

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Estudo e avaliação de defeitos em discos de cortiça para rolhas

Dissertação de Mestrado

de

Gonçalo Veiga Dias Azevedo

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

Relvas II - Rolhas de Champanhe S.A.



Orientador na FEUP: Prof.^a Joana Peres

Orientador na Relvas II - Rolhas de Champanhe S.A.: Eng.^o Emanuel Cabeça



Departamento de Engenharia Química

Julho de 2018

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação do mestrado contou com inúmeros importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estou profundamente agradecido.

A Professora Joana Peres, o seu apoio orientação e disponibilidade, pelos conhecimentos que me transmitiu e pela sua colaboração na resolução de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo deste trabalho.

Ao Engenheiro Emanuel Cabeça por toda paciência, empenho, disponibilidade, sentido pratico com que sempre me orientou neste trabalho e em todos aqueles que realizei enquanto estive na Relvas S.A.

Agradeço á equipa de laboratório da Relvas S.A., Branca Cerdeirinha, Aurora Jesus, Patrícia Ribeiro, Mariana Albuquerque, Ana Filipa Correia, pela forma como me acolheram na empresa e pela ajuda na elaboração deste trabalho.

Ao Diogo Sousa, meu colega de mestrado, pelo companheirismo e colaboração nas imensas horas passadas no setor de produção da Relvas S.A.

A todos os funcionários da Relvas S.A. em especial a Engenheira Rita Petiz e ao Engenheiro Cristiano Paulino.

Por último a minha família e amigos pelo apoio incondicional que sempre me deram.

A Prof. Joana Peres, orientadora desta dissertação, é membro integrado do LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia, financiado pelos Projetos (i) POCI-01-0145-FEDER-006939 (Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia, UID/EQU/00511/2013) financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P., (ii) NORTE-01-0145-FEDER-000005 - LEPABE-2-ECO-INNOVATION, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020)

Resumo

Uma das etapas importantes do processo na empresa Relvas II S.A é o controlo de qualidade na receção das matérias-primas. É utilizado uma máquina que emite radiação Raios-X de modo a detetar discos de cortiça defeituosos, contudo a parametrização da máquina não está otimizada podendo originar falsos positivos e falsos negativos na escolha de discos. Deste modo, este trabalho teve como objetivo a identificação e avaliação dos defeitos existentes nos discos de cortiça determinando assim, o índice de quebra de rolhamento para os defeitos existentes otimizando assim a máquina de Raios-X.

Para a otimização do processo foi necessário primeiro determinar os parâmetros ideais para a quebra da rolha na máquina de rolhamento. Determinou-se que os parâmetros que a máquina de rolhamento utilizava era a velocidade de compressão, velocidade de inserção, diâmetro de aperto e nível de inserção. Para tal realizou-se um método estatístico de desenho de experiências (DOE) nomeadamente o desenho fatorial e a metodologia de superfície de resposta (RSM) permitindo assim determinar os parâmetros que afetam a rolha no rolhamento e como maximiza-los. Concluiu-se que só a combinação dos parâmetros da velocidade de compressão e diâmetro de aperto influenciam o rolhamento com os valores ótimos respetivamente de 100 cm/min e 15 mm.

Após esse estudo, analisou-se as influências do defeito prego no rolhamento estudando as variáveis área do maior prego do disco, a visibilidade e a localização do prego verificando-se que se o defeito é visível e se se localiza junto da coroa do disco poderá provocar um maior índice de quebra no rolhamento. Além disso, verificou-se que nos discos com pregos invisíveis ou no centro existe um valor de desvios superiores e também um maior número de rolhamentos conformes.

Palavras Chave (Tema): Rolhas de Champanhe; Discos de cortiça; Defeitos; Desenho de experiências; RSM; Desenho fatorial; Raios-X; *CITCORK*;

Abstract

One of the main steps in the industrial process of Relvas II S.A. is the quality control that exists when receiving the agglomerate and cork discs. A machine that emits x-ray radiation is used to detect defects present within the cork discs. However, the x-ray machine is not fully optimized and therefore producing false positive and false negative results when scanning the discs. The primary objective of this work is to identify and evaluate defects that exist in the discs and determine their rate of breaking. With this information we can then optimise the x-ray machine.

To optimise the process, it was first necessary to determine the correct parameters in a machine that inserts the corks in the bottle. A first analysis on the machine we can determine that it operates with four parameters, the compression speed, insertion speed, the diameter after applying the compression and the depth of insertion. We realized a design of experiments model, namely the factorial design and response surface methodology to determine the parameters that affect the system's response and to maximize them. We determined that only the compression speed and the final diameter of the cork after compression are the parameters that affected the process which values correspond to 100 cm/min and 15 mm respectively.

After that project, we proceeded to analyse the influences of a defect nail. Three factors were considered in this study those being the area of the biggest nail present in the disc, the visibility and its location in the disc. We concluded that there was a higher rate of breaking with discs that had nails present next to the edges of the disc as opposed to those with nails in the center. However, it was also verified that there is also a high amount of deviations observed with discs that had nails invisible and nails in the center of the disc.

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Índice

1	Introdução.....	7
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	7
1.2	Apresentação da Empresa	7
1.3	A cortiça	8
1.3.1	Obtenção da cortiça	10
1.3.2	Tratamento da cortiça	11
1.3.3	Propriedades e estrutura da cortiça	13
1.3.4	Propriedades Químicas	13
1.4	Contributos do Trabalho	14
1.5	Organização da tese	14
2	Contexto e Estado da Arte	15
2.1	Rolha de champanhe	15
2.2	Defeitos	16
2.3	Máquina Raios-X.....	18
2.4	Plano de experiências.....	19
2.4.1	Desenho fatorial.....	20
2.4.2	Metodologia de superfície de resposta (RSM)	20
2.5	Norma da garrafa e da massa volúmica	21
3	Materiais e Métodos	23
3.1	Relação entre a massa volúmica real e a massa volúmica inferida Raios-X.....	24
3.2	Determinação dos parâmetros ideais para quebra da rolha no rolhamento (sensibilidade do método).....	24
3.3	Validação da parametrização da máquina <i>CITCORK</i>	29
3.4	Determinação do índice de quebra de rolhamento (IQR) em discos com o defeito “prego”.....	30
4	Resultados e Discussão.....	32
4.1	Relação entre a massa volúmica e a massa volúmica inferida pelo Raios-X	32

4.2	Determinação dos parâmetros ideais para quebra da rolha no rolhamento	33
4.3	Influência do defeito “prego” no índice de quebra no rolhamento.....	41
5	Conclusões	43
6	Avaliação do trabalho realizado.....	45
6.1	Objetivos Realizados	45
6.2	Limitações e Trabalho Futuro	45
6.3	Apreciação Final	45
Anexo 1	Testes da massa volúmica e valor do Raios-X.....	47
Anexo 2	Otimização da máquina <i>CITCORK</i>	60
Anexo 3	Coeficientes determinados pelo <i>Minitab</i>	64
Anexo 4	Estudo do defeito “Prego”	65

Lista de figuras

Figura 1 - Sobreiro (adaptado de [3]).	9
Figura 2 - Evolução das exportações principais ao longo dos anos (adaptado de [4]).	9
Figura 3 - Exportação de rolhas de cortiça para os principais países (adaptado de [4]).	10
Figura 4 - Extração da cortiça - Descortiçamento (adaptado de [6]).	11
Figura 5 - Pilhas de cortiça em repouso (adaptado de [7]).	11
Figura 6 - Operação de cozedura da cortiça (adaptado de [8]).	12
Figura 7 - Esquema geral das linhas de processamento industrial da cortiça para a cortiça amadia e a cortiça virgem e segundeira (adaptado de [2]).	12
Figura 8 - Desenhos da estrutura celular da cortiça observados por Robert Hooke (adaptado de [10]).	13
Figura 9 - Rolha de cortiça.	15
Figura 10 - Diagrama de blocos do processo de produção de rolhas de champanhe.	16
Figura 11 - Disco com o defeito “prego”.	17
Figura 12 - Disco com defeito ano seco.	17
Figura 13 - Disco com verdura.	17
Figura 14 - Amostra de cortiça com terra (adaptado de [2]).	18
Figura 15 - Disco com galeria causada pela formiga e cobrilha.	18
Figura 16 - Máquina Raios-X (adaptado de [12]).	19
Figura 17 - Exemplo de experiência fatorial sem interação de fatores (a) e com interação (b) (adaptado de [14]).	20
Figura 18 - CCD para 2 fatores (adaptado de [14]).	21
Figura 19 - Diâmetros existentes no gargalo (adaptado de [18]).	21
Figura 20 - Diagrama de Pareto das rolhas quebradas na linhe de rolhamento	23
Figura 21 - Máquina <i>CITCORK</i> .	24
Figura 22 - Respetivamente, perfil de gargalo da garrafa verde (perfil cónico) e garrafa branca (perfil cilíndrico)	25
Figura 23 - Rolha com desvio	26
Figura 24 - Rolha quebrada no rolhamento	26
Figura 26 - Imagem do programa do Raios-X.	30
Figura 27 - Disco com prego de uma área entre 4 a 6 mm ² (a) e disco com prego de uma área entre 8 a 10 mm ² (b)	31

Figura 28 - Massa volúmica versus sinal do Raios-X de discos terrosos.....	33
Figura 29 - Gráfico dos resíduos em função da previsão da resposta	35
Figura 30 - Gráfico da distribuição normal dos valores residuais	35
Figura 31 - Análise gráfica do comportamento dos valores residuais	36
Figura 32 - Interação entre a velocidade de compressão e diâmetro de aperto	37
Figura 33 - Representação gráfica dos resíduos em função da previsão da resposta	38
Figura 34 - Representação gráfica da distribuição normal dos valores residuais.....	38
Figura 35 - Análise gráfica do comportamento dos valores residuais	39
Figura 36 - Ajuste gráfico do modelo com a resposta real	39

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 - Composição média da cortiça virgem e da cortiça amadia (adaptado de [2]).</i>	13
<i>Tabela 2 - Valores de diâmetros (adaptado de [18]).</i>	22
<i>Tabela 3 - Variáveis utilizadas para cada disco e a respetiva gama</i>	24
<i>Tabela 4- Níveis estabelecidos para cada parâmetro da máquina CITCORK</i>	27
<i>Tabela 5 -Níveis estabelecidos para cada parâmetro</i>	28
<i>Tabela 6 - Planeamento experimental</i>	28
<i>Tabela 7 - Planeamento experimental (continuação)</i>	29
<i>Tabela 8 - Níveis estabelecidos para cada parâmetro</i>	31
<i>Tabela 9 - Valores médios da massa volúmica e da massa volúmica obtida pelo Raios-X</i>	32
<i>Tabela 10 - Coeficiente de variância</i>	33
<i>Tabela 11 - Valor de prova para cada parâmetro individual</i>	34
<i>Tabela 12 - Valor de prova para interação entre 5 parâmetros</i>	34
<i>Tabela 13 - Valores Valor de prova para cada parâmetro e interação entre parâmetros.</i>	37
<i>Tabela 14 - Parâmetros obtidos através da análise de variância</i>	40
<i>Tabela 15 - Resultados da validação do procedimento</i>	40
<i>Tabela 16 - Resultados obtidos em rolhas com pregos no topo</i>	40
<i>Tabela 17 - Resultados obtidos para interação entre os 3 parâmetros</i>	41
<i>Tabela 18 - Valores de massa volúmica obtidos para discos com prego</i>	42

Notação e Glossário

Letras gregas

ρ	Massa volúmica
B	Coeficientes do polinómio
μ	Média

Índices

i	Índice ou contador
J	Índice ou contador

Lista de Siglas

DOE -	Design Of Experiments
RSM -	Response Surface Method
ANOVA -	Analysis of variance
CCD -	Central Composite Design
IQR -	Índice de Quebra de Rolhamento
VCOMP -	Velocidade de compressão
DIAMAP -	Diâmetro de aperto
AB1D -	Ano com barro no primeiro disco
AS1D -	Ano seco no primeiro disco
PRG.T -	Prego no topo
DISC PART	Disco partido
AB2D	Ano com barro no segundo disco
AS2D	Ano seco no segundo disco
PRG. L1D	Prego na lateral do primeiro disco
PCA	Plano de colagem aberto
P	Proporção

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

Desde há séculos que a cortiça é utilizada na produção de rolhas para vinhos e champanhes devido à sua capacidade elástica que causa uma vedação estanque e permite uma penetração mínima de oxigénio promovendo, assim, o envelhecimento do vinho, ao mesmo tempo que o protege de variações de temperatura e da sua consequente deterioração.

A empresa Relvas II, Rolhas de Champanhe S.A produz somente rolhas aglomeradas com dois discos de cortiça para Champanhe e outras bebidas efervescentes.

As rolhas são constituídas por um corpo aglomerado e 2 discos de cortiça capazes de suportar pressões que podem variar entre 5 a 6 bar dentro da garrafa.

O controlo de qualidade dos discos de cortiça é assegurado industrialmente através da sua passagem por um sistema de análise com tecnologia de Raios-X.

O objetivo desta dissertação é o estudo e avaliação dos defeitos existentes nos discos de cortiça, utilizando como equipamento de medição do índice de quebra de rolhamento (IQR) uma máquina de rolhamento com a designação comercial *CITCORK*. Para esse efeito utilizaram-se ferramentas de otimização tais como o desenho de experiências, desenho fatorial, análise de variância e metodologia de superfície de resposta.

1.2 Apresentação da Empresa

Fundada em 1926 por Américo Coelho Relvas, a empresa Relvas S.A. iniciou a sua atividade com produção de rolhas de cortiça para vinho, produtos farmacêuticos entre outros, especializando posteriormente em rolhas para garrafas de Champanhe. Nos anos 60 iniciaram a transformação de cortiça para o fabrico de discos de cortiça e com as aparas deste processo iniciaram a produção de granulados para a produção de um corpo aglomerado, dando assim origem à rolha que é utilizada ainda hoje.

Nos anos 80 a Relvas S.A. investiu numa nova unidade de produção de rolhas de Champanhe em Mozelos, concelho de Santa Maria da Feira, onde foi instalada a primeira moldadora individual de granulados de cortiça. Desenvolveram também uma unidade de assistência e reparação de equipamentos da área produtiva com o intuito de desenvolver novas máquinas e equipamentos para o seu uso interno. Fruto destes investimentos, nos anos 90, foi desenvolvido de um sistema de cozedura de elevada qualidade que foi patenteado. Continuaram também a realizar investimentos na área da qualidade desenvolvendo para isso um laboratório equipado com os equipamentos de medição necessários para oferecer um

produto de excelência. Mais recentemente, adquiriram uma nova unidade de preparação de cortiça no Alentejo de modo a assegurar a completa verticalidade do processo produtivo desde a seleção da cortiça na floresta até ao fornecimento de produto acabado ao cliente final.

A Relvas II, Rolhas de Champanhe S.A consolidou em 2012 a sua imagem de qualidade ao ver reconhecida por uma entidade externa o seu sistema de gestão certificado nas áreas da Gestão da Qualidade (ISO 9001), Gestão Ambiental (ISO 14001) e Segurança Alimentar ISO/FSSC 22000). Recentemente obteve ainda a certificação SYSTECODE EXCELENCE do Código Internacional das Práticas Rolheiras.

No seu portfólio de produtos, a empresa apresenta uma solução alargada de soluções que pode abranger, para além dos vinhos efervescentes, rolhas para cervejas artesanais, cidra, vinhos frisantes, entre outras bebidas similares. As rolhas podem ser comercializadas em diversos calibres (diâmetro e comprimento) sendo a sua escolha uma função do formato de garrafa a obturar ou da pressão da bebida em causa. Comercialmente, o produto diferencia-se pela qualidade visual dos discos, sendo o produto final valorizado em função do n.º e tamanho dos canais lenticulares (poros). O produto é, na sua maioria, exportado para França (50-60%), seguindo-se a Itália (30 a 40%), Estados Unidos (10 a 20%), América do Sul e outros países do centro da Europa^[1].

1.3 A cortiça

O revestimento de cortiça produzido no tronco e ramos pelo sobreiro *Quercus suber* L. é utilizado em diversas aplicações como por exemplo rolhas, solas de sapatos e boias de pesca. Esta espécie de sobreiro é utilizada devido ao volume de tecido suberoso produzido que é maior quando comparado com outras espécies de sobreiro. A árvore adaptou-se ao clima mediterrâneo, isto é, a períodos de seca estival e invernos amenos ^[2] sendo capaz de atingir entre 10 a 15 metros de altura no seu estado adulto e tem uma grande longevidade podendo atingir os 350 anos ^[3].



Figura 1 - Sobreiro (adaptado de [3]).

Em 2016, Portugal foi o principal exportador de cortiça com uma quota de mercado mundial de 49.6%, o que equivale a uma produção anual de 100 mil toneladas de cortiça. Dessas exportações 72,1%, são rolhas e o volume de negócios corresponde a um valor de 675.3 milhões de euros.

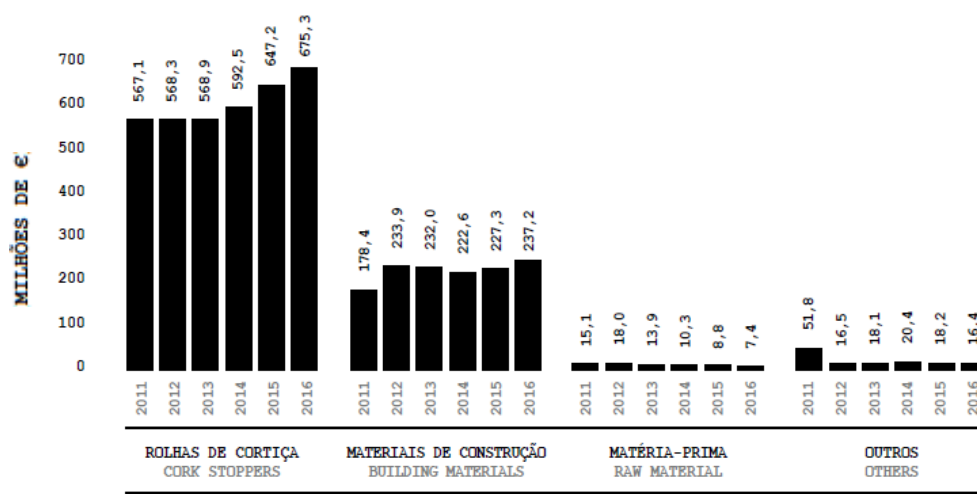


Figura 2 - Evolução das exportações principais ao longo dos anos (adaptado de [4]).

O principal consumidor de rolhas naturais é França com um valor de 103,4 milhões de euros seguido pelos Estados Unidos com 94,2 milhões de euros. Quanto às rolhas de champanhe, Itália é o principal consumidor com 34,5 milhões de euros seguindo-se de França com 33,1 milhões de euros.

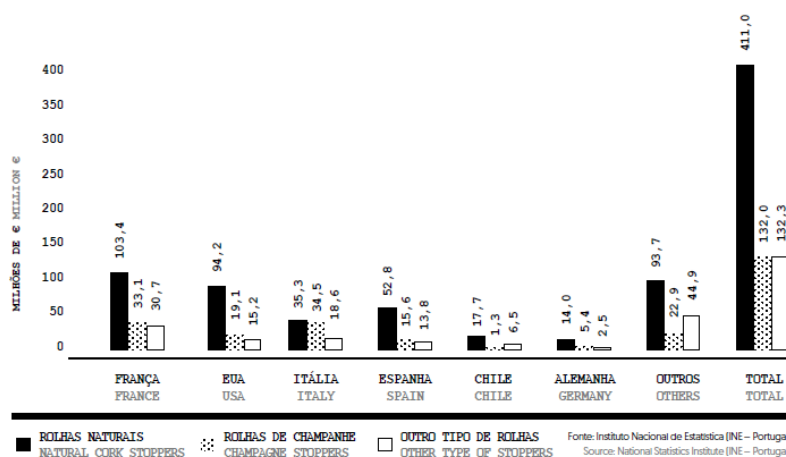


Figura 3 - Exportação de rolhas de cortiça para os principais países (adaptado de [4]).

1.3.1 Obtenção da cortiça

A extração da cortiça a partir do sobreiro acontece quando esta árvore tem entre 20 a 35 anos, conseguindo-se assim extrair cortiça virgem, como se pode ver na figura 4. Neste primeiro descortiçamento (designado por desbóia), a cortiça apresenta sulcos e fendas verticais resultantes das fraturas que ocorreram durante o crescimento do sobreiro e por essa razão, a cortiça virgem só pode ser utilizada para a produção de aglomerado. Após a extração da cortiça virgem a árvore produz um novo felogénio que lhe permite a sua regeneração e a sua contínua exploração de forma sustentável. Após a extração da cortiça virgem as seguintes extrações são realizadas de 9 em 9 anos. A segunda camada de cortiça produzida pelo sobreiro é denominada por cortiça segundeira. Esta camada é formada durante o crescimento da árvore razão pela qual apresenta, tensões e fraturas pelo que ainda não é possível a sua utilização em produtos como as rolhas. A cortiça extraída a seguir é denominada por cortiça amadia. Esta apresenta uma camada de espessura uniforme com poucas fraturas, dado que o sobreiro encontra-se já na fase adulta, com um reduzido crescimento radial reduzindo, assim, as tensões resultantes do engrossamento do tronco [2]. O descortiçamento é realizado em 5 fases:

1. Abrir - Com o machado é dado um golpe em sentido vertical na sua ranhura mais vincada de modo a separar a prancha do entrecasco.
2. Separar - O machado é introduzido com gume do machado entre a barriga da prancha de cortiça e o entrecasco de modo a separar a prancha utilizando um movimento de torção com o machado.
3. Traçar - O tamanho da prancha de cortiça a sair depende de um corte horizontal ou traçagem.
4. Extrair - A prancha de cortiça é extraída da árvore.

5. Descalçar - São deixados alguns fragmentos de cortiça junto a base do tronco de modo a evitar potenciais parasitas e são dadas algumas pancadas nos calços de sobreiro.

Após cada extração de cortiça, marca-se o sobreiro com um algarismo que corresponde ao último número do ano em que foi realizada a extração da cortiça ^[5].



Figura 4 - Extração da cortiça - Descortiçamento (adaptado de [6])

1.3.2 Tratamento da cortiça

Após a extração das pranchas de cortiça é necessária a sua estabilização, ficando para esse efeito as mesmas em repouso ao ar livre durante 6 meses. Isto permite-lhes desenvolver um teor de água constante. De modo a favorecer a circulação de ar e prevenir contaminação microbiana, as pilhas de cortiça são colocadas por cima de estruturas de aço inoxidável construídas num plano inclinado como se pode verificar na figura 5 ^[7].



Figura 5 - Pilhas de cortiça em repouso (adaptado de [7])

De seguida as pranchas de cortiça são submetidas a um processo de cozedura onde são removidos os sólidos orgânicos alojados nos poros e até que atinja o valor de humidade pretendido para ser processada. Além disso neste processo o ar que se encontra alojado dentro das pranchas de cortiça é expandido, aumentando assim o seu volume de forma a melhorar a sua estrutura interna. Depois são secas num ambiente estéril e com boa ventilação ^[7]. A figura 6 demonstra uma unidade de cozedura.



Figura 6 - Operação de cozedura da cortiça (adaptado de [8])

A cortiça, após a secagem, tem várias utilidades, dependendo do tipo de cortiça. A figura 7 esquematiza o processo desde o corte até ao produto final.

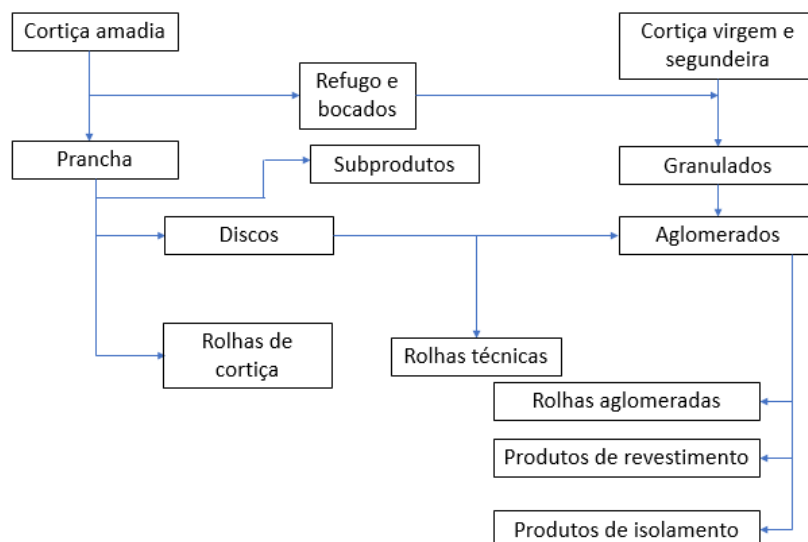


Figura 7 - Esquema geral das linhas de processamento industrial da cortiça para a cortiça amadia e a cortiça virgem e segunda (adaptado de [2])

1.3.3 Propriedades e estrutura da cortiça

A cortiça produzida pelo sobreiro *Quercus suber* L é um tecido vegetal natural constituído por uma colmeia de células revestidas na sua maioria por suberina e lenhina. O grande uso desta matéria-prima deve-se ao facto de esta ser um material impermeável a líquidos e gases devido à elevada presença de suberina e ainda ao facto de apresentar um elevado poder elástico. A elevada quantidade de gás (cerca de 60%) presente dentro das células de cortiça confere-lhe leveza ^[9]. Em 1660, Robert Hooke aperfeiçoou o microscópio e com isso examinou a estrutura celular da cortiça. Ao examinar a cortiça descobriu que as células desta apresentavam estruturas hexagonais numa secção estudada e uma estrutura do tipo caixa noutra secção, conforme se pode observar na figura 8 ^[10].

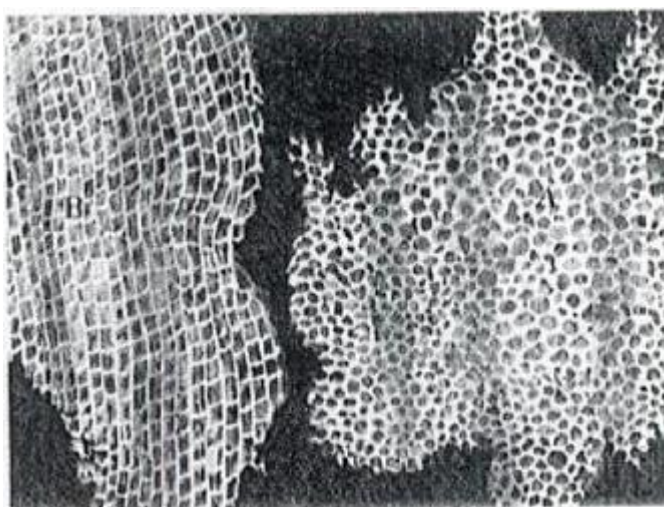


Figura 8 - Desenhos da estrutura celular da cortiça observados por Robert Hooke (adaptado de [10]).

1.3.4 Propriedades Químicas

Uma grande parte das propriedades da cortiça resultam da sua constituição química que difere dos outros tecidos vegetais. O composto principal na parede celular é a suberina e a lenhina. Enquanto a suberina é um biopolímero de carácter lipídico e é responsável pela baixa permeabilidade da cortiça, a lenhina é um biopolímero com um carácter aromático. Na tabela 1 encontram-se os constituintes da cortiça virgem e amadia.

Tabela 1 - Composição média da cortiça virgem e da cortiça amadia (adaptado de [2]).

Componente	% em peso seco	
	Cortiça virgem	Cortiça amadia
Cinzas	0,9	1,2
Extrativos	16,9	14,2
Suberina	35,2	39,4
Lenhina	22,4	24
Polissacáridos	21,3	19,9

1.4 Contributos do Trabalho

Atualmente é desconhecido o grau de seriedade da presença de defeitos nos discos de cortiça pelo que este projeto tem como objetivo a melhor compreensão das características dos defeitos que poderão provocar quebra na linha de rolhamento e consequentes reclamações provenientes de clientes.

Por outro lado, é possível com esta informação uma melhor otimização da máquina de Raios-X permitindo assim uma melhor seleção de discos em função da natureza dos defeitos presentes.

Utilizando as ferramentas estatísticas adequadas espera-se que seja possível alcançar os objetivos propostos de modo a reduzir, por um lado, o número de rolhas defeituosas produzidas que podem representar um risco de reclamação, e por outro lado, reduzir o desperdício de matéria-prima resultante da rejeição de discos falsos negativos.

1.5 Organização da tese

Esta tese encontra-se organizada em 6 capítulos.

No capítulo 1 é descrita uma breve introdução da empresa onde a dissertação foi realizada assim como uma breve explicação sobre a cortiça.

No capítulo 2 são explicados os constituintes da rolha de Champanhe, uma descrição detalhada dos defeitos existentes e as ferramentas estatísticas utilizadas, sendo este capítulo importante para a compreensão das matérias explicadas nos capítulos seguintes.

No capítulo 3 são apresentados em detalhe os processos e métodos utilizados para a obtenção dos resultados.

No capítulo 4 são revelados os resultados obtidos durante o período da dissertação em cada estudo e a sua consequente discussão e análise crítica.

No capítulo 5 referem-se as conclusões finais da dissertação realizada.

No capítulo 6 é realizado uma autoavaliação do projeto realizado e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 Contexto e Estado da Arte

2.1 Rolha de champanhe

As rolhas de champanhe são constituídas por um corpo aglomerado e dois discos de cortiça.

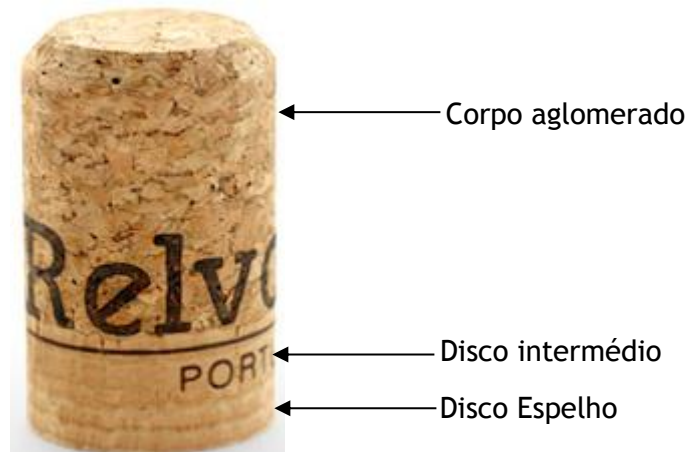


Figura 9 - Rolha de cortiça.

O tratamento da matéria-prima proveniente do sobreiro é realizado pela fábrica no Alentejo que produz os discos e os envia diariamente, juntamente com o granulado de cortiça, para a unidade fabril de Mozelos. É nesta unidade que se realiza a produção de rolhas. O processo de produção encontra-se resumido na Figura 10. Após a chegada dos discos e do granulado estes entram em diferentes linhas de produção. Os discos são introduzidos no equipamento de análise e classificação de defeitos por Raios-X. O granulado entra na máquina de moldação onde se realiza a sua aglutinação com uma cola, sendo de seguida introduzido na unidade de topejamento (designação internada usada para descrever o polimento dos topos dos corpos aglomerados obtidos na moldação). Segue-se depois a colagem dos discos ao corpo aglomerado. As rolhas são posteriormente retificadas nas dimensões solicitadas pelo cliente. Após uma seleção visual eletrónica para a separação das rolhas em função da sua classe visual e separação de alguns defeitos, as rolhas são marcadas com o logotipo do cliente através de uma marcação a fogo e seguem para um tratamento de superfície onde é introduzido um produto de revestimento de superfície (elastómero de silicone) que ajuda a inserção e extração da rolha na garrafa e assegura a impermeabilização da rolha à progressão de líquido. No final as rolhas são novamente submetidas a um controlo de qualidade visual e de seguida são contadas e embaladas ^[11].

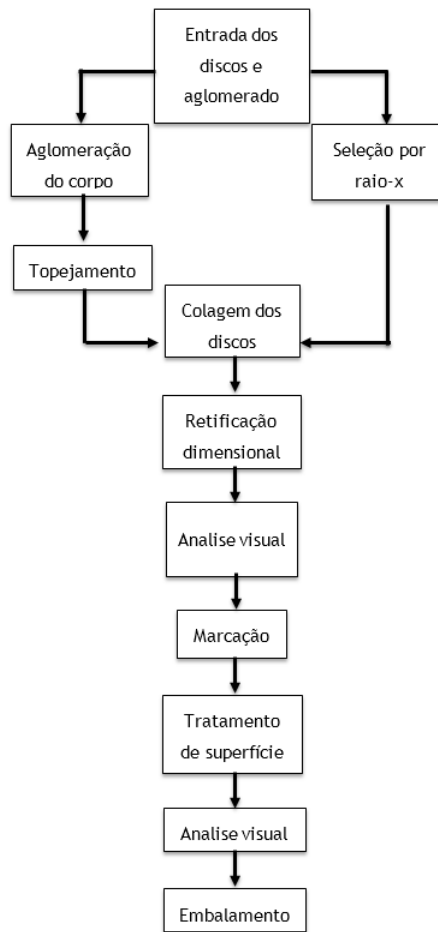


Figura 10 - Diagrama de blocos do processo de produção de rolhas de champanhe.

2.2 Defeitos

Na produção de discos de cortiça, para o uso nas rolhas de Champanhe, podem existir defeitos provenientes da matéria-prima que podem provocar a quebra do disco da rolha na linha de engarrafamento podendo, em situações mais extremas, originar a queda de pequenas partículas no vinho. Estes defeitos têm origem biológica resultantes de processos fisiológicos da árvore ou de outras influências externas.

Iremos, em primeiro lugar, falar dos defeitos de origem biológica. Um deles, denominado “prego”, refere-se ao defeito que origina zonas de cortiça onde os valores da massa volúmica e da dureza são elevados como se pode verificar na figura 11. Isto deve-se à inclusão de células de esclerênquima química no interior da cortiça.



Figura 11 - Disco com o defeito “prego”.

Um outro defeito, consiste numa descontinuidade na ligação entre anéis anuais de crescimento que ocorre quando existe uma alteração no processo meristemático da árvore. Esta alteração é o resultado de uma situação de stress quando a árvore atravessa períodos de seca ou ataque da lagarta *Lymantria dispar* L ou fogo originado o defeito denominado “ano-seco” demonstrado na figura 12.



Figura 12 - Disco com defeito ano seco.

Por motivos desconhecidos, é possível existir um elevado aumento no teor de água numa determinada área da cortiça atingindo valores entre os 400% e 500% quando o valor normal se encontra entre os 6% a 8%, provocando o defeito que se denomina “verde” como se verifica na figura 13.



Figura 13 - Disco com verdura.

A “terra” ou “ano com barro” é um defeito que corresponde a um tipo especial de porosidade, onde os canais lenticulares são cónicos com a base no lado da barriga da prancha de cortiça. Devido a esta forma a área do felogénio lenticular aumenta com a formação da cortiça contendo assim, no final, canais lenticulares com dimensões apreciáveis suscetíveis de

serem preenchidos com material de preenchimento. Isto provoca um aspeto pulverulento de cor castanho-avermelhado parecido com terra apresentado na figura 14.



Figura 14 - Amostra de cortiça com terra (adaptado de [2]).

Os defeitos de origem externa devem-se a ataques de insetos onde, no caso da larva da cobrilha-da-cortiça, origina galerias preenchidas com excrementos misturado com o tecido com o tecido suberoso o que aumenta a densidade. O ataque da formiga origina galerias ocas apresentando secções arredondadas e, portanto, diminuí a massa volúmica da cortiça^[2]. A figura 15 mostra o exemplo de uma galeria formada pela formiga a esquerda e a direita a galeria preenchida pela cobrilha.

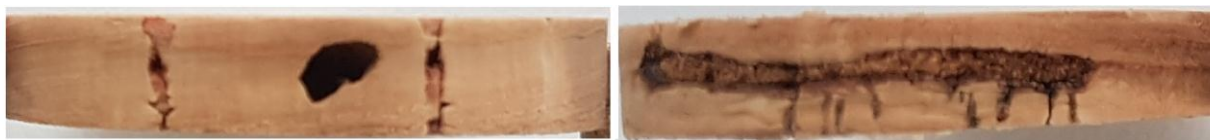


Figura 15 - Disco com galeria causada pela formiga e cobrilha.

2.3 Máquina Raios-X

Devido à existência de inúmeros defeitos que são possíveis encontrar nos discos, foi necessário desenvolver novos métodos que sejam capazes de detetar automaticamente e rejeitar os discos com defeito considerado grave. A máquina de Raios-X é utilizada com o objetivo de fazer a leitura da diferença entre a massa volúmica média do disco e a massa volúmica em cada ponto do disco e faz a rejeição automática caso essa diferença seja elevada. Isto permite, assim, identificar a presença de defeitos que possam alterar a massa volúmica como por exemplo o prego ou cobrilha. Com base na gravidade do defeito a máquina classifica os discos como lenha, intermédio ou sem defeito^[12].



Figura 16 - Máquina Raios-X (adaptado de [12]).

2.4 Plano de experiências

O plano de experiências ou desenho de experiências (DOE) é um método estatístico onde se realiza uma série de procedimentos experimentais com o objetivo de obter informações sobre os efeitos e interações entre diferentes fatores com base na resposta. Para a otimização do processo é necessário entender os fatores que poderão afetar a resposta e através da combinação e alteração destes fatores é possível determinar as condições mais favoráveis. É também possível reduzir o número de fatores estimados caso esses parâmetros não influenciem a resposta ^[13].

Este método existe há muitos anos, mas foi só com o trabalho de *Sir R. A. Fisher*, na área da agricultura, que se deram verdadeiramente os primeiros passos na área do DOE ^[14].

Após efetuar as experiências, é realizado um teste de hipóteses baseado numa análise de variância (ANOVA).

Um teste de hipóteses é um procedimento estatístico onde é feita uma afirmação que, com base na amostra de resultados obtidos, pode ser rejeitada ou não, essa afirmação é denominada hipótese nula (H_0). Caso a hipótese nula seja rejeitada aceita-se a hipótese alternativa (H_1) formulada inicialmente com a hipótese nula e que contraria esta ^[15]. A análise de variância consiste em testar a hipótese da média de duas ou mais populações serem iguais. Avalia a importância de um ou mais fatores comparando as médias das variáveis de resposta em diferentes níveis de fatores. Assim, obtemos duas hipóteses, a hipótese nula onde afirma que as médias de todas as populações são iguais e a hipótese alternativa onde pelo menos uma média é diferente.

$$\text{Hipótese nula } H_0: \mu_i = \mu_j \forall i \neq j$$

$$\text{Hipótese alternativa } H_1: \exists i \neq j: \mu_i \neq \mu_j$$

2.4.1 Desenho fatorial

O desenho fatorial é um método frequentemente utilizado em experiências que envolvem vários fatores passíveis de influenciar a resposta do sistema. É normalmente utilizado nos passos iniciais do trabalho experimental porque reduz o número de experiências necessárias e permite identificar possíveis interações entre fatores que influenciam a resposta. Um dos possíveis métodos consiste em atribuir a cada fator (seja ele qualitativo ou quantitativo) dois níveis obtendo assim 2^k observações sendo k o número de fatores. A análise gráfica dos resultados permite assim determinar a influência do fator no resultado e a interação entre fatores.

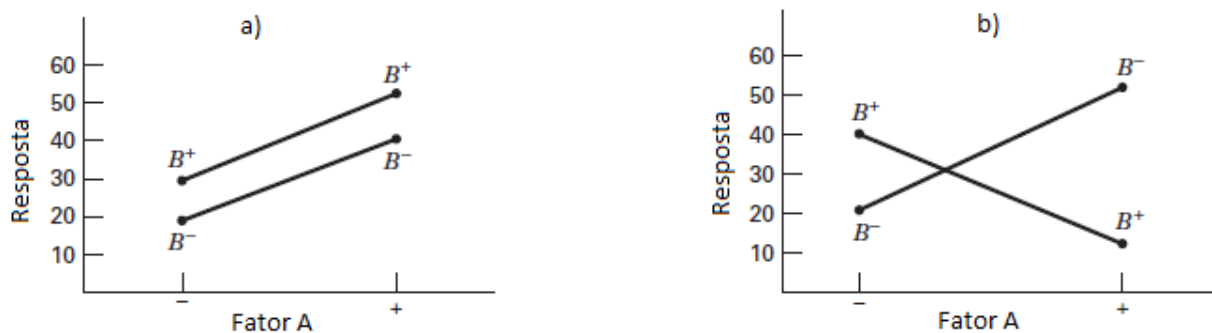


Figura 17 - Exemplo de experiência fatorial sem interação de fatores (a) e com interação (b) (adaptado de [14])

2.4.2 Metodologia de superfície de resposta (RSM)

Existem várias técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para a modelação e análise de problemas. Esse conjunto de técnicas denomina-se metodologia de superfície de resposta. O primeiro passo é encontrar uma aproximação adequada entre a resposta e as variáveis independentes utilizando um polinómio de baixo grau. Se a aproximação for adequada por uma função linear então a aproximação é um modelo de primeira ordem

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.1)$$

Se existir curvatura no sistema, então é necessário um modelo de segunda ordem, isto é, um polinómio de maior grau ^[16].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.2)$$

Um dos desenhos utilizados para ajustar o modelo de segunda ordem é o modelo central composto (CCD) que consiste na junção de um desenho fatorial (2^k) com o dobro dos fatores como pontos estrela e um número de pontos centrais.

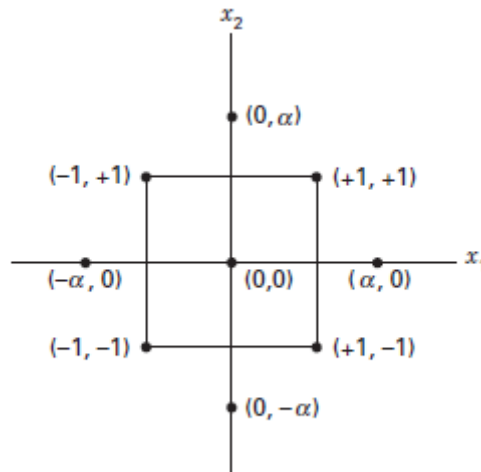


Figura 18 - CCD para 2 fatores (adaptado de [14]).

2.5 Norma da garrafa e da massa volúmica

De modo a inspirar confiança nos clientes sobre os produtos e serviços foram criadas normas, ou seja, documentos cujo objetivo é assegurar ao cliente que o produto e serviço é fiável, que funciona a um nível expectável e que fornece um resultado expectável.^[17]

Existem, então, dois tipos de garrafas, as *bague 26* e *bague 29*, onde cada tipo tem especificações para cada diâmetro no gargalo ^[18]. A figura 19 mostra uma representação do gargalo de uma garrafa com os diâmetros ($D1, D2, D3, D4$) que são necessários para a garrafa estar de acordo com a norma.

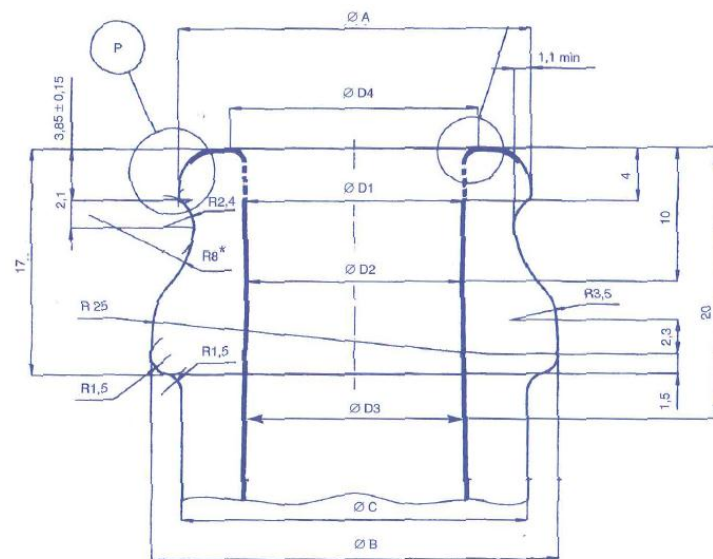


Figura 19 - Diâmetros existentes no gargalo (adaptado de [18]).

Tabela 2 -Valores de diâmetros (adaptado de [18]).

	Bague 26 (mm)	Bague 29 (mm)
ØA	26,55 ± 0,25	29 ± 0,3
ØB	31 ± 0,3	33,6 ± 0,3
ØC	26,5	29
ØD1	16,3 ± 0,3	17,5 ± 0,3
ØD2	$D2 + 0,1 < 16,6$ ou $D2 - 0,4 < 16,6$	$D2 + 0,1 < 17,8$ ou $D2 - 0,4 < 17,8$
ØD3	< 16,8	< 19,3
ØD4	> 18,1	> 19,3

A determinação da massa volúmica das rolhas é também um procedimento que foi padronizado criando assim a norma ISO 9727-2:2011. O cálculo da massa volúmica para rolhas de cortiça cilíndricas semi-acabadas ou prontas para uso é dada pela seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{m \times 10^6}{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times L} \quad (2.3)$$

em que ρ é a massa volúmica em kg/m^3 , m a massa da rolha em gramas, d o diâmetro da rolha em milímetros e L o comprimento da rolha em milímetros ^[19].

3 Materiais e Métodos

Para determinar a situação atual na Relvas II S.A., começou-se por elaborar gráficos pareto, figura 20, com a informação existente nas reclamações feitas pelos clientes de modo a determinar o defeito que poderá ter causado a quebra da rolha no rolhamento.

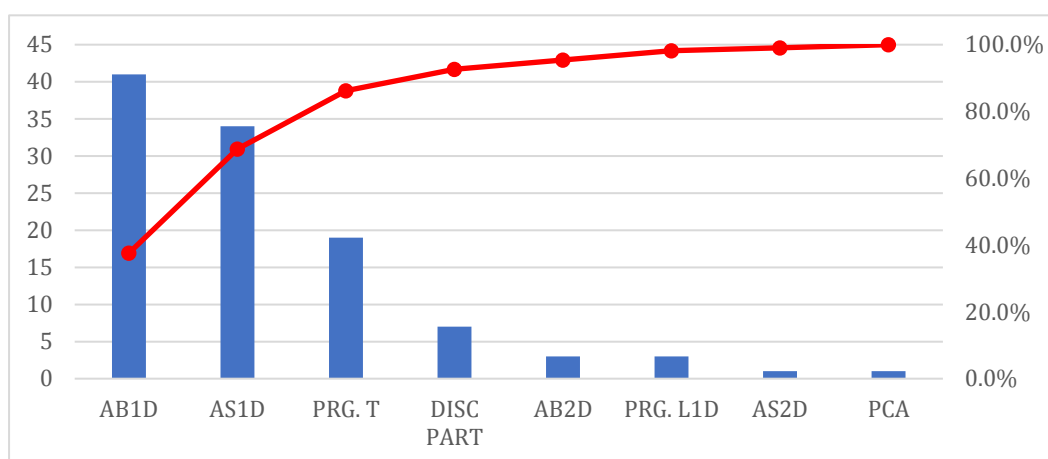


Figura 20 - Diagrama de Pareto das rolhas quebradas na linha de rolhamento

Verificou-se assim, que os defeitos que mais efeito têm sobre as propriedades de rolhamento e que constituem 80% dos problemas observados na linha de enchimento de um determinado cliente são o ano com barro no primeiro disco (AB1D), o ano seco no primeiro disco (AS1D) e o prego no topo (PRG.T). No entanto, a percentagem de rolhas quebradas, quando comparado com a quantidade de rolhas expedidas é bastante reduzida (entre 0,20 e 0,4%). Para simular estes rácios de quebra, foi adquirida uma máquina de rolhamento capaz de realizar inserções em garrafas denominada por rolhadora *CITCORK*. A máquina opera comprimindo a rolha inicialmente a um valor de diâmetro previamente definido e insere a rolha no gargalo pretendido. A velocidade de compressão, a velocidade de inserção, o nível de inserção da rolha na garrafa e o diâmetro de aperto da rolha antes da sua inserção são previamente definidos pelo operador. Inicialmente os valores que foram atribuídos aos parâmetros da máquina foram os valores médios das gamas possíveis de operação da máquina, no entanto foi indicado que essas condições não seriam as mais propícias para provocar quebra do disco da rolha pelo que um estudo da máquina era necessário de forma a ampliar a sensibilidade do método para a medição do IQR (Índice de Quebra de Rolhamento).

Nos subcapítulos a seguir são detalhados os métodos e procedimentos utilizados no estudo dos defeitos dos discos de amostra a usar no rolhamento e na otimização da máquina *CITCORK*.

3.1 Relação entre a massa volúmica real e a massa volúmica inferida Raios-X

Com o objetivo de entender melhor a relação entre o sinal de Raios-X e os defeitos foi elaborado um protocolo de modo a analisar as densidades obtidas pelo Raios-X dado que a identificação dos defeitos e a sua classificação eram realizadas através da diferença de densidades existentes no disco. Recolheu-se uma amostra de 30 discos para cada tipo de disco a analisar no Raios-X e determinou-se a massa volúmica do disco utilizando a norma portuguesa ISO 9727-2:2011 medindo a espessura e o diâmetro com um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm e medindo a massa utilizando uma balança de precisão com uma resolução 0,01 g. As variáveis selecionadas para cada amostra de discos e a sua gama associada encontram-se descritas na tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis utilizadas para cada disco e a respetiva gama

Variáveis	Níveis	Gama
Qualidade Visual	3	Extra/N1/N2
Defeitos	2	Prego/Ano com barro
Teor de água no disco	2	Alto/Baixo
Calibre Cortiça	2	Meia Marca/Delgado

3.2 Determinação dos parâmetros ideais para quebra da rolha no rolhamento (sensibilidade do método)

Com o objetivo de analisar os defeitos presentes em rolhas procedeu-se primeiro a um desenho de experiências da máquina de rolhamento *CITCORK* com o objetivo de encontrar as condições mais propícias para a quebra da rolha. Este aparelho, figura 21, permite estudar o comportamento das rolhas nas condições reais de rolhamento registando a força de compressão de inserção e relaxação.



Figura 21 - Máquina *CITCORK*

Para tal efeito, é necessário definir as variáveis a alterar e definir as variáveis fixar. Analisando a máquina de rolhamento verificou-se que esta utiliza 4 parâmetros para efetuar o rolhamento:

- Velocidade de compressão (cm/min)
- Velocidade de inserção (cm/min)
- Diâmetro de aperto (mm)
- Nível de inserção (mm)

A velocidade de compressão é a velocidade que a máquina aperta a rolha de modo a ser inserida na garrafa e o valor encontra-se expresso em cm/min. A velocidade de inserção é a velocidade com que o pistão insere a rolha na garrafa e é medida em cm/min. O diâmetro de aperto é o valor do diâmetro final, medido em milímetros, da rolha após o aperto das maxilas para depois ser introduzida na garrafa (normalmente aperto de 2mm abaixo do diâmetro de entrada no gargalo). O nível de inserção é a profundidade, medido em milímetros, com que se pretende introduzir a rolha na garrafa (valor recomendado de $24\text{mm} \pm 2\text{mm}$).

O perfil dimensional do gargalo das garrafas varia consoante o fornecedor das mesmas. Determinados perfis podem ter um efeito sobre o IQR pelo que decidiu-se avaliar dois tipos de garrafas provenientes de 2 fornecedores diferentes e cujo perfil de gargalo se encontra representado na figura 22.

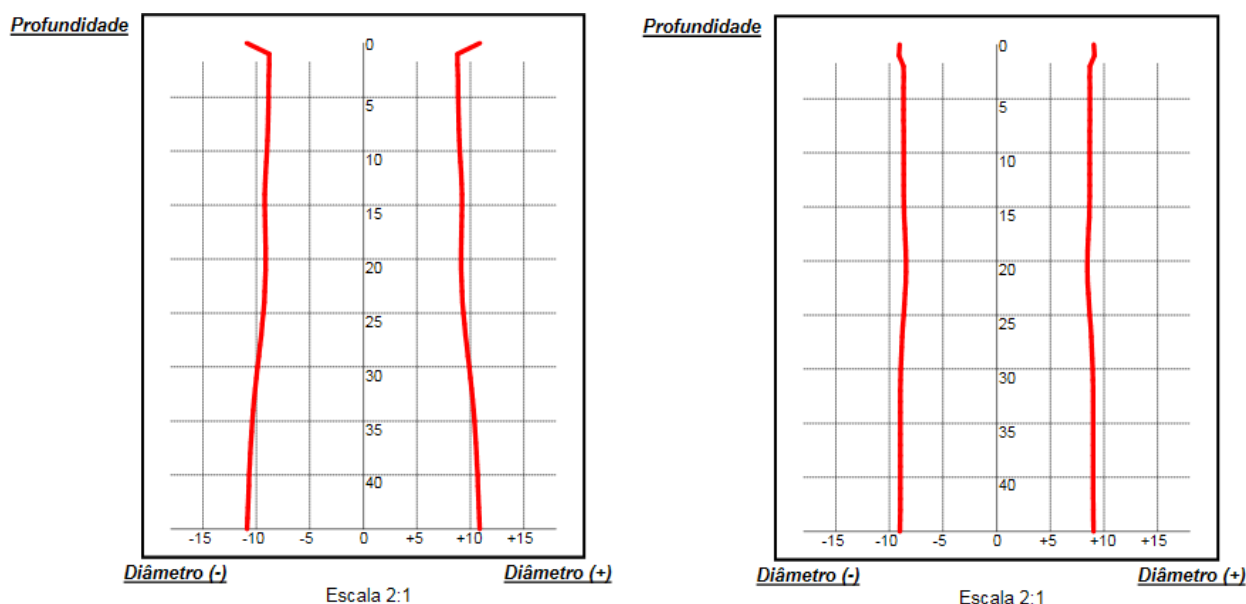


Figura 22 - Respetivamente, perfil de gargalo da garrafa verde (perfil cónico) e garrafa branca (perfil cilíndrico)

Com os parâmetros variáveis determinados, procedeu-se à caracterização do nível superior (1) e do nível inferior (-1) para as variáveis contínuas e para a variável categórica definiu-se as garrafas verdes (1) e as garrafas brancas (-1). Como resposta do sistema

considerou-se a resposta constituída por 2 níveis. Se não apresentar quebra (0) ou se apresenta quebra ou desvio suficiente para causar uma paragem numa linha de rolhamento (1) como se pode ver na figura 23 e na figura 24. Na tabela 4 encontram-se apresentados os fatores considerados para a realização do desenho de experiências, em particular, o desenho fatorial do tipo 2^k onde a variável k representa o número de fatores.



Figura 23 - Rolha com desvio



Figura 24 - Rolha quebrada no rolhamento

Nesta experiência consideraram-se 5 fatores onde 4 são do tipo contínuo e 1 fator do tipo categórico. Para cada fator foram atribuídos 2 níveis, um máximo e um mínimo para as variáveis contínuas de modo a estudar as situações extremas, fazendo o número total de experiências para 32. Mesmo com rolhas somente defeituosas a probabilidade de ocorrer quebra da rolha no rolhamento é reduzida pelo que foi necessário aumentar a amostra para poder obter conclusões, portanto, para cada experiência realizaram-se 10 rolhamentos, realizando assim, um total de 320 rolhamentos.

Tabela 4- Níveis estabelecidos para cada parâmetro da máquina CITCORK

Parâmetro	Nível		Tipo de variável
	-1	1	
Velocidade de compressão	100 cm/min	240 cm/min	Contínua
Velocidade de inserção	250 cm/min	1500 cm/min	Contínua
Diâmetro de aperto	15 mm	16 mm	Contínua
Nível de inserção	22 mm	28 mm	Contínua
Garrafa	Branca	Verde	Categórica

Os resultados obtidos são proporções que não seguem uma distribuição normal que é um dos requisitos para poder aplicar a ANOVA. Para converter os resultados para distribuições normais aplicou-se a transformação definida pela seguinte equação:

$$Resultado = \arcsen(\sqrt{P}) \quad (2.4)$$

Onde P é a proporção de rolhas quebradas ou com desvio e a função arcsen é a função trigonométrica inversa do seno, arco seno.

Após a recolha dos resultados procedeu-se a análise da variância a um nível de significância de 5 %.

Para realizar estes ensaios é necessário manter certas variáveis constantes de modo a poder avaliar a variação da resposta consoante os parâmetros escolhidos para análise. Definiu-se então, que todas as rolhas continham o defeito ano com barro no primeiro disco, o mesmo tipo e idade de tratamento de superfície, a mesma humidade e um calibre constante de 48 mm de comprimento e 31 mm de diâmetro.

Com a análise dos resultados foi possível eliminar os parâmetros velocidade de inserção, nível de inserção e o tipo da garrafa dado que não influenciam a resposta. De seguida procedeu-se a desenhar um planeamento de superfície de resposta com o desenho face central compósita

Definiram-se, então, 4 novos pontos centrais e 4 pontos estrela com 5 réplicas que perfaz um total de 25 ensaios cada um com 10 rolhamentos. Assim podemos verificar se existe, ou não, curvatura na resposta do sistema. Os níveis encontram-se apresentados na tabela 5 e o planeamento todo na tabela 6.

Tabela 5 - Níveis estabelecidos para cada parâmetro

Parâmetro	Nível			Tipo de variável
	-1	0	1	
Velocidade de compressão	100 cm/min	120 cm/min	240 cm/min	Contínua
Diâmetro de aperto	15 mm	15,5 mm	16 mm	Contínua

Tabela 6 - Planeamento experimental

Ensaio	Velocidade de Compressão	Diâmetro de aperto	Ensaio	Velocidade de Compressão	Diâmetro de aperto
1	1	-1	21	-1	1
2	1	1	22	-1	-1
3	1	1	23	-1	-1
4	1	-1	24	-1	-1
5	1	-1	25	-1	-1
6	1	1	26	-1	-1
7	1	1	27	-1	1
8	1	1	28	-1	1
9	1	1	29	-1	1
10	1	-1	30	-1	-1
11	1	-1	31	-1	1
12	1	1	32	-1	1
13	1	-1	33	0	0
14	1	1	34	0	0
15	1	-1	35	0	0
16	1	-1	36	0	0
17	-1	-1	37	0	0
18	-1	-1	38	0	-1
19	-1	1	39	0	1
20	-1	1	40	1	0

Tabela 7 - Planeamento experimental (continuação)

Ensaio	VCOMP	DIAM AP
41	-1	0
42	0	-1
43	0	-1
44	0	-1
45	0	-1
46	0	1
47	0	1
48	0	1
49	0	1
50	1	0
51	1	0
52	1	0
53	1	0
54	-1	0
55	-1	0
56	-1	0
57	-1	0

Com os novos resultados utilizou-se a metodologia de superfície de resposta para determinar os valores ótimos dos parâmetros que maximizam o índice de quebra de rolhamento.

3.3 Validação da parametrização da máquina *CITCORK*

Mesmo com os parâmetros determinados para obter o maior índice de quebra no rolhamento, é necessário validar a parametrização da máquina *CITCORK*.

Para obter a validação realizou-se um ensaio com as mesmas variáveis fixas que no desenho de experiências. Para determinar o tamanho da amostra necessário para a validação, de modo a obter com um grau de confiança de 95 % uma estimativa intervalar do IQR com uma margem de erro de 10% recorreu-se ao programa estatístico *Minitab*. Na utilização do método de resposta de superfície é possível obter o valor alvo e o intervalo de confiança para um grau de confiança de 95% sendo assim, o valor alvo pretendido para a validação é de 48% com o intervalo de confiança entre 37% e 61%. Com os valores definidos o tamanho da amostra sugerido foi de 76 rolhas.

De modo a analisar se os novos parâmetros da máquina *CITCORK* afetaram o índice de quebra de rolhamento em discos com diferentes tipos de defeitos, realizou-se um outro ensaio onde se recolheram 76 rolhas que foram rejeitadas no último passo de controlo devido à presença de pregos no topo mantendo as mesmas condições de rolhamento.

3.4 Determinação do índice de quebra de rolhamento (IQR) em discos com o defeito “prego”.

Com a parametrização da máquina *CITCORK* concluída foi utilizado a máquina de Raios-X para separar amostras de discos com o defeito prego. A máquina do Raios-X separa o defeito prego a partir de 2 parâmetros possíveis: a área do maior prego presente no disco e a área acumulada de pregos existentes. Se os valores destes parâmetros forem superiores aos valores predefinidos a máquina rejeita-os. É possível ver o programa da máquina de Raios-X na figura 25 onde é detetado um disco de cortiça com o defeito prego resultando num aumento na massa volumica onde se pode verificar com uma tonalidade de cinzento mais escura.

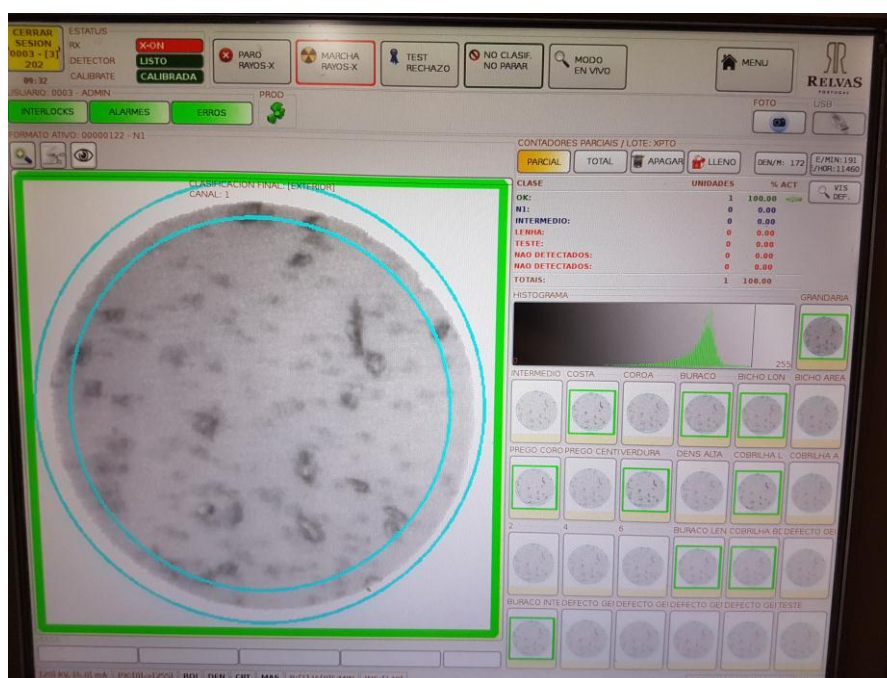


Figura 25 - Imagem do programa do Raios-X

Separou-se, então, os discos com base nas áreas acumuladas e área máxima e a posição do defeito no disco. Com os discos selecionados utilizaram-se discos intermédios de qualidade superior de modo a garantir que o defeito era de origem do defeito existente no disco espelho. Nesta experiência foram avaliados 3 parâmetros com 2 níveis fazendo assim um total de 8 experiências, onde em cada experiência foram utilizadas 80 rolhas. A escolha das rolhas foi feita com base em 3 parâmetros como se pode verificar na tabela 8.

Tabela 8 - Níveis estabelecidos para cada parâmetro

Parâmetro	Nível		Tipo de variável
	-1	1	
Área do maior prego máximo Área acumulada de pregos	4-6 mm ² 10-15 mm ²	8-10 mm ² 20-25 mm ²	Contínua
Visibilidade	Invisível	Visível	Categórica
Localização	Coroa	Centro	Categórica

Na figura 26 podemos ver um disco com o maior prego de área 4 a 6 mm² e um outro disco com o maior prego com uma área entre 8 a 10 mm²

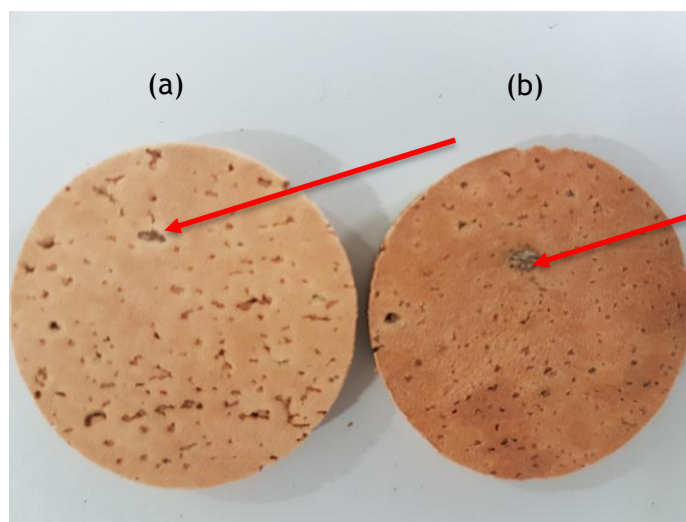


Figura 26 - Disco com prego de uma área entre 4 a 6 mm² (a) e disco com prego de uma área entre 8 a 10 mm² (b)

Mantiveram-se várias variáveis constantes. As classes de ambos os discos foram constantes e certificou-se que a humidade e o tratamento de superfície das rolhas acabadas fossem iguais. Esperou-se 24 horas após a aplicação do tratamento de superfície e procedeu-se ao rolhamento com o mesmo tipo de garrafa (bague 29). Utilizaram-se os parâmetros que maximizam a quebra da rolha na máquina *CITCORK* determinados no último desenho de experiências.

Realizou-se também um estudo para averiguar se a massa volúmica poderia influenciar a taxa de quebra no rolhamento. Recolheram-se 30 discos que continham pregos de tamanho 4 a 6 mm² e 30 discos de pregos com 8 a 10 mm² e determinou-se a massa volúmica dos discos utilizando a norma ISO 9727-2 medindo assim, a massa dos discos, o seu diâmetro e a sua espessura.

4 Resultados e Discussão

4.1 Relação entre a massa volúmica e a massa volúmica inferida pelo Raios-X

O objetivo desta dissertação é a melhor compreensão do efeito que os defeitos podem provocar na linha de rolhamento determinando, assim, os defeitos que provocam a quebra da rolha ao ser introduzida na garrafa ajudando assim no processo de seleção de discos pelo Raios-X.

Como o Raios-X seleciona discos com base na diferença de densidades foi feito um estudo para avaliar a correlação do sinal obtido pelo Raios-X consoante a qualidade visual, humidade, defeito presente no disco e o calibre da cortiça. Os valores médios da massa volúmica obtidos encontram-se na tabela 9. A massa volúmica foi calculada utilizando a norma ISO 9727-2:2011

Tabela 9 - Valores médios da massa volúmica e da massa volúmica obtida pelo Raios-X

Tipo de disco	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal Raios-X
Extra	178,29	78,93
N1	186,47	82,9
N2	184,13	78,77
Terroso	205,42	88,65
Prego	209,47	90,34
Disco húmido	185,69	79,9
Disco seco	167,44	77,98
Meia marca	185,69	79,9
Delgado	183,39	80,95

Verificou-se que, independente do tipo de disco, existe uma relação linear entre a massa volúmica e o sinal do Raios-X sendo assim possível determinar a massa volúmica do disco a partir do sinal obtido pelo Raios-X. A figura 28 ilustra a massa volúmica com o sinal do Raios-X para o caso de discos classificados como discos terrosos. Conseguimos também verificar, através do cálculo do coeficiente de variação apresentado na tabela 10, que a variação da massa volúmica e do sinal do Raios-X não é elevada consoante as características dos discos analisados.

Tabela 10 - Coeficiente de variação

	Massa volúmica	Sinal Raios-X
Média	187,33 kg/m ³	82,04
Desvio padrão	12,88 kg/m ³	4,48
CV	7%	5%

As tabelas dos valores da massa volúmica, os gráficos com as médias das massas volúmicas e os restantes gráficos encontram-se no anexo 1.

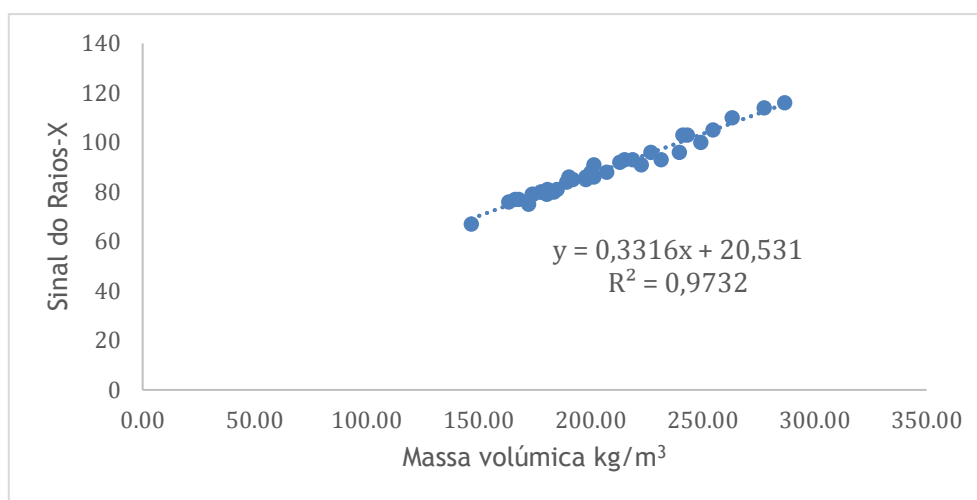


Figura 27 - Massa volúmica versus sinal do Raios-X de discos terrosos

4.2 Determinação dos parâmetros ideais para quebra da rolha no rolhamento

Atualmente, os rolhamentos realizados com rolhas com discos que apresentam sinais evidentes de defeito não provocam frequentemente a quebra da rolha, portanto foi necessário fazer um estudo na máquina *CITCORK* para descobrir que parâmetros influenciam o rolhamento e em que condições a rolha quebra mais frequentemente de modo a poder ampliar os resultados reduzindo assim as amostras necessárias. Portanto, realizou-se um desenho de experiências, desenho fatorial, com 5 variáveis com 2 níveis onde cada ensaio continha 10 rolhamentos onde os resultados encontram-se no anexo 2. O valor de prova para cada parâmetro individual encontra-se na tabela 11.

Tabela 11 - Valor de prova para cada parâmetro individual

Parâmetro	Valor de prova
Velocidade de compressão	0,851
Velocidade de inserção	0,331
Diâmetro de aperto	0,127
Nível de inserção	0,841
Garrafa	0,263

Concluimos que nenhum parâmetro individualmente tem influência no índice de quebra de rolhamento, no entanto, verifica-se na tabela 12 que existe influência na resposta quando combinamos 2 fatores, a velocidade de compressão e o diâmetro de aperto, dado que o valor de prova é inferior ao nível de significância 0,05.

Tabela 12 - Valor de prova para interação entre 5 parâmetros

Parâmetro	Valor de prova
Velocidade de Compressão x Velocidade de inserção	0,749
Velocidade de Compressão x Diâmetro de aperto	0,018
Velocidade de Compressão x Nível de inserção	0,786
Velocidade de Compressão x Garrafa	0,921
Velocidade de inserção x Diâmetro de aperto	0,298
Velocidade de inserção x Nível de inserção	0,339
Velocidade de inserção x Garrafa	0,56
Diâmetro de aperto x Nível de inserção	0,854
Diâmetro de aperto x Garrafa	0,921
NI x Garrafa	0,841

Após a análise de variância (ANOVA) é preciso efetuar uma análise dos resíduos para verificar os pressupostos da ANOVA, isto é, variância constante, normalidade e independência dos erros aleatórios.

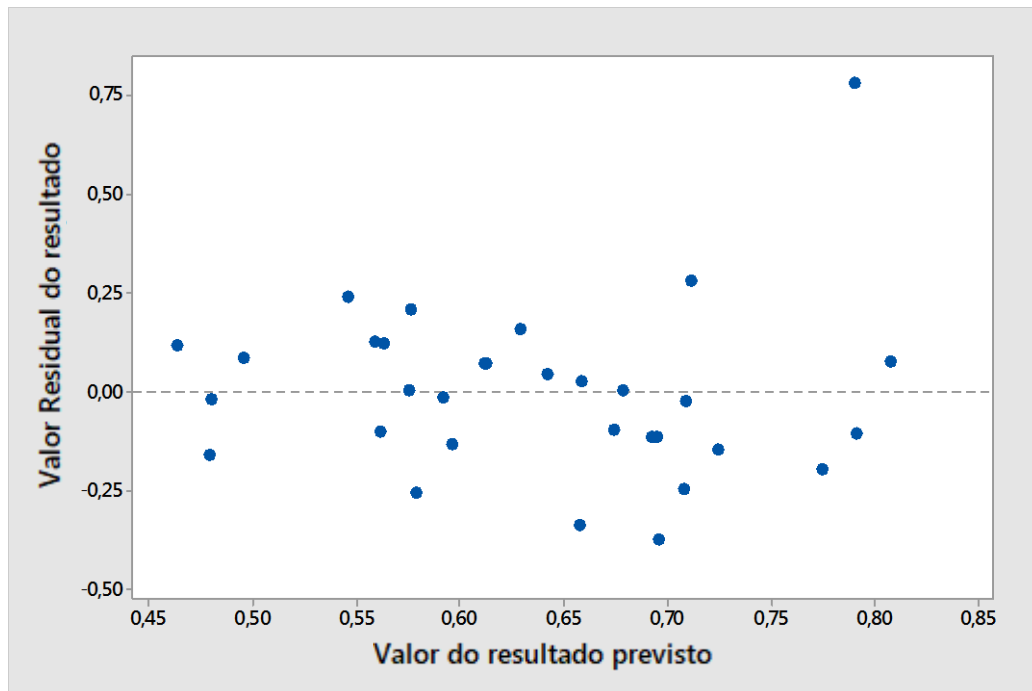


Figura 28 - Gráfico dos resíduos em função da previsão da resposta

Verifica-se na figura 29 que existe aleatoriedade na distribuição dos pontos por volta da reta horizontal não apresentando nenhum padrão. Podemos então concluir que é verificado o pressuposto da variância constante dos erros aleatórios.

Com a análise seguinte, figura 30, pretende-se verificar se os valores residuais seguem uma distribuição normal. Como os valores se encontram próximos da reta conclui-se que não existem grandes desvios ao pressuposto da normalidade dos erros aleatórios.

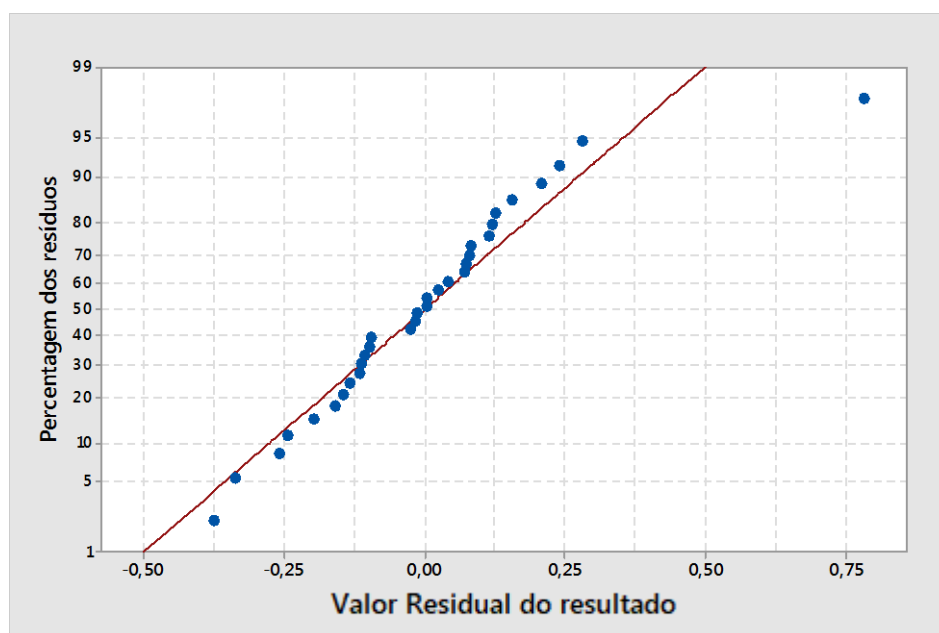


Figura 29 - Gráfico da distribuição normal dos valores residuais

De seguida procedeu-se à observação do comportamento residual em função da ordem da realização dos ensaios (Figura 31) verificando a existência ou inexistência de alguma tendência ou padrão.

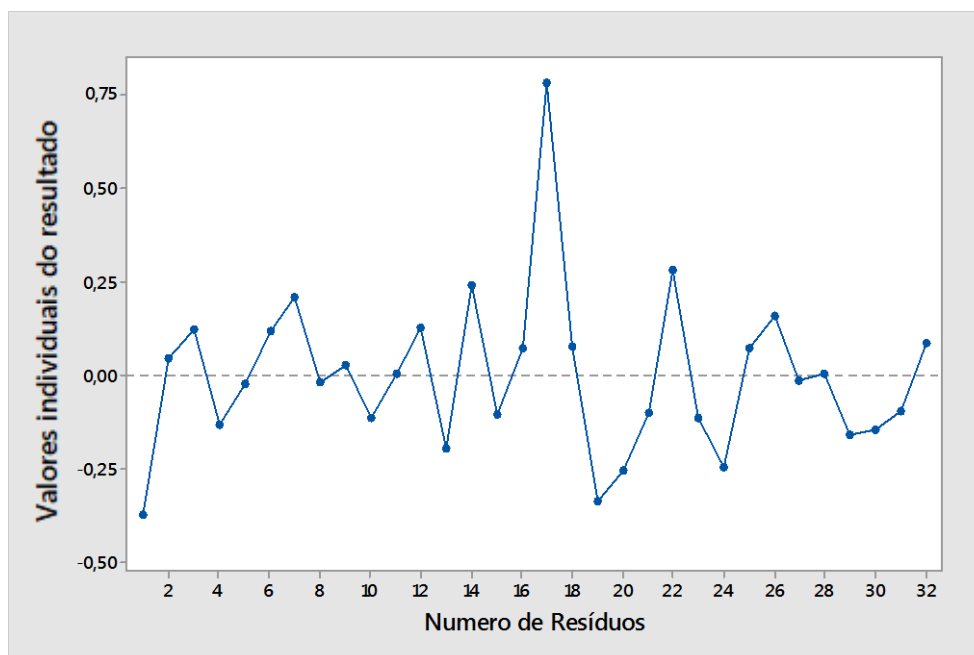


Figura 30 - Análise gráfica do comportamento dos valores residuais

Podemos verificar que não existe tendência ou padrão confirmando assim a independência dos erros aleatórios.

Com estes resultados concluímos que só a combinação do diâmetro de aperto da máquina com a velocidade de compressão é que afeta a resposta e, portanto, eliminaram-se os restantes parâmetros.

No estudo destes 2 parâmetros introduziram-se agora os pontos estrela e pontos centrais fazendo assim um planeamento de superfície de resposta com um desenho FCC (*Face Center Cube Design*). Obtemos então que a interação entre os parâmetros velocidade de compressão e o diâmetro de aperto influencia a resposta. Podemos observar na figura 32 a interação entre os parâmetros e na tabela 13 mostra os valores de prova obtidos na análise de variância.

Tabela 13 - Valores Valor de prova para cada parâmetro e interação entre parâmetros.

Parâmetros	Valor de prova
Velocidade de Compressão	0,857
Diâmetro de aperto	0,051
Velocidade de Compressão x Velocidade de Compressão	0,309
Diâmetro de aperto x Diâmetro de aperto	0,451
Velocidade de Compressão x Diâmetro de aperto	0,004

Ao aplicar o método RSM é possível obter a relação da resposta com base dos fatores estudados onde neste caso, tabela 13, os valores quadráticos apresentam um valor de prova superior a 0,005 os rejeitamos. Como só a interação entre a velocidade de compressão e o diâmetro de aperto é que é estatisticamente relevante consideramos então os parâmetros lineares e a interação entre eles. Os coeficientes codificados que geraram a equação (2.4) encontram-se no anexo 3.

$$Resposta = 0,5941 - 0,0056 \times VCOMP - 0,0623 \times DIAMAP + 0,1082 \times VCOMP \times DIAMAP \quad (2.4)$$

Onde VCOMP é a velocidade de compressão em cm/min e DIAMAP o diâmetro de aperto em mm.

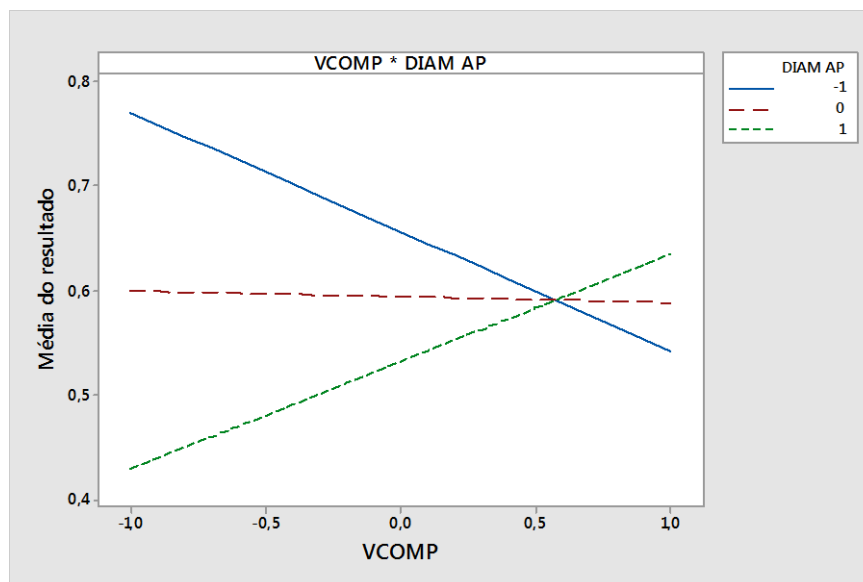


Figura 31 - Interação entre a velocidade de compressão e diâmetro de aperto

Foi realizado novamente um estudo nos valores residuais. Na figura 33 é possível confirmar que a distribuição dos valores é aleatória e por volta da reta horizontal concluindo que é verificado o pressuposto da variância constante dos erros associados. Os valores na figura 34 encontram-se juntos da reta concluindo assim que o pressuposto da normalidade dos erros

aleatórios é verificado. Finalmente, na figura 35 podemos comprovar que existe independência nos erros aleatórios dado que o gráfico demonstra que não existe tendência ou padrão.

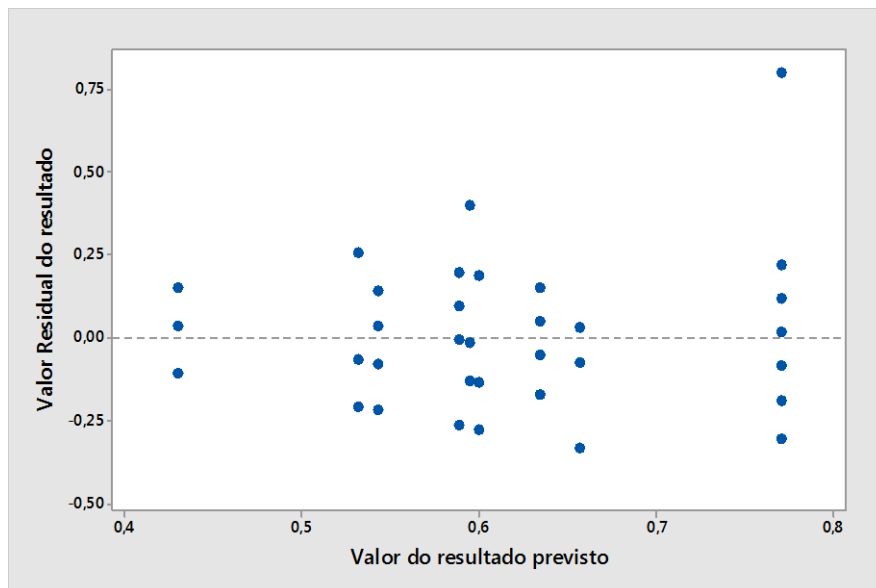


Figura 32 - Representação gráfica dos resíduos em função da previsão da resposta

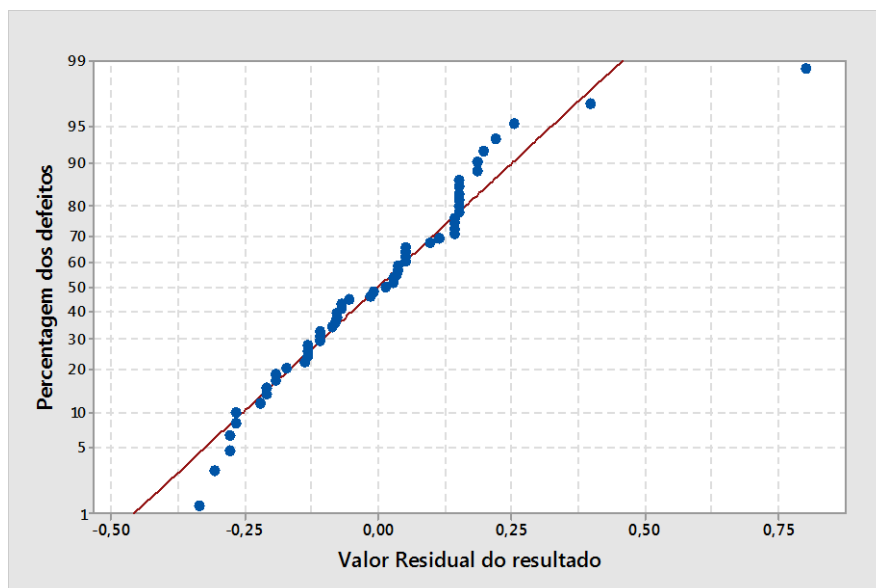


Figura 33 - Representação gráfica da distribuição normal dos valores residuais

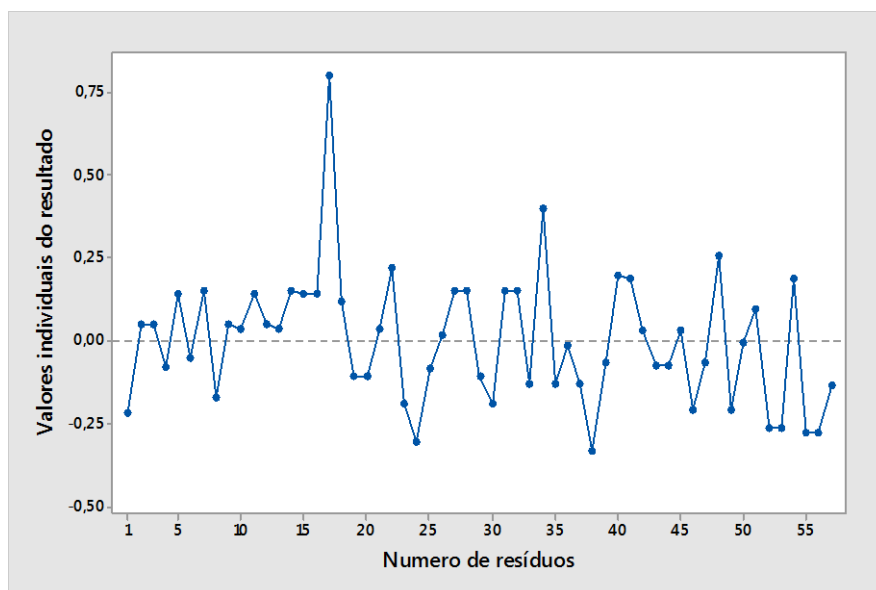


Figura 34 - Análise gráfica do comportamento dos valores residuais

Apresentamos agora na figura 36 a relação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores previstos pelo modelo com os intervalos de confiança de 95% e a reta de regressão.

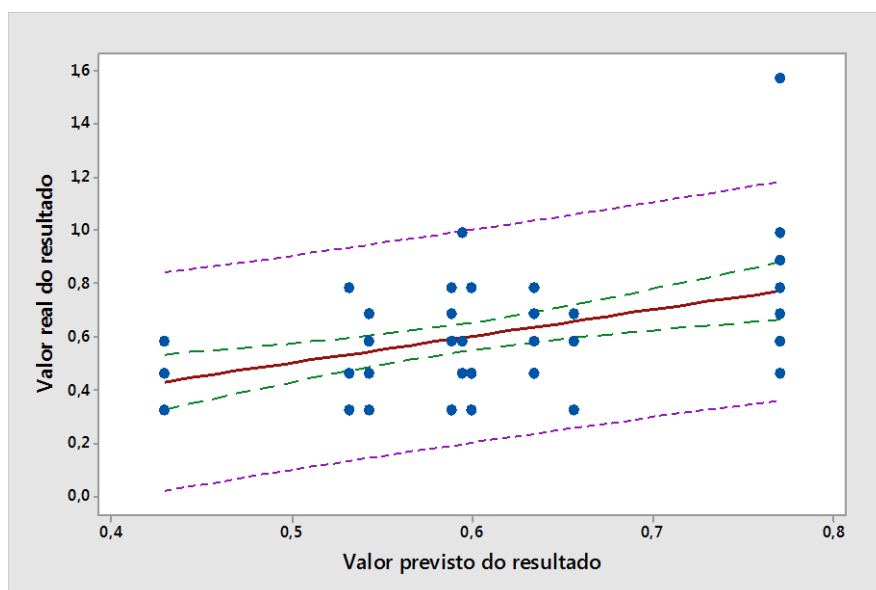


Figura 35 - Ajuste gráfico do modelo com a resposta real

Na tabela 14 podemos encontrar os valores dos parâmetros obtidos através da ANOVA. Apesar do valor do coeficiente de determinação ser baixo (19,99%), o ajuste ao modelo é significativo dado que o valor de prova (inferior a 0,001) é inferior ao nível de significância. Com o erro padrão residual podemos concluir que existe variabilidade onde, em média, os pontos encontram-se a uma distância de 0,2018 da reta considerada.

Tabela 14 - Parâmetros obtidos através da análise de variância

Erro padrão residual	0,2018
R²	19,99%
Valor de prova	< 0.001

Determinamos que os parâmetros mais adequados para a quebra da rolha no rolhamento é aumentar o aperto da rolha (15 mm) e diminuir a velocidade de compressão (100 cm/min), como se pode verificar na figura A.11 do Anexo 3. Com o aumento do aperto das maxilas da máquina *CITCORK* os defeitos terão uma maior probabilidade de se manifestarem e a diminuição da velocidade de compressão aumenta o tempo que o defeito tem para causar a quebra da rolha. Como é necessário definir os restantes parâmetros da máquina *CITCORK* escolheram-se os parâmetros que embora estatisticamente não relevantes, poderiam ajudar na quebra da rolha, ou seja, escolheu-se uma velocidade de inserção de 1500 cm/min, um diâmetro de aperto de 24 mm e garrafas brancas.

Após a determinação dos novos parâmetros procedeu-se a nova experiência, onde utilizou-se uma amostra de 80 rolhas de modo a validar o procedimento.

Tabela 15 - Resultados da validação do procedimento

Nível	0	2	3
Total	36	26	14
Media	48%	34%	18%
Media defeitos	52%		

Ao analisar a média de rolhamentos defeituosos observados verificamos que o valor se encontra dentro da margem de erro pelo que podemos então validar o procedimento.

Foi feito também um teste para analisar o efeito dos novos parâmetros da máquina *CITCORK* com o defeito prego no disco espelho obtidos no último passo de controlo de qualidade.

Tabela 16 - Resultados obtidos em rolhas com pregos no topo

Nível	0	2	3
Total	47	21	8
Media	61%	28%	11%
Media defeitos	39%		

Verificamos que o valor de defeitos numa amostra de 76 rolhas é alto o que prova que as alterações dos parâmetros afetam também as rolhas com o defeito prego, no entanto, como a amostra retirada na última etapa do processo de fabrico as rolhas obtidas já eram de qualidade acrescida e, portanto, os defeitos “prego” obtidos eram de tamanhos muito reduzidos. Além

disso podemos verificar que o IQR dos discos com o defeito ano com barro é maior do que o IQR dos discos com o defeito prego o que está de acordo com o pareto da reclamação do cliente.

4.3 Influência do defeito “prego” no índice de quebra no rolhamento

O Raios-X neste momento classifica o defeito prego com base na área do maior prego e a área acumulada de pregos eliminando, assim, todos os discos cujo maior prego contem uma área máxima de $7,5 \text{ mm}^2$ ou uma área acumulada de 32 mm^2 . Devido a isso a selecionaram-se discos onde o maior prego tem uma área entre 8 a 10 mm^2 e uma área acumulada de pregos entre 20 a 25 mm^2 e discos com o maior prego contendo uma área de 4 a 6 mm^2 com uma área acumulada de 10 a 15 mm^2 . Além de se testar as dimensões do defeito também se estudou a posição desse defeito, isto é, se o defeito se encontra junto da coroa do disco ou no centro e se o defeito se localiza na face, sendo assim visível após ser introduzido na rolha, ou na contra face do disco, o que faz com que o prego fique invisível após inspecionar a rolha. A tabela 17 mostra os valores obtidos para cada combinação de parâmetros e no anexo 4 encontram-se os resultados obtidos de cada garrafa.

Tabela 17 - Resultados obtidos para interação entre os 3 parâmetros

Parâmetros dos Pregos					
Área Maior Área Acumulada (mm^2)	Localização	Visibilidade	Conforme (%)	Desvio (%)	Quebra (%)
4-6 10-15	Centro	Visível	78,75	17,50	3,75
		Invisível	77,50	21,25	1,25
	Coroa	Visível	58,75	16,25	25,00
		Invisível	86,25	10,00	3,75
8-10 20-25	Centro	Visível	63,75	27,50	8,75
		Invisível	72,50	16,25	11,25
	Coroa	Visível	58,75	21,25	20,00
		Invisível	63,75	31,25	5,00

Ao analisar a tabela 17 conseguimos identificar que os maiores valores de quebra foram detetados para pregos pequenos visíveis na coroa (25%) e em pregos grandes visíveis na coroa (20%). Verificamos também que os pregos com um maior tamanho provocaram um maior numero de rolhamentos com desvios

Acredita-se que a razão pela qual os pregos de menor tamanho foram os que deram maior taxa de quebra se deve ao facto de se ter observado que pregos de maior tamanho se encontram também mais profundos pelo que a massa da cortiça impede a saída da zona. Se o prego se situa na contra face do disco, isto é, entre o plano de colagem com o disco intermédio, a massa

da cortiça evita que o prego seja capaz de sair ao ser comprimido, logo, pregos na contra face devem provocar menos problemas na linha de rolhamento. Ao analisar a tabela 17 verificamos que pregos no centro do disco tem uma maior taxa de rolhamentos conformes do que discos com pregos na coroa pelo que, acredita-se que se o prego se encontrar junto da coroa existe menos massa de cortiça para evitar a saída do prego quando comparado com pregos no centro do disco, no entanto, verifica-se que há um aumento de discos com desvios.

Foi feito um estudo também a avaliar a massa volúmica dos discos de modo a verificar se a massa volúmica poderia influenciar nos resultados obtidos recolhendo para tal efeito 30 discos de discos com pregos entre 4 a 6 mm² e entre 8 a 10 mm², tabela 18.

Tabela 18 - Valores de massa volúmica obtidos para discos com prego

Área de prego máximo (mm ²)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
4-6	6,1	32,86	0,88	170,44	78
8-10	6,13	33,21	1,01	189,8	84

Com este estudo podemos verificar que as massas volúmicas dos discos não variam significativamente pelo que a massa volúmica não deverá afetar o IQR.

5 Conclusões

O principal objetivo desta dissertação era um melhor conhecimento dos defeitos existentes nos discos de cortiça que ocorrem nas rolhas de champanhe produzidas pela Relvas II - Rolhas de champanhe S.A. Inicialmente o problema era a existência de rolhas defeituosas que provocam quebra na linha de rolhamento de um cliente. Estes defeitos que existem nos discos de cortiça são detetados pela máquina de Raios-X. Para tal procedeu-se a uma otimização da máquina de Raios-X identificando e classicando os defeitos com base no índice de quebra de rolhamento.

Como existe uma grande variabilidade nos parâmetros e condições utilizados pelos clientes no processo de rolhamento foram determinadas as piores condições da máquina *CITCORK* de modo a assumir o pior cenário possível. Para tal elaborou-se um desenho de experiências de modo a poder aumentar a taxa de quebra no rolhamento chegando assim aos seguintes parâmetros:

- Velocidade de compressão: 100 cm/min
- Velocidade de inserção: 1500 cm/min
- Diâmetro de aperto: 15 mm
- Nível de inserção: 24 mm

Foi determinado que só a combinação entre a velocidade de compressão e o diâmetro de aperto eram os fatores que influenciavam a resposta pelo que podemos concluir que um aperto das maxilas grande e lento na rolha é o principal responsável pela quebra da rolha pelo defeito criando assim, uma nova ferramenta de controlo de qualidade.

Após a otimização da máquina *CITCORK* procedeu-se à análise do defeito “prego” tendo-se procedido à análise de 3 variáveis:

- Tamanho do prego
- Localização do prego
- Visibilidade do prego

Durante este ensaio considerou-se constante o tratamento de superfície, a humidade, o calibre da rolha, as garrafas utilizadas no rolhamento e a qualidade do disco intermédio.

Neste ensaio podemos verificar que os pregos de tamanho entre 4 a 6 mm² junta da coroa do disco visíveis foram os que mais quebraram sendo que na experiência o índice de quebra de rolhamento atingiu 25% e também os pregos junto da coroa do disco visíveis do tamanho entre 8 a 10 mm² obtiveram um IQR elevado sendo o valor 20%. Podemos concluir que os pregos na coroa quando visíveis são os que apresentam maior risco de quebra e que nos

discos com pregos invisíveis ou no centro existe um valor de desvios superiores e também um maior número de rolhamentos conformes. Isto deve-se a quantidade de massa de cortiça envolvente que é capaz de suportar o prego evitando então a quebra da rolha.

6 Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objetivos Realizados

O objetivo principal deste projeto foi a avaliação das consequências dos defeitos existentes nos discos de cortiça, onde para tal, foi necessário a otimização da máquina de rolhamento *CITCORK* de modo a propiciar a quebra da rolha utilizando ferramentas estatísticas em particular o desenho de experiências (DOE), o desenho fatorial e o método de resposta de superfície (RSM). Posteriormente estes resultados foram utilizados para a otimização da máquina Raios-X que é utilizada na filtração de discos defeituosos.

6.2 Limitações e Trabalho Futuro

Nesta dissertação a grande limitação foi o tempo. Mesmo com a nova parametrização da máquina *CITCORK* continua a ser necessário grandes amostras de rolhas para poder obter resultados dado que a quebra da rolha é um fenómeno raro. Além disso eram necessários discos de cortiça com defeitos e condições muito restritas demorando, assim, a preparação da amostra.

Sugere-se como trabalho futuro, continuar a estudar o efeito do defeito “prego” nos discos de cortiça restringindo a gama de valores da área do prego de maior tamanho de modo a determinar um novo limiar de rejeição na maquina de Raios-X. Além disso é possível o estudo do efeito da humidade em discos defeituosos para poder verificar se humidificando as rolhas é possível evitar a quebra dos discos.

6.3 Apreciação Final

Com esta dissertação foi possível obter um melhor conhecimento sobre processos de otimização através de tratamentos estatísticos. Além disso foi possível uma melhor compreensão do setor industrial da cortiça e uma maior experiencia profissional.

Referências

1. S.A, R.I.-R.d.c. *Relvas II heritage*. [acedido em 2018 27 Feb]; Disponível em: <http://relvascork.com/website/heritage/>.
2. Fortes, M.A., M.E. Rosa, and H. Pereira, *A cortiça*. 2004: Instituto Superior Técnico.
3. APCOR. *O Sobreiro*. 2018 [acedido em 2018 11 Jun]; Disponível em: <http://www.apcor.pt/montado/sobreiro/>.
4. APCOR. *Boletim Estatístico*. 2018 [acedido em 2018 12 Jun]; Disponível em: http://www.apcor.pt/wp-content/uploads/2017/12/Boletim_Estatistico_APCOR_17_18.pdf.
5. Corticeira Amorim. *The art of cork*. [acedido em 2018 27 Feb]; Disponível em: https://www.amorim.com/xms/files/Documentacao/Brochura_Arte_Cortica_Small_EN.pdf.
6. Amorim. *Sobre o Sobreiro*. 2018 [acedido em 2018 17 Jun]; Disponível em: <https://amorimcorkcomposites.com/pt/porque-a-cortica/factos-e-curiosidades/o-sobreiro/>.
7. Amorim. *Cortiça Natural - Matéria prima e processo produtivo*. 2018 [acedido em 2018 18 Jun]; Disponível em: <https://www.amorimcork.com/pt/natural-cork/raw-material-and-production-process/>.
8. APCOR. *Rolhas naturais*. 2018 [acedido em 2018 18 Jun]; Disponível em: <http://www.apcor.pt/cortica/processo-de-transformacao/percurso-industrial/rolhas-naturais/>.
9. APCOR. *Cortiça - O que é?* 2018 [acedido em 2018 11 Jun]; Disponível em: <http://www.apcor.pt/cortica/o-que-e/>.
10. J. A. A. Gibson, L. and M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure And Properties*. Vol. 9. 1988.
11. Rives, J., et al., *Environmental analysis of the production of champagne cork stoppers*. Journal of Cleaner Production, 2012. 25: p. 1-13.
12. Varpe. *RX-IRIX*. 2018 [acedido em 2018 7 Mar]; Disponível em: http://www.varpe.com/wp-content/uploads/2017/11/IRIX_por.pdf.
13. Montgomery, D.C. and G.C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 2010: John Wiley & Sons.
14. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. 2008: John Wiley & Sons.
15. MINITAB. *What is a Hypothesis Test?* 2018 [acedido em 2018 14 Jun]; Disponível em: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/what-is-a-hypothesis-test/>.
16. Montgomery, D.C., *Introduction to Statistical Quality Control*. 2009: Wiley.
17. Wilson-Wilde, L., *The international development of forensic science standards – A review*. Forensic Science International, 2018. 288: p. 1-9.
18. Institut national de l'embouteillage et des industries du, c., *Bouchage de tirage et d'expédition pour vins mousseux de qualité produits dans des régions déterminées VMQPRD sur bague couronne - NF H 35-029*. 1994, [Paris]: INE.
19. Standardization, I.O.f. *Cylindrical cork stoppers -- Physical tests -- Part 2: Determination of mass and apparent density for agglomerated cork stoppers*. 2016; Disponível em: <https://www.iso.org/standard/36662.html>.

Anexo 1 Testes da massa volúmica e valor do Raios-X

Neste anexo são apresentadas todas as tabelas utilizadas para a obtenção da regressão linear

Tabela A.1 - Valores obtidos da massa volúmica para cada disco extra

Rolha	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
1	6,11	33,46	0,98	182,41	76
2	6,18	33,62	0,95	173,16	78
3	6,21	34	0,99	175,59	79
4	6,21	33,55	1,17	213,12	94
5	6,21	33,82	0,97	173,88	79
6	6,21	34,06	1	176,74	79
7	6,2	33,07	0,9	169,00	72
8	6,13	33,98	0,75	134,92	68
9	6,18	33,08	0,8	150,62	68
10	6,25	33,88	0,93	165,05	75
11	6,19	33,37	0,83	153,32	70
12	6,21	33,55	1,11	202,19	88
13	6,22	33,86	0,99	176,76	73
14	6,18	33,45	0,9	165,72	75
15	6,16	33,9	0,88	158,28	69
16	6,21	33,66	0,99	179,15	79
17	6,15	34,01	1,1	196,89	85
18	6,24	33,77	0,84	150,29	83
19	6,17	33,57	0,95	173,96	73
20	6,19	33,1	1,06	199,01	88
21	6,2	33,67	1,27	230,06	101
22	6,24	32,98	0,99	185,72	77
23	6,19	33,94	0,99	176,78	82
24	6,21	33,63	0,95	172,22	76
25	6,22	33,65	1,08	195,24	81
26	6,17	34,2	1,02	179,96	82
27	6,17	34,25	1,07	188,23	83
28	6,16	33,77	0,88	159,50	72
29	6,14	33,74	1,01	183,98	77
30	5,96	34	1,12	206,98	86

Tabela A.2 - Valores obtidos da massa volúmica para cada disco N1

Rolha	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
1	6,2	33,15	1,04	194,35	85
2	6,39	33,51	1,03	182,77	80
3	6,38	34,01	1,19	205,32	88
4	6,23	33,21	1,04	192,72	88
5	6,15	34,45	1,11	193,63	83
6	6,21	33,95	1,03	183,22	86
7	6,34	35,26	1,06	171,22	80
8	6,14	34,06	1,09	194,84	81
9	6,15	33,5	0,95	175,25	75
10	6,25	33,7	1,3	233,19	98
11	6,36	34,6	1,25	209,03	90
12	6,36	33,38	1,1	197,64	88
13	6,3	33,24	1,03	188,40	83
14	6,26	33,44	0,86	156,42	76
15	6,38	33,46	0,85	151,52	72
16	6,28	33,08	1,12	207,51	85
17	6,25	33,98	1,06	187,02	81
18	6,35	33,83	0,99	173,45	77
19	6,42	33,17	0,88	158,62	72
20	6,25	34,04	1,01	177,57	78
21	6,54	32,95	0,95	170,35	76
22	6,26	34,64	1,34	227,14	96
23	6,32	33,94	1,04	181,89	81
24	6,26	33,34	1,15	210,43	89
25	6,28	33,85	0,82	145,09	67
26	6,21	33,22	0,91	169,07	74
27	6,29	33,48	0,98	176,98	80
28	6,25	33,66	1,12	201,38	83
29	6,28	33,48	0,98	177,26	83
30	6,27	33,93	1,39	245,18	117
31	6,33	33,82	0,9	158,27	71
32	6,25	33,31	1	183,60	81
33	6,27	33,73	0,94	167,78	78
34	6,22	33,58	1,15	208,76	91
35	6,3	33,98	1,18	206,54	98

Tabela A.3 - Valores obtidos da massa volúmica para cada disco N2

Rolha	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
1	6,3	32,12	0,81	158,67	74
2	6,17	32,55	0,78	151,92	70
3	6,19	33,75	0,96	173,36	83
4	6,18	32,49	1,01	197,13	87
5	6,15	33	1,01	192,01	85
6	6,2	33,43	1,23	226,02	93
7	6,22	33,88	1,11	197,95	84
8	6,19	33,15	1,02	190,92	82
9	6,18	34,08	0,96	170,29	77
10	6,15	33,74	1,09	198,23	85
11	6,09	32,89	1,05	202,93	88
12	6,2	33,67	1,07	193,83	84
13	6,03	34,01	1,01	184,37	77
14	6,19	33,61	1,07	194,83	86
15	6,25	33,39	0,87	158,97	74
16	6,25	33,71	1	179,27	83
17	6,13	34,34	1,07	188,47	84
18	6,14	34,09	1	178,44	77
19	6,14	33,65	1,22	223,42	89
20	6,12	33,16	0,91	172,18	73
21	6,09	32,8	1,11	215,71	89
22	6,25	34,01	1,05	184,93	79
23	6,13	33,28	1	187,54	76
24	6,24	33,84	0,92	163,93	73
25	6,06	33,16	0,88	168,15	74
26	6,14	33,39	0,8	148,80	66
27	6,13	33,73	0,93	169,79	73
28	6,13	33,88	0,94	170,09	73
29	6,18	32,56	1,01	196,28	79
30	6,12	33,09	0,89	169,10	72
31	6,16	33,61	0,93	170,17	73
32	6,21	33,62	1,08	195,91	83
33	6,16	32,98	1,03	195,73	80
34	6,15	32,92	1	191,04	81
35	6,08	33,22	0,72	136,63	56

Tabela A.4 - Valores obtidos da massa volúmica para cada disco com cortiça delgado

Rolha	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
1	6,19	34,22	1,52	7,5	266,99	109
2	6,19	34,22	1,07	8	187,95	82
3	6,14	33,86	0,92	8,5	166,40	76
4	6,13	34,16	1,05	8,5	186,90	84
5	6,14	33,92	0,88	9	158,60	73
6	6,21	34,41	1,01	10	174,89	83
7	6,2	34,08	1,09	10	192,73	85
8	6,2	33,83	0,89	8	159,70	69
9	6,26	34,11	1	9	174,81	78
10	6,2	33,26	1	8,5	185,64	81
11	6,26	33,36	1,02	9,5	186,42	82
12	6,07	33,6	0,88	8,5	163,50	73
13	6,15	33,35	0,98	9	182,42	82
14	6,28	34,08	0,98	8,5	171,07	77
15	6,19	33,72	0,98	8,5	177,28	78
16	6,18	33,48	0,96	9	176,45	78
17	6,18	33,38	0,92	8	170,11	73
18	6,19	33,96	1,03	7,5	183,71	80
19	6,22	33,75	1,06	9	190,49	82
20	6,23	33,47	0,93	9	169,67	77
21	6,21	34,11	1,54	8	271,38	114
22	6,25	33,93	1,08	9,5	191,11	84
23	6,25	33,75	0,98	8,5	175,27	78
24	6,28	33,67	0,96	9,5	171,69	77
25	6,25	34,25	1,01	8,5	175,40	77
26	6,17	34,01	0,99	8,5	176,62	78
27	6,13	34,26	1,25	6,5	221,20	95
28	6,2	34,33	1,04	9	181,22	82
29	6,17	33,39	0,87	7	161,03	71
30	6,18	33,84	1,12	8	201,50	87
31	6,15	33,75	0,88	9	159,94	74
32	6,26	33,81	0,97	8,5	172,59	79
33	6,27	33,47	1,07	9	193,96	81
34	6,14	33,84	0,89	9	161,17	71
35	6,13	34,41	1,21	8,5	212,26	92
36	6,15	33,71	0,83	8	151,22	67
37	6,24	34,01	0,99	9	174,64	78
38	6,25	34,22	1,06	9,5	184,41	84
39	6,19	33,7	1,03	8,5	186,55	83
40	6,16	34,4	1,07	9	186,89	84

Tabela A.5 - Valores obtidos da massa volúmica para cada disco com cortiça meia marca

Rolha	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
1	6,21	34,51	1,03	9,5	177,32	77
2	6,22	34,62	1,16	8,5	198,12	85
3	6,18	34,11	0,93	8,5	164,68	72
4	6,15	34,4	1,12	9,5	195,95	89
5	6,18	33,18	0,85	8	159,07	65
6	6,22	33,73	1	9	179,92	78
7	6,18	33,91	1,08	9	193,50	81
8	6,22	33,63	1,13	8,5	204,52	83
9	6,14	33,88	0,84	8,5	151,75	63
10	6,18	33,66	0,94	9	170,93	73
11	6,14	34,51	1,02	9	177,60	77
12	6,14	33,86	1,2	10	217,04	96
13	6,21	34,21	1,15	10	201,47	92
14	6,21	33,7	1	9	180,53	80
15	6,16	34,1	1,07	8,5	190,20	84
16	6,12	33,75	0,9	8,5	164,38	72
17	6,18	33,64	0,97	9	176,60	75
18	6,2	33,98	0,92	9,5	163,63	73
19	6,17	34,13	1,17	10	207,27	95
20	6,16	34,22	1,03	9	181,81	79
21	6,19	33,81	0,88	8,5	158,35	67
22	6,26	33,93	1,04	9	183,74	83
23	6,1	33,88	0,86	8	156,38	65
24	6,21	33,75	1,04	9	187,20	80
25	6,21	33,87	0,98	9	175,15	78
26	6,14	33,98	0,95	8,5	170,62	71
27	6,1	34,32	1,27	10	225,06	93
28	6,2	33,61	0,91	9	165,43	69
29	6,13	33,96	0,85	8	153,09	62
30	6,17	34,18	1,04	9	183,70	78
31	5,97	34,22	0,9	9	163,91	67
32	6,18	33,08	1,01	9,5	190,16	83
33	6,13	33,5	1,1	9,5	203,59	89
34	6,17	34,08	1,18	9,5	209,66	95
35	6,21	33,59	1,23	9,5	223,51	93
36	6,2	33,73	0,95	9	171,48	73
37	6,1	33,95	1,22	8,5	220,93	89
38	6,16	33,78	1,25	8,5	226,42	96
39	6,16	34,14	1,13	9	200,39	88
40	6,17	34,22	1,15	9	202,66	88

Tabela A.6 - Valores obtidos da massa volúmica para cada disco com defeito prego

Rolha	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
1	6,19	33,65	1,06	192,56	83
2	6,19	33,77	0,98	176,76	80
3	6,17	34,79	1,22	208,01	89
4	6,11	34,12	0,99	177,21	81
5	6,16	34,65	1,08	185,93	91
6	6,18	34,31	1,25	218,77	98
7	6,14	34	0,82	147,09	68
8	6,17	33,83	0,98	176,70	81
9	6,21	34,41	1,21	209,52	93
10	6,16	33,8	1,03	186,35	85
11	6,12	33,45	1,15	213,83	96
12	6,02	33,76	1,08	200,42	88
13	6,13	33,75	1,06	193,29	90
14	6,04	34,12	0,96	173,83	86
15	6,12	34,11	1,04	185,96	81
16	6,04	34,04	0,86	156,46	71
17	6,13	34,15	1,09	194,13	90
18	6,19	32,98	1,22	230,72	90
19	6,14	34,02	1,07	191,72	85
20	6,21	33,74	1,41	253,95	104
21	5,98	33,48	1,65	313,42	122
22	6,18	33,86	1,18	212,05	84
23	6,11	33,57	1,2	221,89	88
24	6,13	33,93	1,15	207,48	92
25	6,2	33,74	1,42	256,16	103
26	6,13	33,82	1,35	245,15	99
27	6,17	34,15	1,38	244,19	97
28	6,16	33,87	1,17	210,81	91
29	6,17	34,23	1,37	241,29	100
30	6,2	33,39	1,12	206,30	88
31	6,13	34,05	1,53	274,10	109
32	6,17	33,94	1,1	197,06	88

Tabela A.8 - Valores obtidos da massa volúmica para cada disco terroso

Rolha	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
1	6,14	33,73	0,99	180,44	79
2	6,19	33,35	1,07	197,88	85
3	6,25	33,41	0,92	167,91	77
4	6,21	32,79	0,97	184,97	81
5	6,19	32,9	1,06	201,43	86
6	6,24	33,06	1,24	231,49	93
7	6,28	32,77	1,06	200,13	88
8	6,09	32,98	0,85	163,38	76
9	6,08	33,45	0,95	177,80	80
10	6,15	33,42	0,94	174,24	79
11	6,21	34,1	1,22	215,11	93
12	6,11	32,8	1,1	213,07	92
13	6,19	32,88	1,04	197,87	86
14	6,24	33,41	1,33	243,12	103
15	6,14	33,61	1	183,57	80
16	6,12	32,97	1,33	254,55	105
17	6,2	33,78	1,34	241,16	103
18	6,13	32,75	0,89	172,35	75
19	6,14	33,31	1,17	218,66	93
20	6,2	33	1,52	286,64	116
21	6,23	32,69	0,99	189,33	84
22	6,17	32,42	1,22	239,53	96
23	6,23	32,32	0,75	146,74	67
24	6,18	32,87	1,38	263,15	110
25	6,23	33,6	0,96	173,79	79
26	6,3	33,19	1,04	190,80	85
27	6,28	32,04	0,9	177,75	80
28	6,19	32,03	1,11	222,55	91
29	6,17	34,16	0,94	166,23	77
30	6,16	33,32	1,49	277,40	114
31	6,21	33,15	1,11	207,10	88
32	5,99	33,95	1,23	226,83	96
33	6,2	33,03	1,07	201,41	91
34	6,2	32,86	0,95	180,68	81
35	6,21	33,79	1,06	190,35	86
36	6,14	33,68	1,05	191,95	85
37	6,11	33,6	1,35	249,19	100

Tabela A.9- Valores obtidos da massa volúmica para cada disco húmidos

Rolha	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
1	6,21	34,51	1,03	9,5	177,32	77
2	6,22	34,62	1,16	8,5	198,12	85
3	6,18	34,11	0,93	8,5	164,68	72
4	6,15	34,4	1,12	9,5	195,95	89
5	6,18	33,18	0,85	8	159,07	65
6	6,22	33,73	1	9	179,92	78
7	6,18	33,91	1,08	9	193,50	81
8	6,22	33,63	1,13	8,5	204,52	83
9	6,14	33,88	0,84	8,5	151,75	63
10	6,18	33,66	0,94	9	170,93	73
11	6,14	34,51	1,02	9	177,60	77
12	6,14	33,86	1,2	10	217,04	96
13	6,21	34,21	1,15	10	201,47	92
14	6,21	33,7	1	9	180,53	80
15	6,16	34,1	1,07	8,5	190,20	84
16	6,12	33,75	0,9	8,5	164,38	72
17	6,18	33,64	0,97	9	176,60	75
18	6,2	33,98	0,92	9,5	163,63	73
19	6,17	34,13	1,17	10	207,27	95
20	6,16	34,22	1,03	9	181,81	79
21	6,19	33,81	0,88	8,5	158,35	67
22	6,26	33,93	1,04	9	183,74	83
23	6,1	33,88	0,86	8	156,38	65
24	6,21	33,75	1,04	9	187,20	80
25	6,21	33,87	0,98	9	175,15	78
26	6,14	33,98	0,95	8,5	170,62	71
27	6,1	34,32	1,27	10	225,06	93
28	6,2	33,61	0,91	9	165,43	69
29	6,13	33,96	0,85	8	153,09	62
30	6,17	34,18	1,04	9	183,70	78
31	5,97	34,22	0,9	9	163,91	67
32	6,18	33,08	1,01	9,5	190,16	83
33	6,13	33,5	1,1	9,5	203,59	89
34	6,17	34,08	1,18	9,5	209,66	95
35	6,21	33,59	1,23	9,5	223,51	93
36	6,2	33,73	0,95	9	171,48	73
37	6,1	33,95	1,22	8,5	220,93	89
38	6,16	33,78	1,25	8,5	226,42	96
39	6,16	34,14	1,13	9	200,39	88
40	6,17	34,22	1,15	9	202,66	88

Tabela A.10- Valores obtidos da massa volúmica para cada disco secos

Rolha	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Sinal do Raios-X
1	6,45	34,2	0,92	2,5	155,27	75
2	6,22	32,86	0,78	2	147,87	67
3	6,41	33,94	1,07	2,5	184,51	84
4	6,36	33,7	0,9	2,5	158,65	73
5	6,63	33,56	0,96	2	163,69	78
6	6,27	33,61	0,83	2,5	149,21	68
7	6,5	33,86	1,01	2	172,56	79
8	6,72	33,98	1,1	2	180,50	82
9	6,54	33,66	0,96	2,5	164,96	78
10	6,52	33,81	0,94	2	160,58	74
11	6,33	33,67	1,23	2	218,24	96
12	6,38	33,25	1,09	2	196,76	87
13	6,46	33,6	0,92	2,5	160,62	76
14	6,59	33,55	0,96	2	164,78	76
15	6,55	33,8	1,08	2,5	183,76	82
16	6,4	32,92	0,82	2	150,53	67
17	6,33	33,94	1,02	3	178,11	87
18	6,57	33,54	1	2	172,27	81
19	6,32	33,81	1,05	2	185,05	84
20	6,44	33,41	1,02	2	180,66	81
21	6,53	33,63	0,93	2	160,33	78
22	6,48	33,82	0,96	3	164,91	79
23	6,61	33,77	1,12	2	189,18	90
24	6,45	33,52	0,88	2	154,61	72
25	6,57	34,04	0,89	3	148,85	74
26	6,3	33,43	0,96	2	173,61	77
27	6,43	33,23	0,8	2,5	143,46	68
28	6,68	33,97	0,97	2	160,22	78
29	6,36	33,64	0,78	3	137,99	65
30	6,65	34,15	1	2	164,18	77
31	6,59	34,15	0,98	2	162,36	74
32	6,84	33,84	1,09	2	177,18	86
33	6,4	33,21	0,79	2	142,50	67
34	6,35	33,97	0,96	2	166,81	77
35	6,78	33,49	0,84	2,5	140,65	71
36	6,26	33,47	0,93	2,5	168,85	75
37	6,4	33,89	0,95	2	164,55	78
38	6,4	34,02	0,88	3	151,27	77
39	6,53	33,79	0,96	2	163,94	78
40	6,39	33,69	1,33	1,5	233,48	103

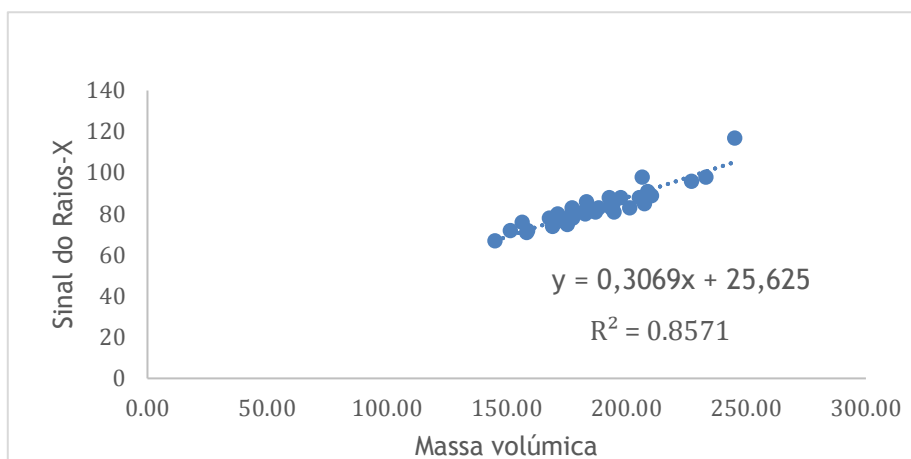


Figura A.1 - Massa volúmica versus massa volúmica do Raios-X de discos N1

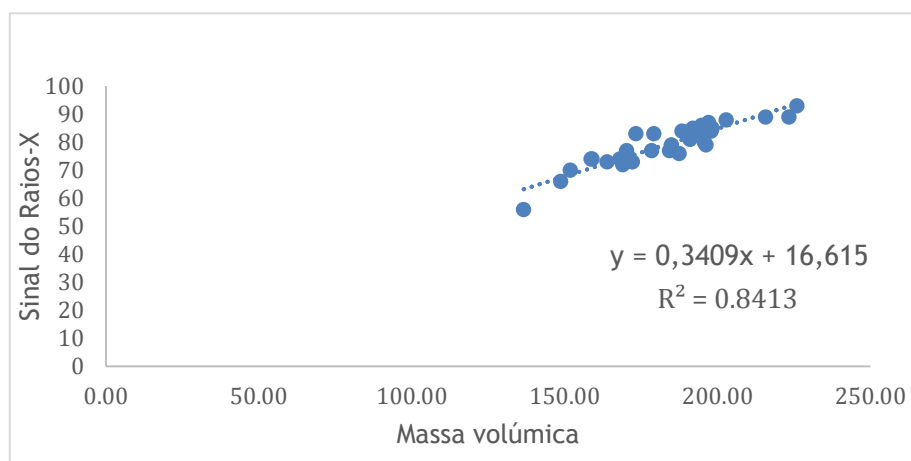


Figura A.2 - Massa volúmica versus massa volúmica do Raios-X de discos N2

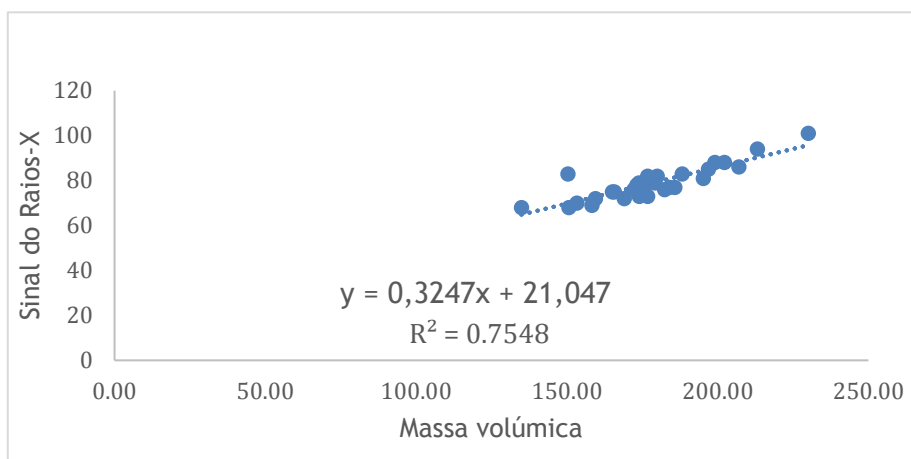


Figura A.3 - Massa volúmica versus massa volúmica do Raios-X de discos extra

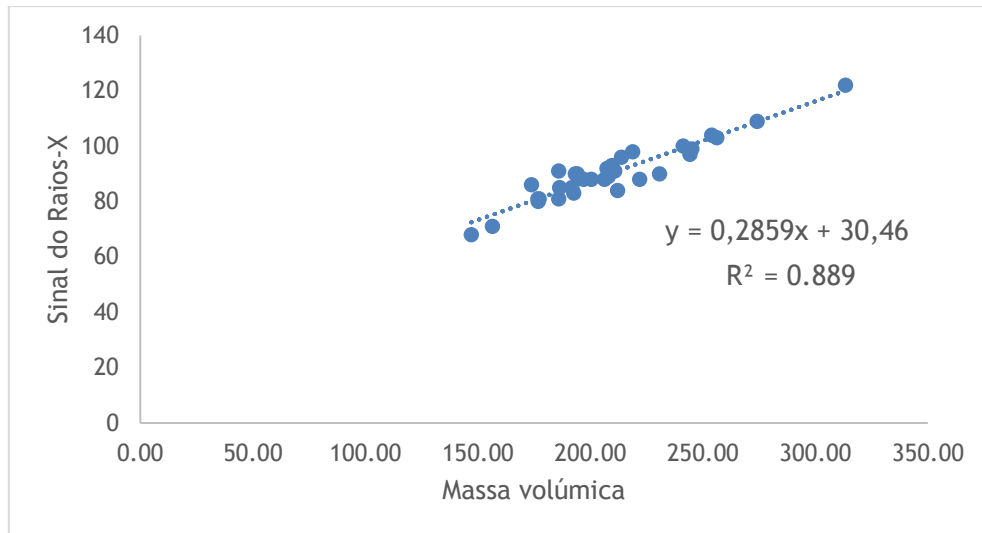


Figura A.4 - Massa volúmica versus massa volúmica do Raios-X de discos com o defeito “prego”

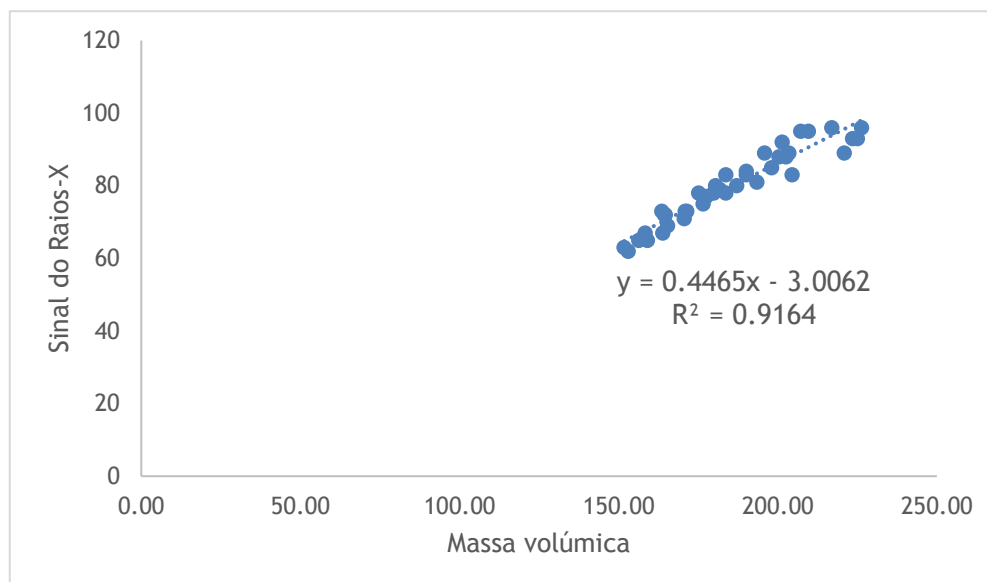


Figura A.5 - Massa volúmica versus massa volúmica do Raios-X de discos húmidos

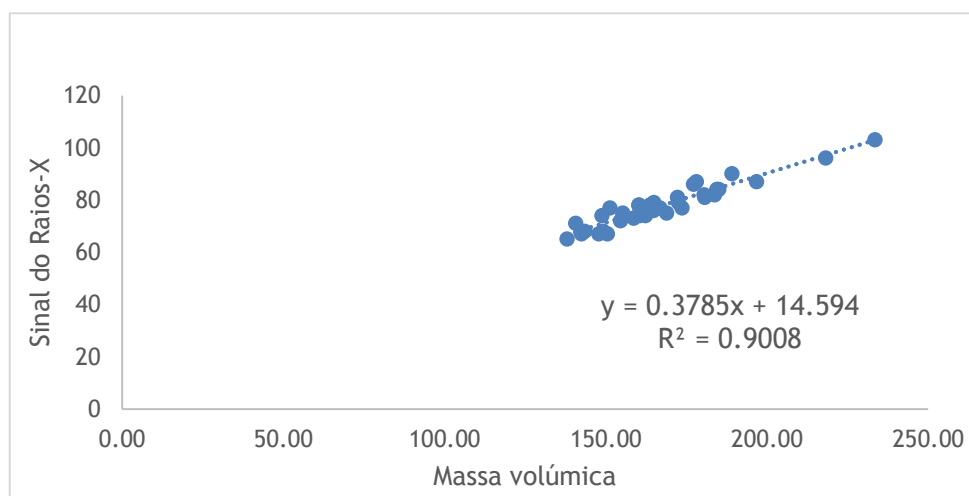


Figura A.6 - Massa volúmica versus massa volúmica do Raios-X de discos secos

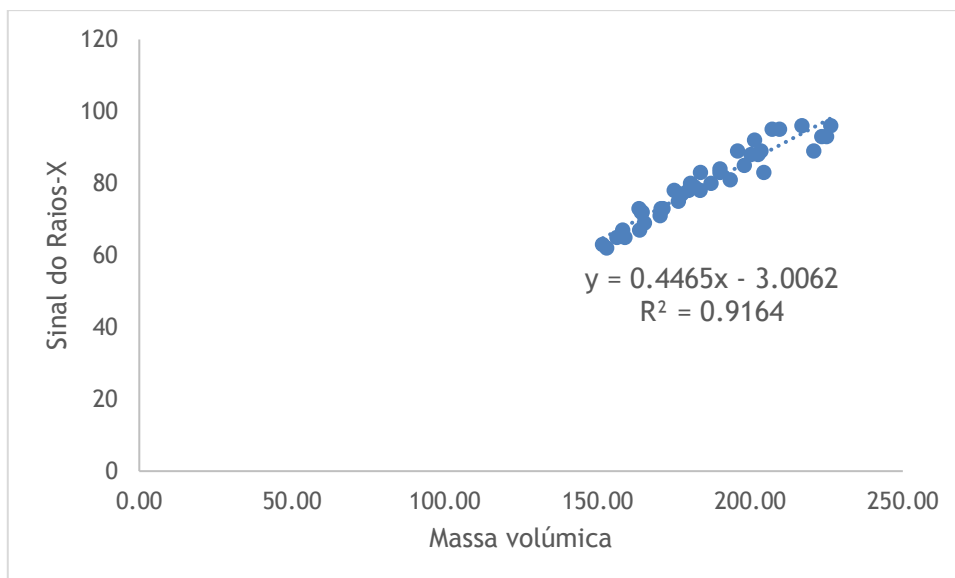


Figura A.7 - Massa volúmica versus massa volúmica do Raios-X de discos de cortiça meia marca

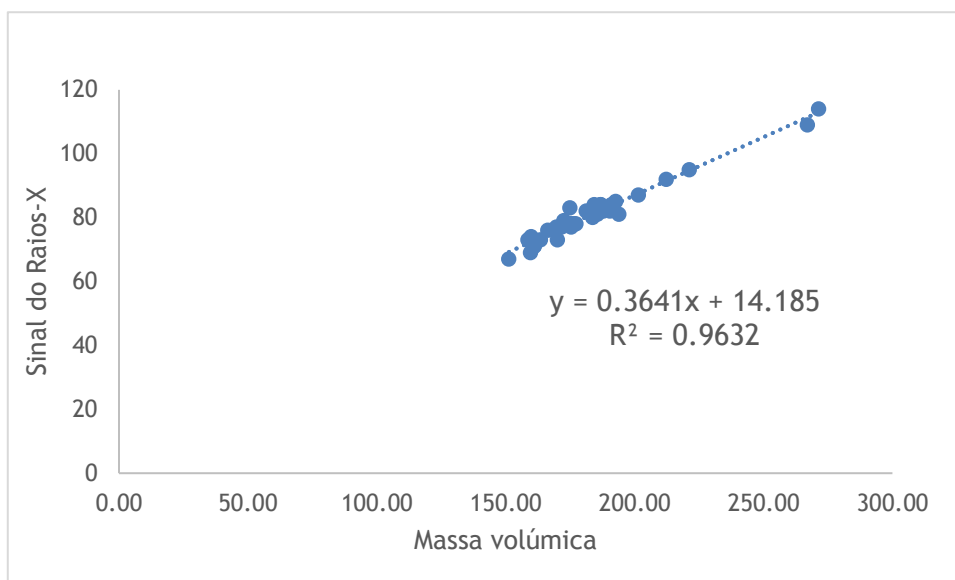


Figura A.8 - Massa volúmica versus massa volúmica do Raios-X de discos de cortiça delgado

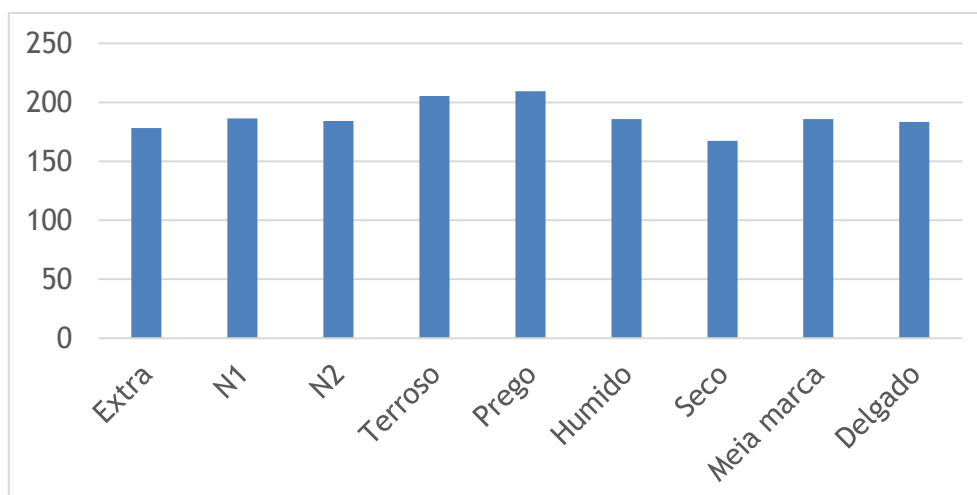


Figura A.9 - Massa volúmica para cada classe de discos

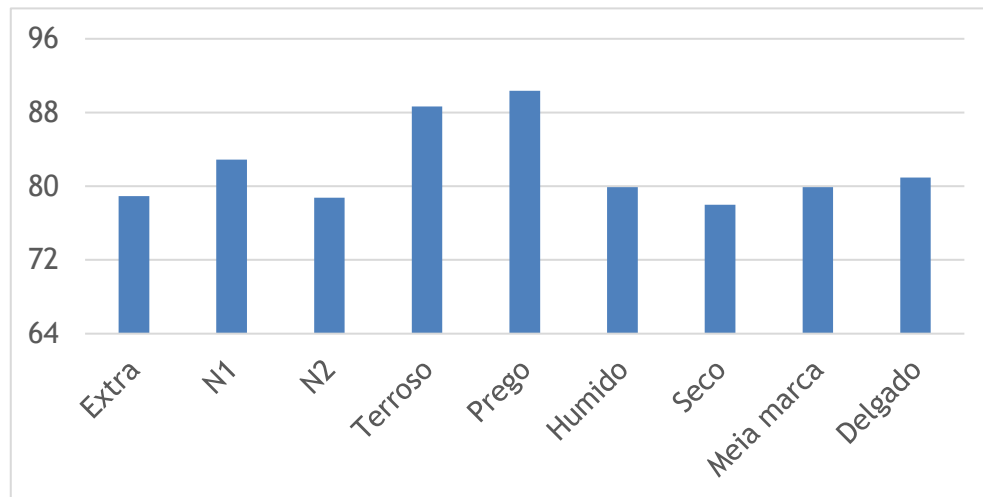


Figura A.10 - Sinal obtido pelo Raios-X para cada classe de discos

Anexo 2 Otimização da máquina CITCORK

Tabela A.11 - Valores obtidos do desenho de experiências com todos os parâmetros

Experiência	Velocidade de compressão	Velocidade de inserção	Diâmetro de aperto	Nível de inserção	Garrafa	Proporção de defeitos	Resultado Normalizado
1	-1	-1	1	1	-1	0,1	0,32
2	-1	-1	-1	-1	1	0,4	0,68
3	-1	-1	-1	1	-1	0,4	0,68
4	-1	1	1	-1	-1	0,2	0,46
5	-1	1	1	1	1	0,4	0,68
6	-1	1	-1	-1	-1	0,3	0,58
7	-1	1	-1	1	1	0,5	0,79
8	-1	1	-1	1	-1	0,2	0,46
9	-1	-1	-1	1	1	0,4	0,68
10	-1	1	1	-1	1	0,3	0,58
11	-1	-1	1	-1	-1	0,4	0,68
12	-1	1	-1	-1	1	0,4	0,68
13	-1	-1	1	-1	1	0,3	0,58
14	-1	-1	-1	-1	-1	0,5	0,79
15	-1	-1	1	1	1	0,4	0,68
16	-1	1	1	1	-1	0,4	0,68
17	1	-1	1	-1	1	1	1,57
18	1	-1	1	1	1	0,6	0,89
19	1	-1	-1	-1	1	0,1	0,32
20	1	-1	-1	1	-1	0,1	0,32
21	1	-1	-1	-1	-1	0,2	0,46
22	1	-1	1	1	-1	0,7	0,99
23	1	-1	1	-1	-1	0,3	0,58
24	1	1	1	-1	1	0,2	0,46
25	1	1	1	-1	-1	0,4	0,68
26	1	1	1	1	-1	0,5	0,79
27	1	1	-1	1	1	0,3	0,58
28	1	1	-1	-1	1	0,3	0,58
29	1	1	-1	-1	-1	0,1	0,32
30	1	1	1	1	1	0,3	0,58
31	1	-1	-1	1	1	0,3	0,58
32	1	1	-1	1	-1	0,3	0,58

Tabela A.12 - Valores obtidos do desenho de experiência após a eliminação de parâmetros

Experiência	Velocidade de Compressão	Diâmetro de Aperto	Proporção de defeitos	Resultado Normalizado
1	1	-1	0,1	0,32
2	1	1	0,4	0,68
3	1	1	0,4	0,68
4	1	-1	0,2	0,46
5	1	-1	0,4	0,68
6	1	1	0,3	0,58
7	1	1	0,5	0,79
8	1	1	0,2	0,46
9	1	1	0,4	0,68
10	1	-1	0,3	0,58
11	1	-1	0,4	0,68
12	1	1	0,4	0,68
13	1	-1	0,3	0,58
14	1	1	0,5	0,79
15	1	-1	0,4	0,68
16	1	-1	0,4	0,68
17	-1	-1	1	1,57
18	-1	-1	0,6	0,89
19	-1	1	0,1	0,32
20	-1	1	0,1	0,32
21	-1	1	0,2	0,46
22	-1	-1	0,7	0,99
23	-1	-1	0,3	0,58
24	-1	-1	0,2	0,46
25	-1	-1	0,4	0,68
26	-1	-1	0,5	0,79
27	-1	1	0,3	0,58
28	-1	1	0,3	0,58
29	-1	1	0,1	0,32
30	-1	-1	0,3	0,58
31	-1	1	0,3	0,58
32	-1	1	0,3	0,58
33	0	0	0,2	0,46
34	0	0	0,7	0,99
35	0	0	0,2	0,46
36	0	0	0,3	0,58

Tabela A.13 - Valores obtidos do desenho de experiência após a eliminação de parâmetros (continuação)

Experiência	Velocidade de Compressão	Diâmetro de Aperto	Proporção de defeitos	Resultado Normalizado
37	0	-1	0,4	0,68
38	0	-1	0,3	0,58
39	0	-1	0,3	0,58
40	0	-1	0,4	0,68
41	0	1	0,1	0,32
42	0	1	0,2	0,46
43	0	1	0,5	0,79
44	0	1	0,1	0,32
45	1	0	0,3	0,58
46	1	0	0,4	0,68
47	1	0	0,1	0,32
48	1	0	0,1	0,32
49	-1	0	0,5	0,79
50	-1	0	0,1	0,32
51	-1	0	0,1	0,32
52	-1	0	0,2	0,46

Tabela A.14 - Teste de validação do protocolo de ensaio

Garrafa	Resultado	Garrafa	Resultado
1	3	41	0
2	3	42	0
3	2	43	3
4	2	44	0
5	0	45	0
6	0	46	0
7	0	47	0
8	0	48	0
9	0	49	3
10	0	50	3
11	0	51	2
12	0	52	2
13	2	53	2
14	2	54	0
15	0	55	0
16	0	56	0
17	0	57	2
18	0	58	2
19	3	59	2
20	3	60	2
21	2	61	2
22	2	62	2
23	2	63	2
24	0	64	0
25	3	65	0
26	2	66	0
27	2	67	3
28	0	68	0
29	0	69	2
30	0	70	2
31	3	71	2
32	3	72	2
33	3	73	2
34	3	74	2
35	0	75	0
36	0	76	0
37	3		
38	2		
39	0		
40	0		

Anexo 3 Coeficientes determinados pelo Minitab

Tabela A.15- Coeficientes determinados pelo modelo do *Minitab*

Parâmetros	Coeficientes	Erro padrão	Valor-T	Valor-P
Constante	0,5136	0,0662	7,76	0
Velocidade de compressão	-0,0056	0,0311	-0,18	0,857
Diâmetro de aperto	-0,0623	0,0311	-2,00	0,05
Velocidade de compressão X Diâmetro de aperto	0,1082	0,0357	3,03	0,004

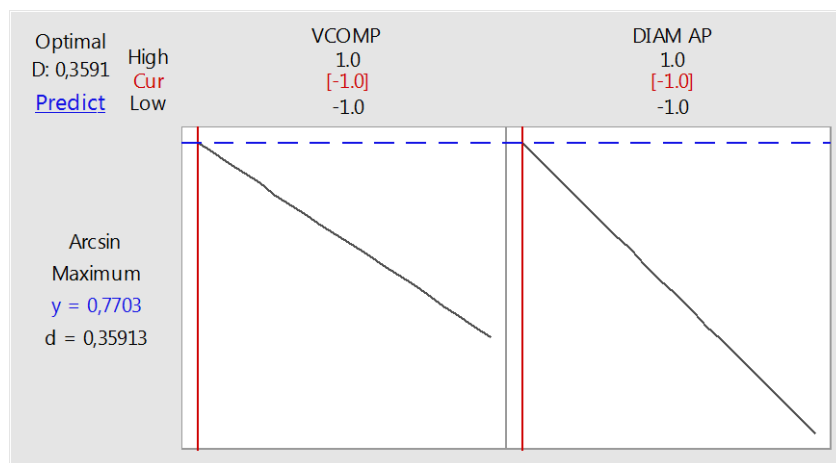


Figura A.11 - Parâmetros ótimos do modelo RSM

Anexo 4 Estudo do defeito “Prego”

Tabela A.15 - Resultados do rolhamento de discos com pregos entre 8-10 invisível junto da coroa

Rolha	Resultado	Rolha	Resultado
1	Desvio	41	Desvio
2	Desvio	42	Desvio
3	Desvio	43	Desvio
4	Desvio	44	Desvio
5	Conforme	45	Conforme
6	Conforme	46	Conforme
7	Conforme	47	Conforme
8	Conforme	48	Conforme
9	Conforme	49	Conforme
10	Conforme	50	Conforme
11	Desvio	51	Desvio
12	Desvio	52	Desvio
13	Conforme	53	Desvio
14	Conforme	54	Desvio
15	Conforme	55	Desvio
16	Conforme	56	Conforme
17	Conforme	57	Conforme
18	Conforme	58	Conforme
19	Conforme	59	Conforme
20	Conforme	60	Conforme
21	Quebra	61	Quebra
22	Desvio	62	Quebra
23	Conforme	63	Desvio
24	Conforme	64	Desvio
25	Conforme	65	Desvio
26	Conforme	66	Desvio
27	Conforme	67	Conforme
28	Conforme	68	Conforme
29	Conforme	69	Conforme
30	Conforme	70	Conforme
31	Desvio	71	Quebra
32	Desvio	72	Desvio
33	Desvio	73	Conforme
34	Desvio	74	Conforme
35	Conforme	75	Conforme
36	Conforme	76	Conforme
37	Conforme	77	Conforme
38	Conforme	78	Conforme
39	Conforme	79	Conforme
40	Conforme	80	Conforme

Tabela A.16 - Resultados do rolhamento de discos com pregos entre 8-10 invisível no centro

Rolha	Resultado	Rolha	Resultado
1	Quebra	41	Quebra
2	Quebra	42	Quebra
3	Conforme	43	Desvio
4	Conforme	44	Desvio
5	Conforme	45	Conforme
6	Conforme	46	Conforme
7	Conforme	47	Conforme
8	Conforme	48	Conforme
9	Conforme	49	Conforme
10	Conforme	50	Conforme
11	Quebra	51	Desvio
12	Quebra	52	Desvio
13	Quebra	53	Desvio
14	Desvio	54	Conforme
15	Desvio	55	Conforme
16	Conforme	56	Conforme
17	Conforme	57	Conforme
18	Conforme	58	Conforme
19	Conforme	59	Conforme
20	Conforme	60	Conforme
21	Desvio	61	Desvio
22	Conforme	62	Desvio
23	Conforme	63	Desvio
24	Conforme	64	Conforme
25	Conforme	65	Conforme
26	Conforme	66	Conforme
27	Conforme	67	Conforme
28	Conforme	68	Conforme
29	Conforme	69	Conforme
30	Conforme	70	Conforme
31	Quebra	71	Desvio
32	Quebra	72	Desvio
33	Conforme	73	Conforme
34	Conforme	74	Conforme
35	Conforme	75	Conforme
36	Conforme	76	Conforme
37	Conforme	77	Conforme
38	Conforme	78	Conforme
39	Conforme	79	Conforme
40	Conforme	80	Conforme

Tabela A.17 - Resultados do rolhamento de discos com pregos entre 8-10 visível no centro

Rolha	Resultado	Rolha	Resultado
1	Desvio	41	Desvio
2	Desvio	42	Desvio
3	Desvio	43	Desvio
4	Conforme	44	Conforme
5	Conforme	45	Conforme
6	Conforme	46	Conforme
7	Conforme	47	Conforme
8	Conforme	48	Conforme
9	Desvio	49	Desvio
10	Desvio	50	Conforme
11	Conforme	51	Conforme
12	Conforme	52	Conforme
13	Quebra	53	Conforme
14	Conforme	54	Conforme
15	Conforme	55	Conforme
16	Conforme	56	Conforme
17	Quebra	57	Conforme
18	Quebra	58	Conforme
19	Quebra	59	Desvio
20	Desvio	60	Desvio
21	Desvio	61	Desvio
22	Quebra	62	Conforme
23	Conforme	63	Conforme
24	Conforme	64	Conforme
25	Conforme	65	Conforme
26	Conforme	66	Conforme
27	Conforme	67	Conforme
28	Conforme	68	Conforme
29	Quebra	69	Conforme
30	Quebra	70	Conforme
31	Desvio	71	Conforme
32	Conforme	72	Conforme
33	Conforme	73	Conforme
34	Conforme	74	Conforme
35	Conforme	75	Desvio
36	Conforme	76	Desvio
37	Conforme	77	Desvio
38	Conforme	78	Desvio
39	Quebra	79	Desvio
40	Desvio	80	Desvio

Tabela A.18 - Resultados do rolhamento de discos com pregos entre 8-10 visível junto da coroa

Rolha	Resultado	Rolha	Resultado
1	Quebra	41	Quebra
2	Desvio	42	Desvio
3	Desvio	43	Desvio
4	Desvio	44	Desvio
5	Conforme	45	Conforme
6	Conforme	46	Conforme
7	Conforme	47	Conforme
8	Conforme	48	Conforme
9	Conforme	49	Quebra
10	Conforme	50	Quebra
11	Quebra	51	Conforme
12	Desvio	52	Conforme
13	Desvio	53	Conforme
14	Conforme	54	Conforme
15	Conforme	55	Conforme
16	Conforme	56	Conforme
17	Conforme	57	Conforme
18	Conforme	58	Conforme
19	Conforme	59	Conforme
20	Conforme	60	Conforme
21	Quebra	61	Desvio
22	Quebra	62	Desvio
23	Desvio	63	Conforme
24	Desvio	64	Conforme
25	Desvio	65	Conforme
26	Desvio	66	Conforme
27	Conforme	67	Conforme
28	Conforme	68	Conforme
29	Conforme	69	Quebra
30	Conforme	70	Quebra
31	Quebra	71	Desvio
32	Quebra	72	Desvio
33	Quebra	73	Conforme
34	Desvio	74	Conforme
35	Quebra	75	Conforme
36	Quebra	76	Conforme
37	Conforme	77	Conforme
38	Conforme	78	Conforme
39	Conforme	79	Quebra
40	Conforme	80	Quebra

Tabela A.19 - Resultados do rolhamento de discos com pregos entre 4-6 invisível no centro

Rolha	Resultado	Rolha	Resultado
1	Quebra	41	Conforme
2	Desvio	42	Conforme
3	Desvio	43	Conforme
4	Desvio	44	Conforme
5	Conforme	45	Conforme
6	Conforme	46	Conforme
7	Conforme	47	Conforme
8	Conforme	48	Conforme
9	Conforme	49	Conforme
10	Desvio	50	Conforme
11	Conforme	51	Desvio
12	Conforme	52	Conforme
13	Conforme	53	Desvio
14	Desvio	54	Desvio
15	Desvio	55	Conforme
16	Desvio	56	Conforme
17	Conforme	57	Conforme
18	Conforme	58	Conforme
19	Conforme	59	Conforme
20	Conforme	60	Conforme
21	Conforme	61	Conforme
22	Conforme	62	Conforme
23	Conforme	63	Conforme
24	Conforme	64	Conforme
25	Desvio	65	Conforme
26	Conforme	66	Conforme
27	Conforme	67	Conforme
28	Conforme	68	Conforme
29	Conforme	69	Conforme
30	Conforme	70	Desvio
31	Conforme	71	Conforme
32	Conforme	72	Conforme
33	Desvio	73	Desvio
34	Desvio	74	Desvio
35	Conforme	75	Desvio
36	Conforme	76	Conforme
37	Conforme	77	Conforme
38	Conforme	78	Conforme
39	Conforme	79	Conforme
40	Conforme	80	Conforme

Tabela A.20 - Resultados do rolhamento de discos com pregos entre 4-6 visível junto da coroa

Rolha	Resultado	Rolha	Resultado
1	Quebra	41	Quebra
2	Quebra	42	Desvio
3	Conforme	43	Desvio
4	Conforme	44	Conforme
5	Conforme	45	Conforme
6	Conforme	46	Conforme
7	Conforme	47	Conforme
8	Conforme	48	Conforme
9	Conforme	49	Conforme
10	Conforme	50	Conforme
11	Quebra	51	Quebra
12	Quebra	52	Quebra
13	Quebra	53	Quebra
14	Desvio	54	Desvio
15	Conforme	55	Conforme
16	Conforme	56	Conforme
17	Conforme	57	Conforme
18	Conforme	58	Conforme
19	Conforme	59	Conforme
20	Conforme	60	Conforme
21	Quebra	61	Quebra
22	Quebra	62	Desvio
23	Quebra	63	Desvio
24	Desvio	64	Desvio
25	Desvio	65	Conforme
26	Conforme	66	Conforme
27	Conforme	67	Conforme
28	Conforme	68	Conforme
29	Conforme	69	Conforme
30	Conforme	70	Conforme
31	Quebra	71	Quebra
32	Quebra	72	Quebra
33	Quebra	73	Desvio
34	Quebra	74	Desvio
35	Quebra	75	Desvio
36	Conforme	76	Desvio
37	Conforme	77	Conforme
38	Conforme	78	Conforme
39	Conforme	79	Conforme
40	Conforme	80	Conforme

Tabela A.21 - Resultados do rolhamento de discos com pregos entre 4-6 visível no centro

Rolha	Resultado	Rolha	Resultado
1	Desvio	41	Quebra
2	Desvio	42	Desvio
3	Conforme	43	Conforme
4	Conforme	44	Conforme
5	Conforme	45	Conforme
6	Conforme	46	Conforme
7	Conforme	47	Conforme
8	Conforme	48	Conforme
9	Conforme	49	Conforme
10	Conforme	50	Conforme
11	Desvio	51	Desvio
12	Desvio	52	Conforme
13	Desvio	53	Conforme
14	Conforme	54	Conforme
15	Conforme	55	Conforme
16	Conforme	56	Conforme
17	Conforme	57	Conforme
18	Conforme	58	Conforme
19	Conforme	59	Conforme
20	Conforme	60	Conforme
21	Quebra	61	Quebra
22	Desvio	62	Desvio
23	Desvio	63	Conforme
24	Desvio	64	Conforme
25	Conforme	65	Conforme
26	Conforme	66	Conforme
27	Conforme	67	Conforme
28	Conforme	68	Conforme
29	Conforme	69	Conforme
30	Conforme	70	Conforme
31	Desvio	71	Desvio
32	Desvio	72	Conforme
33	Conforme	73	Conforme
34	Conforme	74	Conforme
35	Conforme	75	Conforme
36	Conforme	76	Conforme
37	Conforme	77	Conforme
38	Conforme	78	Conforme
39	Conforme	79	Conforme
40	Conforme	80	Conforme

Tabela A.22 - Resultados do rolhamento de discos com pregos entre 4-6 invisível junto da coroa

Rolha	Resultado	Rolha	Resultado
1	Desvio	41	Conforme
2	Conforme	42	Conforme
3	Conforme	43	Conforme
4	Conforme	44	Desvio
5	Conforme	45	Conforme
6	Conforme	46	Conforme
7	Conforme	47	Conforme
8	Conforme	48	Conforme
9	Conforme	49	Conforme
10	Conforme	50	Conforme
11	Quebra	51	Conforme
12	Conforme	52	Conforme
13	Conforme	53	Conforme
14	Conforme	54	Desvio
15	Conforme	55	Desvio
16	Conforme	56	Conforme
17	Conforme	57	Conforme
18	Conforme	58	Conforme
19	Conforme	59	Conforme
20	Conforme	60	Conforme
21	Quebra	61	Conforme
22	Conforme	62	Conforme
23	Conforme	63	Conforme
24	Conforme	64	Desvio
25	Conforme	65	Conforme
26	Conforme	66	Conforme
27	Conforme	67	Conforme
28	Conforme	68	Conforme
29	Conforme	69	Conforme
30	Conforme	70	Conforme
31	Conforme	71	Conforme
32	Conforme	72	Conforme
33	Conforme	73	Conforme
34	Desvio	74	Quebra
35	Desvio	75	Desvio
36	Conforme	76	Conforme
37	Conforme	77	Conforme
38	Conforme	78	Conforme
39	Conforme	79	Conforme
40	Conforme	80	Conforme