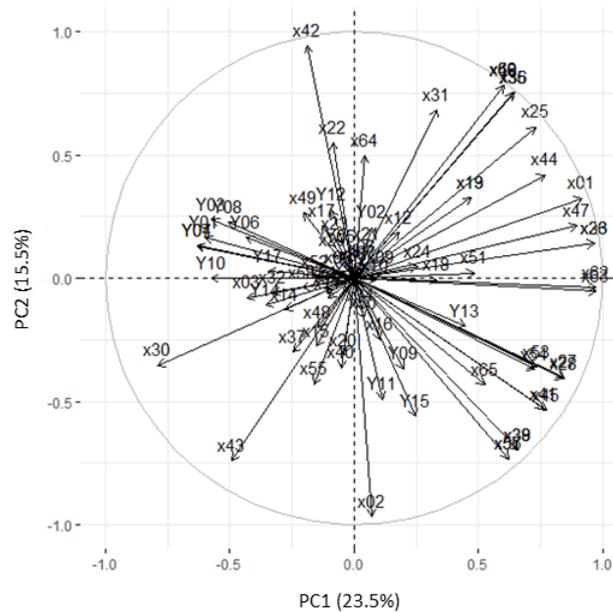


Figura 4.16.: Representação gráfica do decaimento dos valores próprios com o número de componentes (*scree plot*) para espaço global preditor-resposta.

Analisando o gráfico da figura 4.16 e tendo em conta também a tabela 4.2, e seguindo o Critério de Kaiser, abordado na subsubsecção 3.2.1.1, podemos considerar como componentes mais importantes as dezassete primeiras componentes para o espaço global preditor-resposta.

Para uma análise acerca das variáveis no novo sistema de eixos, procedeu-se à elaboração do gráfico da figura 4.17.



primeiras componentes, PC1 e PC2, exprimem uma recuperação de informação de apenas 39% - na medida em que, a representação gráfica em duas dimensões não poderá ser considerada muito representativa, uma vez que a quantidade de informação recuperada pelas duas primeiras componentes principais é muito baixa.

Todavia, numa tentativa de interpretação do gráfico da figura 4.17, é possível verificar que as variáveis x02, x26, x33, x42, x62 e x63 apresentam-se como as mais relevantes. É de salientar que as variáveis x02, x26, x33 e x42 repetem-se na análise efetuada para o sub-espaco preditor e que, curiosamente, nenhuma das variáveis dependentes, do sub-espaco da resposta, surge como relevante - provavelmente, porque o sub-espaco da resposta aparentava não ser estruturado (contribuição considerada aleatória).

Seguidamente, procedeu-se à representação gráfica da distribuição das observações (*scores*) num gráfico de duas dimensões, figura 4.18.

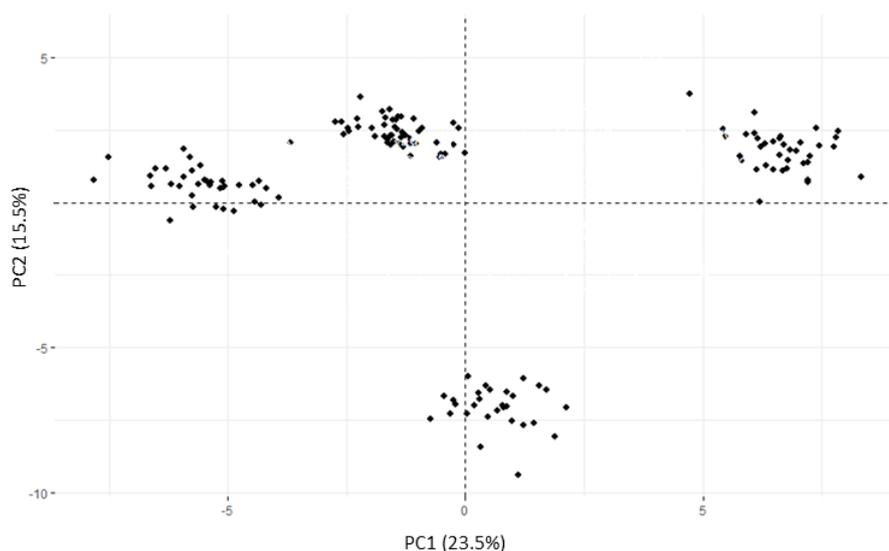
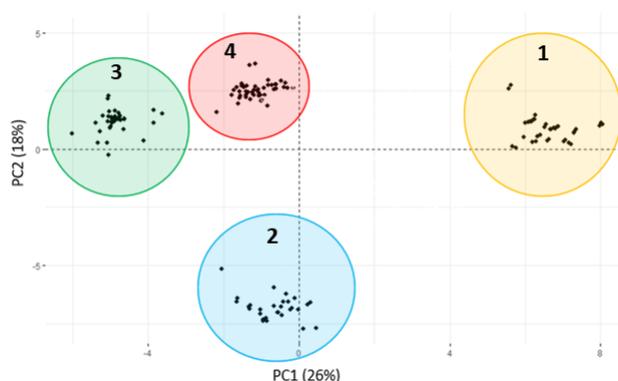


Figura 4.18.: Representação gráfica dos objetos (*scores*) no novo sistema de eixos a duas dimensões para o espaço global preditor-resposta. O eixo PC1 corresponde à primeira componente que apresenta uma recuperação de informação de 23.5% e o eixo PC2 corresponde à segunda componente principal que apresenta uma recuperação de informação de 15.5%, correspondendo a 39% da informação total.

A representação gráfica da figura 4.18 manifesta a existência de quatro agrupamentos; contudo, esta análise é pouco válida apenas pela observação do gráfico, uma vez que a informação recuperada pelas componentes nele representadas totaliza apenas 39% da informação. Mais uma vez, vemos que o padrão verificado para o sub-espaco preditor, ver figura 4.15 (A), tem uma estrutura similar ao que foi agora encontrado para o espaço global.

Assim, propôs-se uma nova representação das figuras 4.15 (A) e 4.18 com a inclusão de áreas que demonstram os agrupamentos de forma mais visível, figura 4.19.

(A)



(B)

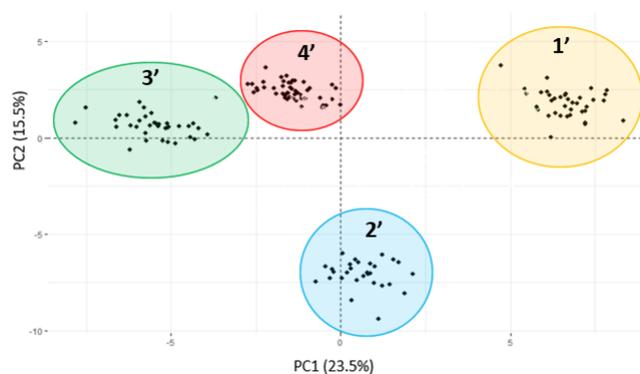


Figura 4.19.: Representação gráfica dos objetos (*scores*) no novo sistema de eixos a duas dimensões (*biplot*) para: (A) sub-espço predictor; (B) espaço global predictor-resposta. O eixo PC1 corresponde à primeira componente que apresenta uma recuperação de informação de 26% e 23.5%, respetivamente, e o eixo PC2 corresponde à segunda componente principal que apresenta uma recuperação de informação de 26% e 15.5%, respetivamente. Relativamente aos *clusters* 1, 2, 3 e 4, estes correspondem, respetivamente, aos agrupamentos a amarelo, azul, verde e vermelho.

Observando a figura 4.19, tanto para o sub-espço predictor (A) como para o espaço global predictor-resposta (B), verifica-se que ambos os gráficos são semelhantes, indicando que a informação contida no sub-espço dos preditores condiciona muito a informação contida no espaço global predictor-resposta. Este resultado pode ser explicado pelo facto de que existem 66 variáveis no sub-espço dos preditores, havendo uma maior contribuição de informação para o espaço global, contrariamente ao sub-espço das respostas que apresenta apenas 17.

Curiosamente, observa-se a preservação da estrutura na figura 4.19 (A) e (B), existindo quatro agrupamentos distintos: o agrupamento 1 contém 37 objetos, o agrupamento 2 contém 29 objetos, o agrupamento 3 contém 35 objetos e, por último, o agrupamento 4 contém 49 objetos.

Esta distribuição dos objetos, ou seja, das amostras em estudo, estão relacionadas com a área/formato das peças porcelânicas produzidas, tal como era expectável - dado que, o agrupamento 1 diz respeito às peças de formato 60x60, o agrupamento 2 às de 20x80, o agrupamento 3 às de 33x33 e o agrupamento 4 às de 45x45.

### 4.2.2. Análise hierárquica de agrupamentos

Uma vez que a informação recuperada por PCA a duas dimensões era demasiado insuficiente (aproximadamente, 44% e 53% para os sub-espacos preditor e resposta, respetivamente, e 39% para o espaco global preditor-resposta), de modo similar procedeu-se ao estudo dos sub-espacos preditor e respostas em separado e, de seguida, a sua análise conjunta preditor-resposta, com o intuito de entender a similaridade nas amostras do sistema em causa e, deste modo, procurar relacionar esta informação com características das peças porcelânicas fabricadas representadas no sistema de dados em estudo.

#### 4.2.2.1. Análise de sub-espacos preditor e resposta

Primeiramente, foi determinada a matriz de dissimilaridade baseada na distância Euclidiana para os dados referentes aos sub-espacos preditor e resposta. Em relação ao método de associação, utilizou-se a ligação média e a ligação de Ward.

De seguida, procedeu-se à representação gráfica do dendrograma através da análise HCA, quer para a ligação média quer para a ligação de Ward, para os sub-espacos preditor e resposta, figura 4.20.

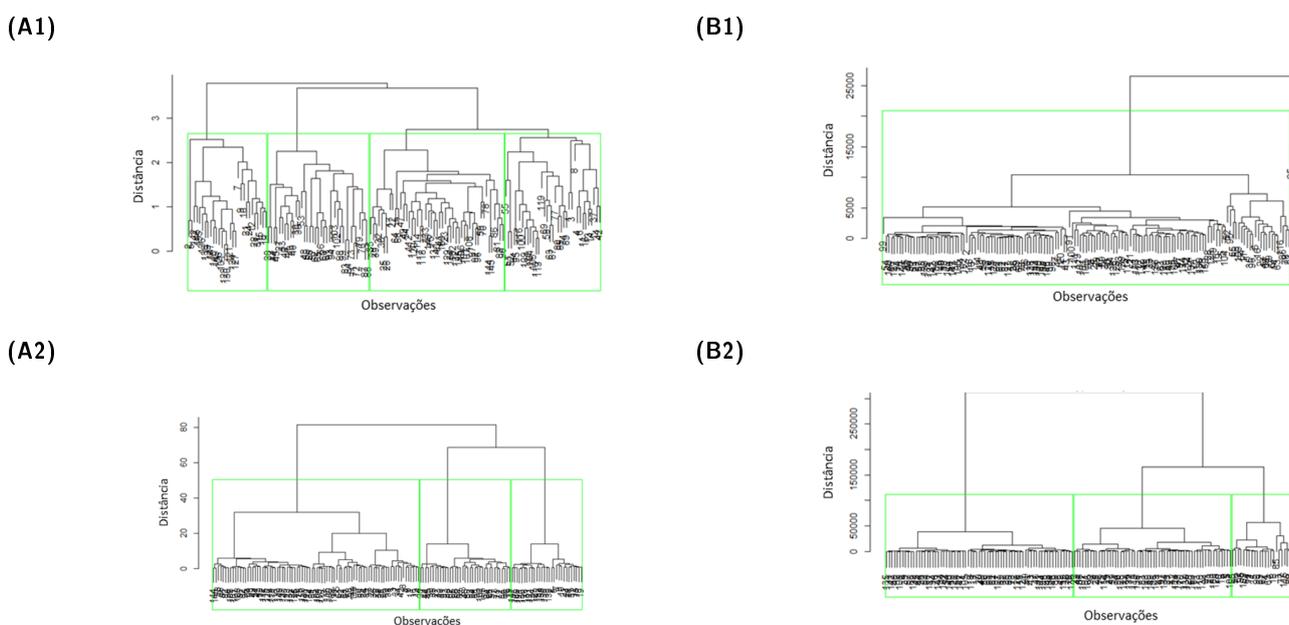


Figura 4.20.: Representação gráfica do dendrograma através do: (A1) método de ligação média e (A2) método de ligação de Ward para o sub-espaco dos preditores; (B1) método de ligação média e (B2) método de ligação de Ward para o sub-espaco das respostas. Os retângulos a verde sugerem uma perspetiva de formação de agrupamentos.

Assumindo como critério de agrupamento metade da distância de sobreposição global dos objetos em causa, verifica-se que os dendrogramas obtidos para o sub-espaco dos preditores, figura 4.20 (A1) e (A2), propõem a existência de quatro agrupamentos quando se recorre ao método de ligação média, figura 4.20 (A1), e três agrupamentos quando se utiliza o método de ligação de Ward, 4.20 (A2). Relativamente aos dendrogramas obtidos para o sub-espacos das respostas, figura 4.20 (B1) e (B2), verifica-se a existência de dois agrupamentos quando utilizado o método de ligação média, figura 4.20 (A1), e três agrupamentos quando se utiliza o método de ligação de Ward.

Uma vez que os dendrogramas obtidos com recurso ao método de Ward, figura 4.20 (A2) e (B2), se apresentam de forma mais compacta e bem estruturada, o que permite uma melhor visualização dos agrupamentos, propôs-se uma nova representação da figura 4.20 (A2) e (B2) com a inclusão de áreas que demonstram os agrupamentos (*clusters*) de forma mais explícita, figura 4.21.

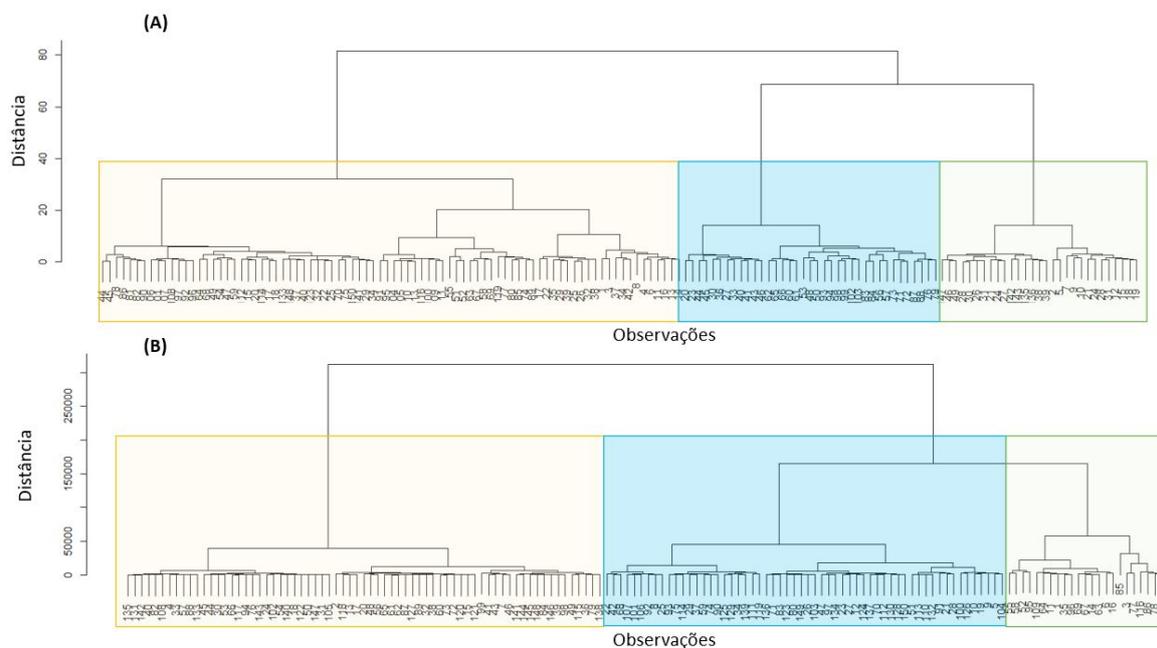


Figura 4.21.: Representação gráfica do dendrograma através do método de ligação de Ward para os sub-espacos: (A) Preditor; (B) Resposta. Relativamente aos agrupamentos 1, 2 e 3, estes correspondem, respetivamente, aos agrupamentos a amarelo, azul e verde, da esquerda para a direita.

Com base na figura 4.21 (A), é possível verificar a existência de três agrupamentos para o sub-espaco dos preditores, como já mencionado anteriormente, sendo que as amostras que dizem respeito a cada um destes encontram-se divididas por formato e, por vezes, subdivididas pelo tipo de pó. Relativamente ao agrupamento a amarelo, este é dividido, da esquerda para a direita, em amostras referentes a peças porcelânicas de formato 45x45 e produzidas com o tipo de pó ECOPOR, e a segunda ramificação diz respeito a amostras de formato 33x33 e de 45x45, respetivamente, com o uso do tipo de pó X-23. No agrupamento a azul, encontram-se as peças porcelânicas de formato 60x60, não tendo sido encontrada uma razão para a subdivisão existente dentro deste agrupamento. No que diz respeito ao agrupamento a verde, este é composto por peças de 20x80, sendo que, da esquerda para a direita, a primeira ramificação está relacionada com as peças que foram produzidas com o uso do tipo de pó ECOPOR e a outra ramificação com as que foram produzidas com o tipo de pó X-23.

De acordo com a figura 4.21 (B), observa-se, também, a existência de três agrupamentos, encontrando-se estes divididos pelo número de peças porcelânicas produzidas, pelo que, o agrupamento a amarelo relaciona-se com as peças porcelânicas que foram produzidas em maior quantidade e, contrariamente, os agrupamentos a azul e a verde com as peças porcelânicas que foram produzidas em menor quantidade. A diferença que se encontra entre os agrupamentos a azul e a verde reside no facto de que, o agrupamento a verde só possui peças porcelânicas certificadas (contêm na sua designação as iniciais PA).

#### 4.2.2.2. Análise do espaço global preditor-resposta

Primeiramente, foi determinada a matriz de dissimilaridade baseada na distância Euclidiana para os dados referentes ao espaço global preditor-resposta. Utilizou-se a ligação média para efetuar a comparação dos objetos e os resultados encontram-se representados no gráfico da figura 4.22.

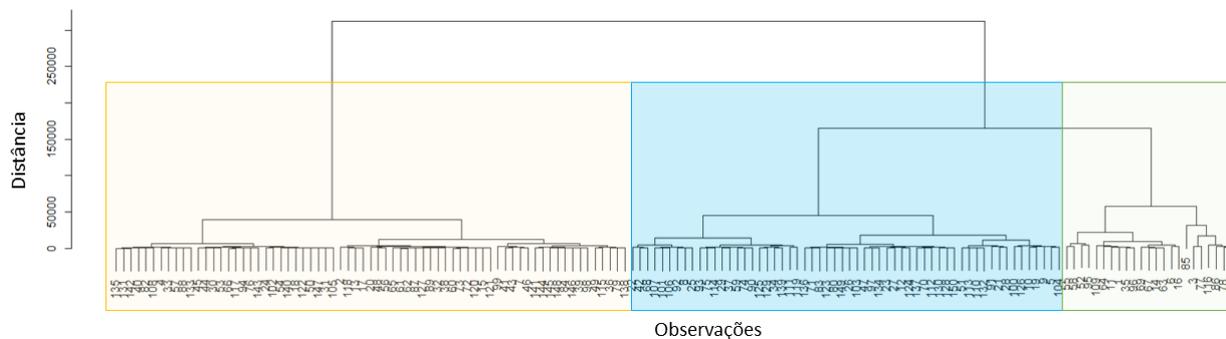


Figura 4.22.: Representação gráfica do dendrograma através do método de ligação de Ward para o espaço global preditor-resposta. Relativamente aos agrupamentos 1, 2 e 3, estes correspondem, respetivamente, aos agrupamentos a amarelo, azul e verde, da esquerda para a direita.

Observando a figura 4.22, verifica-se a existência de três agrupamentos - sendo que, este dendrograma assemelha-se à representação do dendrograma para o sub-espaço da resposta, ver figura 4.21 (B) - do qual não resultou nenhuma conclusão com especial interesse relativamente à qualidade do material, uma vez que a classificação está relacionada com a quantidade de peças porcelânicas produzidas.

Em suma, os resultados obtidos para análise PCA e para a análise HCA demonstraram ser diferentes. No PCA houve uma compressão da informação, tendo havido uma retenção inferior a 50% com a representação gráfica a duas dimensões, pelo que apenas foi detetada estrutura no sub-espaço dos preditores e no espaço global preditor-resposta, sugerindo respostas aleatórias; já o HCA permitiu identificar estruturas quer no sub-espaço dos preditores quer no sub-espaço das respostas, estando estas relacionadas, respetivamente, com o formato das peças e tipo de pó utilizado e com a quantidade de peças produzidas.

### 4.3. Modelação multivariada

Para este trabalho recorreu-se a uma base de dados composta por 150 linhas correspondentes aos fabricos registados (amostras) e 83 colunas onde 66 estão relacionadas com as matérias-primas e condições de fabrico (preditores) e 17 respostas (Y01 a Y17) relacionadas com os tipos de perdas de material e qualidade final das peças produzidas. Relativamente às respostas, a Y01 encontra-se relacionada com o número de peças produzidas; a Y02 e Y03 com o número de quebras em cru, sendo a Y02 o valor normal obtido e Y03 em percentagem; a Y04 com o número de peças cozidas; a Y05 e Y06 com o número de quebras em cozido, sendo a Y05 o valor obtido em percentagem e Y06 o valor normal; a Y07 com o número de peças escolhidas; as Y08 à Y15 encontram-se relacionadas com o valor normal obtido para a qualidade da peça em termos de primeira qualidade (Y08), comercial (Y09), terceira qualidade (Y10) e caco (Y11) e com o seu valor em percentagem (Y12, Y13, Y14 e Y15, respetivamente); e, por fim, as últimas duas respostas Y16 e Y17 estão relacionadas com a percentagem e o valor normal obtido, respetivamente, para o número de peças desclassificadas pelo liner.

Após identificação das variáveis independentes (preditores) e variáveis dependentes (respostas) referentes ao processo industrial em estudo, verificou-se que não haviam omissões de dados no conjunto de amostras obtido. Em relação ao tipo de variáveis controladas verificou-se que não existiam dados invariantes, ou seja, variáveis contendo apenas valores constantes. Em termos de disparidade de escalas dos valores, verificou-se que os dados relativos às variáveis x01, x26, x33, Y04, Y07 e Y08 encontravam-se numa escala distinta das restantes variáveis, pelo que foi necessário proceder à sua logaritmização, introduzindo assim novas variáveis na base de dados inicial.

No sentido de procurar melhorar a descrição das respostas com modelos polinomiais, efetuou-se a expansão da matriz de preditores com termos de grau não unitário - preditores do tipo R, T e Q para descrever as potências 1/2, 3/2 e 2 baseadas nos preditores iniciais.

Após esta expansão da base de dados efetuou-se o auto-escalamento dos preditores, equação 3.29.

Seguidamente diagnosticou-se o conjunto de preditores a usar nos modelos de iniciação - para tal procedeu-se à estimativa do coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para cada combinação preditor-resposta e, após a sua ordenação decrescente, consideraram-se apenas aqueles que se situavam entre o valor máximo e metade desse valor.

Na tabela 4.3 encontra-se representado o número de preditores utilizados para a iniciação de modelos para cada uma das respostas.

Tabela 4.3.: Número de preditores eleitos, modelos iniciais, modelos obtidos e modelo eleito para cada uma das respostas (Y).

Resposta	Preditores eleitos	Modelos iniciais	Modelos obtidos	Modelo eleito
Y01	74	148	48	m138
Y02	11	22	14	m214
Y03	18	36	21	m316
Y04	73	146	56	m406
LY04	77	154	106	mL484
Y05	17	34	26	m516
Y06	101	202	145	m6737
Y07	73	146	88	m709
LY07	77	154	106	mL783
Y08	70	140	101	m839
LY08	69	138	110	mL8902
Y09	48	96	53	m929
Y10	56	112	90	m1052
Y11	40	80	70	m1166
Y12	33	66	51	m1217
Y13	82	164	127	m13404
Y14	75	150	89	m1443
Y15	47	94	61	m1544
Y16	22	44	34	m1617
Y17	55	110	91	m1778

Modelo eleito - código referencial: os primeiros números estão relacionados com o identificador da resposta e os restantes com o número do modelo encontrado.

Após a seleção dos preditores com maior interdependência procedeu-se ao desenvolvimento do maior número de eventuais modelos, tendo-se usado cada preditor previamente selecionado na iniciação de modelos, segundo os critérios AIC e BIC, equações 2.6 e 2.7, respetivamente.

No final da sequência iterativa de pesquisa do modelo que melhor satisfaz os critérios anteriores, obteve-se uma listagem provisória de modelos resultantes. Esta listagem foi organizada por ordem crescente de complexidade (maior número de parâmetros) tendo deste modo facilitado o reconhecimento de modelos coincidentes - nesse caso estes foram removidos de modo a ficar apenas com um conjunto de modelos distintos.

Após esta operação, procedeu-se à análise dos modelos obtidos no sentido de verificar a existência de parâmetros sem significado estatístico - no caso de surgirem parâmetros “nulos”, esses modelos foram posteriormente simplificados, por remoção e reajuste de forma a deixar de estarem sobre-parametrizados. No caso de este novo modelo parcimonioso não corresponder a algum outro já presente na listagem, este foi também adicionado à mesma.

Perante a listagem definitiva de modelos obtidos, efetuou-se a avaliação da qualidade dos modelos quanto ao ajuste (QA, equação 3.31) e à respetiva capacidade preditiva (QP, equação 3.35). A eleição do melhor modelo que descreve cada resposta foi obtida através do cálculo da qualidade global do modelo (QG, equação 3.36). Os resultados para os melhores modelos eleitos referentes a cada uma das respostas encontram-se sistematizados na tabela 4.4 e as respetivas equações na tabela 4.5.

Tabela 4.4.: Sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição das respostas através de modelos polinomiais por modelação multivariada evolutiva - avaliação da qualidade do ajuste, de previsão e global dos modelos eleitos.

Resposta	$\sigma_{fit}$	$R^2$	$R^2_{adj}$	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*
Y01	1.054	0.746	0.733	450.2	474.2	1.110	1.110	2.43	0.81	1.97
Y02	0.954	0.859	0.848	423.9	460.1	1.019	1.018	3.91	0.96	3.77
Y03	1.643	0.801	0.788	585.3	615.4	1.692	1.692	1.07	0.35	0.37
Y04	1.044	0.744	0.730	448.4	475.6	1.088	1.088	2.44	0.84	2.06
LY04	1.419	0.942	0.939	540.4	567.6	1.469	1.468	2.03	0.46	0.94
Y05	2.225	0.699	0.687	673.5	694.6	2.263	2.262	0.46	0.20	0.09
Y06	1.270	0.717	0.694	509.8	546.0	1.331	1.331	1.41	0.56	0.79
Y07	1.046	0.740	0.725	448.8	475.9	1.088	1.088	2.40	0.84	2.03
LY07	1.425	0.941	0.938	541.7	568.9	1.481	1.480	2.01	0.46	0.92
Y08	1.042	0.718	0.704	446.7	470.8	1.089	1.089	2.31	0.84	1.95
LY08	0.854	0.989	0.988	394.5	442.7	0.936	0.936	6.55	1.14	7.48
Y09	1.420	0.648	0.622	542.4	575.6	1.489	1.488	0.91	0.45	0.41
Y10	1.052	0.797	0.773	457.9	509.1	1.128	1.127	2.51	0.79	1.98
Y11	0.382	0.870	0.844	161.4	239.7	0.705	0.704	49.69	2.01	100.1
Y12	1.412	0.972	0.969	544.4	589.6	1.485	1.484	2.08	0.45	0.94
Y13	0.980	0.737	0.709	434.8	480.1	1.045	1.044	2.55	0.92	2.34
Y14	1.085	0.846	0.823	470.7	533.9	1.192	1.192	2.16	0.70	1.80
Y15	0.767	0.773	0.758	356.6	386.7	0.908	0.908	5.54	1.21	6.72

$\sigma_{fit}$  - desvio padrão do ajuste;  $R^2$  e  $R^2_{adj}$  - coeficientes de determinação de Pearson e ajustado (para compensar diferenças na alteração do número de parâmetros); AIC - critério de informação de Akaike; BIC - critério de informação Bayesiano; QA - qualidade do ajuste; PE - estimativa do erro de previsão normal; PEadj - estimativa do erro de previsão ajustado (*leave-one-out*); QP - qualidade de previsão; QG - qualidade global; \* - valores multiplicados por  $10^6$ .

Tabela 4.5.: Equações polinomiais obtidas por modelação multivariada evolutiva dos modelos eleitos para descrição das respostas em estudo.

Resposta	Equação do modelo eleito
Y01	$\sim Q63 + Q04 + R44 + I20 + I34 + I10 + Q06 - 1$
Y02	$\sim R64 + R23 + Q22 + Q31 + x31 + Q40 + Q45 + Q34 + Q55 + I21 + x50 - 1$
Y03	$\sim I62 + Q64 + R13 + Q31 + Q13 + I22 + Q32 + R52 + Q55 - 1$
Y04	$\sim Q62 + Q04 + R44 + I20 + I34 + x50 + R45 + Q21 - 1$
LY04	$\sim x63 + R66 + Q49 + I34 + I10 + R34 + I49 + I09 - 1$
Y05	$\sim x18 + I18 + I51 + Q54 + Q18 + I20 - 1$
Y06	$\sim Q11 + x11 + R65 + Q51 + R11 + x65 + R22 + Q30 + I34 + R30 + I28 - 1$
Y07	$\sim Q62 + Q04 + R44 + I20 + I34 + x50 + R45 + Q21 - 1$
LY07	$\sim x63 + R66 + Q49 + I34 + I10 + R34 + I49 + x08 - 1$
Y08	$\sim IL26 + Q04 + I44 + I20 + I25 + IL33 + I45 - 1$
LY08	$\sim Q47 + I20 + I08 + I10 + R66 + R29 + x29 + Q29 + I27 + x66 + Q07 + R23 + Q12 + x44 + Q24 - 1$
Y09	$\sim Q45 + Q65 + I44 + R23 + Q55 + I63 + I31 + I15 + R52 + I14 - 1$
Y10	$\sim x33 + Q09 + I65 + Q47 + R23 + x55 + Q12 + I26 + I01 + I20 + I52 + x46 + I51 + x35 + Q14 + Q37 - 1$
Y11	$\sim Q40 + Q47 + x01 + I32 + Q28 + I43 + I17 + x25 + I06 + R22 + x22 + R27 + Q27 + R54 + Q55 + Q22 + x03 + x55 + Q23 + R52 + R23 + Q52 + I50 + I15 + R13 - 1$
Y12	$\sim I50 + R23 + R20 + I12 + I47 + Q54 + Q08 + x48 + I52 + x53 + R29 + x29 + Q43 + I65 - 1$
Y13	$\sim R54 + Q62 + R23 + I22 + R29 + Q53 + x29 + R14 + I44 + I15 + Q29 + Q34 + Q30 + I31 - 1$
Y14	$\sim R20 + x10 + I25 + I48 + I12 + I22 + x49 + Q08 + x15 + Q21 + I14 + x21 + I63 + I26 + I45 + R23 + Q32 + x22 + I51 + Q11 - 1$
Y15	$\sim I59 + I47 + I35 + Q43 + I12 + Q40 + I15 + I37 + Q34 - 1$
Y16	$\sim I16 + Q23 + R14 + I48 + Q09 + x10 + R37 + Q43 + x43 + I18 + Q54 + I31 + I44 - 1$
Y17	$\sim Q65 + Q23 + Q43 + Q18 + R37 + I14 + Q09 + x10 + I17 + I48 + Q22 + Q30 + I08 - 1$

Equação do modelo - fórmula matemática simplificada de acordo com a linguagem de programação R-project.

Com base na tabela 4.4, podemos analisar a descrição dos resultados por parte do modelo eleito e a previsão associada ao mesmo através, respetivamente, do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do erro de previsão (PE, equação 3.32) - pelo que, um maior valor de  $R^2$  é um bom resultado, pois indica que o modelo se encontra a descrever uma maior quantidade de informação contida na resposta; contrariamente, um maior erro de previsão indica que o modelo apresenta maiores limitações em traduzir a relação casualística que relaciona os preditores selecionados com a resposta em modelação.

Em termos de ajuste de modelos multivariados pode-se definir como critérios de avaliação o respetivo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Com base nos critérios usuais da qualidade e também nos pressupostos de Pareto e de Pearson (relativamente à análise PCA), um modelo excelente traduz mais que 99% da informação da resposta, um bom modelo é capaz de reproduzir mais de 95% dessa informação e um modelo aceitável traduz pelo menos 80% da resposta modelada.

Para uma melhor análise quanto ao coeficiente de determinação de cada um dos modelos eleitos procedeu-se à sua representação gráfica, figura 4.23.

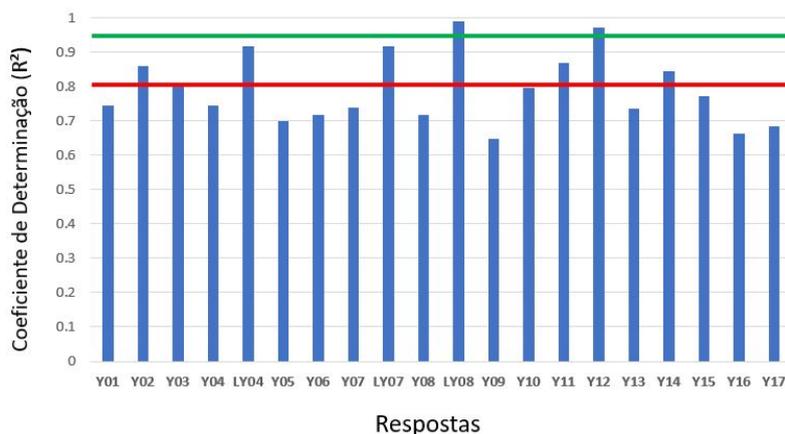


Figura 4.23.: Representação gráfica do coeficiente de determinação de Pearson ( $R^2$ ) para cada uma das respostas estudadas. A linha a verde evidencia quando o  $R^2 = 0.95$ , visto que este foi o valor escolhido como critério de aceitação de um bom modelo e a linha a vermelho evidencia quando  $R^2 = 0.80$ , o requisito mínimo de aceitação como modelo satisfatório.

Da figura 4.23 verifica-se que existem dois modelos capazes de descrever bem as respetivas respostas (LY08 e Y12) já que os seus coeficientes de determinação garantem que mais de 95% da informação contida em cada resposta está a ser justificada através dos modelos eleitos.

Ainda da mesma figura verifica-se que há duas respostas que apresentam uma razoável descrição (LY04 e LY07 com  $R^2 > 0.90$ ) mas as restantes não se consegue descrever tão bem.

Preocupados com o “eventual insucesso” dos modelos de base polinomial na descrição destas respostas multivariadas, os modelos eleitos foram posteriormente analisados através de um teste de recuperação para verificar se se detetava algum eventual erro sistemático. Verificou-se que todos os modelos encontrados, apesar de terem alguma dificuldade no ajuste, demonstraram que o modelo eleito encontra-se a reproduzir fielmente os resultados experimentais, não tendo sido evidenciados erros sistemáticos constantes ( $b_0 = 0$ ) nem proporcionais ( $b_1 = 1$ ).

Encontrados os modelos que melhor representam cada uma das respostas, procedeu-se à sua respetiva interpretação, tendo em conta os gráficos elaborados a partir das equações dos mesmos, tabela 4.5.

De seguida, procedeu-se à análise em detalhe das variáveis que demonstraram ser mais relevantes, isto é, as respostas que apresentaram um coeficiente de determinação com um valor igual ou superior a 95% e encontram-se relacionadas com a qualidade do material - sendo estas a LY08 e a Y12 relativas às peças de primeira qualidade.

Antes de entrar numa discussão detalhada acerca da análise das duas melhores respostas descritas (LY08 e Y12), cabe aqui referir que todas as respostas foram analisadas para poder concluir acerca do efeito global das condições de produção na qualidade final das peças cerâmicas e serão resumidas no final deste capítulo. Assim, para não tornar o texto demasiado pesado, apenas serão apresentadas em anexo (anexo B) a discussão dos modelos que conseguiram satisfazer 80 a 95% da informação contida na resposta.

4.3.1. Interpretação dos melhores modelos

4.3.1.1. Resposta LY08

A resposta LY08 diz respeito à resposta Y08 logaritmizada correspondente ao número de peças de primeira qualidade. Numa triagem inicial identificaram-se 69 preditores que levaram ao surgimento de 138 modelos iniciais e resultaram em 110 modelos finais, encontrando-se a sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição de cada um dos modelos polinomiais finais na tabela B.1 em anexo (anexo B.1).

Para uma melhor visualização, procedeu-se à representação gráfica da qualidade de ajuste, previsão e global dos modelos obtidos com o objetivo de selecionar o modelo que apresenta o melhor desempenho global para a resposta LY08, figura 4.24.

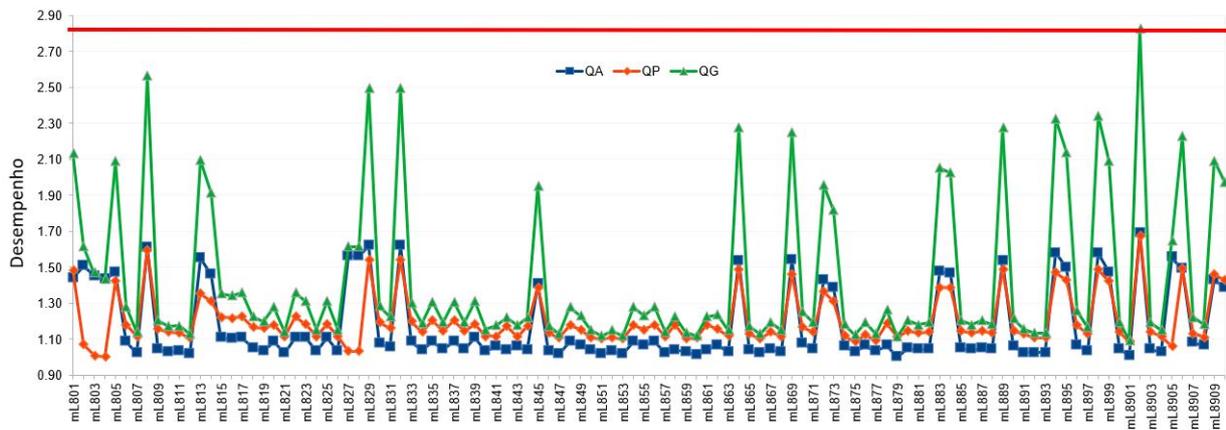


Figura 4.24.: Representação gráfica, em relação à resposta LY08, do desempenho global dos modelos obtidos finais para seleção do melhor modelo. A linha a azul representa a qualidade do ajuste (QA), a linha a vermelho com pontos representa a qualidade de previsão (QP) e a linha a verde representa a qualidade global (QG). A linha a vermelho serve como guia orientadora para uma melhor percepção do modelo que apresenta uma melhor QG. Nota: devido às escalas serem diferentes para QA, QP e QG, os valores apresentados são relativos ao mínimo de cada variável, traduzindo deste modo os ganhos relativos a esse limite inferior.

O melhor modelo parcimonioso obtido foi o mL8902, o qual representa cerca de 99% da informação, pelo que através da sua equação

$$\begin{aligned}
 LY08 = & -1.75 Q47 + 1.23 I20 + 3.89 I08 - 2.55 I10 + [2.31 R66 - 1.76 x66] + \\
 & + [26.90 R29 - 31.86 x29 + 11.59 Q29] + 1.59 I27 + 1.35 Q07 - \\
 & - 0.78 R23 - 1.54 Q12 + 2.55 x44 - 1.04 Q24
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

procedeu-se à elaboração de gráficos que permitiram visualizar o comportamento das variáveis em relação a esta resposta bem como a representação do teste de recuperação em função do modelo ajustado, figuras 4.25 e 4.26, respetivamente.

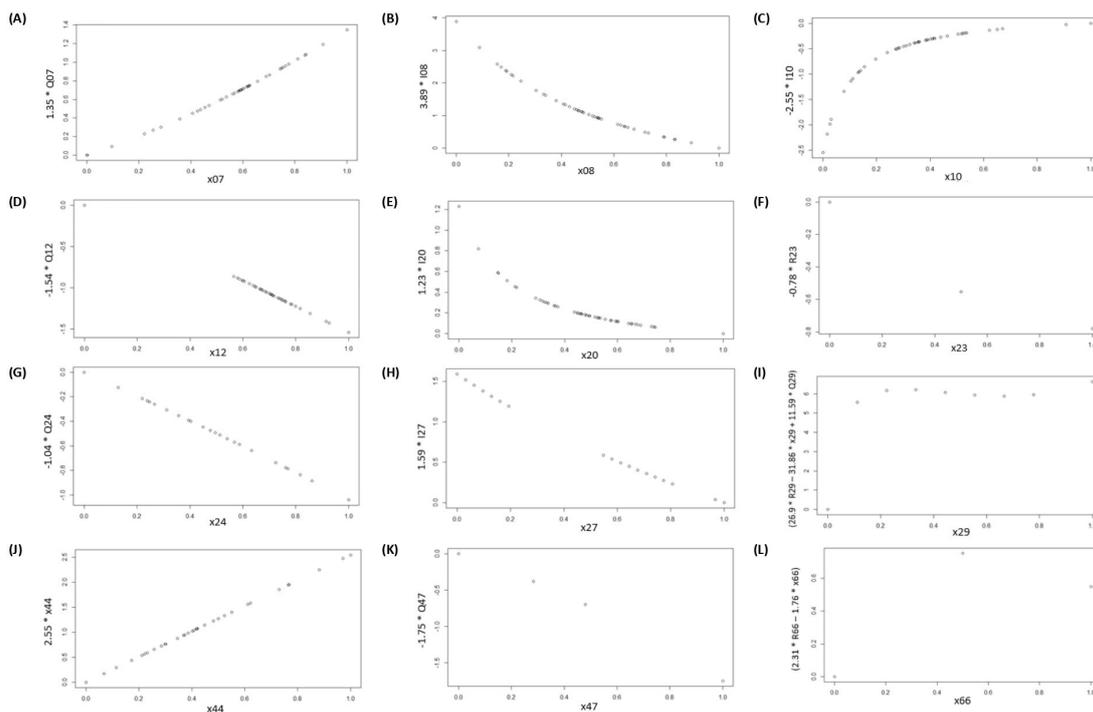


Figura 4.25.: Representação gráfica, em relação à resposta LY08, do comportamento dos preditores: (A) x07; (B) x08; (C) x10; (D) x12; (E) x20; (F) x23; (G) x24; (H) x27; (I) x29; (J) x44; (K) x47; e (L) x66. O eixo das abscissas representa o conjunto de amostras para o preditor em causa e o eixo das ordenadas corresponde à função polinomial aproximada para o mesmo.

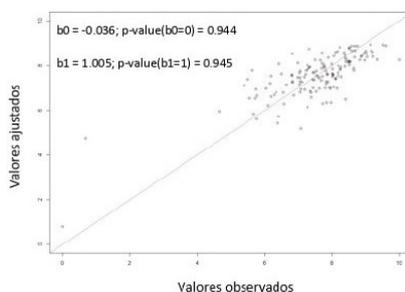


Figura 4.26.: Representação gráfica, em relação à resposta LY08, do teste de recuperação em função do modelo ajustado.

Com base na figura 4.26, é possível verificar que o modelo ajusta bem as amostras analisadas ( $b_0 \simeq 0$  e  $b_1 \simeq 1$ ) e dado que LY08 corresponde à logaritmização das peças de primeira qualidade, algo que queremos aumentar, é necessário encontrar as melhores condições que maximizam esta resposta. Assim, através da figura 4.25, procuram-se valores dos preditores que correspondam a máximos de LY08 e as melhores condições serão obtidas quando: a granulometria do pó a  $250 \mu\text{m}$  (x07) é da ordem dos 20.7%, a  $180 \mu\text{m}$  (x08) é da ordem dos 5.3% e na base (x10) é da ordem dos 11.1%; o peso seco do provete no cálculo da perda ao rubro (x12) é por volta de 46.2 g; a percentagem de absorção de água do provete (x20) ronda 1%; a percentagem de humidade do pó determinada na secção de prensagem (x24) encontra-se por volta de 6% e o desvio da espessura da peça em verde (x29) ronda os 0.9 mm. A equipa que se encontra a laborar tanto na secção de prensagem-linhas de vidragem (x23) como na secção de escolha (x66) também

se encontram a influenciar este resultado. Em relação aos parâmetros como a espessura máxima da peça em verde (x27) e a carga e a distância inter-apoios no ensaio da resistência mecânica à flexão em seco (x44 e x47, respetivamente), não é possível indicar um valor ideal, apesar destes também se encontrarem a comprometer a qualidade do material, visto que estas variáveis estão dependentes da área da peça e nas amostras em estudo foram consideradas peças com diferentes áreas.

### 4.3.1.2. Resposta Y12

A resposta Y12 corresponde à percentagem de peças de primeira qualidade. Foram identificados 33 preditores que levaram ao surgimento de 66 modelos iniciais que convergiram para 51 modelos finais, encontrando-se a sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição de cada um dos modelos polinomiais finais na tabela B.2 em anexo (anexo B.2).

Para uma melhor visualização, procedeu-se à representação gráfica da qualidade de ajuste, previsão e global dos modelos obtidos com o objetivo de selecionar o modelo que apresenta o melhor desempenho global para a resposta Y12, figura 4.27.

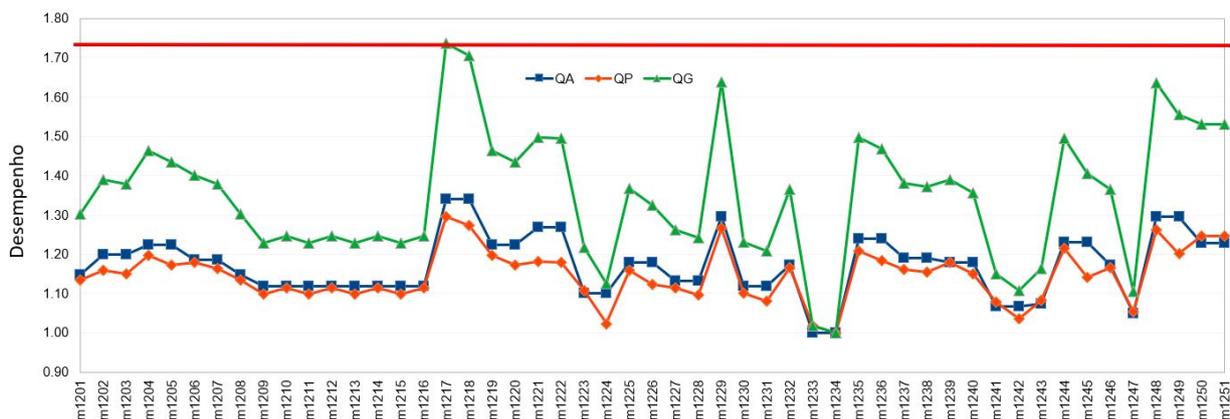


Figura 4.27.: Representação gráfica, em relação à resposta Y12, do desempenho global dos modelos obtidos finais para seleção do melhor modelo. A linha a azul representa a qualidade do ajuste (QA), a linha a vermelho com pontos representa a qualidade de previsão (QP) e a linha a verde representa a qualidade global (QG). A linha a vermelho serve como guia orientadora para uma melhor perceção do modelo que apresenta uma melhor QG. Nota: devido às escalas serem diferentes para QA, QP e QG, os valores apresentados são relativos ao mínimo de cada variável, traduzindo deste modo os ganhos relativos a esse limite inferior.

O modelo final eleito é o m1217 que representa 97% da informação expressa pela equação

$$\begin{aligned}
 Y12 = & 0.92 I50 - 1.75 R23 - 3.06 R20 + 4.50 I12 + 6.50 I47 + 17.58 Q54 - \\
 & -2.37 Q08 + 2.41 x48 + 1.95 I52 + [16.64 R29 - 12.45 x29] - \\
 & -14.90 x53 - 7.31 Q43 - 1.08 I65
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

e através desta, procedeu-se à elaboração de gráficos que permitiram visualizar o comportamento das variáveis em relação a esta resposta bem como a representação do teste de recuperação em função do modelo ajustado, figuras 4.28 e 4.29, respetivamente.

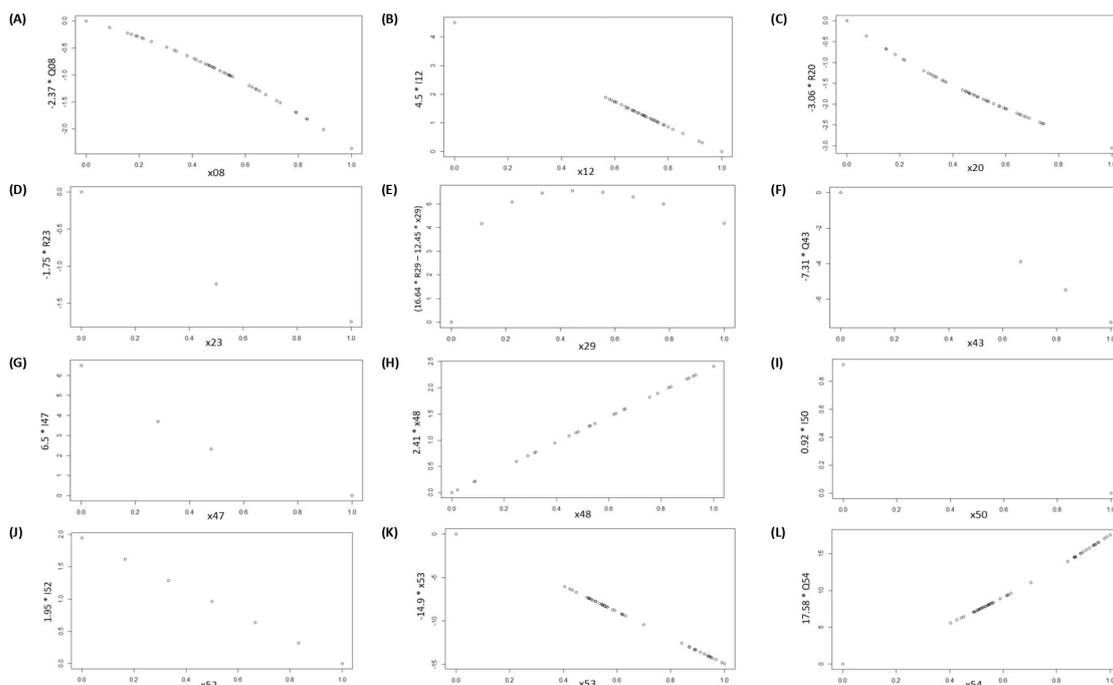


Figura 4.28.: Representação gráfica, em relação à resposta Y12, do comportamento dos preditores: (A) x08; (B) x12; (C) x20; (D) x23; (E) x29; (F) x43; (G) x47; (H) x48; (I) x50; (J) x52; (K) x53; e (L) x54. O gráfico relativo ao preditor x65 foi ocultado, uma vez que existiam apenas dois pontos em sentido crescente, correspondendo o máximo a 1. O eixo das abcissas representa o conjunto de amostras para o preditor em causa e o eixo das ordenadas corresponde à função polinomial aproximada para o mesmo.

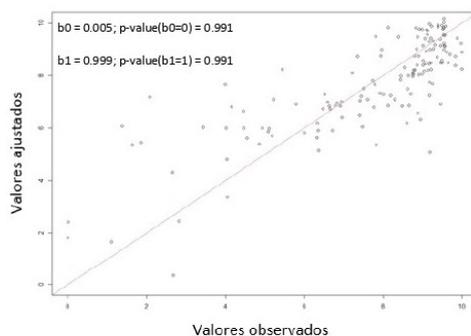


Figura 4.29.: Representação gráfica, em relação à resposta Y12, do teste de recuperação em função do modelo ajustado.

Com base na figura 4.29, é possível inferir que o modelo obtido ajusta bem as amostras em análise ( $b_0 \simeq 0$  e  $b_1 \simeq 1$ ) e dado que Y12 corresponde à percentagem de peças de primeira qualidade, factor que queremos maximizar, é necessário encontrar as melhores condições que contribuem para o aumento desta resposta. Posto isto, através da figura 4.28, procuram-se valores dos preditores que correspondam a máximos de Y12. Para além das melhores condições mencionadas para a resposta LY08 relativamente aos preditores comuns x08, x12, x20, x23, x29 e x47, esta variável também demonstra que a pressão dos cunhos (x43) ideal é cerca de 2 bar e a temperatura máxima do forno (x52) deve rondar os 1180 °C. O número do forno (x50) e o número da linha de escolha (x65) também se encontram a influenciar a categoria a nível de qualidade do

material. No que diz respeito a parâmetros como módulo de rutura médio no ensaio da resistência mecânica à flexão em seco (x48) e peso cozido e húmido da peça (x53 e x54, respetivamente), não é viável sugerir um valor como ideal, uma vez que este tipo de variáveis são dependentes do formato das peças e nas amostras em análise foram consideradas peças de formatos diferentes.

#### 4.3.2. Perspetiva global

Baseados na modelação de todas as respostas a que nos propusemos estudar, estando estas traduzidas pelos modelos<sup>1</sup> apresentados na tabela 4.4 e respetivas equações, tabela 4.5, foi efetuada uma análise global de reconhecimento e sistematização da informação relativa às condições de produção e respetivo efeito sobre a qualidade das peças produzidas.

Dentro dos limites de variabilidade em que se esteve a recolher a informação processada, esta análise global permitiu-nos identificar e classificar as variáveis do processo em quatro grandes classes - variáveis de compromisso, variáveis benéficas, variáveis prejudiciais e variáveis irrelevantes.

Nas tabelas seguintes, tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, resume-se esta informação.

Tabela 4.6.: Variáveis de compromisso que se mostraram críticas - tanto contribuem positivamente para respostas que são benéficas, como contribuem negativamente para respostas que também são benéficas, pelo que não é possível defini-las como positivas.

Variáveis de compromisso
Granulometria do pó na base
Percentagem de humidade do pó
Percentagem de perda ao rubro (provete)
Média do tamanho em seco (provete)
Peso húmido (provete)
Número do silo (1 a 8)
Número da prensa (1, 2 e 3)
Tempo de ciclo da prensa
Temperatura do queimador 2 (secador)
Diferença entre peso em verde e peso em seco (peça)
Carga (ensaio da resistência mecânica à flexão em seco)
Espessura (ensaio da resistência mecânica à flexão em seco)
Tempo de ciclo do forno
Percentagem de absorção de água (peça cozida)
Média do tamanho em seco (peça)
Média do tamanho em cozido (peça)

Na tabela 4.6, encontram-se as variáveis que se mostraram críticas, isto é, as variáveis que tanto se mostraram benéficas para uma situação como prejudiciais para outra - por exemplo, o número de quebras em cozido diminui com o tempo de ciclo do forno (efeito benéfico), contudo, há o aumento de peças de 3ª qualidade (efeito prejudicial).

<sup>1</sup>Foram considerados os modelos apresentados na subsecção 4.3.1 (com um coeficiente de determinação igual ou superior a 0.95, no anexo B (com um coeficiente de determinação entre 0.80 e 0.95) e os restantes que não se encontram apresentados na tese por uma questão de espaço e de escrita.

Tabela 4.7.: Variáveis com influência positiva nos resultados (benéficas) - contribuem positivamente para respostas que são benéficas e contribuem negativamente para respostas que são prejudiciais.

Variáveis benéficas
Área (peça)
Granulometria do pó a 600 $\mu\text{m}$
Granulometria do pó a 250 $\mu\text{m}$
Peso cozido (provete)
Desvio da espessura em verde (peça)
Peso em seco (peça)
Módulo de rutura médio (ensaio da resistência mecânica à flexão em seco)
Número da linha de escolha (1, 2 e 3)
Equipa da linha de escolha (A, B e C)
Tipo de pó (ECOPOR e X-23)
Peso húmido (peça cozida)

Em relação à tabela 4.7, encontram-se as variáveis que mostraram ter uma influência positiva nos resultados. Nesta lista, podemos observar a existência da área da peça e do número de linha de escolha, algo que faz sentido, uma vez que, no geral, cada linha de escolha está preparada para classificar determinados formatos. Algo que merece destaque também é a equipa que se encontra a laborar na linha de escolha, pois esta variável encontra-se a influenciar positivamente os resultados, pelo que uma análise individual das equipas na secção de escolha merece especial atenção, figura 4.7 (B); assim como acontece para o pó, no qual existem dois tipos de pó porcelânico e deve-se verificar qual deles se encontra a produzir melhores resultados.

Tabela 4.8.: Variáveis com influência negativa nos resultados (prejudiciais) - encontram-se a contribuir positivamente para respostas que são prejudiciais e encontram-se a contribuir negativamente para respostas que são benéficas.

Variáveis prejudiciais
Granulometria do pó a 300 $\mu\text{m}$
Granulometria do pó a 180 $\mu\text{m}$
Granulometria do pó a 125 $\mu\text{m}$
Peso seco (provete)
Média do tamanho em cozido (provete)
Percentagem de contração (provete)
Percentagem de absorção de água (provete)
Tempo de ciclo do forno (provete)
Percentagem de humidade do pó (na secção de prensagem)
Peso em verde (peça)
Máximo da espessura em verde (peça)
Mínimo da espessura em verde (peça)
Temperatura do queimador 1 (secador)
Desvio do segundo lado das dimensões em seco (peça)
Pressão dos cunhos
Largura (ensaio da resistência mecânica à flexão em seco)
Distância inter-apoios (ensaio da resistência mecânica à flexão em seco)
Número do forno (1 e 2)
Temperatura máxima do forno
Peso (peça cozida)
Máximo do segundo lado das dimensões (peça cozida)
Percentagem de contração (peça cozida)
Equipa a laborar na secção de prensagem e linhas de vidrar (A, B e C)

Na tabela 4.8 são apresentadas as variáveis que se encontram a influenciar negativamente os resultados, as quais merecem maior destaque e atenção com o intuito de serem vistas como oportunidades de melhoria.

Assim sendo, e de acordo com tabela 4.8, o pó é uma variável que deve ser analisada com algum cuidado, pois trata-se da matéria-prima principal para a produção de pavimentos cerâmicos e vários dos seus parâmetros encontram-se a contribuir negativamente para os resultados, tais como a sua granulometria a 300, 180 e 125  $\mu\text{m}$ , a percentagem de humidade, o tempo de ciclo do forno do qual é sujeito, a percentagem de contração e a percentagem de absorção de água. Defeitos relacionados com a geometria da peça, como as falhas de ortogonalidade, dimensões e diferenças de espessura (que se mostraram ser o maior defeito das peças produzidas na empresa, figura 4.10), estão relacionados com a distribuição granulométrica e a percentagem de humidade do pó, pois estas variáveis afetam a fluidez dos granulados durante o processo de preenchimento dos alvéolos dos moldes na prensagem e basta um carregamento inadequado para gerar defeitos desta categoria. Deste modo, os parâmetros do pó devem ser devidamente controlados, não só na presente unidade industrial, como na unidade responsável pela sua produção, a qual realiza o processo de atomização que tem uma forte influência neste tipo de características do pó - sugere-se, então, um maior controlo dos valores obtidos pelo laboratório da CLiPER e um pedido de informação acerca das análises que se encontram a ser realizadas no fornecedor de pó atomizado.

Ainda com recurso à tabela 4.8, é possível observar que, no processo de prensagem e secagem, a atenção recai sobre a pressão dos cunhos que pode estar a influenciar negativamente o peso e a espessura da peça em verde e sobre a temperatura do queimador 1 do secador que pode estar a ser prejudicial para os resultados obtidos no ensaio da resistência mecânica à flexão em seco, nomeadamente a largura, distância inter-apoios e humidade residual da peça seca, levando ao défice de resistência mecânica da peça para os processos que se seguem. A equipa que se encontra a laborar na secção de prensagem e linhas de vidragem também contribui para resultados negativos, pelo que a análise da produtividade das equipas, figura 4.7 (A), é um fator de especial atenção.

Por fim, relativamente à cozedura, é necessário verificar a temperatura máxima do forno e o número do forno, tabela 4.8. A temperatura máxima do forno pode estar a possibilitar que a percentagem de contração se encontre a prejudicar a obtenção de peças cerâmicas com qualidade, uma vez que os parâmetros de cozedura são essenciais para a obtenção de peças cerâmicas dentro de especificações pré-determinadas. Para além disso, as variáveis relacionadas com a cozedura são extremamente dependentes da natureza física e química da pasta, do seu grau de moagem e da pressão de prensagem - se, anteriormente já se verificou que estes fatores não se encontravam bem estabelecidos, faz sentido o facto das variáveis resultantes do processo de cozedura também se encontrarem a prejudicar os resultados - pelo que, mais uma vez, realça-se, aqui, a necessidade de reforçar a análise e verificação de resultados obtidos no processo de controlo do pó atomizado. Em relação ao número do forno (1 ou 2), sugere-se a observação em detalhe dos resultados para verificação de quais dos dois fornos se encontra a produzir melhores resultados e tentar entender o motivo para tal situação estar a acontecer.

De um modo geral, sendo o objetivo principal o aumento de peças de primeira qualidade e diminuição de outras categorias (comercial, terceira qualidade e caco), as condições específicas a serem seguidas são as seguintes: a pressão dos cunhos deve ser da ordem dos 2 bar, a temperatura máximo do forno deve rondar os 1180 °C, a granulometria do pó a 250  $\mu\text{m}$  deve rondar os 20.7%, a 180  $\mu\text{m}$  os 5.3% e na base os 11.1%, o peso seco do provete no cálculo da perda ao rubro deve ser cerca de 46.2 g, a percentagem de absorção de água do provete 1%, a percentagem de humidade do pó determinada na secção de prensagem 6% e o

desvio da espessura da peça em verde deve rondar os 0.9 mm.

Tabela 4.9.: Variáveis irrelevantes - não apresentaram qualquer influência nos resultados.

<b>Variáveis irrelevantes</b>
Forma da peça
Granulometria do pó a $425\ \mu m$
Percentagem de humidade residual
Dimensões em seco da peça (máximo e mínimo do lado 1 e 2 e desvio do lado 1)
Espessura nominal
Pressão de trabalho
Dimensões da peça cozida (máximo do lado 1 e mínimo e desvio do lado 1 e 2)

E, por fim, na tabela 4.9, encontram-se as variáveis que demonstraram não ter qualquer efeito sob as respostas.

## 5. Conclusão

Durante o período de estágio decorrido na empresa CLiPER Cerâmica houve a oportunidade de avaliar a qualidade da produção, tendo sido esta avaliada em três aspetos diferentes: através da construção de base de dados, aplicando ferramentas de controlo e diagnóstico da qualidade e um diagnóstico estatístico multivariado baseado na análise exploratória de dados que culminou na modelação multivariada, usada na avaliação da relação de casualidade entre condições de fabrico e parâmetros da qualidade no produto fabricado.

Com recurso ao sistema de base de dados relacional criado, foi possível sistematizar informação relevante ao controlo da qualidade, de forma rastreável e quantificada, permitindo-nos retirar algumas conclusões relevantes que podem auxiliar na maximização da qualidade ao nível da produção. Um destes exemplos consistiu na constatação de que as paragens não registadas são um ponto crítico na produção, principalmente na secção de escolha, pelo que é sugerido uma análise em detalhe desta situação para tentar entender melhor os motivos desse excessivo intervalo de tempo sem produção. Foi também possível verificar que existem diversas paragens de curta duração que se devem a falhas nos equipamentos, forçando a efetuar manutenção preventiva - esta importante constatação sugere que se deve ter como prioridade o cumprimento de um adequado plano de manutenção dos equipamentos de modo preventivo.

O cálculo do OEE nas diferentes etapas da produção permitiu encontrar diversas anomalias a afetar a taxa de produção e respetiva qualidade final do produto. No que diz respeito a equipamentos, verificou-se que os valores encontram-se abaixo do índice desejável de produtividade tanto na secção de prensagem-linhas de vidragem como na escolha final do produto - na secção de prensagem-linhas de vidragem o valor obtido é afetado essencialmente pela baixa eficiência registada; já na escolha, o índice OEE apresenta uma média de eficiência global próxima de 10%, muito aquém do objetivo, estando este gravemente penalizado pela respetiva baixa eficiência e disponibilidade - por isso este foi considerado o ponto mais crítico na eficiência ao nível da produção na empresa.

A análise estatística aplicada à qualidade final do produto também permitiu obter importantes conclusões. Durante o período de acompanhamento a percentagem de peças de primeira qualidade situou-se ao nível dos 82%, cerca de dez pontos abaixo do objetivo pretendido (92%) - as causas mais relevantes detetadas (representando mais de 50% dos defeitos observados) estão relacionadas com anomalias na esquadria e as pintas pretas resultantes do processo de cozedura. Mais em concreto, no que diz respeito às falhas de esquadria, verificou-se que estas se devem essencialmente a duas coisas - dificuldade de deteção automática nos equipamentos de rastreio e aos operadores que efetuam avaliação por amostragem.

Passando ao que se obteve através da análise multivariada exploratória, tanto a análise por componentes principais (PCA) como a análise de hierarquização de agrupamentos (HCA) mostraram-se pouco conclusivas.

Devido ao grau de complexidade da informação contida nos sub-espacos preditor, resposta e global (preditor e resposta), PCA não conseguiu efetuar uma adequada compressão da informação de modo a facilitar a identificação de estruturas dentro das bases de dados analisadas - apesar da baixa quantidade de informação descrita com apenas 2 ou 3 componentes, ficou-se com uma noção de que a distribuição das amostras nos sub-espacos preditor e global são algo similares e que a estrutura identificada está relacionada com a geometria das peças fabricadas; quanto ao sub-espaco da resposta suspeita-se que este seja essencialmente não-estruturado - quando analisado em separado apresenta-se de forma difusa e não estruturada e em conjunto com os preditores (espaco global), apenas contribui para randomizar um pouco mais a estrutura anteriormente encontrada no sub-espaco preditor.

Na impossibilidade de compreender adequadamente a estrutura da informação contida na base de dados de trabalho (análise PCA), recorreu-se à análise hierárquica de agregados (HCA) - seguindo uma estratégia de segmentação da informação similar ao caso PCA, enfrentou-se outra dificuldade, a da escolha do algoritmo associativo que permitisse concluir melhor acerca da organização mútua da informação contida nos objetos (histórico da produção) em análise - com base na análise dos dendogramas obtidos verificou-se que o algoritmo associativo de Ward (WL) é mais eficiente na classificação dos objetos e que esta classificação está relacionada com o formato das peças porcelânicas e o tipo de pó utilizado ao nível das condições de produção (sub-espaco preditor), com a quantidade de peças produzidas e com o facto de serem ou não referências certificadas ao nível da qualidade obtida (sub-espaco das respostas) e com a quantidade de produto produzido no conjunto global da informação.

Já numa perspetiva de descrição estatística da relação casualística entre as condições de produção (preditores) e qualidade final do produto obtido (respostas), avaliada através da modelação multivariada explícita (MOLS), foi possível, com base na variabilidade usual de processamento de cada variável controlada observada no período de acompanhamento do processo, identificar quatro tipos de classes de variáveis do processo - variáveis críticas (ou de compromisso), variáveis benéficas, variáveis prejudiciais e variáveis irrelevantes.

De forma muito sucinta e resumida, o pó atomizado é o indicador que requer maior atenção, pois os parâmetros relacionados com o seu controlo, (granulometria, percentagem de humidade, tempo de ciclo do forno, percentagem de contração e absorção de água) bem como os processos que dependem dos mesmos (como por exemplo a cozedura) mostraram-se a influenciar negativamente a produção de peças cerâmicas com melhor qualidade - sugere-se, assim, um maior controlo do pó recebido por parte do laboratório, bem como uma análise em detalhe às informações acerca do controlo realizado na unidade industrial que o produz; relativamente ao processo de prensagem e secagem, deve-se ter em atenção a pressão dos cunhos e a temperatura do queimador 1 do secador; na prensagem e linhas de vidragem, a equipa que se encontra a laborar também afeta a produção negativamente; e, por fim, relativamente à cozedura, é necessário ter em atenção a temperatura máxima do forno e o número do forno, sugerindo que um dos dois fornos produz piores resultados em relação a outro.

Em suma, embora a perspetiva inicial fosse apenas a aplicação da análise multivariada no diagnóstico da qualidade de peças cerâmicas (a qual foi cumprida com sucesso), o interesse manifestado, por parte da empresa, para uma solução quanto ao tratamento estatístico dos dados que eram recolhidos diariamente também se mostrou útil e surgiu como uma oportunidade de melhoria significativa para a organização

e compreensão da informação recolhida que se revelou determinante como apoio a tomada de decisões, integrando o plano da qualidade da empresa.

Numa perspetiva de futuro com vista à continuidade do presente trabalho, seria recomendado uma análise aprofundada relativamente ao controlo do pó, quer na presente unidade industrial quer na unidade produtora do pó fornecido à CLiPER, bem como a elaboração de um plano para ser aplicado em “chão de fábrica” com vista a apurar quais as causas das paragens que não se encontram a ser registadas e efetuar melhorias nos mais variados níveis mencionados.



# Bibliografia

- [1] Direção da CLiPER. Manual de Acolhimento da CLiPER Cerâmica. (Versão 7), 2019. Consultado no arquivo da empresa.
- [2] Direção da CLiPER. Manual da Qualidade da CLiPER. (Versão 17), 2020. Consultado no arquivo da empresa.
- [3] Anderson Turner. *Extruder, Mold & Tile: Forming Techniques*. The American Ceramic Society, 2008.
- [4] W. M. Carty and Udayan S. Porcelain—raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(1):3–20, 1998.
- [5] G. B. Silveira, G. F. Lopes, C. P. Oliveira, and F. M. Azevedo. Estudo das propriedades técnicas de revestimentos cerâmicos do tipo grês porcelânico. *Exatas & Engenharias*, 9(26):55–66, 2019.
- [6] L. Esposito, A. Tucci, and D. Naldi. The reliability of polished porcelain stoneware tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(9):1487–1498, 2005.
- [7] CLiPER Cerâmica. O que são revestimentos cerâmicos e as suas vantagens. Disponível em: <https://www.cliper.pt/revestimentos-ceramicos-vantagens/>. Consultado a: 22/09/2021.
- [8] P. Boch and J. C. Ni. *Ceramic Materials: Processes, Properties, and Applications*, volume 98. John Wiley & Sons, 2010.
- [9] E. Ferraz, J. Coroado, R. Triães, and F. Rocha. *Conceitos e Sistematização da Cerâmica Clássica: Matérias-primas e Produtos*. 2012.
- [10] Classificação Portuguesa das Atividades Económicas. *Economia e Finanças*, (Rev. 3), 2007.
- [11] F. A. Andrade, H. Al-Qureshi, and D. Hotza. Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science*, 51(1-2):1–7, 2011.
- [12] Felix Singer and Sonja S Singer. *Industrial ceramics*. Springer, 1963.
- [13] J. M. L. Meira. Argilas: O que são, suas propriedades e classificações. *Comunicações Técnicas*, 1:1–7, 2001.
- [14] T. Alves. Formulação de pastas cerâmicas a partir de matérias-primas argilosas dos concelhos de vila viçosa e redondo para a produção de olaria tradicional. *Tese de Mestrado, Universidade de Évora*, 1:37–65, 2015.
- [15] J. Motta, A. Zanardo, M. Júnior, L. Tanno, and G. Cuchierato. As matérias-primas plásticas para a cerâmica tradicional: Argilas e caulins. *Cerâmica Industrial*, 1:1–14, 2004.

- [16] M. Valásková. Clays, clay minerals and cordierite ceramics: A review. *Ceramics - Silikáty*, 1:1–10, 2015.
- [17] A. M. Rodriguez, S. A. Pianaro, E. A. Berg, and A. H. Santos. Propriedades de matérias-primas selecionadas para a produção de grês porcelanato. *Cerâmica Industrial*, 9(1):33–38, 2004.
- [18] R. Martins. Investigação científica e tecnológica de matérias-primas de santiago do cacém (alentejo) e das suas potencialidades para a indústria cerâmica. *Tese de Doutoramento, Universidade de Évora*, 1:97–164, 2006.
- [19] Prudence M Rice. Pottery analysis: a sourcebook. *University of Chicago press*, 2015.
- [20] Dr R Kiran. Total quality management: Key concepts and case studies. *Butterworth-Heinemann*, 2016.
- [21] T. Ohno. Toyota production system beyond large-scale production. *Productivity Press*, 1:120–134, 1988.
- [22] M. Poppendieck. Principles of lean thinking. *IT Management Select*, 18(2011):1–7, 2011.
- [23] D. T. Jones and J. P. Womack. *Lean Thinking: Cómo utilizar el pensamiento Lean para eliminar los despilfarros y crear valor en la empresa*. Gestión 2000, 2012.
- [24] S. Gupta and S. K. Jain. A literature review of lean manufacturing. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 8(4):241–249, 2013.
- [25] J. Singh and H. Singh. Kaizen philosophy: A review of literature. *IUP journal of operations management*, 8(2):51, 2009.
- [26] C. K. Sendil and R. Panneerselvam. Literature review of jit-kanban system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(3):393–408, 2007.
- [27] N. A. A. Rahman, S. M. Sharif, and M. M. Esa. Lean manufacturing case study with kanban system implementation. *Procedia Economics and Finance*, 7:174–180, 2013.
- [28] N. K. Shimbun. *Poka-yoke: improving product quality by preventing defects*. CRC Press, 1989.
- [29] M. Dudek-Burlikowska and D. Szewieczek. The poka-yoke method as an improving quality tool of operations in the process. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 36(1):95–102, 2009.
- [30] J. E. Bauer, G. L. Duffy, and R. T. Westcott. *The Quality Improvement Handbook, Second Edition*. Asq Press, 2006.
- [31] Bernardo FE Lins. Ferramentas básicas da qualidade. *Ciência da Informação*, 22(2), 1993.
- [32] D. Rufilanchas. On the origin of Karl Pearson's term "histogram". *Revista Estadística Española*, 59(192):29–35, 2017.
- [33] Guidance on the application of statistical methods to quality and to industrial standardization. 1:43–44, 2009.

- [34] A. F. Oliveira, E. G. Magnani, and G. M. P. Silva. Aumento da eficiência global do equipamento (oe) através da identificação e tratamento de problemas crônicos: Um estudo de caso realizado em uma indústria de refratários. *Engenharia de Produção*, 2021.
- [35] I. Zattar, S. Rudek, and G. S. Turquino. O uso do indicador oee como ferramenta na tomada de decisões em uma indústria gráfica: Um caso prático. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 2:113–132, 12 2010.
- [36] M. Akdere. An analysis of decision-making process in organizations: Implications for quality management and systematic practice. *Total Quality Management & Business Excellence*, 22(12):1317–1330, 2011.
- [37] L Valenzuela. Diagrama de ishikawa. *Santiago de Chile, Chile: UNAB*, 2000.
- [38] A. A. Bazoni, A. Zeni, R. França, T. Torricelli, and R. Daolio. Implantação do diagrama de ishikawa em uma empresa do segmento de tintas e materiais para construção, para solucionar problemas de estocagem e recebimento. *Gestão em Foco, Edição nº7*, 2015.
- [39] Kam Cheong Wong, Kai Zhi Woo, and Kai Hui Woo. Ishikawa diagram. *Quality Improvement in Behavioral Health*, 1:119–132, 2016.
- [40] A. V. Fonseca and D. I. Miyake. Uma análise sobre o ciclo pdca como um método para solução de problemas da qualidade. *XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 1:1–9, 2006.
- [41] B. Foulla. Quality problem solving with PDCA cycle. *Management Research*, 5(2):49, 2021.
- [42] M. A. Benzaghta, A. Elwalda, M. Mousa, I. Erkan, and M. Rahman. SWOT analysis applications: An integrative literature review. *Journal of Global Business Insights*, 6(1):55–73, 2021.
- [43] I. G. M. Fernandes, H. M. Figueiredo, H. Junior, S. G. Sanches, and Â. Brasil. Planejamento estratégico: Análise swot. *Revista Conexão Eletrônica*, 8(01):43–48, 2015.
- [44] T. Sammut-Bonnici and D. Galea. Swot analysis. *Strategic Management*, 01 2015.
- [45] Kapil Dev Sharma and Shobhit Srivastava. Failure mode and effect analysis (FMEA) implementation: a literature review. *J Adv Res Aeronaut Space Sci*, 5:1–17, 2018.
- [46] Zigmund Bluvband and Pavel Grabov. Failure analysis of FMEA. *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1:344–347, 2009.
- [47] N. Vanti. Ambiente de qualidade em uma biblioteca universitária: aplicação do 5S e de um estilo participativo de administração. *Ciência da Informação*, 28:333–339, 1999.
- [48] J. Michalska and D. Szewieczek. The 5S methodology as a tool for improving the organization. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 24(2):211–214, 2007.
- [49] N. Vanti. Ambiente de qualidade em uma biblioteca universitária: aplicação do 5s e de um estilo participativo de administração. *Ciência da Informação*, 28:333–339, 1999.

- [50] S. Junior, R. Carvalho, F. Melo, L. Xavier, and D. Medeiros. Aplicação do controle estatístico de processo: Estudo de caso de uma empresa de calçados. *XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2017.
- [51] A. Ferreira and M. Tobyn. Multivariate analysis in the pharmaceutical industry: Enabling process understanding and improvement in the pat and qbd era. *Pharmaceutical development and technology*, 20:1–4, 2014.
- [52] E. O. Batista. Sistemas de informação: O uso consciente da tecnologia para o gerenciamento. *São Paulo: Saraiva*, 2004.
- [53] L. S. Gonçalves. Sistema de informação. Disponível em: <https://docplayer.com.br/14738630-Sistema-de-informacao-leandro-salenave-goncalves.html>. Consultado a: 16/02/2022.
- [54] A. C. M. Mattos. Sistemas de informação: uma visão executiva. *Saraiva Educação SA*, 2017.
- [55] S. Sumathi and S. Esakkirajan. Fundamentals of relational database management systems. *Springer*, 47:1–7;65–68;111–121, 2007.
- [56] R. Elmasri, S. B. Navathe, and M. G. Pinheiro. Sistemas de banco de dados. *Pearson Addison Wesley São Paulo*, 2005.
- [57] C. P. Caldeira. Introdução ao modelo de dados relacional. *Departamento de Informática, Universidade de Évora*, 2010.
- [58] Microsoft. Msaccess 16.0: Sistemas de gestão de bases de dados da microsoft. Disponível em: <https://www.microsoft.com/pt-pt/microsoft-365/>. Consultado a: 16/02/2022.
- [59] Microsoft. Noções básicas da base de dados. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-pt/office/>. Consultado a: 18/02/2022.
- [60] Microsoft. Princípios básicos da estrutura de bases de dados. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-pt/office/>. Consultado a: 18/02/2022.
- [61] J. Eaton, D. Bateman, S. Hauberg, and R. Wehbring. Gnu octave version 4.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations, 2016.
- [62] RStudio Team. Rstudio: Integrated development for R. studio, inc., Boston, MA, 2016.
- [63] S. R. B. Silva. Base de dados para gestão de processos da provedoria do estudante da universidade de coimbra. *Universidade de Coimbra*, 1:6–7, 2014.

## A. Estimativas

### A.1. Equação do gás, em MWh, consumido por área, em m<sup>2</sup> (GCA)

$$GCA = \frac{QGC * 1.055}{100} \quad (A.1)$$

onde QGC corresponde à quantidade de gás consumido (em m<sup>3</sup>) por área.

### A.2. Parâmetros relacionados com a eficiência global do equipamento

Equações para o cálculo dos parâmetros necessários para a determinação do OEE para as prensas:

$$TPP = TT - TTPP \quad (A.2)$$

$$DP = \frac{TPP}{TTL} \quad (A.3)$$

$$EP = \frac{PP}{PPT} \quad (A.4)$$

$$QP = 1 - QbP = 1 - \left( \frac{PP - PS}{PP} \right) \quad (A.5)$$

onde TPP corresponde ao tempo a produzir na prensa, TT ao tempo de turno, TTPP ao tempo total de paragens na prensa, DP à disponibilidade na prensa, EP à eficiência na prensa, PP às peças prensadas, PPT às peças produzidas teoricamente, QP à qualidade na prensa, QbP às quebras na prensa e PS às peças secas.

Equações para o cálculo dos parâmetros necessários para a determinação do OEE para as linhas de vidragem:

$$TPL = TT - TTPL \quad (A.6)$$

$$DL = \frac{TPL}{TTL} \quad (A.7)$$

$$EL = \frac{PV}{PS} \quad (A.8)$$

$$QL = 1 - QbL = 1 - \left( \frac{PS - PV}{PS} \right) \quad (A.9)$$

onde TPL corresponde ao tempo a produzir na linha, TT ao tempo de turno, TTPL ao tempo total de

paragens na linha, DL à disponibilidade na linha, EL à eficiência na linha, PV às peças vidradas, PS às peças secas, QL à qualidade na linha e QbL às quebras na linha.

Equações para o cálculo dos parâmetros necessários para a determinação do OEE para as prensas-linhas de vidragem:

$$DPL = \frac{TTR}{TT} \quad (A.10)$$

$$EPL = \frac{PV}{PPT} \quad (A.11)$$

$$QPL = 1 - QbC \quad (A.12)$$

onde DPL corresponde à disponibilidade na prensa e na linha de vidragem, TTR ao tempo de trabalho real, TT ao tempo de turno, EPL à eficiência na prensa e linha de vidragem, PV às peças vidradas, PPT às peças produzidas teoricamente, QPL à qualidade na prensa e linha de vidragem e QbC às quebras em cru.

Equações para o cálculo dos parâmetros necessários para a determinação do OEE para as linhas de escolha:

$$DE = \frac{TTR}{TT} \quad (A.13)$$

$$EE = \frac{TAE}{TAET} \quad (A.14)$$

$$QE = \frac{TAEP}{TAE} \quad (A.15)$$

onde DE corresponde à disponibilidade na linha de escolha, TTR ao tempo de trabalho real, TT ao tempo de turno, EE à eficiência na linha de escolha, TAE ao total de área escolhida, TAET ao total de área escolhida teoricamente, QE à qualidade da linha de escolha e TAEP ao total de área escolhida de primeira qualidade.

# B. Parâmetros dos modelos obtidos

## B.1. LY08

A sistematização dos parâmetros dos modelos finais obtidos para a resposta LY08 encontram-se na tabela B.1.

Tabela B.1.: Sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição dos modelos polinomiais para a resposta LY08 por modelação multivariada evolutiva - avaliação da qualidade do ajuste, de previsão e global dos modelos eleitos.

Modelo	ofit	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*	Modelo	ofit	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*
mL801	0.945	0.986	0.985	417.37	441.45	0.995	0.995	1.44	1.48	2.13	mL856	1.057	0.982	0.981	452.18	479.28	1.115	1.114	1.09	1.18	1.28
mL802	0.906	0.987	0.986	409.65	448.78	1.171	1.169	1.51	1.07	1.61	mL857	1.104	0.980	0.979	461.43	476.48	1.146	1.146	1.02	1.12	1.14
mL803	0.933	0.986	0.985	415.47	445.58	1.205	1.204	1.45	1.01	1.47	mL858	1.082	0.981	0.980	458.26	482.35	1.115	1.114	1.04	1.18	1.22
mL804	0.934	0.986	0.985	416.74	449.86	1.211	1.210	1.43	1.00	1.43	mL859	1.085	0.981	0.980	459.03	483.11	1.153	1.152	1.03	1.10	1.14
mL805	0.932	0.986	0.985	414.30	441.39	1.016	1.016	1.47	1.42	2.09	mL860	1.099	0.980	0.979	461.91	482.99	1.151	1.150	1.01	1.11	1.12
mL806	1.057	0.982	0.981	452.14	479.23	1.114	1.114	1.09	1.18	1.28	mL861	1.082	0.981	0.980	458.26	482.35	1.115	1.114	1.04	1.18	1.22
mL807	1.104	0.980	0.979	461.39	476.44	1.146	1.146	1.02	1.12	1.14	mL862	1.069	0.981	0.981	454.46	478.54	1.126	1.126	1.07	1.16	1.24
mL808	0.886	0.988	0.987	402.06	438.19	0.960	0.960	1.61	1.59	2.56	mL863	1.101	0.980	0.979	460.41	475.46	1.145	1.145	1.03	1.12	1.15
mL809	1.085	0.981	0.980	458.07	479.15	1.126	1.126	1.04	1.16	1.20	mL864	0.909	0.987	0.986	408.58	441.70	0.993	0.993	1.53	1.49	2.28
mL810	1.096	0.980	0.980	460.17	478.23	1.133	1.133	1.03	1.14	1.17	mL865	1.087	0.981	0.980	458.47	479.54	1.141	1.140	1.04	1.13	1.17
mL811	1.079	0.981	0.980	458.24	485.34	1.136	1.135	1.03	1.14	1.18	mL866	1.098	0.980	0.980	460.63	478.69	1.153	1.153	1.02	1.10	1.13
mL812	1.096	0.980	0.980	461.13	482.21	1.149	1.149	1.02	1.11	1.13	mL867	1.083	0.981	0.980	457.56	478.63	1.133	1.133	1.05	1.14	1.19
mL813	0.893	0.988	0.986	406.04	448.19	1.041	1.040	1.55	1.35	2.09	mL868	1.095	0.980	0.980	459.86	477.93	1.146	1.146	1.03	1.12	1.15
mL814	0.926	0.986	0.985	414.32	447.43	1.058	1.058	1.46	1.31	1.91	mL869	0.907	0.987	0.986	407.94	441.06	1.002	1.001	1.54	1.46	2.25
mL815	1.053	0.982	0.981	450.08	474.17	1.095	1.094	1.11	1.22	1.35	mL870	1.066	0.982	0.981	453.79	477.87	1.122	1.122	1.07	1.16	1.25
mL816	1.056	0.982	0.981	450.85	474.94	1.097	1.097	1.10	1.22	1.34	mL871	1.089	0.980	0.980	458.31	476.37	1.133	1.133	1.04	1.14	1.19
mL817	1.053	0.982	0.981	449.88	473.97	1.094	1.094	1.11	1.22	1.36	mL872	0.934	0.986	0.985	416.93	450.05	1.036	1.036	1.43	1.37	1.95
mL818	1.076	0.981	0.980	456.43	480.52	1.122	1.122	1.05	1.16	1.22	mL873	0.955	0.985	0.985	421.60	448.69	1.057	1.057	1.39	1.31	1.82
mL819	1.089	0.981	0.980	459.12	480.20	1.123	1.123	1.03	1.16	1.20	mL874	1.069	0.982	0.981	455.55	482.64	1.145	1.144	1.06	1.12	1.18
mL820	1.057	0.982	0.981	452.18	479.28	1.115	1.114	1.09	1.18	1.28	mL875	1.090	0.981	0.980	459.48	480.56	1.161	1.160	1.03	1.09	1.12
mL821	1.104	0.980	0.979	461.43	476.48	1.146	1.146	1.02	1.12	1.14	mL876	1.067	0.982	0.981	454.87	481.96	1.142	1.142	1.06	1.12	1.19
mL822	1.053	0.982	0.981	449.88	473.97	1.094	1.094	1.11	1.22	1.36	mL877	1.088	0.981	0.980	458.82	479.90	1.158	1.158	1.04	1.09	1.13
mL823	1.035	0.983	0.982	448.45	484.58	1.113	1.112	1.11	1.18	1.31	mL878	1.066	0.982	0.981	454.80	481.70	1.112	1.112	1.06	1.19	1.26
mL824	1.088	0.981	0.980	458.95	480.03	1.146	1.146	1.03	1.12	1.15	mL879	1.114	0.979	0.979	463.91	478.97	1.147	1.147	1.00	1.11	1.11
mL825	1.035	0.983	0.982	448.45	484.58	1.113	1.112	1.11	1.18	1.31	mL880	1.076	0.981	0.980	456.58	480.67	1.132	1.131	1.05	1.14	1.20
mL826	1.088	0.981	0.980	458.95	480.03	1.146	1.146	1.03	1.12	1.15	mL881	1.086	0.981	0.980	458.26	479.33	1.136	1.136	1.04	1.13	1.18
mL827	0.893	0.988	0.986	405.35	444.48	1.192	1.191	1.56	1.03	1.61	mL882	1.087	0.981	0.980	457.57	475.64	1.134	1.134	1.05	1.14	1.20
mL828	0.893	0.988	0.986	405.35	444.48	1.192	1.191	1.56	1.03	1.61	mL883	0.922	0.987	0.986	413.00	446.11	1.027	1.027	1.48	1.39	2.05
mL829	0.881	0.988	0.987	401.14	440.28	0.976	0.975	1.62	1.54	2.49	mL884	0.930	0.986	0.985	414.65	444.75	1.029	1.029	1.46	1.38	2.02
mL830	1.061	0.982	0.981	453.22	480.32	1.109	1.109	1.08	1.19	1.28	mL885	1.076	0.981	0.980	456.58	480.67	1.132	1.131	1.05	1.14	1.20
mL831	1.079	0.981	0.980	456.49	477.56	1.124	1.124	1.06	1.16	1.22	mL886	1.086	0.981	0.980	458.26	479.33	1.136	1.136	1.04	1.13	1.18
mL832	0.881	0.988	0.987	401.14	440.28	0.976	0.975	1.62	1.54	2.49	mL887	1.076	0.981	0.980	456.60	480.69	1.132	1.131	1.05	1.14	1.20
mL833	1.058	0.982	0.981	452.24	479.33	1.105	1.105	1.08	1.20	1.30	mL888	1.086	0.981	0.980	458.24	479.31	1.136	1.136	1.04	1.14	1.18
mL834	1.091	0.980	0.980	458.59	476.65	1.134	1.134	1.04	1.14	1.19	mL889	0.909	0.987	0.986	408.58	441.70	0.993	0.993	1.53	1.49	2.28
mL835	1.056	0.982	0.981	451.88	478.98	1.104	1.104	1.09	1.20	1.31	mL890	1.077	0.981	0.980	455.94	477.01	1.131	1.131	1.06	1.15	1.21
mL836	1.089	0.981	0.980	458.17	476.23	1.133	1.132	1.04	1.14	1.19	mL891	1.102	0.980	0.979	460.71	475.76	1.140	1.140	1.03	1.13	1.16
mL837	1.056	0.982	0.981	451.88	478.98	1.104	1.104	1.09	1.20	1.31	mL892	1.083	0.981	0.980	459.37	486.46	1.150	1.150	1.03	1.11	1.14
mL838	1.089	0.981	0.980	458.17	476.23	1.133	1.132	1.04	1.14	1.19	mL893	1.083	0.981	0.980	459.38	486.47	1.150	1.150	1.03	1.11	1.14
mL839	1.035	0.983	0.982	448.45	484.58	1.113	1.112	1.11	1.18	1.31	mL894	0.885	0.988	0.987	403.53	445.68	0.998	0.998	1.58	1.47	2.33
mL840	1.088	0.981	0.980	458.95	480.03	1.146	1.146	1.03	1.12	1.15	mL895	0.921	0.986	0.986	411.82	441.92	1.013	1.012	1.50	1.43	2.14
mL841	1.074	0.981	0.980	455.82	479.91	1.146	1.146	1.06	1.12	1.18	mL896	1.069	0.981	0.981	454.46	478.54	1.116	1.116	1.07	1.18	1.26
mL842	1.091	0.980	0.980	458.71	476.77	1.117	1.117	1.04	1.17	1.22	mL897	1.094	0.980	0.980	459.47	477.53	1.140	1.140	1.03	1.13	1.16
mL843	1.074	0.981	0.980	455.85	479.93	1.146	1.146	1.06	1.12	1.18	mL898	0.887	0.988	0.987	403.95	446.09	0.993	0.993	1.58	1.49	2.34
mL844	1.091	0.980	0.980	458.77	476.83	1.117	1.117	1.04	1.17	1.22	mL899	0.931	0.986	0.985	414.10	441.19	1.016	1.016	1.47	1.42	2.09
mL845	0.946	0.986	0.985	419.68	449.79	1.027	1.027	1.40	1.39	1.95	mL8900	1.083	0.981	0.980	457.50	478.57	1.135	1.135	1.05	1.14	1.19
mL846	1.079	0.981	0.980	458.24	485.34	1.136	1.135	1.03	1.14	1.18	mL8901	1.110	0.980	0.979	462.83	477.89	1.162	1.162	1.01	1.09	1.10
mL847	1.096	0.980	0.980	461.13	482.21	1.149	1.149	1.02	1.11	1.13	mL8902	0.854	0.989	0.988	394.52	442.69	0.936	0.936	1.69	1.67	2.83
mL848	1.058	0.982	0.981	452.31	479.40	1.116	1.115	1.08	1.18	1.28	mL8903	1.083	0.981	0.980	457.56	478.63	1.133	1.133	1.05	1.14	1.19
mL849	1.071	0.981	0.981	455.01	479.10	1.127	1.126	1.06	1.15	1.23	mL8904	1.095	0.980	0.980	459.86	477.93	1.146	1.146	1.03	1.12	1.15
mL850	1.078	0.981	0.980	458.09	485.19	1.150	1.150	1.04	1.11	1.15	mL8905	0.888	0.988	0.987	405.31	450.47	1.176	1.176	1.55	1.06	1.65
mL851	1.091	0.981	0.980	460.70	484.78	1.154	1.154	1.02	1.10	1.12	mL8906	0.923	0.986	0.986	412.31	442.42	0.991	0.990	1.49	1.49	2.23
mL852	1.079	0.981	0.980	458.14	485.23	1.150	1.150	1.04	1.11	1.15	mL8907	1.060	0.982	0.981	452.88	479.98	1.137	1.137	1.08	1.13	1.22
mL853	1.091	0.981	0.980	460.71	484.79	1.154	1.154	1.02	1.10	1.12	mL8908	1.071	0.981	0.980	455.17	479.26	1.148	1.148	1.06	1.11	1.18
mL854	1.058	0.982	0.981	452.31	479.40	1.116	1.115	1.08	1.18	1.28	mL8909	0.922	0.987	0.986	415.62	457.77	1.001				

## B.2. Y12

A sistematização dos parâmetros dos modelos finais obtidos para a resposta Y12 encontram-se na tabela B.2.

Tabela B.2.: Sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição dos modelos polinomiais para a resposta Y12 por modelação multivariada evolutiva - avaliação da qualidade do ajuste, de previsão e global dos modelos eleitos.

Modelo	ofit	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*
m1201	1.527	0.967	0.964	566.2	605.3	1.586	1.585	1.15	1.14	1.30
m1202	1.491	0.968	0.965	560.0	602.1	1.570	1.570	1.20	1.16	1.39
m1203	1.491	0.968	0.965	560.0	602.1	1.576	1.575	1.20	1.15	1.38
m1204	1.478	0.969	0.966	557.2	599.4	1.545	1.544	1.22	1.20	1.46
m1205	1.478	0.969	0.966	557.2	599.4	1.560	1.559	1.22	1.17	1.44
m1206	1.499	0.968	0.965	561.5	603.6	1.555	1.555	1.19	1.18	1.40
m1207	1.499	0.968	0.965	561.5	603.6	1.567	1.567	1.19	1.16	1.38
m1208	1.527	0.967	0.964	566.2	605.3	1.586	1.585	1.15	1.14	1.30
m1209	1.535	0.967	0.963	569.6	614.8	1.611	1.611	1.12	1.10	1.23
m1210	1.535	0.967	0.963	569.6	614.8	1.601	1.600	1.12	1.11	1.25
m1211	1.535	0.967	0.963	569.6	614.8	1.611	1.611	1.12	1.10	1.23
m1212	1.535	0.967	0.963	569.6	614.8	1.601	1.600	1.12	1.11	1.25
m1213	1.535	0.967	0.963	569.6	614.8	1.611	1.611	1.12	1.10	1.23
m1214	1.535	0.967	0.963	569.6	614.8	1.601	1.600	1.12	1.11	1.25
m1215	1.535	0.967	0.963	569.6	614.8	1.611	1.611	1.12	1.10	1.23
m1216	1.535	0.967	0.963	569.6	614.8	1.601	1.600	1.12	1.11	1.25
m1217	1.412	0.972	0.969	544.4	589.6	1.485	1.484	1.34	1.30	1.74
m1218	1.412	0.972	0.969	544.4	589.6	1.498	1.497	1.34	1.27	1.71
m1219	1.478	0.969	0.966	557.2	599.4	1.545	1.544	1.22	1.20	1.46
m1220	1.478	0.969	0.966	557.2	599.4	1.560	1.559	1.22	1.17	1.44
m1221	1.438	0.971	0.968	551.7	602.9	1.555	1.555	1.27	1.18	1.50
m1222	1.438	0.971	0.968	551.7	602.9	1.556	1.555	1.27	1.18	1.50
m1223	1.547	0.966	0.963	571.8	617.0	1.606	1.606	1.10	1.11	1.22
m1224	1.547	0.966	0.963	571.8	617.0	1.670	1.670	1.10	1.02	1.13
m1225	1.497	0.968	0.965	562.1	607.2	1.569	1.569	1.18	1.16	1.37
m1226	1.497	0.968	0.965	562.1	607.2	1.595	1.594	1.18	1.12	1.32
m1227	1.531	0.967	0.964	568.0	610.1	1.601	1.601	1.13	1.11	1.26
m1228	1.531	0.967	0.964	568.0	610.1	1.614	1.613	1.13	1.10	1.24
m1229	1.424	0.972	0.968	548.9	600.1	1.502	1.501	1.29	1.27	1.64
m1230	1.546	0.966	0.963	569.9	609.1	1.611	1.610	1.12	1.10	1.23
m1231	1.546	0.966	0.963	569.9	609.1	1.625	1.625	1.12	1.08	1.21
m1232	1.502	0.968	0.965	563.0	608.1	1.565	1.565	1.17	1.17	1.37
m1233	1.628	0.962	0.959	585.3	624.5	1.675	1.675	1.00	1.02	1.02
m1234	1.628	0.962	0.959	585.3	624.5	1.690	1.689	1.00	1.00	1.00
m1235	1.469	0.969	0.966	555.4	597.6	1.538	1.537	1.24	1.21	1.50
m1236	1.469	0.969	0.966	555.4	597.6	1.553	1.553	1.24	1.18	1.47
m1237	1.492	0.969	0.965	560.9	606.1	1.568	1.568	1.19	1.16	1.38
m1238	1.492	0.969	0.965	560.9	606.1	1.573	1.573	1.19	1.15	1.37
m1239	1.493	0.969	0.965	562.1	610.2	1.555	1.555	1.18	1.18	1.39
m1240	1.493	0.969	0.965	562.1	610.2	1.575	1.574	1.18	1.15	1.36
m1241	1.574	0.965	0.961	576.1	618.3	1.627	1.627	1.07	1.08	1.15
m1242	1.574	0.965	0.961	576.1	618.3	1.659	1.659	1.07	1.04	1.11
m1243	1.586	0.963	0.961	575.7	608.9	1.624	1.624	1.07	1.08	1.16
m1244	1.452	0.971	0.967	555.6	609.8	1.533	1.533	1.23	1.21	1.50
m1245	1.452	0.971	0.967	555.6	609.8	1.582	1.582	1.23	1.14	1.40
m1246	1.502	0.968	0.965	563.0	608.1	1.565	1.565	1.17	1.17	1.37
m1247	1.597	0.963	0.960	578.7	614.9	1.647	1.646	1.05	1.05	1.11
m1248	1.413	0.973	0.969	548.3	605.5	1.504	1.504	1.30	1.26	1.64
m1249	1.413	0.973	0.969	548.3	605.5	1.542	1.541	1.30	1.20	1.56
m1250	1.475	0.969	0.966	556.7	598.9	1.514	1.513	1.23	1.25	1.53
m1251	1.475	0.969	0.966	556.7	598.9	1.514	1.513	1.23	1.25	1.53

$\sigma_{fit}$  - desvio padrão do ajuste;  $R^2$  e  $R^2_{adj}$  - coeficientes de determinação de Pearson e ajustado (para compensar diferenças na alteração do número de parâmetros); AIC - critério de informação de Akaike; BIC - critério de informação Bayesiano; QA - qualidade do ajuste; PE - estimativa do erro de previsão normal; PEadj - estimativa do erro de previsão ajustado (*leave-one-out*); QP - qualidade de previsão; QG - qualidade global; \* - valores multiplicados por  $10^6$ .

## C. Estudo das respostas em análise por modelação multivariada

### C.1. Resposta Y02

A resposta Y02 corresponde à percentagem de quebras em cru, encontrando-se esta relacionada com o número de peças que não são aproveitadas entre o momento em que estas são prensadas até ao final da linha de vidragem, equação 3.3. A triagem inicial permitiu identificar apenas 11 preditores relevantes que conduziram à iniciação de 22 modelos. No final, após as convergências com os critérios de AIC e BIC, obtiveram-se apenas 14 modelos distintos, encontrando-se a sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição de cada um dos modelos polinomiais finais na tabela C.1.

Tabela C.1.: Sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição dos modelos polinomiais para a resposta Y02 por modelação multivariada evolutiva - avaliação da qualidade do ajuste, de previsão e global dos modelos eleitos.

Modelo	$\sigma_{fit}$	$R^2$	$R^2_{adj}$	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*
m201	1.040	0.827	0.820	445.2	466.3	1.080	1.080	1.00	1.00	1.00
m202	1.018	0.835	0.827	440.0	464.1	1.068	1.068	1.06	1.02	1.08
m203	0.985	0.847	0.838	430.9	458.0	1.044	1.044	1.16	1.07	1.25
m204	0.985	0.847	0.838	431.0	458.1	1.046	1.045	1.16	1.07	1.24
m205	0.990	0.845	0.836	432.5	459.6	1.050	1.050	1.14	1.06	1.21
m206	0.987	0.846	0.837	431.6	458.7	1.043	1.043	1.15	1.07	1.24
m207	0.973	0.852	0.842	428.2	458.3	1.025	1.024	1.20	1.11	1.33
m208	0.977	0.850	0.841	429.5	459.6	1.037	1.036	1.18	1.09	1.28
m209	0.978	0.850	0.840	429.8	459.9	1.050	1.049	1.18	1.06	1.25
m210	0.980	0.849	0.840	430.5	460.6	1.037	1.037	1.17	1.09	1.27
m211	0.981	0.849	0.839	430.7	460.8	1.041	1.040	1.17	1.08	1.26
m212	0.982	0.849	0.839	430.9	461.1	1.038	1.038	1.16	1.08	1.26
m213	0.994	0.845	0.835	434.6	464.7	1.051	1.051	1.12	1.06	1.18
m214	0.954	0.859	0.848	424.0	460.1	1.019	1.018	1.25	1.13	1.40

$\sigma_{fit}$  - desvio padrão do ajuste;  $R^2$  e  $R^2_{adj}$  - coeficientes de determinação de Pearson e ajustado (para compensar diferenças na alteração do número de parâmetros); AIC - critério de informação de *Akaike*; BIC - critério de informação Bayesiano; QA - qualidade do ajuste; PE - estimativa do erro de previsão normal; PEadj - estimativa do erro de previsão ajustado (*leave-one-out*); QP - qualidade de previsão; QG - qualidade global; \* - valores multiplicados por  $10^6$ .

Para uma melhor visualização, na figura C.1 encontram-se representados os respetivos desempenhos de ajuste, previsão e global.

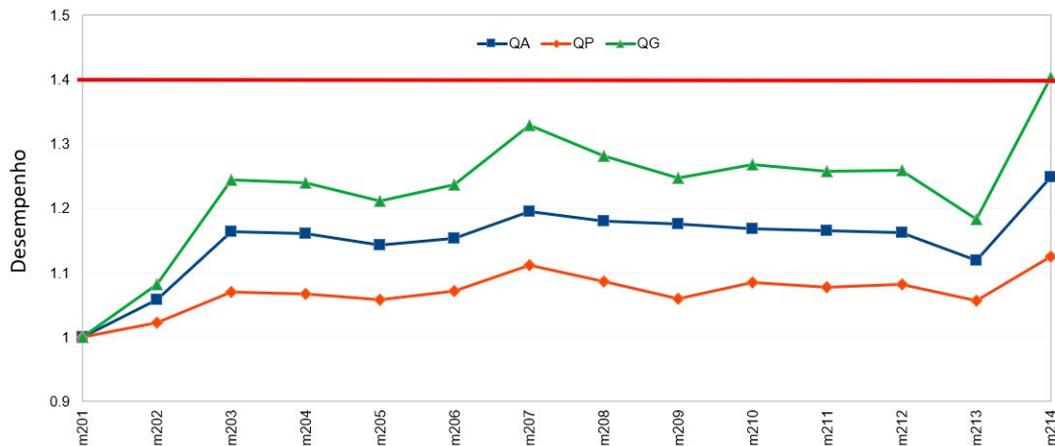


Figura C.1.: Representação gráfica, em relação à resposta Y02, do desempenho global dos modelos obtidos finais para seleção do melhor modelo. A linha a azul representa a qualidade do ajuste (QA), a linha a vermelho com pontos representa a qualidade de previsão (QP) e a linha a verde representa a qualidade global (QG). A linha a vermelho serve como guia orientadora para uma melhor percepção do modelo que apresenta uma melhor QG. Nota: devido às escalas serem diferentes para QA, QP e QG, os valores apresentados são relativos ao mínimo de cada variável, traduzindo deste modo os ganhos relativos a esse limite inferior.

O melhor modelo obtido (m214) foi inquestionavelmente o melhor em todas as vertentes (ajuste, previsão e global). Este modelo permite ajustar relativamente bem os valores experimentais de Y02 já que o coeficiente de determinação ronda os 86% (o modelo descreve cerca de 86% da informação contida na resposta modelada).

Numa análise posterior, verificou-se que este modelo era parcimonioso, já que todos os parâmetros possuíam significado estatístico. Esta resposta pode ser então descrita através da equação

$$Y02 = [54.5 Q31 - 28.9 x31] + 2.59 R64 + 1.45 Q40 + 0.95 I21 + 0.72 Q34 + 0.51 x50 + 0.59 R23 - 1.22 Q45 - 1.54 Q22 - 2.29 Q55 \quad (C.1)$$

Na equação C.1 nota-se que existe uma dependência complexa de Y02 com a variável x31. No sentido de entender esta dependência procedeu-se à elaboração de gráficos que permitiram visualizar o comportamento das variáveis em relação a esta resposta bem como a representação do teste de recuperação em função do modelo ajustado, figuras C.2 e C.1, respetivamente.

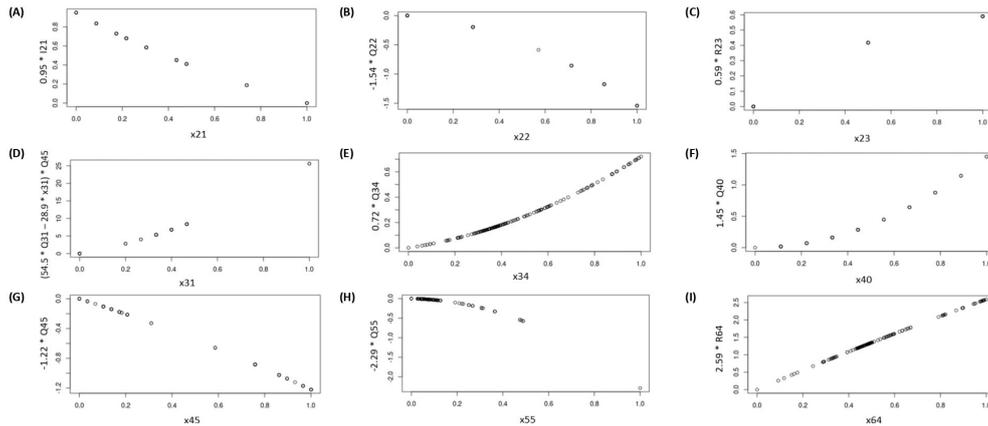


Figura C.2.: Representação gráfica, em relação à resposta Y02, do comportamento dos preditores: (A) x21; (B) x22; (C) x23; (D) x31; (E) x34; (F) x40; (G) x45; (H) x55; e (I) x64. O eixo das abcissas representa o conjunto de amostras para o preditor em causa e o eixo das ordenadas corresponde à função polinomial aproximada para o mesmo.

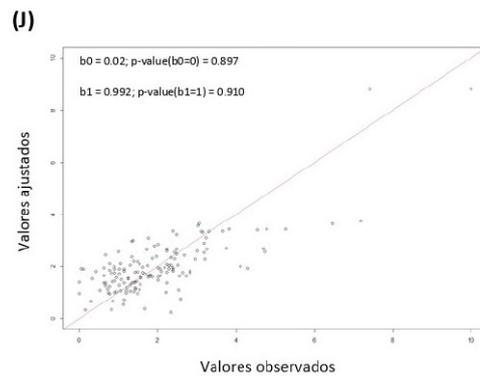


Figura C.3.: Representação gráfica, em relação à resposta Y02, do teste de recuperação em função do modelo ajustado.

Na figura C.6, pela representação da relação entre os valores previstos pelo modelo e os valores da resposta relativamente à equação de recuperação integral ( $b_0 \simeq 0$  e  $b_1 \simeq 1$ ), é possível verificar que o modelo eleito não apresenta erro sistemático significativo. Com base na figura C.5 e atendendo a que Y02 corresponde à percentagem de quebras em cru e se pretende minimizar este valor, é necessário encontrar as melhores condições que diminuem esta resposta, sendo estas: o ciclo de forno (x21) deve rondar os 76 °C; o silo (x22) que dá menos problemas é o 8; a temperatura do queimador 1 do secador (x31) deve ser 105 °C; a diferença entre o peso em verde e em seco (x34) deve ser cerca de 45.3g; o desvio do lado 2 da peça seca (x40) deve ser apenas 0.09g; a percentagem de absorção de água da peça (x55) deve ser cerca de 2% e a percentagem de contração (x64) 7%. A equipa que se encontrar a laborar na secção de prensagem-linhas de vidragem também se encontra a influenciar a percentagem de quebras em cru. Relativamente à espessura da peça no ensaio da resistência mecânica à flexão em seco (x45) não é aconselhado indicar um valor ideal, visto que este parâmetro é dependente da área do material.

## C.2. Resposta Y03

A resposta Y03 corresponde ao número de quebras em cru. Numa seleção inicial, identificaram-se 18 preditores que levaram à iniciação de 36 modelos iniciais e que após os critérios de convergência resultaram em apenas 21 modelos finais, encontrando-se a sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição de cada um dos modelos polinomiais finais na tabela C.2.

Tabela C.2.: Sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição dos modelos polinomiais para a resposta Y03 por modelação multivariada evolutiva - avaliação da qualidade do ajuste, de previsão e global dos modelos eleitos.

Modelo	$\sigma_{fit}$	$R^2$	$R^2_{adj}$	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*
m301	1.774	0.762	0.752	605.6	626.6	1.822	1.822	1.01	1.01	1.02
m302	1.776	0.762	0.752	605.8	626.9	1.824	1.823	1.01	1.01	1.02
m303	1.781	0.761	0.751	606.7	627.8	1.829	1.829	1.00	1.00	1.00
m304	1.691	0.786	0.775	592.0	616.1	1.729	1.729	1.17	1.12	1.31
m305	1.696	0.784	0.774	593.0	617.1	1.742	1.742	1.16	1.10	1.28
m306	1.723	0.777	0.767	597.8	621.9	1.774	1.774	1.11	1.06	1.18
m307	1.726	0.777	0.766	598.3	622.3	1.777	1.777	1.10	1.06	1.17
m308	1.766	0.766	0.755	605.2	629.3	1.823	1.823	1.02	1.01	1.03
m309	1.671	0.792	0.780	589.5	616.6	1.714	1.714	1.21	1.14	1.38
m310	1.673	0.792	0.780	589.8	616.9	1.724	1.724	1.21	1.13	1.36
m311	1.673	0.792	0.780	589.8	616.9	1.716	1.716	1.21	1.14	1.37
m312	1.673	0.792	0.780	589.9	617.0	1.725	1.724	1.20	1.12	1.36
m313	1.674	0.791	0.780	590.0	617.1	1.727	1.726	1.20	1.12	1.35
m314	1.675	0.791	0.779	590.3	617.4	1.727	1.727	1.20	1.12	1.35
m315	1.660	0.795	0.783	587.6	614.7	1.702	1.701	1.23	1.16	1.43
m316	1.643	0.801	0.788	585.3	615.4	1.692	1.692	1.27	1.17	1.48
m317	1.657	0.797	0.784	588.0	618.1	1.715	1.714	1.23	1.14	1.40
m318	1.657	0.797	0.784	588.0	618.1	1.715	1.715	1.23	1.14	1.40
m319	1.668	0.794	0.781	590.0	620.1	1.725	1.724	1.21	1.13	1.36
m320	1.668	0.794	0.781	589.9	620.0	1.724	1.724	1.21	1.13	1.36
m321	1.644	0.802	0.787	586.5	619.6	1.699	1.699	1.26	1.16	1.45

$\sigma_{fit}$  - desvio padrão do ajuste;  $R^2$  e  $R^2_{adj}$  - coeficientes de determinação de Pearson e ajustado (para compensar diferenças na alteração do número de parâmetros); AIC - critério de informação de Akaike; BIC - critério de informação Bayesiano; QA - qualidade do ajuste; PE - estimativa do erro de previsão normal; PEadj - estimativa do erro de previsão ajustado (*leave-one-out*); QP - qualidade de previsão; QG - qualidade global; \* - valores multiplicados por  $10^6$ .

A representação gráfica para os modelos obtidos com o objetivo de selecionar o modelo que apresenta o melhor desempenho global para esta resposta encontra-se na figura C.4.

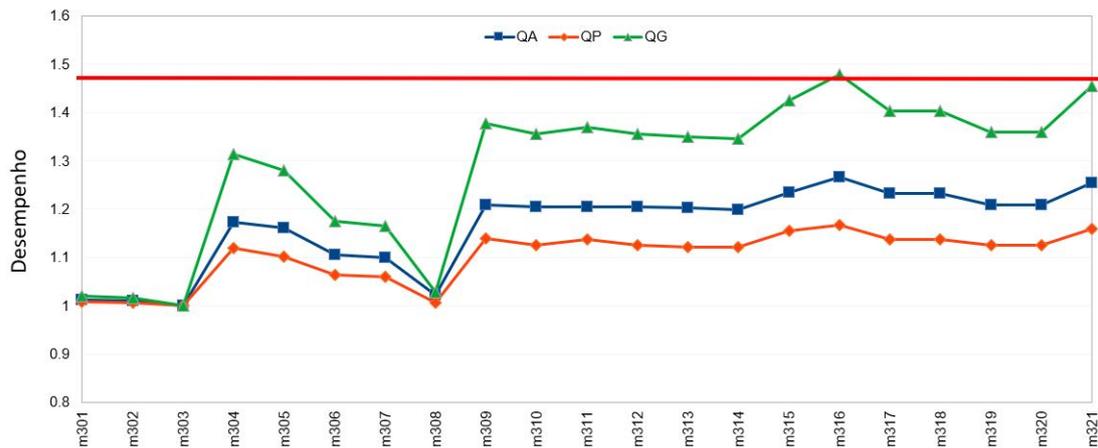


Figura C.4.: Representação gráfica, em relação à resposta Y03, do desempenho global dos modelos obtidos finais para seleção do melhor modelo. A linha a azul representa a qualidade do ajuste (QA), a linha a vermelho com pontos representa a qualidade de previsão (QP) e a linha a verde representa a qualidade global (QG). A linha a vermelho serve como guia orientadora para uma melhor percepção do modelo que apresenta uma melhor QG. Nota: devido às escalas serem diferentes para QA, QP e QG, os valores apresentados são relativos ao mínimo de cada variável, traduzindo deste modo os ganhos relativos a esse limite inferior.

O modelo m316 demonstrou ser o melhor modelo parcimonioso, descrevendo cerca de 80% da representação da informação.

A resposta Y03 pode ser descrita através da equação

$$Y03 = [254 Q13 - 256 R13] + 7.1 Q31 + 4.57 I62 + 3.89 Q64 + 2.13 I22 + 0.91 R52 - 3.0 Q55 - 4.6 Q32 \quad (C.2)$$

Com a equação C.2, verifica-se uma dependência complexa da resposta Y03 com a variável x13, pelo que se procedeu à elaboração de gráficos que permitiram visualizar melhor o comportamento desta e demais variáveis bem como a representação do teste de recuperação em função do modelo ajustado, figuras C.5 e C.6, respetivamente.

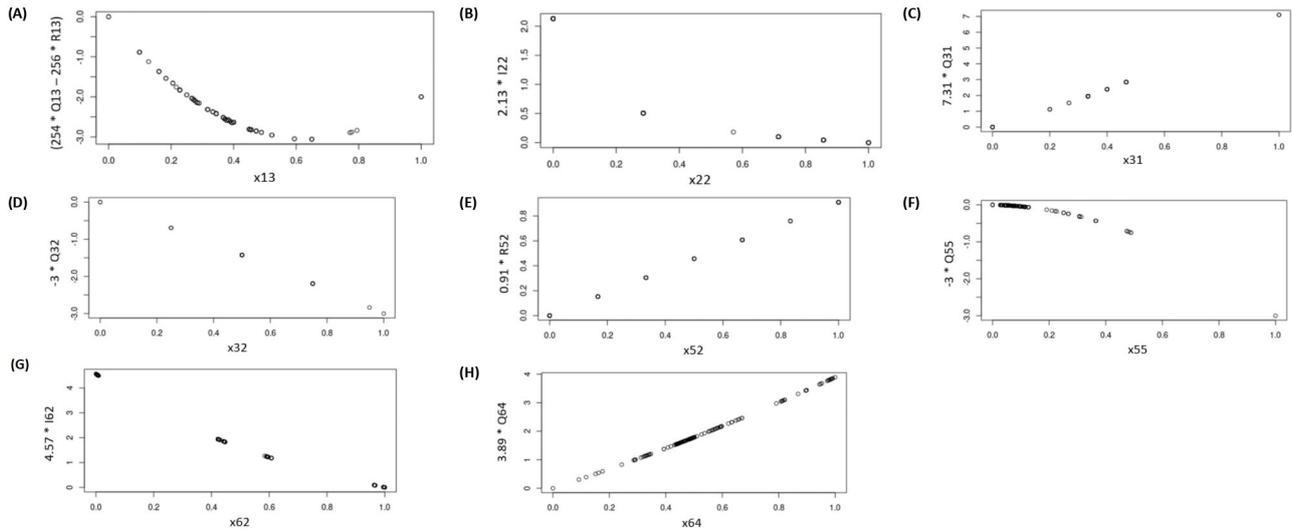


Figura C.5.: Representação gráfica, em relação à resposta Y03, do comportamento dos preditores: (A) x13; (B) x22; (C) x31; (D) x32; (E) x52; (F) x55; (G) x62; e (H) x64. O eixo das abcissas representa o conjunto de amostras para o preditor em causa e o eixo das ordenadas corresponde à função polinomial aproximada para o mesmo.

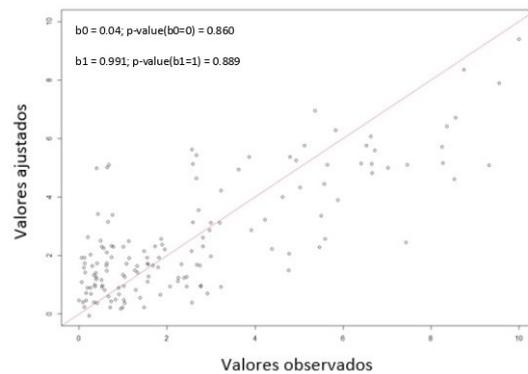


Figura C.6.: Representação gráfica, em relação à resposta Y03, do teste de recuperação em função do modelo ajustado.

Com base na figura C.6, é possível verificar a ausência de erro sistemático significativo nos resultados ( $b_0 \simeq 0$  e  $b_1 \simeq 1$ ) e, observando a figura C.5 e considerando que a resposta Y03 encontra-se relacionada com o número de quebras em cru, algo que se pretende minimizar, é necessário uma análise quanto às condições ideais para a diminuir, sendo estas: o peso cozido do provete para cálculo da perda ao rubro (x13) deve ser por volta das 45.2 g; o silo (x22) que dá menos problemas é o 8; a temperatura do queimador 1 do secador (x31) deve ser 105 °C e do queimador 2 (x32) 110 °C; a temperatura máxima do forno (x52) a rondar os 1180 °C; a percentagem de absorção de água da peça (x55) por volta dos 0% e a percentagem de contração 7%. Relativamente à espessura da peça no ensaio da resistência mecânica à flexão em seco (x45) não é aconselhado indicar um valor ideal, visto que este parâmetro é dependente da área do material. O tamanho seco da peça cozida também deve ser um parâmetro a ser analisado, contudo não é possível indicar um valor exato, uma vez que este se encontra dependente do formato da peça.

### C.3. Resposta Y10

A resposta Y10 corresponde ao número de peças de terceira qualidade, ou seja, as peças que foram escolhidas e foram classificadas como terceira qualidade (defeitos visíveis a olho nu). Após uma triagem inicial, foram selecionados 56 preditores que conduziram à iniciação de 112 modelos que convergiram para 90 modelos finais, encontrando-se a sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição de cada um dos modelos polinomiais finais na tabela C.3.

Tabela C.3.: Sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição dos modelos polinomiais para a resposta Y10 por modelação multivariada evolutiva - avaliação da qualidade do ajuste, de previsão e global dos modelos eleitos.

Modelo	ofit	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*	Modelo	ofit	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*
m1001	1.132	0.754	0.736	474.6	507.7	1.205	1.205	1.25	1.18	1.47	m1046	1.140	0.754	0.733	478.6	517.7	1.281	1.280	1.20	1.04	1.26
m1002	1.142	0.748	0.732	476.3	506.4	1.211	1.210	1.22	1.17	1.43	m1047	1.209	0.711	0.699	490.6	511.6	1.264	1.264	1.01	1.07	1.08
m1003	1.144	0.747	0.731	476.8	506.9	1.216	1.215	1.21	1.16	1.41	m1048	1.161	0.742	0.723	482.0	515.2	1.296	1.296	1.14	1.02	1.16
m1004	1.180	0.727	0.714	484.1	508.2	1.236	1.236	1.10	1.12	1.23	m1049	1.101	0.774	0.751	469.8	515.0	1.235	1.235	1.34	1.12	1.50
m1005	1.195	0.718	0.706	487.1	508.1	1.248	1.248	1.05	1.10	1.16	m1050	1.123	0.762	0.741	473.9	513.0	1.188	1.187	1.27	1.21	1.54
m1006	1.141	0.750	0.732	477.0	510.1	1.287	1.286	1.22	1.03	1.26	m1051	1.161	0.742	0.723	482.1	515.2	1.296	1.296	1.14	1.02	1.16
m1007	1.155	0.742	0.726	479.5	509.6	1.217	1.217	1.17	1.16	1.36	m1052	1.052	0.797	0.773	457.9	509.1	1.128	1.127	1.54	1.35	2.08
m1008	1.180	0.727	0.714	484.1	508.2	1.236	1.236	1.10	1.12	1.23	m1053	1.062	0.791	0.768	459.9	508.0	1.140	1.139	1.51	1.32	1.98
m1009	1.195	0.718	0.706	487.1	508.1	1.248	1.248	1.05	1.10	1.16	m1054	1.107	0.772	0.748	471.5	516.7	1.248	1.247	1.32	1.10	1.45
m1010	1.120	0.763	0.742	473.1	512.2	1.198	1.198	1.28	1.19	1.53	m1055	1.129	0.759	0.738	475.6	514.8	1.209	1.209	1.25	1.17	1.46
m1011	1.144	0.749	0.731	477.6	510.7	1.222	1.222	1.21	1.15	1.38	m1056	1.116	0.763	0.744	471.1	507.2	1.198	1.198	1.31	1.19	1.56
m1012	1.057	0.793	0.770	458.6	506.8	1.134	1.133	1.53	1.33	2.04	m1057	1.109	0.768	0.747	470.1	509.3	1.190	1.190	1.33	1.21	1.60
m1013	1.200	0.716	0.704	488.2	509.2	1.308	1.308	1.04	1.00	1.04	m1058	1.131	0.755	0.737	474.2	507.3	1.209	1.208	1.26	1.17	1.47
m1014	1.200	0.716	0.704	488.2	509.2	1.308	1.308	1.04	1.00	1.04	m1059	1.116	0.763	0.744	471.1	507.2	1.198	1.198	1.31	1.19	1.56
m1015	1.214	0.707	0.697	490.7	508.8	1.258	1.257	1.00	1.08	1.08	m1060	1.106	0.770	0.749	470.3	512.4	1.241	1.240	1.33	1.11	1.48
m1016	1.075	0.785	0.762	462.7	507.8	1.176	1.175	1.46	1.24	1.80	m1061	1.115	0.765	0.745	471.8	511.0	1.191	1.191	1.30	1.21	1.57
m1017	1.087	0.778	0.757	465.0	507.1	1.184	1.183	1.41	1.22	1.73	m1062	1.116	0.763	0.744	471.1	507.2	1.198	1.198	1.31	1.19	1.56
m1018	1.200	0.716	0.704	488.2	509.2	1.308	1.308	1.04	1.00	1.04	m1063	1.161	0.740	0.723	481.1	511.2	1.274	1.274	1.15	1.05	1.21
m1019	1.214	0.707	0.697	490.7	508.8	1.258	1.257	1.00	1.08	1.08	m1064	1.170	0.733	0.718	482.7	509.8	1.223	1.223	1.12	1.14	1.29
m1020	1.098	0.774	0.752	468.0	510.2	1.181	1.180	1.36	1.23	1.68	m1065	1.138	0.752	0.734	476.0	509.2	1.264	1.264	1.23	1.07	1.32
m1021	1.087	0.778	0.757	465.2	507.3	1.162	1.161	1.41	1.27	1.79	m1066	1.163	0.737	0.722	480.9	508.0	1.288	1.287	1.15	1.03	1.19
m1022	1.123	0.760	0.741	473.0	509.2	1.160	1.160	1.28	1.17	1.50	m1067	1.180	0.727	0.714	484.1	508.2	1.236	1.236	1.10	1.12	1.23
m1023	1.132	0.754	0.737	474.5	507.7	1.208	1.208	1.25	1.17	1.47	m1068	1.195	0.718	0.706	487.1	508.1	1.248	1.248	1.05	1.10	1.16
m1024	1.057	0.793	0.770	458.6	506.8	1.134	1.133	1.53	1.33	2.04	m1069	1.146	0.746	0.730	477.3	507.4	1.220	1.220	1.21	1.15	1.39
m1025	1.138	0.752	0.734	476.0	509.2	1.264	1.264	1.23	1.07	1.32	m1070	1.160	0.738	0.723	480.1	507.2	1.235	1.234	1.16	1.12	1.30
m1026	1.163	0.737	0.722	480.9	508.0	1.288	1.287	1.15	1.03	1.19	m1071	1.116	0.763	0.744	471.1	507.2	1.198	1.198	1.31	1.19	1.56
m1027	1.111	0.770	0.746	472.7	517.9	1.255	1.255	1.30	1.09	1.41	m1072	1.148	0.745	0.729	477.9	508.0	1.223	1.222	1.20	1.15	1.37
m1028	1.134	0.757	0.736	476.9	516.0	1.208	1.208	1.23	1.17	1.44	m1073	1.163	0.737	0.722	480.7	507.8	1.237	1.237	1.15	1.12	1.29
m1029	1.149	0.749	0.729	479.9	516.0	1.280	1.280	1.18	1.04	1.23	m1074	1.103	0.772	0.750	469.4	511.6	1.239	1.239	1.34	1.11	1.50
m1030	1.161	0.741	0.723	482.2	515.3	1.286	1.285	1.14	1.04	1.18	m1075	1.142	0.750	0.732	477.2	510.3	1.218	1.218	1.21	1.15	1.40
m1031	1.139	0.751	0.733	476.4	509.5	1.266	1.265	1.22	1.07	1.31	m1076	1.103	0.772	0.750	469.4	511.6	1.239	1.239	1.34	1.11	1.50
m1032	1.164	0.737	0.722	480.9	508.0	1.288	1.288	1.15	1.03	1.18	m1077	1.142	0.750	0.732	477.2	510.3	1.218	1.218	1.21	1.15	1.40
m1033	1.075	0.786	0.762	463.7	511.8	1.168	1.167	1.44	1.26	1.81	m1078	1.143	0.750	0.732	477.3	510.5	1.201	1.201	1.21	1.19	1.44
m1034	1.093	0.776	0.755	466.7	508.9	1.179	1.178	1.39	1.23	1.71	m1079	1.144	0.749	0.731	477.8	510.9	1.204	1.203	1.20	1.18	1.42
m1035	1.106	0.770	0.749	470.3	512.4	1.250	1.249	1.33	1.10	1.46	m1080	1.159	0.740	0.724	480.7	510.8	1.216	1.216	1.16	1.16	1.34
m1036	1.113	0.766	0.746	471.2	510.4	1.194	1.194	1.31	1.20	1.57	m1081	1.059	0.794	0.769	460.0	511.2	1.168	1.168	1.51	1.25	1.89
m1037	1.137	0.750	0.734	475.0	505.1	1.206	1.206	1.24	1.18	1.46	m1082	1.161	0.741	0.723	482.2	515.3	1.288	1.287	1.14	1.03	1.18
m1038	1.163	0.735	0.722	479.9	504.0	1.228	1.228	1.16	1.13	1.31	m1083	1.186	0.726	0.711	486.6	513.7	1.236	1.236	1.07	1.12	1.20
m1039	1.065	0.787	0.767	459.0	501.1	1.138	1.138	1.51	1.32	2.00	m1084	1.065	0.787	0.767	459.0	501.1	1.138	1.138	1.51	1.32	2.00
m1040	1.137	0.750	0.734	475.0	505.1	1.206	1.206	1.24	1.18	1.46	m1085	1.104	0.771	0.750	469.7	511.8	1.238	1.237	1.34	1.12	1.50
m1041	1.163	0.735	0.722	479.9	504.0	1.228	1.228	1.16	1.13	1.31	m1086	1.116	0.764	0.744	472.2	511.4	1.194	1.194	1.30	1.20	1.56
m1042	1.180	0.727	0.714	484.1	508.2	1.236	1.236	1.10	1.12	1.23	m1087	1.104	0.771	0.750	469.8	511.9	1.238	1.238	1.34	1.12	1.49
m1043	1.195	0.718	0.706	487.1	508.1	1.248	1.248	1.05	1.10	1.16	m1088	1.116	0.765	0.744	472.1	511.2	1.193	1.193	1.30	1.20	1.56
m1044	1.140	0.754	0.733	478.5	517.7	1.281	1.280	1.20	1.04	1.26	m1089	1.140	0.754	0.733	478.5	517.7	1.281	1.280	1.20	1.04	1.26
m1045	1.209	0.711	0.699	490.6	511.6	1.264	1.264	1.01	1.07	1.08	m1090	1.209	0.711	0.699	490.6	511.6	1.264	1.264	1.01	1.07	1.08

$\sigma_{fit}$  - desvio padrão do ajuste;  $R^2$  e  $R^2_{adj}$  - coeficientes de determinação de Pearson e ajustado (para compensar diferenças na alteração do número de parâmetros); AIC - critério de informação de Akaike; BIC - critério de informação Bayesiano; QA - qualidade do ajuste; PE - estimativa do erro de previsão normal; PEadj - estimativa do erro de previsão ajustado (leave-one-out); QP - qualidade de previsão; QG - qualidade global; \* - valores multiplicados por  $10^6$ .

A representação gráfica para os modelos obtidos com o objetivo de selecionar o modelo que apresenta o melhor desempenho global para a resposta Y10 encontra-se na figura C.7.

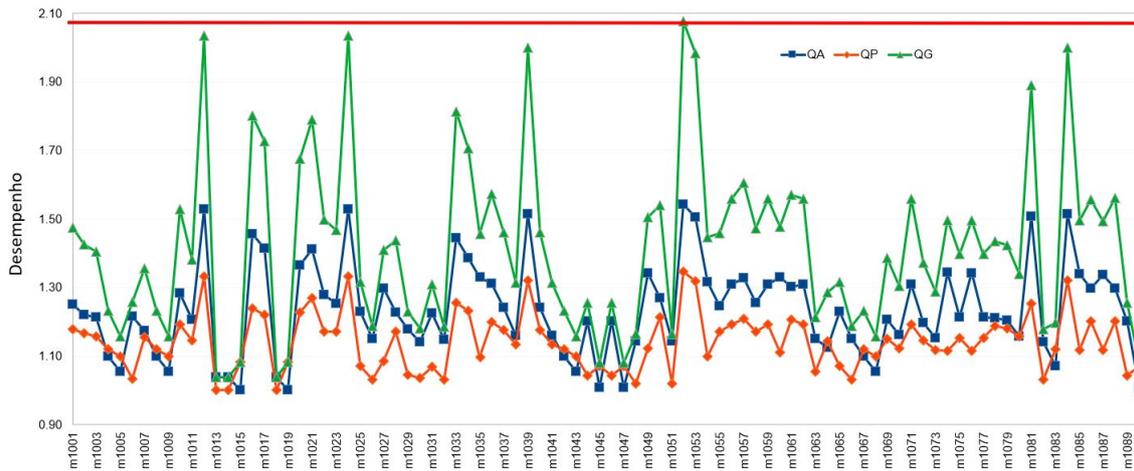


Figura C.7.: Representação gráfica, em relação à resposta Y10, do desempenho global dos modelos obtidos finais para seleção do melhor modelo. A linha a azul representa a qualidade do ajuste (QA), a linha a vermelho com pontos representa a qualidade de previsão (QP) e a linha a verde representa a qualidade global (QG). A linha a vermelho serve como guia orientadora para uma melhor percepção do modelo que apresenta uma melhor QG. Nota: devido às escalas serem diferentes para QA, QP e QG, os valores apresentados são relativos ao mínimo de cada variável, traduzindo deste modo os ganhos relativos a esse limite inferior.

O modelo parcimonioso final eleito foi o m1052 que representa cerca de 80% da informação. Através da sua equação

$$\begin{aligned}
 Y10 = & -10.77 x33 + 1.33 Q09 + 1.34 I65 + 3.43 Q47 + 0.81 R23 - 3.66 x55+ \\
 & +2.69 Q12 - 29.82 I26 + 29.14 I01 - 2.54 I20 - 1.22 I52+ \\
 & +33.22 x46 - 1.39 I51 - 26.79 x35 - 1.86 Q14 - 1.37 Q37
 \end{aligned}
 \tag{C.3}$$

procedeu-se à elaboração de gráficos que permitiram visualizar o comportamento das variáveis em relação a esta resposta bem como a representação do teste de recuperação em função do modelo ajustado, figuras C.8 e C.9, respetivamente.

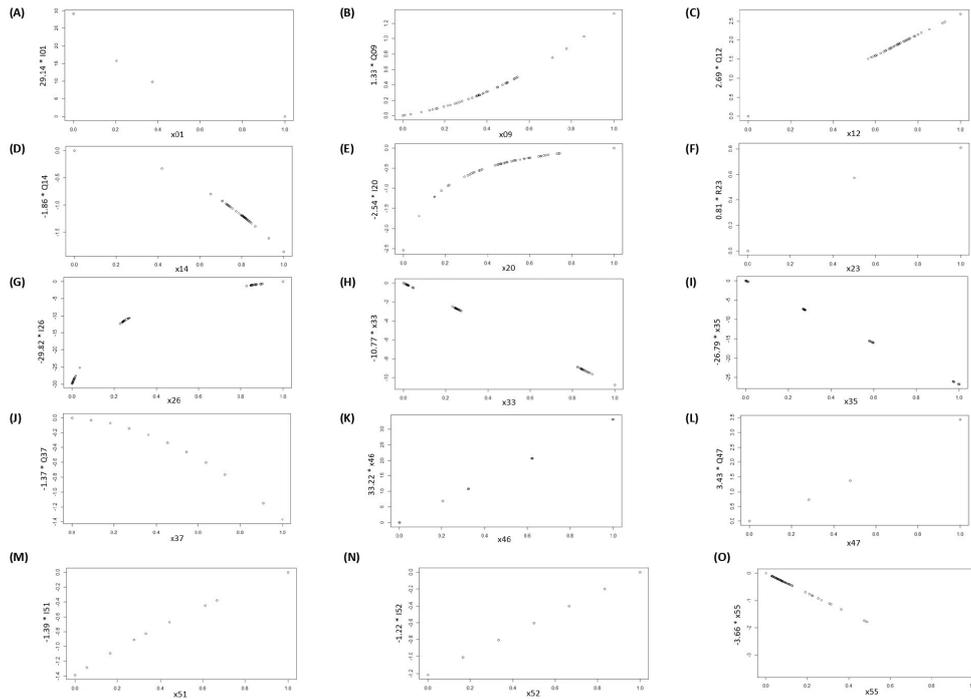


Figura C.8.: Representação gráfica, em relação à resposta Y10, do comportamento dos preditores: (A) x01; (B) x09; (C) x12; (D) x14; (E) x20; (F) x23; (G) x26; (H) x33; (I) x35; (J) x37; (K) x46; (L) x47; (M) x51; (N) x52; (O) x55; e (P) x65. O gráfico relativo ao preditor x65 foi ocultado, uma vez que existiam apenas dois pontos em sentido descendente, correspondendo o mínimo a 1. O eixo das abcissas representa o conjunto de amostras para o preditor em causa e o eixo das ordenadas corresponde à função polinomial aproximada para o mesmo.

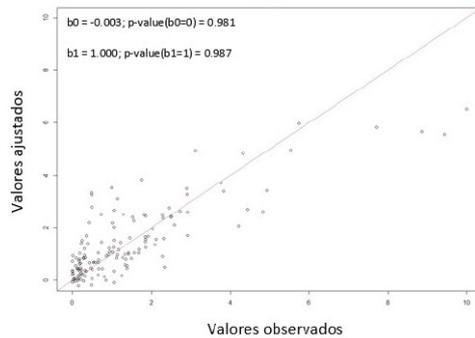


Figura C.9.: Representação gráfica, em relação à resposta Y10, do teste de recuperação em função do modelo ajustado.

Com base na figura C.9, é possível inferir que o modelo não apresenta erro sistemático significativo ( $b_0 \simeq 0$  e  $b_1 \simeq 1$ ) e observando a figura C.8 e atendendo que Y10 diz respeito ao número de peças de terceira qualidade, valor que pretendemos minimizar, é necessário encontrar as melhores condições que diminuam esta resposta, sendo estas: a granulometria do pó a  $125 \mu\text{m}$  (x09) é da ordem dos 2%; o peso seco do provete para o cálculo da perda ao rubro (x12) é cerca de 44.7 g; a percentagem de perda ao rubro do provete no controlo do pó (x14) ronda os 6% e a percentagem de humidade (x20) 1%; o ciclo do forno no controlo do pó (x23) é 53 minutos; o desvio do lado um da peça seca (x37) ronda os 1.2 cm; o ciclo do forno (x51) é de 52 minutos; a temperatura máxima do forno (x52) é de  $1180 \text{ }^\circ\text{C}$ ; a percentagem de absorção

de água da peça (x55) é cerca de 2%; e a linha de escolha é a linha número três podendo este preditor estar relacionado com a área da peça, uma vez que é usual determinadas linhas produzirem determinados formatos. O preditor x01 encontra-se relacionado com a área, a qual está a influenciar os resultados, tendo sido verificado que as peças de 60x60 são as que apresentam menor número de peças de terceira qualidade. Relativamente a parâmetros como peso da peça em verde e em seco (x26 e x33, respetivamente), máximo do lado um das dimensões da peça seca (x35) e largura e distância inter-apoios no ensaio da resistência mecânica à flexão em seco (x46 e x47, respetivamente), é possível verificar que têm influência nos resultados desta resposta, contudo não deve ser indicado um valor exato, uma vez que este se encontra dependente do formato das peças porcelânicas.

### C.4. Resposta Y11

A resposta Y11 corresponde ao número de peças de caco, ou seja, as peças que foram escolhidas e foram consideradas como sem qualquer utilidade devido à presença de defeitos de grandes dimensões. Identificaram-se 40 preditores que levaram ao surgimento de 80 modelos iniciais e que convergiram para 70 modelos finais, encontrando-se a sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição de cada um dos modelos polinomiais finais na tabela C.4.

Tabela C.4.: Sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição dos modelos polinomiais para a resposta Y11 por modelação multivariada evolutiva - avaliação da qualidade do ajuste, de previsão e global dos modelos eleitos.

Modelo	offit	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*	Modelo	offit	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*
m1101	0.424	0.830	0.808	186.0	240.2	0.817	0.815	5.49	1.45	7.93	m1136	0.456	0.805	0.778	208.8	266.0	0.930	0.928	3.83	1.12	4.27
m1102	0.428	0.825	0.804	188.0	239.2	0.824	0.822	5.35	1.42	7.59	m1137	0.620	0.603	0.589	289.1	307.2	0.810	0.809	1.00	1.47	1.47
m1103	0.503	0.756	0.729	236.0	284.1	0.851	0.850	2.53	1.33	3.36	m1138	0.619	0.604	0.590	288.7	306.8	0.809	0.809	1.01	1.47	1.48
m1104	0.516	0.738	0.715	240.9	280.0	0.834	0.832	2.35	1.39	3.25	m1139	0.402	0.849	0.828	171.7	231.9	0.960	0.958	6.81	1.05	7.13
m1105	0.503	0.756	0.729	236.0	284.1	0.851	0.850	2.53	1.33	3.36	m1140	0.409	0.842	0.822	175.1	229.3	0.945	0.942	6.53	1.08	7.06
m1106	0.516	0.738	0.715	240.9	280.0	0.834	0.832	2.35	1.39	3.25	m1141	0.613	0.609	0.598	285.0	300.0	0.781	0.780	1.07	1.58	1.70
m1107	0.503	0.756	0.729	236.0	284.1	0.851	0.850	2.53	1.33	3.36	m1142	0.511	0.745	0.720	238.8	281.0	0.853	0.852	2.42	1.32	3.21
m1108	0.516	0.738	0.715	240.9	280.0	0.834	0.832	2.35	1.39	3.25	m1143	0.516	0.738	0.715	240.8	279.9	0.835	0.834	2.35	1.38	3.25
m1109	0.550	0.698	0.676	258.2	291.3	0.746	0.745	1.77	1.73	3.06	m1144	0.512	0.745	0.720	239.0	281.1	0.854	0.852	2.42	1.32	3.20
m1110	0.568	0.671	0.655	264.9	288.9	0.756	0.755	1.57	1.69	2.64	m1145	0.536	0.711	0.692	249.6	279.7	0.843	0.842	2.04	1.36	2.76
m1111	0.503	0.756	0.729	236.0	284.1	0.851	0.850	2.53	1.33	3.36	m1146	0.513	0.743	0.718	240.0	282.1	0.845	0.844	2.38	1.35	3.21
m1112	0.516	0.738	0.715	240.9	280.0	0.834	0.832	2.35	1.39	3.25	m1147	0.523	0.729	0.708	243.6	279.7	0.850	0.848	2.25	1.33	3.00
m1113	0.391	0.864	0.837	168.4	246.7	0.772	0.770	6.90	1.62	11.17	m1148	0.412	0.845	0.818	182.2	251.4	0.818	0.816	5.67	1.44	8.17
m1114	0.394	0.861	0.834	170.1	245.3	0.775	0.774	6.77	1.60	10.85	m1149	0.422	0.835	0.810	187.1	250.3	0.812	0.811	5.31	1.46	7.76
m1115	0.391	0.864	0.837	168.4	246.7	0.772	0.770	6.90	1.62	11.17	m1150	0.444	0.807	0.789	196.6	238.7	0.838	0.837	4.74	1.37	6.50
m1116	0.394	0.861	0.834	170.1	245.3	0.775	0.774	6.77	1.60	10.85	m1151	0.509	0.747	0.723	237.7	279.8	0.831	0.830	2.47	1.40	3.44
m1117	0.554	0.694	0.672	259.9	293.0	0.746	0.745	1.72	1.73	2.97	m1152	0.519	0.733	0.712	241.6	277.8	0.845	0.843	2.32	1.35	3.13
m1118	0.558	0.687	0.667	261.4	291.5	0.743	0.742	1.67	1.74	2.91	m1153	0.510	0.746	0.722	237.9	280.0	0.831	0.830	2.46	1.39	3.43
m1119	0.465	0.792	0.769	212.2	260.3	0.797	0.795	3.67	1.52	5.58	m1154	0.519	0.733	0.712	241.7	277.8	0.845	0.844	2.32	1.35	3.13
m1120	0.471	0.785	0.763	214.9	260.0	0.778	0.777	3.53	1.59	5.61	m1155	0.541	0.704	0.687	251.2	278.3	0.754	0.754	1.98	1.69	3.35
m1121	0.465	0.792	0.769	212.2	260.3	0.797	0.795	3.67	1.52	5.58	m1156	0.541	0.704	0.687	251.2	278.3	0.754	0.754	1.98	1.69	3.35
m1122	0.471	0.785	0.763	214.9	260.0	0.778	0.777	3.53	1.59	5.61	m1157	0.522	0.732	0.708	244.3	283.4	0.812	0.811	2.22	1.46	3.25
m1123	0.417	0.834	0.814	180.1	231.3	0.982	0.980	6.06	1.00	6.06	m1158	0.533	0.717	0.696	248.5	281.6	0.782	0.781	2.07	1.58	3.27
m1124	0.422	0.828	0.810	181.9	227.1	0.974	0.972	5.96	1.02	6.06	m1159	0.522	0.732	0.708	244.3	283.4	0.812	0.811	2.22	1.46	3.25
m1125	0.574	0.669	0.648	269.7	299.8	0.807	0.806	1.45	1.48	2.14	m1160	0.533	0.717	0.696	248.5	281.6	0.782	0.781	2.07	1.58	3.27
m1126	0.579	0.661	0.642	271.3	298.3	0.811	0.811	1.41	1.46	2.06	m1161	0.553	0.695	0.673	259.7	292.8	0.754	0.753	1.72	1.69	2.92
m1127	0.573	0.670	0.649	269.5	299.6	0.807	0.806	1.45	1.48	2.15	m1162	0.558	0.687	0.667	261.2	291.4	0.752	0.751	1.67	1.70	2.85
m1128	0.578	0.662	0.643	271.0	298.1	0.811	0.810	1.41	1.46	2.06	m1163	0.386	0.862	0.840	160.9	224.1	0.942	0.939	8.06	1.09	8.76
m1129	0.439	0.824	0.794	200.8	270.0	0.906	0.904	4.26	1.17	5.01	m1164	0.402	0.846	0.827	169.4	220.6	0.930	0.928	7.21	1.12	8.04
m1130	0.456	0.805	0.778	208.8	266.0	0.930	0.928	3.83	1.12	4.27	m1165	0.539	0.710	0.689	252.0	285.1	0.781	0.781	1.96	1.58	3.09
m1131	0.563	0.683	0.661	265.1	298.2	0.806	0.805	1.57	1.48	2.33	m1166	0.382	0.870	0.844	161.5	239.7	0.705	0.704	7.70	1.94	14.92
m1132	0.570	0.673	0.652	267.8	297.9	0.792	0.791	1.50	1.54	2.30	m1167	0.393	0.859	0.835	167.7	236.9	0.707	0.706	7.12	1.93	13.73
m1133	0.555	0.697	0.671	262.4	301.6	0.810	0.809	1.65	1.47	2.42	m1168	0.423	0.834	0.809	188.0	251.2	0.780	0.778	5.23	1.59	8.30
m1134	0.571	0.673	0.652	268.1	298.2	0.793	0.792	1.49	1.47	3.68	m1169	0.602	0.633	0.613	283.2	310.3	0.792	0.791	1.14	1.54	1.74
m1135	0.439	0.824	0.794	200.8	270.0	0.906	0.904	4.26	1.17	5.01	m1170	0.602	0.633	0.613	283.2	310.3	0.782	0.781	1.14	1.58	1.79

$\sigma_{fit}$  - desvio padrão do ajuste;  $R^2$  e  $R^2_{adj}$  - coeficientes de determinação de Pearson e ajustado (para compensar diferenças na alteração do número de parâmetros); AIC - critério de informação de Akaike; BIC - critério de informação Bayesiano; QA - qualidade do ajuste; PE - estimativa do erro de previsão normal; PEadj - estimativa do erro de previsão ajustado (leave-one-out); QP - qualidade de previsão; QG - qualidade global; \* - valores multiplicados por  $10^6$ .

A representação gráfica para os modelos obtidos com o objetivo de selecionar o modelo que apresenta o melhor desempenho global para a resposta Y11 encontra-se na figura C.10.

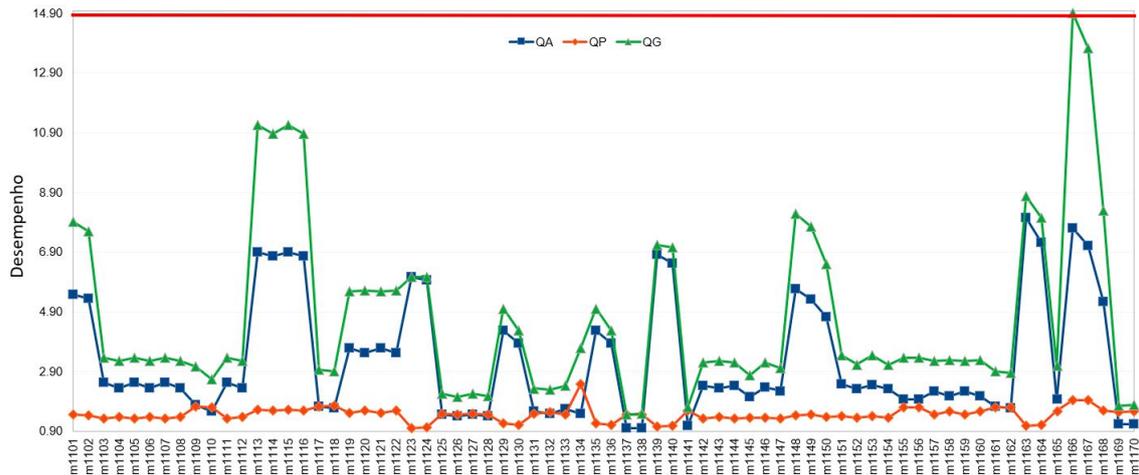


Figura C.10.: Representação gráfica, em relação à resposta Y11, do desempenho global dos modelos obtidos finais para seleção do melhor modelo. A linha a azul representa a qualidade do ajuste (QA), a linha a vermelho com pontos representa a qualidade de previsão (QP) e a linha a verde representa a qualidade global (QG). A linha a vermelho serve como guia orientadora para uma melhor percepção do modelo que apresenta uma melhor QG. Nota: devido às escalas serem diferentes para QA, QP e QG, os valores apresentados são relativos ao mínimo de cada variável, traduzindo deste modo os ganhos relativos a esse limite inferior.

O melhor modelo obtido foi o m1166 que apresenta uma recuperação de informação de 87%. Através da sua equação

$$\begin{aligned}
 Y_{11} = & 0.65 Q_{40} + 7.83 Q_{47} - 20.67 x_{01} - 2.82 I_{32} + 2.40 Q_{28} + 4.64 I_{43} - 1.19 I_{17} + \\
 & + 9.11 x_{25} - 1.15 I_{06} - [60.68 R_{22} + 84.56 x_{22} - 27.58 Q_{22}] + 33.77 R_{27} - \\
 & - 29.34 Q_{27} - 2.14 R_{54} - [3.62 Q_{55} + 1.62 x_{55}] - 0.75 x_{03} - [0.90 Q_{23} + 0.54 R_{23}] - \\
 & - 0.46 I_{50} + [121.52 R_{52} - 120.69 Q_{52}] - 0.54 I_{15} - 0.59 R_{13}
 \end{aligned}
 \tag{C.4}$$

procedeu-se à elaboração de gráficos que permitiram visualizar o comportamento das variáveis em relação a esta resposta bem como a representação do teste de recuperação em função do modelo ajustado, figuras C.11 e C.12, respetivamente.

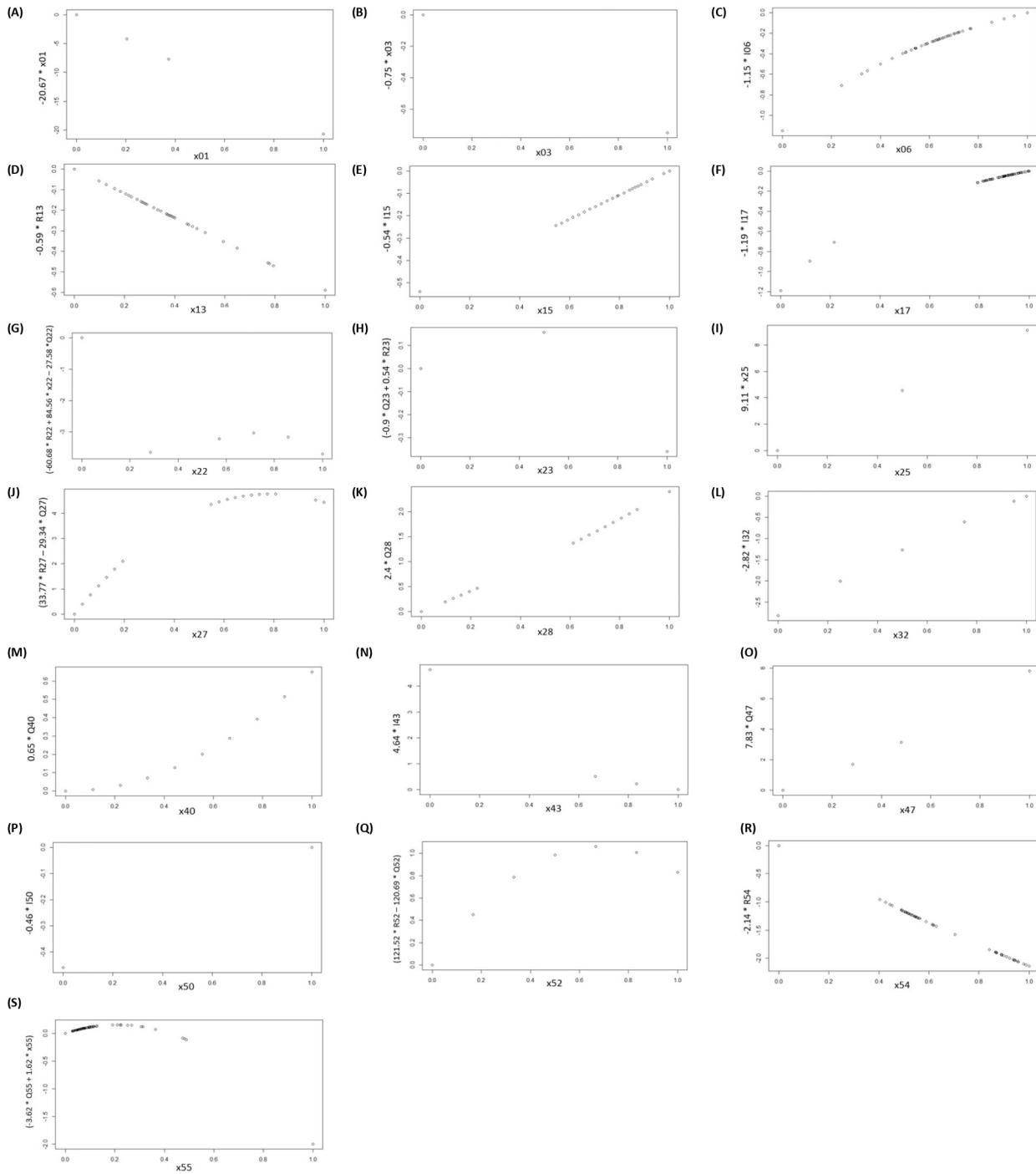


Figura C.11.: Representação gráfica, em relação à resposta Y11, do comportamento dos preditores: (A) x01; (B) x03; (C) x06; (D) x13; (E) x15; (F) x17; (G) x22; (H) x23; (I) x25; (J) x27; (K) x28; (L) x32; (M) x40; (N) x43; (O) x47; (P) x50; (Q) x52; (R) x54; e (S) x55. O eixo das abcissas representa o conjunto de amostras para o preditor em causa e o eixo das ordenadas corresponde à função polinomial aproximada para o mesmo.

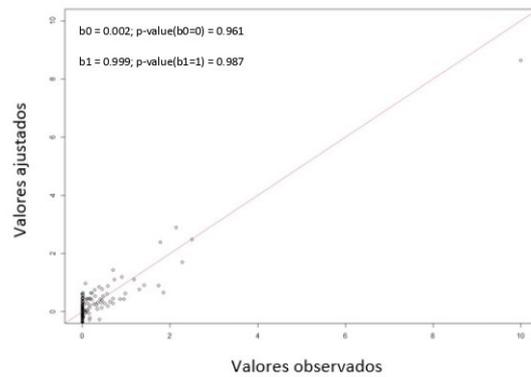


Figura C.12.: Representação gráfica, em relação à resposta Y11, do teste de recuperação em função do modelo ajustado.

Com base na figura C.12, é possível observar que o modelo possui bom ajuste ( $b_0 \simeq 0$  e  $b_1 \simeq 1$ ) e, observando a figura C.11, e dado que Y11 corresponde ao número de peças de caco, algo que se pretende diminuir, é necessário encontrar as condições ideais que minimizam esta resposta, sendo estas: a granulometria do pó a  $300\mu\text{m}$  (x06) é da ordem dos 18%; o peso cozido do provete para o cálculo da perda ao rubro (x13) é de 45.6 g; a média dos lados do tamanho do provete seco para o cálculo da percentagem de contração (x15) é 8.2 cm; a percentagem de contração do provete (x17) ronda os 4%; o silo (x22) que dá menos problemas é o 8; utiliza-se a prensa (x25) número um podendo este preditor estar relacionado com a área da peça, uma vez que é usual determinadas linhas produzirem determinados formatos; a temperatura do queimador 2 do secador (x32) é de 90 °C; não há qualquer desvio no lado dois da peça seca (x40); a pressão dos cunhos (x43) é de 8bar; quando se utiliza o forno (x50) número 1; a temperatura máxima do forno (x52) é 1180 °C; e a percentagem de absorção de água da peça ronda 2%. Também se verificou que a área da peça (x01), o tipo de pó (x03) utilizado e a equipa que se encontra a laborar na secção de prensagem-linhas de vidragem (x23) encontram-se a influenciar os resultados quanto ao número de peças de caco. Parâmetros como a espessura máxima e mínima da peça em verde (x27 e x28, respetivamente), distância inter-apoios no ensaio da resistência mecânica à flexão em seco (x47) e peso húmido da peça (x54) encontram-se a influenciar os resultados, contudo não é possível indicar um valor ideal, dado que estes preditores encontram-se dependentes do formato das peças.

## C.5. Resposta Y14

A resposta Y14 corresponde à percentagem de terceira qualidade, sendo que a única diferença desta em relação à resposta Y10 é o facto de que os valores na resposta em causa encontram-se em percentagem. Uma triagem inicial permitiu a identificação de 75 preditores que possibilitaram a iniciação de 150 modelos que convergiram para 89 modelos finais, encontrando-se a sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição de cada um dos modelos polinomiais finais na tabela C.5.

ANEXO C. ESTUDO DAS RESPOSTAS EM ANÁLISE POR MODELAÇÃO MULTIVARIADA

Tabela C.5.: Sistematização dos resultados obtidos relativos à descrição dos modelos polinomiais para a resposta Y14 por modelação multivariada evolutiva - avaliação da qualidade do ajuste, de previsão e global dos modelos eleitos.

Modelo	offit	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*	Modelo	offit	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	AIC	BIC	PE	PEadj	QA*	QP	QG*	
m1401	1.292	0.764	0.749	513.1	543.3	1.362	1.362	1.32	1.16	1.54	m1446	1.279	0.774	0.754	513.0	552.1	1.384	1.383	1.34	1.13	1.51	
m1402	1.280	0.773	0.754	513.2	552.4	1.382	1.382	1.33	1.13	1.51	m1447	1.292	0.764	0.749	513.4	543.5	1.358	1.358	1.32	1.17	1.54	
m1403	1.178	0.812	0.791	491.0	539.1	1.284	1.283	1.71	1.31	2.24	m1448	1.274	0.774	0.756	510.9	547.0	1.353	1.352	1.37	1.18	1.61	
m1404	1.178	0.812	0.791	491.0	539.1	1.299	1.299	1.71	1.28	2.19	m1449	1.274	0.774	0.756	510.9	547.0	1.365	1.365	1.37	1.16	1.58	
m1405	1.309	0.756	0.742	516.2	543.3	1.377	1.376	1.27	1.14	1.45	m1450	1.296	0.764	0.747	515.2	548.3	1.373	1.373	1.30	1.14	1.48	
m1406	1.273	0.776	0.756	511.6	550.7	1.375	1.375	1.36	1.14	1.55	m1451	1.296	0.764	0.747	515.2	548.3	1.358	1.358	1.30	1.17	1.52	
m1407	1.273	0.776	0.756	511.6	550.7	1.388	1.388	1.36	1.12	1.52	m1452	1.285	0.767	0.752	511.6	541.7	1.355	1.355	1.34	1.17	1.58	
m1408	1.325	0.752	0.736	520.9	551.0	1.398	1.397	1.21	1.10	1.33	m1453	1.213	0.796	0.779	497.2	536.3	1.297	1.296	1.59	1.28	2.04	
m1409	1.319	0.752	0.738	518.6	545.7	1.387	1.387	1.24	1.12	1.39	m1454	1.292	0.764	0.749	513.1	543.3	1.362	1.362	1.32	1.16	1.54	
m1410	1.294	0.763	0.748	513.7	543.8	1.374	1.373	1.31	1.14	1.50	m1455	1.282	0.771	0.753	512.8	548.9	1.353	1.353	1.34	1.18	1.57	
m1411	1.272	0.776	0.756	511.4	550.6	1.344	1.343	1.36	1.19	1.63	m1456	1.282	0.771	0.753	512.8	548.9	1.373	1.372	1.34	1.14	1.53	
m1412	1.272	0.776	0.756	511.4	550.6	1.353	1.353	1.36	1.18	1.60	m1457	1.126	0.831	0.809	479.2	533.3	1.217	1.216	1.94	1.46	2.83	
m1413	1.334	0.748	0.732	522.9	553.0	1.420	1.419	1.18	1.07	1.26	m1458	1.126	0.831	0.809	479.2	533.3	1.253	1.253	1.94	1.37	2.67	
m1414	1.292	0.764	0.749	513.3	543.4	1.372	1.372	1.32	1.15	1.51	m1459	1.291	0.766	0.749	513.9	547.1	1.344	1.344	1.31	1.19	1.57	
m1415	1.309	0.756	0.742	516.2	543.3	1.377	1.376	1.27	1.14	1.45	m1460	1.298	0.762	0.747	514.6	544.7	1.362	1.362	1.30	1.16	1.51	
m1416	1.163	0.818	0.797	488.0	539.2	1.273	1.273	1.77	1.33	2.36	m1461	1.292	0.764	0.749	513.1	543.3	1.362	1.362	1.32	1.16	1.54	
m1417	1.163	0.818	0.797	488.0	539.2	1.280	1.280	1.77	1.32	2.33	m1462	1.283	0.767	0.752	511.2	541.3	1.354	1.353	1.35	1.18	1.59	
m1418	1.294	0.763	0.748	513.7	543.8	1.373	1.373	1.31	1.14	1.50	m1463	1.295	0.763	0.748	513.9	544.0	1.359	1.359	1.31	1.17	1.53	
m1419	1.150	0.824	0.801	485.6	539.8	1.259	1.259	1.82	1.36	2.48	m1464	1.283	0.767	0.752	511.2	541.3	1.354	1.353	1.35	1.18	1.59	
m1420	1.150	0.824	0.801	485.6	539.8	1.281	1.280	1.82	1.31	2.39	m1465	1.272	0.775	0.757	510.4	546.5	1.332	1.332	1.37	1.22	1.67	
m1421	1.231	0.790	0.772	501.5	540.7	1.328	1.327	1.52	1.22	1.86	m1466	1.292	0.764	0.749	513.1	543.3	1.362	1.362	1.32	1.16	1.54	
m1422	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.348	1.348	1.38	1.19	1.64	m1467	1.287	0.766	0.751	512.2	542.3	1.353	1.353	1.34	1.18	1.57	
m1423	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.355	1.355	1.38	1.17	1.63	m1468	1.285	0.767	0.752	511.6	541.7	1.355	1.355	1.34	1.17	1.58	
m1424	1.248	0.786	0.766	506.6	548.8	1.342	1.342	1.44	1.20	1.73	m1469	1.292	0.764	0.749	513.1	543.3	1.362	1.362	1.32	1.16	1.54	
m1425	1.248	0.786	0.766	506.6	548.8	1.364	1.364	1.44	1.16	1.67	m1470	1.298	0.762	0.747	514.6	544.7	1.362	1.362	1.30	1.16	1.51	
m1426	1.292	0.764	0.749	513.1	543.3	1.362	1.362	1.32	1.16	1.54	m1471	1.287	0.766	0.751	512.2	542.3	1.353	1.353	1.34	1.18	1.57	
m1427	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.348	1.348	1.38	1.19	1.64	m1472	1.269	0.774	0.758	508.9	542.0	1.343	1.342	1.39	1.20	1.66	
m1428	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.355	1.355	1.38	1.17	1.63	m1473	1.301	0.761	0.745	515.4	545.5	1.365	1.365	1.29	1.16	1.49	
m1429	1.246	0.787	0.767	506.0	548.1	1.352	1.352	1.45	1.18	1.71	m1474	1.180	0.812	0.791	491.4	539.6	1.322	1.321	1.70	1.23	2.11	
m1430	1.246	0.787	0.767	506.0	548.1	1.355	1.355	1.45	1.17	1.70	m1475	1.269	0.774	0.758	508.9	542.0	1.343	1.342	1.39	1.20	1.66	
m1431	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.348	1.348	1.38	1.19	1.64	m1476	1.313	0.758	0.741	519.1	552.2	1.379	1.379	1.24	1.13	1.41	
m1432	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.355	1.355	1.38	1.17	1.63	m1477	1.402	0.718	0.704	535.8	559.9	1.454	1.453	1.00	1.02	1.02	
m1433	1.292	0.764	0.749	513.4	543.5	1.358	1.358	1.32	1.17	1.54	m1478	1.292	0.764	0.749	513.1	543.3	1.362	1.362	1.32	1.16	1.54	
m1434	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.348	1.348	1.38	1.19	1.64	m1479	1.302	0.766	0.745	518.2	557.4	1.405	1.405	1.26	1.09	1.38	
m1435	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.355	1.355	1.38	1.17	1.63	m1480	1.302	0.766	0.745	518.2	557.4	1.394	1.393	1.26	1.11	1.40	
m1436	1.290	0.766	0.750	513.8	546.9	1.368	1.368	1.32	1.15	1.52	m1481	1.278	0.771	0.754	511.0	544.1	1.357	1.356	1.36	1.17	1.59	
m1437	1.290	0.766	0.750	513.8	546.9	1.380	1.379	1.32	1.13	1.49	m1482	1.278	0.771	0.754	511.0	544.1	1.367	1.366	1.36	1.15	1.57	
m1438	1.312	0.758	0.741	518.8	551.9	1.392	1.391	1.24	1.11	1.38	m1483	1.292	0.764	0.749	513.2	543.3	1.364	1.364	1.32	1.16	1.53	
m1439	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.348	1.348	1.38	1.19	1.64	m1484	1.280	0.773	0.754	513.2	552.4	1.382	1.382	1.33	1.13	1.51	
m1440	1.271	0.773	0.757	509.4	542.5	1.355	1.355	1.38	1.17	1.63	m1485	1.302	0.766	0.745	518.2	557.4	1.405	1.405	1.26	1.09	1.38	
m1441	1.225	0.797	0.774	502.7	550.9	1.333	1.332	1.51	1.21	1.84	m1486	1.302	0.766	0.745	518.2	557.4	1.394	1.393	1.26	1.11	1.40	
m1442	1.225	0.797	0.774	502.7	550.9	1.356	1.355	1.51	1.17	1.77	m1487	1.337	0.751	0.731	525.4	561.6	1.408	1.407	1.16	1.09	1.26	
m1443	1.085	0.846	0.823	470.7	534.0	1.192	1.192	2.12	1.52	3.22	m1488	1.337	0.751	0.731	525.4	561.6	1.468	1.468	1.16	1.00	1.16	
m1444	1.085	0.846	0.823	470.7	534.0	1.202	1.202	2.12	1.49	3.17	m1489	1.287	0.766	0.751	512.2	542.3	1.353	1.353	1.34	1.18	1.57	
m1445	1.279	0.774	0.754	513.0	552.1	1.371	1.370	1.34	1.15	1.54												

$\sigma_{fit}$  - desvio padrão do ajuste;  $R^2$  e  $R^2_{adj}$  - coeficientes de determinação de Pearson e ajustado (para compensar diferenças na alteração do número de parâmetros); AIC - critério de informação de Akaike; BIC - critério de informação Bayesiano; QA - qualidade do ajuste; PE - estimativa do erro de previsão normal; PEadj - estimativa do erro de previsão ajustado (*leave-one-out*); QP - qualidade de previsão; QG - qualidade global; \* - valores multiplicados por  $10^6$ .

A representação gráfica para os modelos obtidos com o objetivo de selecionar o modelo que apresenta o melhor desempenho global para a resposta Y14 encontra-se na figura C.13.

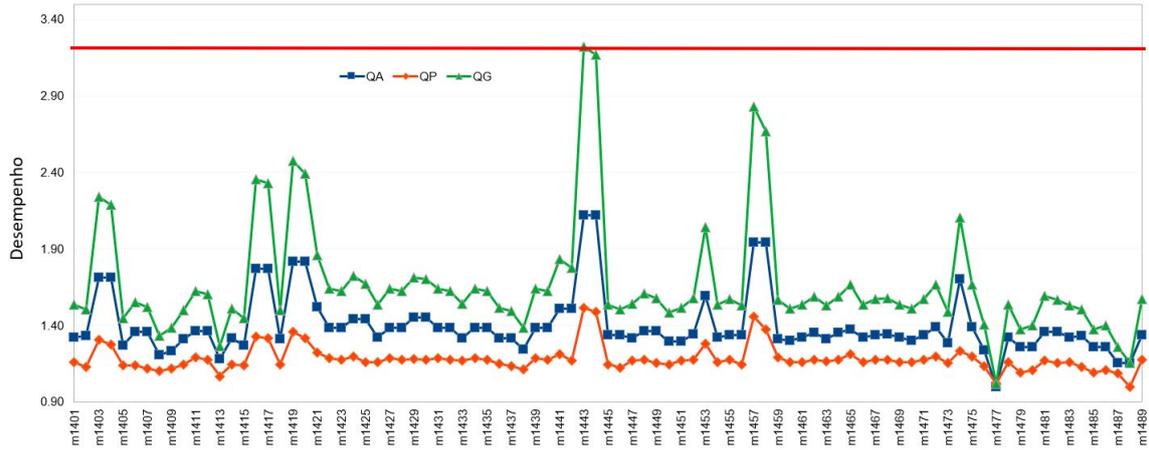


Figura C.13.: Representação gráfica, em relação à resposta Y14, do desempenho global dos modelos obtidos finais para seleção do melhor modelo. A linha a azul representa a qualidade do ajuste (QA), a linha a vermelho com pontos representa a qualidade de previsão (QP) e a linha a verde representa a qualidade global (QG). A linha a vermelho serve como guia orientadora para uma melhor percepção do modelo que apresenta uma melhor QG. Nota: devido às escalas serem diferentes para QA, QP e QG, os valores apresentados são relativos ao mínimo de cada variável, traduzindo deste modo os ganhos relativos a esse limite inferior.

O modelo parcimonioso eleito foi o m1443 que apresenta uma recuperação de informação de 85%. Através da sua equação

$$\begin{aligned}
 Y_{14} = & 6.04 R_{20} + 1.69 x_{10} + 11.84 I_{25} + 1.76 I_{48} - 7.88 I_{12} + 2.45 x_{49} + \\
 & +3.10 Q_{08} - 1.75 x_{15} + 4.95 I_{14} + [-10.67 I_{22} - 4.14 x_{22}] + 28.95 I_{63} - 30.71 I_{26} \\
 & -2.46 I_{45} + 0.76 R_{23} + 5.44 Q_{32} - 1.27 I_{51} + 1.69 Q_{11} + [54.30 Q_{21} - 52.60 x_{21}]
 \end{aligned}
 \tag{C.5}$$

procedeu-se à elaboração de gráficos que permitiram visualizar o comportamento das variáveis em relação a esta resposta bem como a representação do teste de recuperação em função do modelo ajustado, figuras C.14 e C.15, respetivamente.

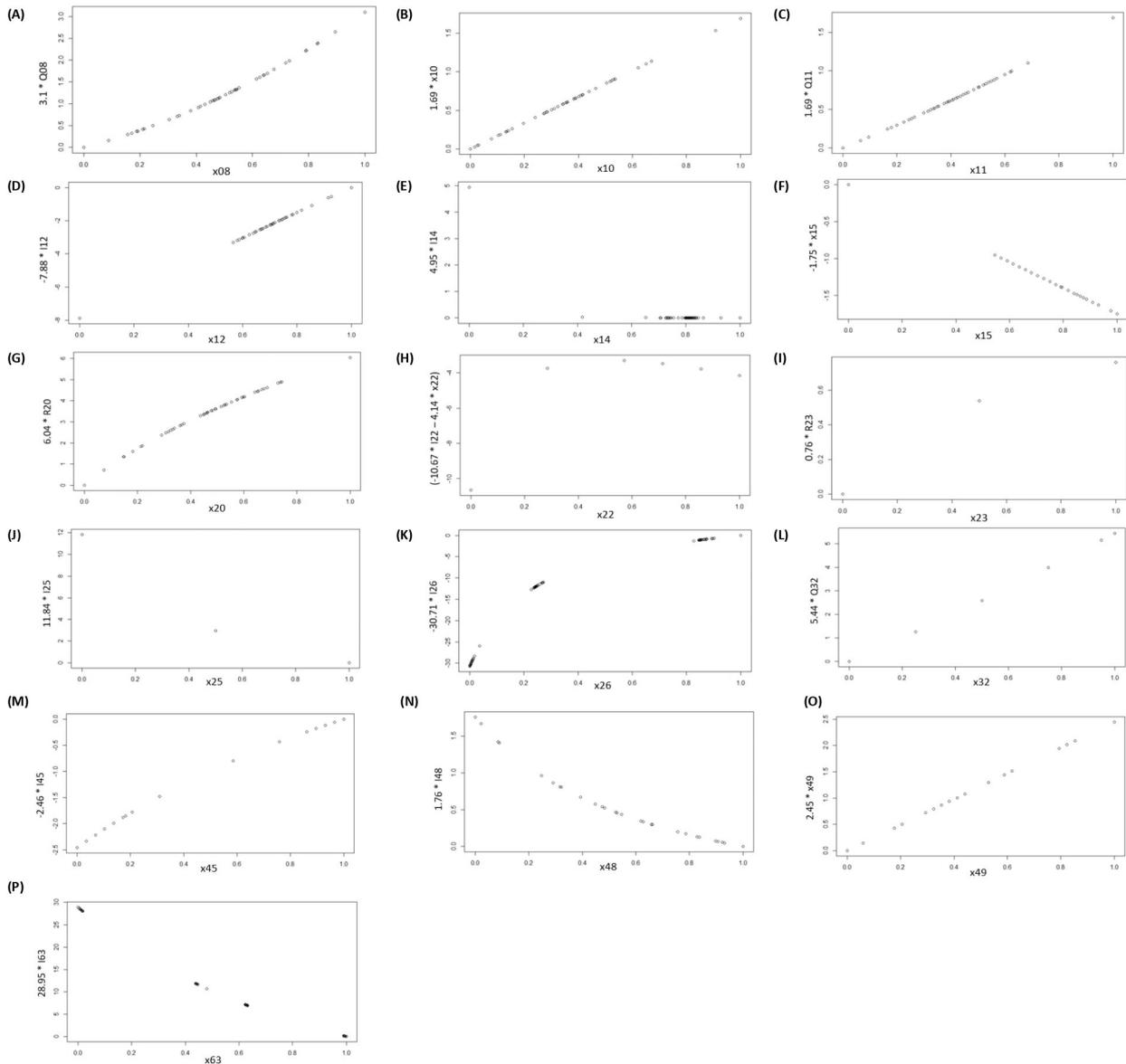


Figura C.14.: Representação gráfica, em relação à resposta Y14, do comportamento dos preditores: (A) x08; (B) x10; (C) x11; (D) x12; (E) x14; (F) x15; (G) x20; (H) x22; (I) x23; (J) x25; (K) x26; (L) x32; (M) x45; (N) x48; (O) x49; e (P) x63. O eixo das abcissas representa o conjunto de amostras para o preditor em causa e o eixo das ordenadas corresponde à função polinomial aproximada para o mesmo.

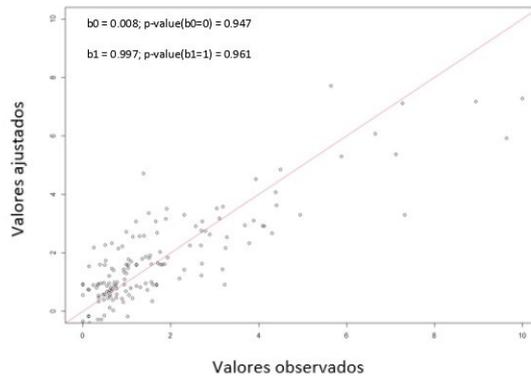


Figura C.15.: Representação gráfica, em relação à resposta Y14, do teste de recuperação em função do modelo ajustado.

Com base na figura C.15, é possível verificar que o modelo não apresenta erro sistemático significativo ( $b_0 \simeq 0$  e  $b_1 \simeq 1$ ) e observando a figura C.14 e atendendo que Y14 diz respeito à percentagem de peças de terceira qualidade é necessário minimizar esta resposta e, conseqüentemente, encontrar as melhores condições que a diminuam, sendo estas: a granulometria do pó a  $180 \mu\text{m}$  (x08) é da ordem dos 5.3% e na base (x10) é da ordem dos 0.4%; a percentagem de humidade do provete (x11) é cerca de 6%; o peso seco do provete (x12) é de 44.7 g e a sua percentagem de perda ao rubro (x14) é 6%; a média dos lados do tamanho em seco do provete (x15) ronda os 8.1 cm; a percentagem de absorção de água do provete (x20) é 1%; o melhor silo (x22) é o número um; utiliza-se a prensa (x25) número três podendo este preditor estar relacionado com a área da peça, uma vez que é usual determinadas linhas produzirem determinados formatos; a temperatura do queimador 2 do secador (x32) é  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ; e a percentagem de humidade residual da peça (x49) ronda os 1%. A equipa que se encontra a laborar na secção de prensagem-linhas de vidragem (x23) também se encontra a influenciar este resultado. Relativamente aos preditores relacionados com o peso em verde da peça (x26), a espessura da peça e o módulo de rutura médio no ensaio da resistência mecânica à flexão em seco (x45 e x48, respetivamente) e o tamanho da peça cozida (x63), apesar de também se encontrarem a comprometer a qualidade do material, não é possível definir um valor ideal para os mesmos, uma vez que estes parâmetros estão dependentes da área das peças.