

Processo de fundição por cera perdida de próteses médicas em ligas CoCrMo vazadas em forno rotativo *rollover*

Catarina Félix Machado

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Rui Jorge de Lemos Neto

Coorientadora na FEUP: Prof. Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte

Orientador na Zollern & Comandita: Eng. João Bernardo Ferreira



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro 2018

“Conhecimento não é aquilo que se sabe, mas o que se faz com aquilo que se sabe.”

Aldous Huxley

Resumo

Esta dissertação, que decorreu na empresa *Zollern & Comandita*, tem como principal objetivo selecionar as gamas de funcionamento do processo de fusão e vazamento em forno *rollover*, recorrendo ao design de experiências (DOE). O vazamento em forno *rollover* permite que o metal líquido seja transferido horizontalmente para o interior da moldação minimizando a turbulência.

Numa primeira fase, foi feito um levantamento de possíveis fatores que podem afetar o vazamento em forno *rollover*. De entre os vários fatores, selecionaram-se apenas três: tempo de enchimento, temperatura de vazamento e temperatura de pré-aquecimento da moldação. Cada um destes fatores foi estudado em dois níveis, por isso, no total fizeram-se oito ensaios com diferentes combinações de fatores. Para além do estudo dos fatores isoladamente, a utilização da técnica do Fatorial Completo, permitiu estudar também todas as interações entre estes fatores.

Após os oito ensaios, foram analisados os oito cachos vazados e classificados segundo um índice que é função do número de defeitos (detetados por inspeção visual, líquidos penetrantes e Raio x) e custo dos mesmos. A análise de variância permitiu concluir que o tempo de enchimento e a temperatura de vazamento são os fatores mais significativos, mas que existem interações que também são significativas no processo. A melhor combinação de fatores para obter peças dentro do nível de qualidade especificado pelo cliente é: tempo de enchimento de 5s, temperatura de vazamento de 1510°C e temperatura de pré-aquecimento do cacho de 1100°C.

Por fim, para o cacho com melhor combinação de fatores, analisou-se a microestrutura e sanidade (nomeadamente microrechupe) de uma peça desse cacho.

Palavras-chave: fundição de precisão, fundição por cera perdida, vazamento *rollover*, próteses, biomateriais, biocompatibilidade, liga CoCrMo, microestrutura, desenho de experiências (DOE)

Abstract

This dissertation, which was held at the company Zollern & Comandita, has as main objective to select the ranges of operation of the rollover furnace, using the Design of experiments (DOE). The rollover furnace allows the liquid metal to be transferred horizontally into the mold without surface turbulence.

In a first phase, a survey was made of possible factors that could affect the rollover furnace leakage. Among the several factors, only three were selected: filling time, pouring temperature and preheating temperature of the ceramic shell. Each of these factors was studied at two levels, so in total there were eight trials with different combinations of factors. Besides the study of factors alone, the use of the Full Factorial Design allowed to study all interactions between these factors.

After the eight trials, the eight castings were analyzed and classified according to an index that is a function of the number of defects (detected by visual inspection, penetrating liquids and x-ray) and cost of the same. The analysis of variance allowed to conclude that the filling time and the pouring temperature are the most significant factors, but that there are interactions that are also significant in the process. The best combination of factors to get parts within the level of quality imposed by the customer is: filling time of 5s, pouring temperature of 1510°C and preheating temperature of the ceramic shell of 1100°C.

Finally, for the castings with the best combination of factors, the microstructure and sanity (namely microrechupe) of one of the pieces of this cluster were analyzed.

Key words: investment casting, lost wax casting, tilt casting, rollover, prosthesis, biomaterials, biocompatibility, CoCrMo alloy, microstructure, design of experiments (DOE)

Agradecimentos

Ao professor Rui Neto e à professora Teresa Duarte, orientador e coorientadora na FEUP, agradeço a disponibilidade e contribuições dadas para a realização da dissertação.

Ao Engº João Ferreira, orientador na *Zollern & Comandita*, pelo acompanhamento diário durante todo o estágio.

À *Zollern & Comandita* pela oportunidade de realizar o estágio curricular e assim contactar com o ambiente industrial. À equipa do *rollover*, em especial ao Filipe e ao Mário, pelo empenho e profissionalismo durante a realização dos vazamentos no forno *rollover*. Ao laboratório metalográfico, em especial ao Isaque, pela ajuda na preparação e análise das amostras. A todos os restantes colaboradores da *Zollern & Comandita* com quem tive a possibilidade de contactar, deixo também o meu agradecimento.

Ao INEGI, em especial à Andreia, técnica dos ensaios mecânicos, pela disponibilidade em realizar os ensaios de compressão nas suas instalações.

Como um culminar de todo o percurso académico, agradeço aos amigos que a FEUP me trouxe e que me acompanharam nestes anos.

A toda a minha família por sempre me incentivarem e apoiarem durante todo o percurso académico.

Ao Bruno, um agradecimento especial, pela confiança e incentivo que me deu durante estes meses de estágio e pela paciência e apoio nos momentos mais difíceis.

Este trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito do projeto com a referência POCI-01-0145-FEDER-032460, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (Compete2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Índice de conteúdo

1. Introdução	1
1.1. Apresentação da Zollern	1
1.2. Enquadramento e objetivos do projeto.....	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. Enquadramento teórico	5
2.1. Fundição por cera perdida.....	5
2.1.2. Características e etapas do processo	5
2.1.2. Vazamento em forno rollover	8
2.2. Biomateriais	13
2.2.1. Requisitos dos biomateriais metálicos usados em próteses	14
2.2.2. Principais biomateriais metálicos para próteses	18
2.3. Liga ASTM F75	23
2.3.1. Composição química.....	23
2.3.2. Propriedades mecânicas	25
2.3.3. Diagrama de equilíbrio	26
2.3.4. Microestrutura.....	28
2.4. Planeamento de experiências (DOE)	30
2.4.1. Definição, terminologia e fundamentos	31
2.4.2. Tipos de DOE	32
2.4.3. Etapas do DOE.....	32
2.4.4. Análise de variância (ANOVA).....	33

3. Processo de fabrico na Zollern.....	35
3.1. Moldes.....	36
3.2. Injeção.....	36
3.3. Soldadura	37
3.4. Revestimento cerâmico.....	38
3.5. Descerificação e pré-queima.....	40
3.6. Sinterização, fusão e vazamento	40
3.7. Acabamentos e ensaios não destrutivos.....	41
4. Material e métodos.....	45
4.1. Requisitos do cliente	45
4.2. Planeamento da experiência.....	46
4.2.1. Definição do problema.....	46
4.2.2. Seleção dos fatores e níveis	48
4.2.3. Seleção da matriz de experiências	55
4.2.4. Definição dos restantes parâmetros não considerados na matriz de experiências	56
4.3. Força de aperto.....	61
5. Resultados e discussão	65
5.1. Fusão, sinterização e vazamento.....	65
5.2. Arrefecimento	68
5.3. Análise das peças	70
5.3.1. Cacho 31	70
5.3.2. Cacho 32	72
5.3.3. Cacho 33	74
5.3.4. Cacho 34	77
5.3.5. Cacho 35	80
5.3.6. Cacho 36	82
5.3.7. Cacho 37	83

5.3.8. Cacho 38	85
5.3.9. Comparação entre cachos	87
5.4. Análise de resultados DOE	92
5.4.1. Apresentação de resultados.....	92
5.4.2. Efeito dos fatores e interações	93
5.4.3. Análise de variância (ANOVA).....	97
5.4.4. Seleção da melhor combinação de parâmetros	99
5.4.5. Modelo de regressão	100
5.4.6. Análise de resíduos	102
5.4.7. Discussão dos resultados obtidos no DOE.....	105
5.5. Análise metalográfica dos melhores cachos a nível visual	106
5.5.1. Sanidade.....	107
5.5.2. Microestrutura.....	108
6. Conclusões	111
Referências.....	115
Anexos	118

Índice de figuras

Figura 1 – Distribuição geográfica do grupo Zollern (Zollern).....	1
Figura 2 - Etapas gerais do processo de fundição por cera perdida (American Foundrymen's Society 1993)	6
Figura 3 - Efeito da velocidade (4, 5, 6 s) de enchimento na turbulência superficial (Djambazov and Pericleous 2011).....	11
Figura 4 - Efeito da velocidade de enchimento (4, 5, 6 s) na perda de sobreaquecimento (Djambazov and Pericleous 2011)	11
Figura 5 - Efeito do perfil de velocidade (constante e parabólico) na turbulência superficial (Djambazov and Pericleous 2011)	12
Figura 6 - Janela de operação para obter fundidos viáveis por tilt casting (Campbell 2015)..	12
Figura 7 - Efeito da temperatura de pré-aquecimento da moldação na solidificação prematura do metal fundido (Djambazov and Pericleous 2011).....	13
Figura 8 - Relação entre resistência à polarização e biocompatibilidade de metais puros, ligas CoCr e aços inoxidáveis (Davis 2003).....	15
Figura 9 - Interface entre a prótese de titânio e o biolíquido (Park and Bronzino 2003)	19
Figura 10- Diagrama de equilíbrio Co-Cr (Silva 2015).....	27
Figura 11 - Diagrama de equilíbrio Co-Mo (Silva 2015)	27
Figura 12 - Diagrama de equilíbrio Cr-Mo (Silva 2015).....	28
Figura 13 - Microestrutura do bruto de fundição da liga ASTM F75 (Ratner et al. 2009).....	29
Figura 14 – Principais fases presentes na microestrutura do bruto de fundição da liga ASTM F75 (Giacchi, Fornaro, and Palacio 2012)	29
Figura 15 - Tabela ANOVA para um fator (Lima, 2010).....	34
Figura 16 - Regiões de rejeição e não-rejeição para distribuição F (Galdaméz, 2002).....	34
Figura 17 - Processo de fabrico de próteses femorais na ZCP	35
Figura 18 - Injeção em cera de próteses femorais e arrefecimento em “gabarits”	37

Figura 19 - Disposição das peças femorais na árvore de 4 fina e pormenor da colagem dos pinos	37
Figura 20 – Revestimento manual da primeira camada.....	39
Figura 21 - Revestimento manual da segunda camada.....	39
Figura 22 - Revestimento manual da terceira camada	39
Figura 23 - Forno rollover.....	41
Figura 24 - Sequência de etapas de acabamentos das peças femorais	42
Figura 25 - Sequência de recuperação das peças femorais	42
Figura 26 - Desenho da peça femoral (desenho confidencial).....	46
Figura 27 - Esquema de referências das peças.....	47
Figura 28 - Diagrama de Ishikawa com os fatores que afetam a qualidade das peças vazadas em forno rollover	49
Figura 29 - Termopar utilizado e registador de temperatura	54
Figura 30 - Carga a utilizar	56
Figura 31 - Saída de Árgon para proteção do banho	57
Figura 32 - Tampa do forno para proteção durante a fusão.....	57
Figura 33 - Marcação dos cachos do lado para onde se realiza a rotação do forno.....	57
Figura 34 - Movimentações dos operadores durante a fusão e vazamento em forno rollover	60
Figura 35 - Cadinho após primeiro dia de vazamentos.....	65
Figura 36 - Cadinho após segundo dia de vazamentos	66
Figura 37 - Carros de arrefecimento do primeiro dia de vazamentos.....	69
Figura 38 - Carro de arrefecimento do segundo dia de vazamentos.....	69
Figura 39 – Defeito detetado na peça 31R11 rejeitada na inspeção visual.....	71
Figura 40 - Defeito detetado na peça 33L21 rejeitada na inspeção visual.....	75
Figura 41 - Defeito detetado na peça 33R22 rejeitada na inspeção visual	76
Figura 42 – Defeitos detetados na peça 33R41 rejeitada na inspeção visual.....	76
Figura 43 - Defeito detetado na peça 34L21 rejeitada na inspeção visual.....	78
Figura 44 - Defeito detetado na peça 34R44 rejeitada na inspeção visual	79
Figura 45 - Defeito detetado na peça 35L11 rejeitada na inspeção visual.....	81
Figura 46 - Defeito detetado na peça 38L23 rejeitada na inspeção visual.....	86
Figura 47 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios	93
Figura 48 - Valores críticos do teste K-S.....	104
Figura 49 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	105

Figura 50 - Plano de corte para análise metalográfica.....	107
Figura 51 - Cluster de inclusões observado na peça 32L23.....	107
Figura 52 - Microrechupe observado na peça 32L32	108
Figura 53 – Microrechupe observado na peça 32L32.....	108
Figura 54 - Microrechupe observado na peça 32L32	108
Figura 55 – Mapa das zonas analisadas no primeiro nível de ataque eletrolítico.....	109
Figura 56 - Mapa das zonas analisadas no segundo nível de ataque eletrolítico.....	109
Figura 57 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 1).....	110
Figura 58 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 2).....	110
Figura 59 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 3).....	110
Figura 60 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 4).....	110
Figura 61 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 5).....	110

Índice de tabelas

Tabela 1 - Elementos químicos no corpo humano (16)	15
Tabela 2 - Principais requisitos mecânicos, físicos e biológicos das próteses (17).....	18
Tabela 3 - Composição química do aço austenítico 316L (19)	19
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço austenítico 316L (19).....	19
Tabela 5 - Composição química dos vários graus de titânio puro e da liga Ti6Al4V (14)	20
Tabela 6 - Propriedades mecânicas dos vários graus de titânio puro e da liga Ti6Al4V (14).	20
Tabela 7 - Composição química das ligas Co-Cr (14).....	21
Tabela 8 - Propriedades mecânicas das ligas Co-Cr (Chen, 2015).....	22
Tabela 9 - Principais vantagens e desvantagens dos biomateriais metálicos (10).....	23
Tabela 10 - Composição química da liga ASTM F75 (20).....	24
Tabela 11 - Influência dos elementos de liga (21).....	25
Tabela 12 - Propriedades mecânicas da liga ASTM F75 (System, 2007)	26
Tabela 13 - Fatores selecionados e respectivos níveis.....	54
Tabela 14 - Matriz de experiências (A – Tempo de enchimento; B – Temperatura de vazamento; C – Temperatura de pré-aquecimento do cacho)	55
Tabela 15 - Fatores constantes ao longo dos ensaios.....	56
Tabela 16 - Movimentações de cada operador durante a fusão e vazamento em forno rollover	59
Tabela 17 - Ensaios a frio para aferir o tempo entre o rotativo e o rollover	61
Tabela 18 - Comparação da composição química da liga 9234 com a da liga 9100	67
Tabela 19 - Parâmetros utilizados em cada vazamento	68
Tabela 20 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 31 nos ensaios de Raios x, inspeção visual e líquidos penetrantes	71
Tabela 21 - Classificação global das peças do cacho 31	72
Tabela 22 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 32 nos ensaios de Raios x, inspeção visual e líquidos penetrantes	73

Tabela 23 - Classificação global das peças do cacho 32	74
Tabela 24 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 33 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes	75
Tabela 25 - Classificação global das peças do cacho 33	77
Tabela 26 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 34 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes	78
Tabela 27 - Classificação global das peças do cacho 34	79
Tabela 28 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 35 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes	80
Tabela 29 - Classificação global das peças do cacho 35	81
Tabela 30 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 36 nos ensaios Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes	82
Tabela 31 - Classificação global das peças do cacho 36	83
Tabela 32 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 37 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes	84
Tabela 33 - Classificação global das peças do cacho 37	85
Tabela 34 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 38 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes	86
Tabela 35 - Classificação global das peças do cacho 38	87
Tabela 36 - Comparação entre cachos – inspeção visual.....	88
Tabela 37 - Comparação entre cachos - líquidos penetrantes.....	89
Tabela 38 – Comparação entre cachos – Raio X.....	89
Tabela 39 - Comparação entre cachos – Global – 12 peças	90
Tabela 40 – Variável de resposta	91
Tabela 41 – Matriz com os resultados dos ensaios (A – Tempo de enchimento; B – Temperatura de vazamento; C – Temperatura de pré-aquecimento do cacho).....	92
Tabela 42 – Algoritmo de Yates – cálculo de efeitos e soma de quadrados.....	93
Tabela 43 - Efeito dos fatores A, B e C	94
Tabela 44 - Efeito das interações AB, AC e BC.....	95
Tabela 45- Efeito da interação ABC	96
Tabela 46 - Percentagem de contribuição de cada fator	97
Tabela 47 – Análise de variância (ANOVA).....	99
Tabela 48 - Algoritmo de Yates invertido - cálculo de resíduos	103

Tabela 49 - Teste K-S 104

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Classificação total dos fatores	52
Gráfico 2 - Classificação total das interações	53
Gráfico 3 - Curva do ensaio de compressão para aferir a força necessária para que garanta estabilidade durante o vazamento	62
Gráfico 4 - Ensaio de compressão com dois cachos cerâmicos.....	63
Gráfico 5 – Índice de classificação dos cachos.....	91
Gráfico 6 - Efeito do fator A (Tempo de enchimento)	94
Gráfico 7 - Efeito do fator B (Temperatura de vazamento).....	95
Gráfico 8 - Efeito do fator C (Temperatura de pré-aquecimento)	95
Gráfico 9 - Efeito da interação AB (A – Tempo de enchimento; B – Temperatura de vazamento)	96
Gráfico 10 - Efeito da interação AC (A – Tempo de enchimento; C – Temperatura de pré- aquecimento).....	96
Gráfico 11 - Efeito da interação BC (B – Temperatura de vazamento; C – Temperatura de pré- aquecimento).....	97
Gráfico 12 - Pareto dos efeitos.....	98

1. Introdução

A presente dissertação, realizada na *Zollern & Comandita*, tem como tema “Processo de fundição por cera perdida de próteses médicas em ligas CoCrMo vazadas em forno rotativo rollover”.

Neste capítulo, é feita uma contextualização do projeto em questão, fazendo-se uma breve apresentação da empresa, dos objetivos do projeto e da metodologia adotada para a consumação dos mesmos.

1.1. Apresentação da Zollern

O grupo *Zollern* é considerado um dos pioneiros na indústria metalúrgica alemã, contando já com 300 anos de experiência. O grupo foi fundado, em 1708, pelo príncipe *Meinrad II de Hohenzollern* no sul da Alemanha. Atualmente, a casa mãe situa-se em Sigmaringendorf, na Alemanha, e o grupo possui cerca de quinze fábricas e sete subsidiárias espalhadas por diversos países, como mostra a Figura 1, empregando mais de 3200 pessoas no total. Em 2015 obteve um volume de vendas de cerca de 600 milhões de euros.

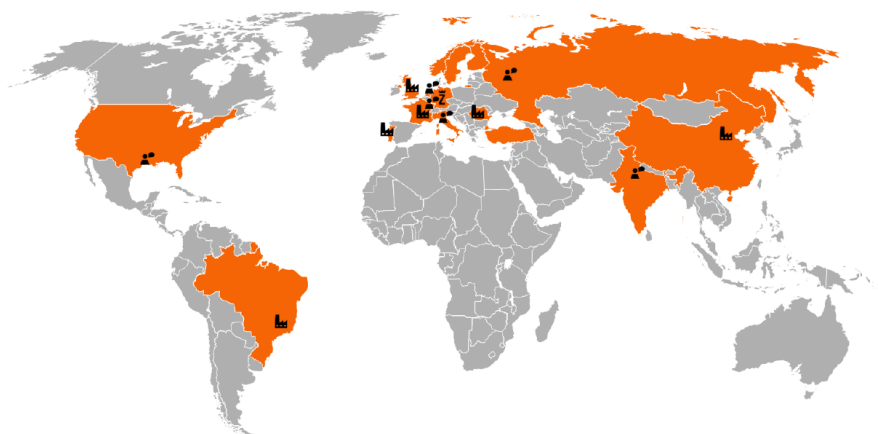


Figura 1 – Distribuição geográfica do grupo Zollern (Zollern)

A *Zollern & Comandita (ZCP)* é uma fundição de precisão que utiliza o processo de fundição por cera perdida. A ZCP situa-se na Maia e foi fundada em 1991, sendo a primeira unidade formada fora da Alemanha. Produz peças técnicas segundo os requisitos do desenho e especificações dos clientes em variadíssimos aços e superligas de níquel para vários mercados como a indústria automóvel, aeronáutica, energia, médica, máquinas e ferramentas, e diversas outras áreas. Produz peças a partir de 1-2 g até 15 kg, séries pequenas de 5 a 10 peças por lote como grandes séries de 1.000 a 100.000 peças por lote.

1.2. Enquadramento e objetivos do projeto

A presente dissertação realizada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica foi desenvolvida em ambiente empresarial na ZCP com o tema “Processo de fundição por cera perdida de próteses médicas em ligas CoCrMo vazadas em forno rotativo *rollover*”. Como foi referido, a ZCP fornece componentes para várias indústrias, incluindo aeronáutica e automóvel, e está há alguns anos a tentar entrar no mercado na área de *medical*. Assim, a empresa encontra-se em constante desenvolvimento no processo de fabrico de próteses, tendo inclusivamente, uma parceria com o INEGI nesta área. Com vista a melhorar a qualidade das próteses e, assim, conseguir a aprovação por parte dos clientes, a ZCP investiu num forno *rollover* para o vazamento das próteses. Com a aquisição deste forno, surgiu a necessidade de definir os parâmetros ideais de vazamento de forma a garantir a obtenção de peças dentro dos níveis de qualidade especificados pelo cliente. Foi assim proposto pela empresa que a seleção das gamas de funcionamento do forno fosse realizada com recurso ao design de experiências (DOE), uma ferramenta poderosa em várias áreas nomeadamente na engenharia.

Assim, os principais objetivos desta dissertação são:

- Avaliação do estado da arte com base na literatura disponível;
- Definição das gamas de funcionamento do forno *rollover*;
- Análise microestrutural do bruto de fundição.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos: Introdução, Enquadramento teórico, Processo de fabrico de próteses na ZCP, Material e métodos, Discussão de resultados e Conclusões.

No presente capítulo foi realizada uma introdução à empresa, ao projeto e seus objetivos.

No capítulo 2 é efetuado um enquadramento teórico dos conceitos abordados e que servirão de suporte a toda a dissertação. O enquadramento teórico inclui os seguintes subcapítulos:

- Fundição por cera perdida: são apresentadas as principais características e etapas do processo. Para além disso, é feito um levantamento dos defeitos mais recorrentes deste processo de fabrico. Por fim, tendo em conta que o tema desta dissertação é o vazamento em forno *rollover*, foi feito um estudo sobre o estado da arte do vazamento por *tilt casting*, onde foi incluído, uma breve descrição sobre as características e vantagens desta variante de vazamento e os fatores que mais influenciam o vazamento por *tilt casting*.
- Biomateriais metálicos: são apresentados os principais requisitos e biomateriais metálicos utilizados no fabrico de próteses médicas.
- Liga ASTM F75: é feito um estudo mais detalhado desta liga, incluindo, composição química, propriedades mecânicas e microestruturais.
- Planeamento de experiências (DOE): tendo em conta que se pretende planejar ensaios para a implementação do vazamento em forno *rollover*, será feita uma revisão sobre o planeamento de experiências onde se inclui definição, terminologia e etapas do DOE.

No capítulo 3, é descrito o processo de fabrico de próteses na ZCP e feita uma análise de problemas em cada setor que podem causar defeitos nas peças finais.

O capítulo 4 serve de preparação dos ensaios para determinação das janelas de funcionamento do forno *rollover*, recorrendo ao planeamento de experiências. Uma vez que o objetivo é obter peças com qualidade dentro dos níveis especificados pelo cliente, é feito um levantamento dessas especificações e posteriormente são descritas todas as etapas de preparação dos ensaios.

No capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de vazamento no forno *rollover*. A análise de resultados foi feita recorrendo à ANOVA (*Analysis of Variance*).

Por último, no capítulo 6, são retiradas as principais conclusões e sugestões de melhoria para implementação numa perspetiva futura.

2. Enquadramento teórico

O enquadramento teórico é fundamental para entender o estado da arte do processo em análise. Neste caso, é importante estudar o processo de fabrico das próteses médicas pelo processo de fundição por cera perdida, com particular foco na fusão e vazamento em forno rotativo *rollover*. Para além disso, é importante conhecer as propriedades da liga utilizada. Por fim, e tendo em conta que se pretende planejar ensaios para a implementação do *rollover*, será feita uma revisão sobre o planeamento de experiências (DOE).

2.1. Fundição por cera perdida

2.1.2. Características e etapas do processo

O processo de fundição por cera perdida caracteriza-se pela aplicação de uma barbotina cerâmica, sobre um cacho ou árvore de modelos “perdidos”, normalmente em cera, que ao endurecer forma uma moldação não permanente na qual será vazado o metal fundido, de forma a obter a peça final após solidificação (Rui et al. 2012). É, assim, um processo moroso que requer várias etapas mas que apresenta vantagens relativamente a outros processos de fabrico (American Foundrymen's Society 1993, Yodice 1991):

- Boa qualidade superficial;
- Elevada precisão dimensional;
- Geometrias finas e complexas;
- Facilidade em vazar qualquer tipo de liga.

Assim, este processo permite reduzir o tempo e custos em processos de acabamento, nomeadamente maquinagem, soldadura, etc (Duarte et al. 2008, American Foundrymen's Society 1993).

As várias etapas do processo de fundição por cera perdida estão resumidas na Figura 2.

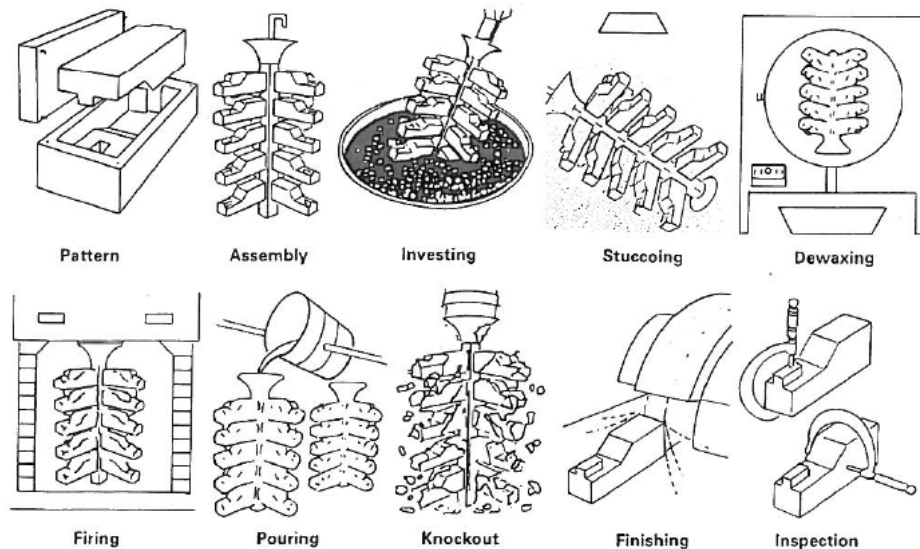


Figura 2 - Etapas gerais do processo de fundição por cera perdida (American Foundrymen's Society 1993)

- **Fabrico dos moldes** – para a obtenção dos modelos em cera é necessário fabricar os moldes para a injeção dos mesmos. Os moldes são normalmente de ligas de alumínio ou aço e são fabricados por maquinagem (American Foundrymen's Society 1993).
- **Injeção e soldadura** – os modelos perdidos são, normalmente, obtidos por injeção. Os principais parâmetros de injeção são: pressão, temperatura e tempo de injeção. O modelo tem a geometria exata da peça desejada mas com uma sobredimensão para compensar a contração da cera após a injeção e do metal após o vazamento. Posteriormente, os vários modelos são agregados a um canal de gitagem por soldadura (American Foundrymen's Society 1993, Yodice 1991, Pattnaik, Karunakar, and Jha 2012).
- **Revestimento cerâmico** – o conjunto dos vários modelos ligados ao canal de gitagem (cacho) é mergulhado numa barbotina cerâmica, polvilhado com areia para formar a carapaça cerâmica. Este processo repete-se várias vezes, de forma a formar várias

camadas que darão espessura e resistência à carapaça cerâmica. Entre cada camada é dado um determinado tempo de secagem de algumas horas (American Foundrymen's Society 1993, Yodice 1991).

- **Descerificação** – a carapaça cerâmica é aquecida de forma a eliminar a cera. Durante a descerificação, a cera deve sair rapidamente da carapaça de modo a prevenir a fratura da carapaça, visto que durante a descerificação a cera expande (American Foundrymen's Society 1993, Yodice 1991, Pattnaik, Karunakar, and Jha 2012).
- **Pré-queima e sinterização** – após a descerificação, é feita uma pré-queima de forma a eliminar eventuais resíduos de cera. Posteriormente, o cacho é sinterizado de forma a remover a humidade presente, fornecer resistência e pré-aquecer o cacho para o vazamento (American Foundrymen's Society 1993).
- **Fusão e vazamento** – o vazamento da liga pode ser gravítico ou com *rollover*, numa atmosfera inerte ou com auxílio de vácuo (American Foundrymen's Society 1993).
- **Abate** – consiste na destruição da carapaça cerâmica (American Foundrymen's Society 1993).
- **Acabamentos** – inclui operações de corte, rebarbagem, granalhagem, polimento e endireitamento (American Foundrymen's Society 1993).
- **Inspeção** – inclui controlo dimensional, ensaios destrutivos ou não destrutivos. (American Foundrymen's Society 1993)

Durante cada etapa do processo de fundição por cera perdida, podem surgir defeitos que afetarão as propriedades do produto final. Os principais defeitos que surgem na fundição por cera perdida são:

- **Mal cheio** – ocorre quando a cavidade moldante não é totalmente preenchida pelo metal líquido, especialmente os detalhes finos, ou seja, a forma pretendida não é totalmente alcançada. As principais causas são: sistema de gitagem incorreto, temperatura de

vazamento ou da moldação baixa e velocidade de enchimento incorreta (Silva-Magalhães 2011).

- **Rechupe** – durante a solidificação, o metal líquido contrai, podendo dar origem a vazios, denominados rechupes. As principais causas são: sistema de gitagem e de alimentação incorretos e temperaturas de vazamento e de moldação incorretas (Silva-Magalhães 2011).
- **Porosidade gasosa** – a porosidade pode surgir devido a contaminação da liga, turbulência ou reação do metal líquido com o cacho cerâmico (Silva-Magalhães 2011).
- **Inclusões** – são partículas sólidas exogéneas e podem ser metálicas ou não metálicas. Em termos de inclusões não metálicas, destacam-se as inclusões cerâmicas devido a arrancamento de partículas da carapaça durante o vazamento. Podem ocorrer também inclusões de escória que se forma durante a fusão. As inclusões de óxidos são também frequentes e podem ter origem no uso de retornos com excessiva oxidação (Silva-Magalhães 2011).
- **Defeitos de superfície** – surge principalmente devido a defeitos na primeira camada da carapaça cerâmica (Silva-Magalhães 2011).

De seguida, é feita uma revisão mais centrada no vazamento visto que já existem várias dissertações realizadas na ZCP, em colaboração com o INEGI e a FEUP, focadas noutras etapas do processo de fundição por cera perdida, referentes ao processo de fabrico de moldações em carapaça (Rocha 2017, Pereira 2017, Félix 2008).

2.1.2. Vazamento em forno rollover

O tema desta dissertação centra-se no estudo do processo de vazamento em forno *rollover*. Esta variante no processo de vazamento, designada por *tilt casting*, é relativamente antiga mas

a informação sobre o processo é muito escassa, principalmente aplicada a *investment casting* (Cox and Harding 2007).

O processo de *tilt casting* permite alcançar um enchimento suave do molde, uma vez que o metal líquido é transferido horizontalmente para o interior do molde sem turbulência superficial se a velocidade de rotação for bem controlada. Tem, por isso, o potencial de produzir fundidos de alta qualidade (Djambazov and Pericleous 2011, Campbell 2015). Um enchimento lento do molde evita turbulência superficial e permite a evacuação de gás. No entanto, se o enchimento for muito lento haverá muita perda de sobreaquecimento, resultando, em peças fundidas incompletas devido ao arrefecimento rápido do metal fundido. Tem de haver, assim, um balanço entre a velocidade de rotação e a perda de calor para permitir um enchimento total mas controlado da moldação (Djambazov and Pericleous 2011).

O processo de *tilt casting* surgiu pela primeira vez por Durville, por volta de 1800, em França, com o intuito de reduzir os defeitos em peças de bronze-alumínio (Campbell 2015).

O processo de vazamento por *tilt casting* apresenta algumas vantagens nomeadamente (Campbell 2015):

- Menor possibilidade de turbulência;
- Menor possibilidade de oxidação;
- Parâmetros de vazamento mais estáveis;
- Elevada possibilidade de automatização do processo;
- Estrutura mais homogénea das peças fundidas;
- Repetibilidade do processo;
- Maior rendimento do metal.

São vários os parâmetros que influenciam o enchimento e a solidificação durante o vazamento por *tilt casting*. Estes parâmetros devem ser bem controlados de forma a produzir fundidos de boa qualidade. Alguns dos parâmetros são (Djambazov and Pericleous 2011, Campbell 2015, Duarte et al. 2008):

- Velocidade de rotação;
- Perfil de rotação;
- Ângulo inicial de rotação;

- Sistema de escape de gases;
- Orientação da moldação;
- Isolamento térmico da moldação;
- Temperatura da moldação;
- Temperatura do metal fundido;
- Sistema de alimentação/gitagem.

De seguida, serão abordados mais em pormenor alguns dos fatores mais importantes anteriormente enunciados.

Velocidade de rotação e perfil de rotação

Como já foi referido anteriormente, é necessário que a velocidade de rotação seja bem selecionada de modo a que o enchimento se dê de forma controlada para evitar turbulência. Uma das regras para obter fundidos viáveis consiste em evitar que o metal líquido entre de forma turbulenta na moldação. A velocidade máxima do menisco para a maior parte dos metais, de forma a evitar turbulência, é de 0.5 m/s – velocidade crítica. Se a velocidade do metal líquido exceder a velocidade crítica, existe o perigo de que o metal líquido ultrapasse a altura suportável pela tensão superficial, provocando um arrastamento da superfície líquida, fenómeno que se chama de turbulência superficial (Campbell 2015).

Num estudo recente, Djambazov and Pericleous (2011) decidiram comparar três ciclos diferentes de vazamento na liga TiAl, os três parabólicos mas com tempos de ciclo diferentes: 4, 5 e 6 s. Nos três casos, o ciclo é composto por três fases: primeiro, a velocidade de rotação é elevada, em seguida, há uma desaceleração até chegar a uma velocidade quase nula quando atinge a horizontal e, no final, a velocidade de rotação é novamente elevada para completar rapidamente o enchimento de forma a reduzir a perda de calor (Djambazov and Pericleous 2011).

Os autores (Djambazov and Pericleous 2011), chegaram à conclusão que o ciclo mais longo foi aquele que permitia um enchimento mais tranquilo, como se pode observar na Figura 3 (Djambazov and Pericleous 2011).

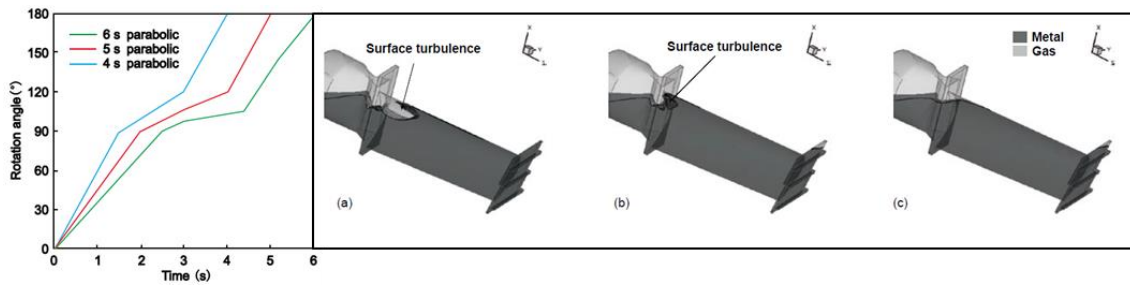


Figura 3 - Efeito da velocidade (4, 5, 6 s) de enchimento na turbulência superficial (Djambazov and Pericleous 2011)

Para verificar se este tempo de ciclo mais lento não comprometia a perda de sobreaquecimento, os autores fizeram variar o tempo de ciclo (4, 5 e 6 s) e verificar qual a variação de temperatura para uma mesma temperatura de pré-aquecimento da moldação. Como se pode ver na Figura 4, a velocidade de enchimento não teve muita influência na perda de sobreaquecimento (Djambazov and Pericleous 2011).

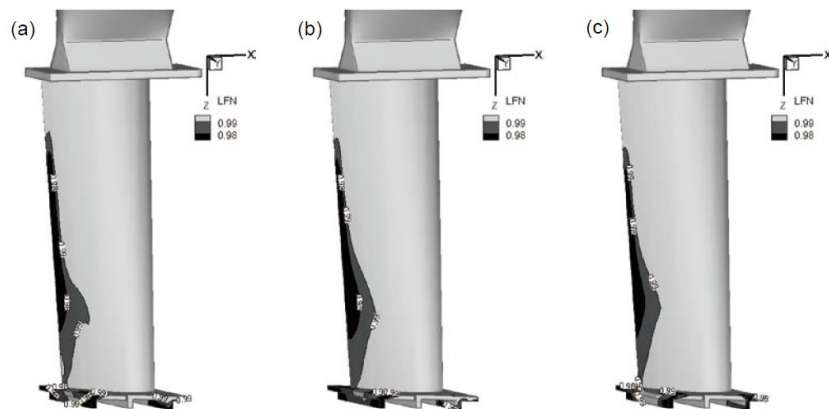


Figura 4 - Efeito da velocidade de enchimento (4, 5, 6 s) na perda de sobreaquecimento (Djambazov and Pericleous 2011)

Posteriormente, compararam dois ciclos com o mesmo tempo mas com perfis diferentes. Um com um perfil de rotação parabólico e outro constante, mas ambos com um ciclo de 6 s. Pela Figura 5, pode-se constatar que os resultados em termos de turbulência superficial foram melhores quando se usou um perfil de velocidades parabólico em comparação com o perfil de velocidade constante (Djambazov and Pericleous 2011).

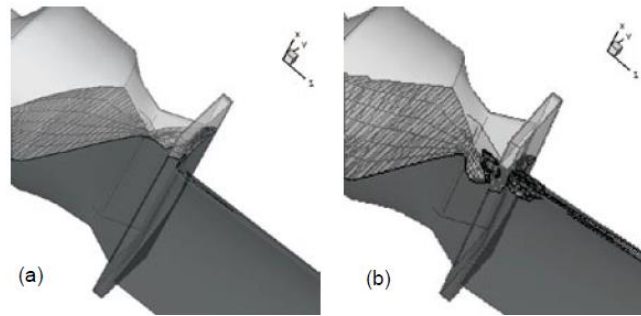


Figura 5 - Efeito do perfil de velocidade (constante e parabólico) na turbulência superficial (Djambazov and Pericleous 2011)

Ângulo de rotação

Para além da velocidade de rotação, também o ângulo inicial de rotação da moldação tem influência na capacidade de produzir fundidos viáveis. Isto porque a velocidade máxima da frente do metal varia com o ângulo de rotação inicial da moldação. Se a moldação estiver inclinada 10° (ou mais) abaixo da horizontal, não é possível produzir fundidos viáveis, como se pode observar na Figura 6 (Campbell 2015).

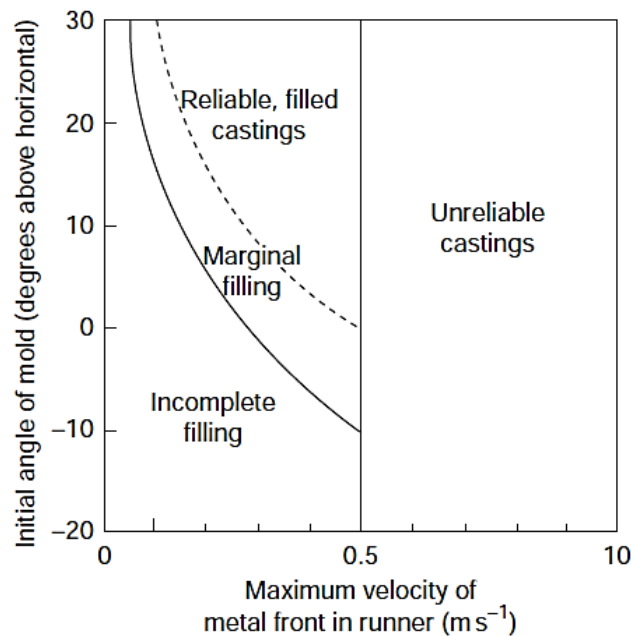


Figura 6 - Janela de operação para obter fundidos viáveis por tilt casting (Campbell 2015)

Temperatura de pré-aquecimento da moldação

A temperatura de pré-aquecimento da moldação deve ser bem selecionada pois se esta for muito baixa pode ocorrer solidificação do metal líquido muito cedo ou, pelo contrário, se esta for muito elevada, pode levar à ocorrência de reações entre o metal líquido e a moldação cerâmica (Djambazov and Pericleous 2011).

Para estudar o efeito da temperatura de pré-aquecimento, os autores (Djambazov and Pericleous 2011) utilizaram três temperaturas de pré-aquecimento diferentes: 1000, 1100 e 1200°C. Verificaram que, no fim do enchimento, com uma temperatura de pré-aquecimento superior o metal líquido encontrava-se todo à mesma temperatura. Para as temperaturas de 1000 e 1100°C, uma fração já se encontrava na forma “pastosa”. Assim, concluíram que quanto maior a temperatura melhor, desde que não ocorram interações entre o metal fundido e a moldação (Djambazov and Pericleous 2011).



Figura 7 - Efeito da temperatura de pré-aquecimento da moldação na solidificação prematura do metal fundido (Djambazov and Pericleous 2011)

2.2. Biomateriais

Os biomateriais são utilizados para fabricar dispositivos para substituir uma parte ou uma função do corpo humano de uma forma segura, económica e fisiologicamente aceitável. Existem várias definições de biomateriais. A definição mais recente e mais aceite pela comunidade foi apresentada por Williams (1987) “Biomateriais são substâncias, exceto drogas e fármacos, ou combinação de substâncias, de origens sintéticas ou naturais, que podem ser

usados por qualquer período de tempo, como parte ou como o todo de sistemas, para tratar, aumentar ou substituir quaisquer tecidos, órgãos ou função do corpo.” (Peterson 2013) .

Os biomateriais metálicos são muito utilizados no fabrico de próteses devido às suas excelentes propriedades mecânicas e biocompatibilidade.

2.2.1. Requisitos dos biomateriais metálicos usados em próteses

Os materiais utilizados no fabrico de próteses devem satisfazer uma série de requisitos de forma a assegurar longevidade e segurança quando implementados no paciente. É importante que não se comportem como um corpo estranho ao sistema imunitário, para que não haja risco de rejeição. Para além disso, e tendo em conta a função que as próteses desempenham no corpo humano, estas devem ser capazes de suportar as elevadas cargas cíclicas a que estão sujeitas e as características agressivas do organismo. Logo, os principais requisitos de um biomaterial metálico são (Chen and Thouas 2015, Félix 2008):

- Biocompatibilidade;
- Resistência à corrosão;
- Resistência ao desgaste;
- Biofuncionalidade;
- Osseointegração;
- Processabilidade.

2.2.1.1. Biocompatibilidade

A biocompatibilidade refere-se à capacidade do material contactar com o corpo humano sem causar danos graves. Idealmente, um biomaterial deveria ser constituído por elementos presentes no corpo humano, elementos esses que se encontram resumidos na Tabela 1 (Landuci 2016).

Tabela 1 - Elementos químicos no corpo humano (Landuci 2016)

	O	C	H	N	Ca	P	K	S	Na	Cl	Mg	Restante
% peso	65	18.5	9.5	3.3	1.5	1	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	<0.01
% at	25.5	9.5	63	1.4	0.31	0.22	0.06	0.05	0.3	0.03	0.1	<0.01

Cerca de 96% da massa do corpo é constituída por elementos O, C, H e N presentes na água e proteínas. Os restantes 4% são elementos presentes em ossos, – Ca, Mg e P – sangue e fluidos extracelulares – S, K e Cl. Para além destes, surgem elementos como Fe, Cu, Mn, I, Zn, Se, Co, Mo e Cr, designados por micronutrientes, em quantidades muito pequenas (Landuci 2016).

Um dos problemas associados ao conceito de biocompatibilidade é a toxicidade do material. Quanto menor a toxicidade, maior a biocompatibilidade do material como se pode ver na Figura 8 (Bahrami Nasab, Hassan, and Sahari 2010).

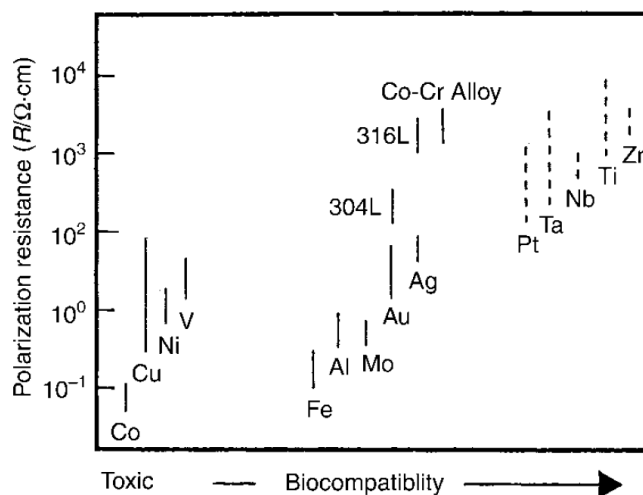


Figura 8 - Relação entre resistência à polarização e biocompatibilidade de metais puros, ligas CoCr e aços inoxidáveis (Davis 2003)

Os biomateriais metálicos mais utilizados são os aços austeníticos (nomeadamente o 316L), as ligas Co-Cr e as ligas de titânio. Como se pode ver pela Figura 8, dos biomateriais mencionados anteriormente, o titânio e suas ligas são os que apresentam melhor

biocompatibilidade. Pode-se constatar também que apesar de o cobalto puro ser um elemento muito tóxico, as ligas Co-Cr apresentam boa biocompatibilidade.

2.2.1.2. Resistência à corrosão

Os fluidos corporais são constituídos por substâncias que podem reagir com a prótese, formando óxidos ou outros compostos decorrentes de uma reação química. A corrosão pode enfraquecer a prótese, sendo por isso de extrema importância a seleção de materiais com uma elevada resistência à corrosão (Chen and Thouas 2015).

2.2.1.3. Resistência ao desgaste

Um elevado coeficiente de atrito resulta num enfraquecimento da prótese. Para além disso, os detritos resultantes podem provocar uma resposta inflamatória grave, conduzindo à destruição do osso saudável ou à infeção de outros tecidos. Assim, torna-se fundamental seleccionar materiais com elevada resistência ao desgaste (Bahrami Nasab, Hassan, and Sahari 2010).

2.2.1.4. Biofuncionalidade

A biofuncionalidade está relacionada com as propriedades mecânicas e físicas da prótese, nomeadamente, densidade, módulo de Young, ductilidade, resistência à rotura e à fadiga (Bahrami Nasab, Hassan, and Sahari 2010, Félix 2008). Para substituir ossos, os biomateriais devem apresentar boa resistência mecânica e tenacidade (Landuci 2016).

- **Resistência à rotura** – descreve a capacidade de um material resistir antes de atingir a rotura.
- **Resistência à fadiga** – refere-se à máxima amplitude de tensões cíclicas que podem ser aplicadas ao material sem causar falha. A fadiga inicia-se, geralmente, em locais de concentração de tensões e é afetada pela microestrutura, qualidade superficial e condições de serviço: frequência cíclica, desgaste e ambiente corrosivo (Landuci 2016).

- **Módulo de Young** – É importante que o módulo de Young do material que constitui a prótese seja similar ao do osso (entre 7 e 30 GPa). Se a rigidez da prótese for muito elevada, esta absorve as cargas aplicadas e, assim, o osso deixa de ser estimulado, resultando numa diminuição da sua densidade e, conseqüentemente, na sua atrofia (Félix 2008).
- **Ductilidade** – é dada pela extensão após rotura e indica a capacidade máxima de deformação plástica do material (Félix 2008).
- **Densidade** – Esta é uma propriedade importante para o conforto do paciente. Quanto mais leve, ou seja, menos densa for a prótese, mais confortável será para o paciente (Bahrami Nasab, Hassan, and Sahari 2010).

2.2.1.5. Osseointegração

É um requisito fundamental em aplicações ortopédicas. É definida como a formação de ligações estruturais e funcionais entre a prótese e o tecido ósseo envolvente. Design, composição química, topografia da superfície e revestimento adequados do implante podem melhorar a osseointegração. A porosidade inadequada pode dificultar a osseointegração (Bahrami Nasab, Hassan, and Sahari 2010).

2.2.1.6. Processabilidade

As propriedades mecânicas e físicas das próteses variam com o processo de fabrico utilizado. Fundição, maquinagem, forjamento e fabrico aditivo são os principais processos de fabrico de próteses. Um *tradeoff* entre propriedades e custo deve ser tido em conta de forma a seleccionar o processo de fabrico mais adequado.

Na Tabela 2, estão resumidos os principais requisitos das próteses de articulações e as respetivas conseqüências de não serem cumpridos esses requisitos.

Tabela 2 - Principais requisitos mecânicos, físicos e biológicos das próteses (Bahrami Nasab, Hassan, and Sahari 2010)

Requisito	Consequências caso o requisito não se verifique
Longa vida à fadiga	Falha mecânica do implante e cirurgia de revisão
Resistência adequada	Falha do implante, dor no paciente e cirurgia de revisão
Módulo de Young equivalente ao do osso	Atrofia do osso
Elevada resistência ao desgaste	Enfraquecimento do implante e resposta inflamatória grave
Elevada resistência à corrosão	Libertação de íons metálicos não compatíveis e reações alérgicas
Biocompatibilidade	Efeitos adversos no sistema orgânico
Osseointegração	Má integração entre o osso e o implante e atrofia do osso

2.2.2. Principais biomateriais metálicos para próteses

Os biomateriais metálicos mais utilizados em próteses são: aço inoxidável, titânio e ligas de titânio e ainda ligas à base de cobalto e cromo (Landuci 2016).

2.2.2.1. Aço inoxidável

Os aços inoxidáveis são aços de alta liga, à base de ferro, que contêm no mínimo de 10,5% de Cr, elemento que confere resistência à corrosão devido à formação de um fino filme de óxido de cromo na superfície do aço (Davis 2003).

O aço inoxidável mais utilizado em próteses é o 316L (designação do Instituto Americano do Ferro e do Aço), pertencendo ao grupo dos aços inoxidáveis austeníticos. A sua utilização deve-se ao facto de a estrutura austenítica oferecer uma maior resistência à corrosão, comparativamente aos outros tipos de aço inoxidável (Park and Bronzino 2003). A Tabela 3, resume a composição química do aço 316L, destacando-se a baixa quantidade de carbono (daí a designação da liga com L, de low carbon), pois acima de 0,03% de C, ocorre segregação na

forma de carbonetos de crômio, diminuindo a resistência à corrosão. Na Tabela 4 estão resumidas as propriedades mecânicas deste aço.

Tabela 3 - Composição química do aço austenítico 316L (Park and Bronzino 2003)

Elementos de liga								
Fe	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
Base	0,03 máx	2 máx	0,03 máx	0,03 máx	0,75 máx	17-20	12-14	2-4

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço austenítico 316L (Park and Bronzino 2003)

	Tensão de rotura (MPa)	Tensão limite elástico (MPa)	Extensão após rotura (%)	Dureza
Recozido	485	172	40	95 HRB
Trabalhado a frio	860	690	12	-

2.2.2.2. Titânio e ligas de titânio

O titânio apresenta boa resistência à fadiga, excelente resistência à corrosão, baixo módulo de elasticidade em comparação com outros biomateriais metálicos e facilidade de osseointegração.

A sua excelente resistência à corrosão está relacionada com a camada de óxido de titânio (TiO_2) que se forma rapidamente, protegendo o metal do meio biolíquido como representado na Figura 9 (Park and Bronzino 2003).

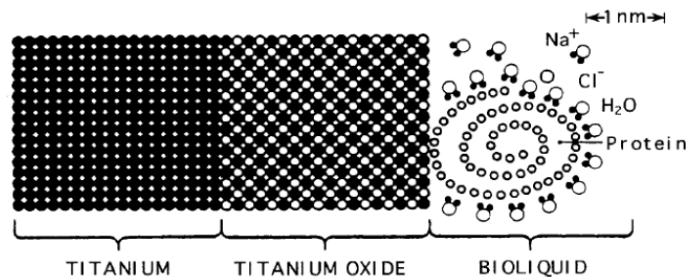


Figura 9 - Interface entre a prótese de titânio e o biolíquido (Park and Bronzino 2003)

Existem quatro graus de titânio comercialmente puro que são utilizados em aplicações ortopédicas. A percentagem de oxigénio tem uma forte influência na ductilidade e resistência. Para além do titânio puro, existe uma liga muito utilizada em próteses: Ti6Al4V (Peterson 2013). A composição química e propriedades mecânicas destes materiais estão resumidas na Tabela 5 e Tabela 6, respetivamente.

Tabela 5 - Composição química dos vários graus de titânio puro e da liga Ti6Al4V (Peterson 2013)

	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4	Ti6Al4V
N	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05
C	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08
H	0.015	0.015	0.015	0.015	0.0125
Fe	0.20	0.30	0.30	0.50	0.25
O	0.18	0.25	0.35	0.40	0.13
Ti	Restante				

Tabela 6 - Propriedades mecânicas dos vários graus de titânio puro e da liga Ti6Al4V (Peterson 2013)

	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4	Ti6Al4V
Tensão de rotura (MPa)	240	345	450	860	1030
Tensão limite elástico (MPa)	170	275	380	795	900
Extensão após rotura (%)	24	20	18	10	15

2.2.2.3. Ligas CoCr

Existem dois grupos de ligas de Co-Cr que podem ser usados em implantes, as fundidas e as trabalhadas (obtidas por forjamento, laminagem ou extrusão), nos quais se incluem as seguintes ligas (com designação da ASTM – American Society for Testing and Materials) (Peterson 2013). A composição química e propriedades mecânicas das ligas Co-Cr encontram-se na Tabela 7 e Tabela 8, respetivamente.

- **Ligas fundidas de Co-Cr**

- ASTM F75 (Co28Cr6Mo)

- **Ligas trabalhadas de Co-Cr**

- ASTM F90 (Co20Cr15W10Ni)

- ASTM F799 (Co20Cr6Mo, esta trata-se igualmente dum ligas trabalhada, mas com uma composição idêntica à liga fundida ASTM F75)

- ASTM F562 (Co35Ni20Cr10Mo)

Tabela 7 - Composição química das ligas Co-Cr (Peterson 2013)

	F75	F90	F562	F799
Co	Base	Base	Base	Base
Cr	27-30	19-21	19-21	26-30
Mo	5-7	-	9-10,5	5-7
Ni	< 1	9-11	33-37	< 1
Fe	< 0,75	< 3	< 1	< 0,75
C	< 0,35	0,05-0,15	< 0,025	< 0,35
Si	< 1	< 0,4	< 0,15	< 1
Mn	< 1	1-2	< 0,15	< 1
W	< 0,2	14-16	-	-
P	< 0,02	< 0,04	< 0,015	-
S	< 0,01	< 0,03	< 0,01	-

Tabela 8 - Propriedades mecânicas das ligas Co-Cr (Chen, 2015)

	Módulo de Young (GPa)	Tensão limite elástico (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Extensão após rotura (%)
F75 fundida, recozida	210	450 – 520	650 – 890	15
F75 metalurgia do pó, HIP	250	840	1280	-
F90 recozida	210	450 – 650	950 – 1220	-
F90 conformada a frio	210	1610	1900	-
F562 forjada	230	960 – 1000	1210	-
F562 conformada a frio, envelhecido	230	1500	1800	8
F799 forjada	210	900 – 1030	1400 – 1590	28

2.2.2.4. Comparação

Na Tabela 9, encontram-se resumidas as vantagens e desvantagens da utilização de cada um dos biomateriais metálicos anteriormente enunciados. No geral, o titânio e as suas ligas apresentam as melhores características de um biomaterial, no entanto, é um material muito caro. Pelo contrário, o aço inoxidável é um material barato mas que apresenta propriedades muito inferiores quando comparado com o titânio, ligas de titânio e ligas CoCr.

Tabela 9 - Principais vantagens e desvantagens dos biomateriais metálicos (Félix 2008)

	Aço inoxidável	Titânio e ligas Ti	Ligas CoCr
Vantagens	Custo Disponibilidade Processamento	Biocompatibilidade Resistência à corrosão Baixo módulo de elasticidade Resistência à fadiga	Resistência ao desgaste Resistência à corrosão Resistência à fadiga
Desvantagens	Comportamento a longo prazo Elevado módulo de elasticidade	Resistência ao desgaste Resistência à tensão de corte	Biocompatibilidade Elevado módulo de elasticidade

2.3. Liga ASTM F75

No projeto da presente dissertação, as próteses serão fabricadas na liga ASTM F75, uma liga à base de cobalto para fundição. Por isso, será feito um estudo mais aprofundado sobre esta liga.

2.3.1. Composição química

A liga ASTM F75 é comercialmente designada por Vitallium ou Stellite 21 e é uma das mais usadas na fundição de próteses (Félix 2008).

As ligas CoCrMo podem ser classificadas quanto ao teor de carbono: alto carbono (0.15-0.25%) ou baixo carbono (menos de 0.06%). Um teor mais elevado de carbono confere maior resistência ao desgaste uma vez que favorece a formação de carbonetos que ao formarem-se na superfície, protegem a matriz da liga que apresenta uma dureza inferior aos carbonetos. Uma maior percentagem de C permite baixar a temperatura de fusão até 1350°C (Félix 2008).

Na Tabela 10 está resumida a composição química da liga ASTM F75.

Tabela 10 - Composição química da liga ASTM F75 (system 2007)

Elemento	%
Co	Balanço
Cr	27 – 30
Mo	5 – 7
Ni	Max 0.5
Fe	Max 0.75
C	Max 0.35
Si	Max 1
Mn	Max 1
W	Max 0.2
P	Max 0.02
S	Max 0.01
N	Max 0.25
Al	Max 0.1
Ti	Max 0.1
B	Max 0.01

Cada elemento de liga desempenha uma determinada função. A influência de cada um dos principais elementos de liga na microestrutura, resistência à corrosão e propriedades mecânicas está resumida na Tabela 11.

Tabela 11 - Influência dos elementos de liga (Chen 2014)

Elemento	Resistência à corrosão	Microestrutura	Propriedades mecânicas
Cr	Confere resistência à corrosão devido à formação de Cr_2O_3	Formação de carbonetos Cr_{23}C_6	Confere resistência ao desgaste
Mo	Aumento da resistência à corrosão	Refinamento de grão	Endurecimento por solução sólida
Ni	Aumento da resistência à corrosão	–	Endurecimento por solução sólida; Aumenta a colabilidade
C	–	Formação de carbonetos Cr_{23}C_6	Confere resistência ao desgaste; Aumenta a colabilidade
W	Diminui a resistência à corrosão	Redução de rechupes, poros e segregações	Endurecimento por solução sólida; Diminui a resistência à fadiga por corrosão

2.3.2. Propriedades mecânicas

As boas propriedades mecânicas desta liga devem-se à natureza cristalográfica do cobalto, elemento base das ligas Co-Cr (Chen and Thouas 2015). Na Tabela 12 estão resumidas as propriedades mecânicas da liga ASTM F75.

Tabela 12 - Propriedades mecânicas da liga ASTM F75 (System, 2007)

Módulo de Young (GPa)	Tensão limite elástico (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Extensão após rotura (%)
210	450	655	8

2.3.3. Diagrama de equilíbrio

O cobalto puro possui dois tipos de estruturas cristalinas, dependendo da temperatura. Para temperaturas abaixo dos 417°C apresenta uma estrutura hexagonal compacta (HC) e acima dessa temperatura, apresenta uma estrutura cúbica de faces centradas (CFC) (Bellefontaine 2010). Esta transformação alotrópica é muito lenta devido à baixa energia livre de Gibbs de α para ϵ , que ronda os -12 J/mol (Santos 2012).

No entanto, durante a solidificação do metal fundido, esta taxa de transformação é rápida, não havendo tempo de transformar a estrutura CFC em HC. Esta transformação é influenciada pela adição de certos elementos de liga. Elementos estabilizadores da fase HC como o crómio, o molibdénio e o tungsténio aumentam a temperatura de transformação. Enquanto que elementos como o níquel e o carbono diminuem a temperatura de transformação pois são estabilizadores da fase CFC (Bellefontaine 2010).

Para estudar o sistema ternário da liga Co-Cr-Mo, é importante conhecer também os sistemas binários Co-Cr, Co-Mo e Cr-Mo.

- **Sistema binário Co-Cr**

As fases presentes no diagrama de equilíbrio Co-Cr são: fase líquida (L), solução sólida CFC (α Co), solução sólida HC (ϵ Co); solução sólida CCC (Cr) e fase intermetálica σ . Pelo diagrama, constata-se que a temperatura de fusão do Co e do Cr puro são 1495 e 1863°C, respetivamente (Nishizawa 1990).

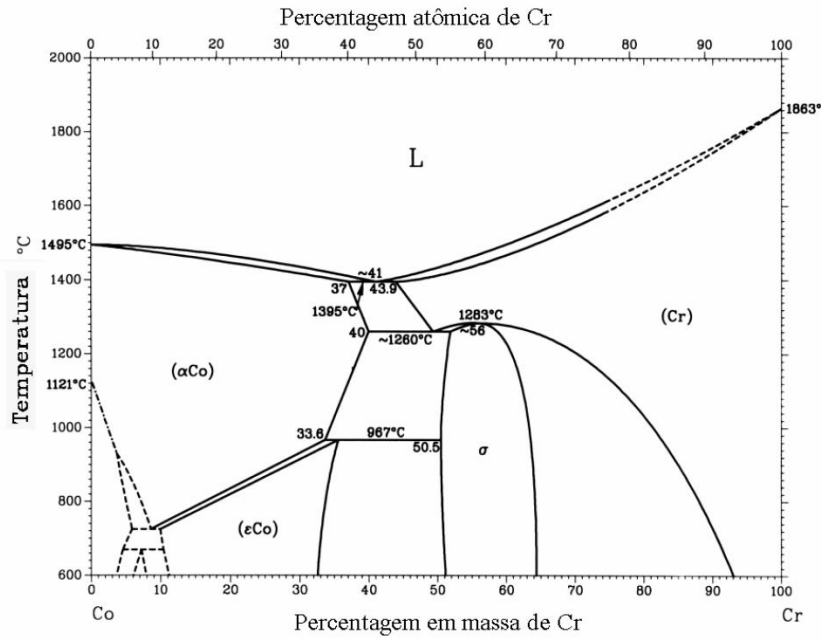


Figura 10- Diagrama de equilíbrio Co-Cr (Silva 2015)

- **Sistema binário Co-Mo**

No diagrama de equilíbrio Co-Mo podem verificar-se quatro fases intermetálicas: Co_9Mo_2 , Co_3Mo , Co_7Mo_6 (μ) e σ (Santos 2012).

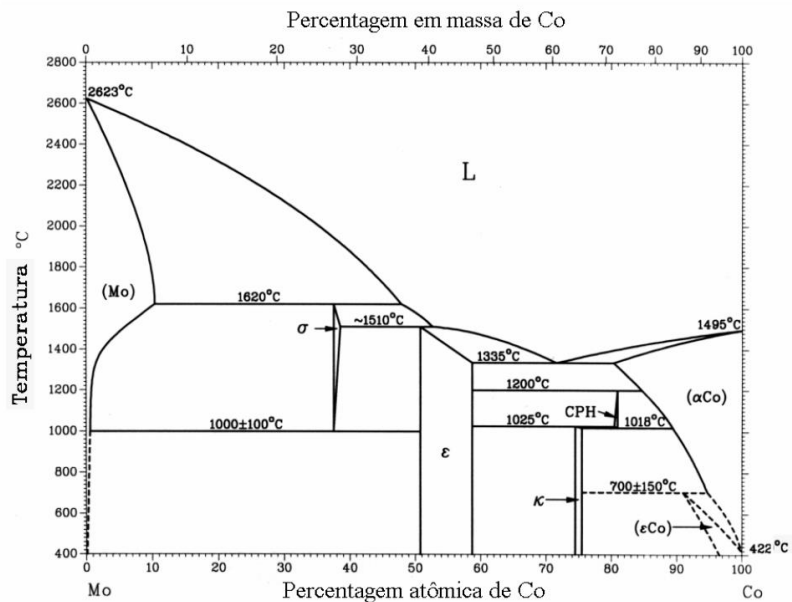


Figura 11 - Diagrama de equilíbrio Co-Mo (Silva 2015)

- **Sistema binário Cr-Mo**

Na gama de temperaturas de 880 a 1800°C existe uma completa miscibilidade na fase sólida, isto é, forma-se apenas uma fase. Para temperaturas inferiores pode ocorrer miscibilidade parcial (Silva 2015).

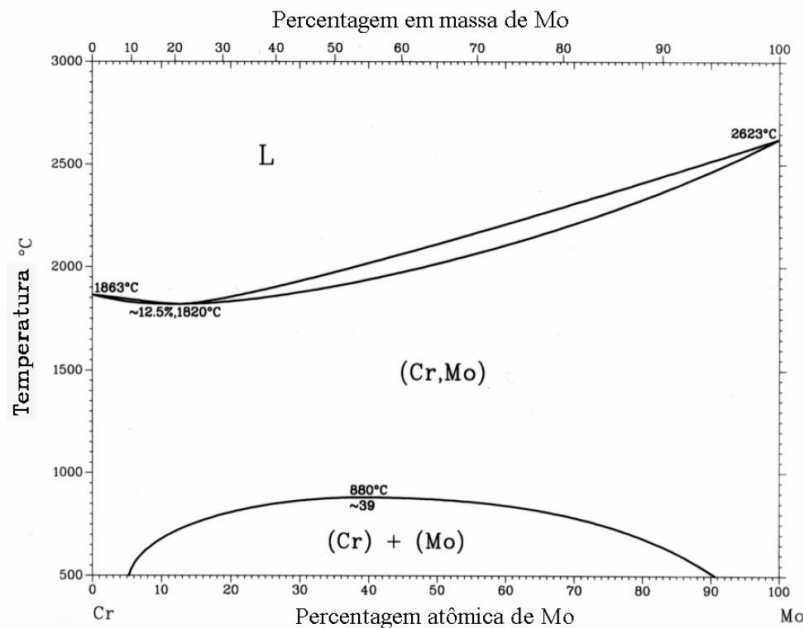


Figura 12 - Diagrama de equilíbrio Cr-Mo (Silva 2015)

2.3.4. Microestrutura

As principais fases presentes na microestrutura da liga ASTM F75 são: fase α e carbonetos M_nC_n onde M representa o metal (Cr, Co ou Mo) e C o carbono. Estes carbonetos podem aparecer sob a forma lamelar ou em bloco. Para além dos carbonetos, podem surgir fases intermetálicas, nomeadamente a fase σ nas zonas interdentríticas (Giacchi, Fornaro, and Palacio 2012). Assim, a microestrutura típica de um bruto de fundição na liga ASTM F75, apresenta uma matriz dendrítica rica em Co (fase α) com fases secundárias (carbonetos e fases intermetálicas) nas fronteiras de grão e nas zonas interdentríticas – Figura 13 e Figura 14 (Ramírez-Vidaurri et al. 2009).

Dependendo da concentração de carbono e dos elementos de liga, os carbonetos surgem devido a uma reação eutética ou por precipitação simples. Os carbonetos mais comuns em ligas ricas em Cr são os $M_{23}C_6$ e M_6C (Podrez-Radziszewska et al. 2010, Park et al. 2017). Os carbonetos $M_{23}C_6$ são os mais frequentes e surgem da reação da fase intermetálica σ com o carbono. Os carbonetos constituem o principal mecanismo de endurecimento desta liga, no entanto, são também responsáveis pelas baixas propriedades mecânicas, nomeadamente baixa ductilidade (Giacchi, Fornaro, and Palacio 2012, Bedolla-Gil et al. 2009). Os carbonetos variam em tipo, tamanho, distribuição e morfologia, dependendo da composição química da liga e dos parâmetros de fundição, nomeadamente, a taxa de arrefecimento (Williamson, O'Brien, and Browne 2013, Bedolla-Gil et al. 2009).

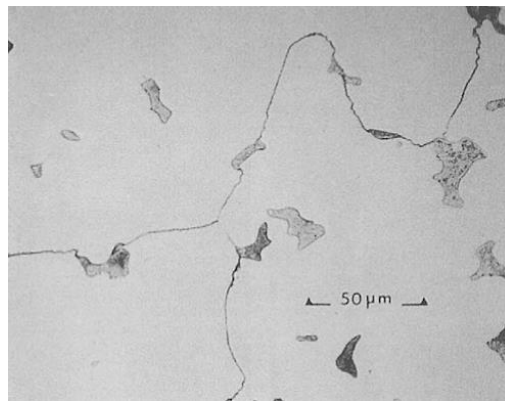


Figura 13 - Microestrutura do bruto de fundição da liga ASTM F75 (Ratner et al. 2009)

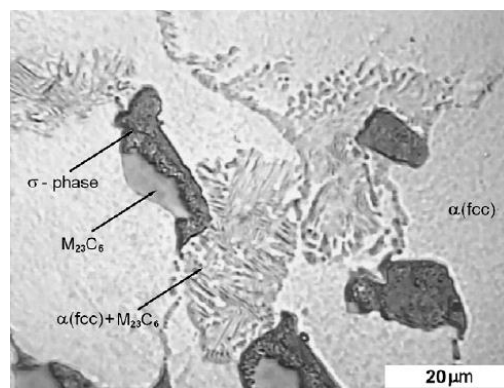


Figura 14 – Principais fases presentes na microestrutura do bruto de fundição da liga ASTM F75 (Giacchi, Fornaro, and Palacio 2012)

As condições em que ocorre o processo de fundição, influenciam a microestrutura e consequentemente as propriedades mecânicas. Surgem normalmente três problemas típicos que afetam negativamente as propriedades desta liga (Ratner et al. 2009):

- **Microestrutura heterogênea** – ocorre devido a um arrefecimento desequilibrado durante a solidificação o que pode induzir a formação de uma estrutura nucleada onde as regiões interdendríticas se tornam ricas em cromo e molibdênio e as zonas dendríticas ficam desprovidas de cromo e ricas em cobalto, tornando-se assim em zonas anódicas.
- **Tamanho de grão elevado** – segundo a relação de Hall-Petch, quanto maior o tamanho de grão, menor a resistência mecânica.
- **Defeitos de fundição** – defeitos como inclusões, porosidade e microrechupes podem surgir, sendo uma fonte de concentração de tensões.

De forma a minimizar estes problemas e, consequentemente, melhorar as propriedades mecânicas, pode recorrer-se a tratamentos térmicos e/ou termomecânicos posteriormente. Estes servem para homogeneizar a estrutura, aliviar tensões inerentes, eliminar porosidade e dissolver parte dos carbonetos (Kaiser et al. 2012).

Os principais tratamentos aplicados a esta liga são: tratamento de homogeneização, *hot isostatic pressing* (HIP) e tratamentos de refinamento de carbonetos (Giacchi, Fornaro, and Palacio 2012).

2.4. Planeamento de experiências (DOE)

A experimentação é fundamental na área de engenharia pois permite perceber o funcionamento de um sistema e, assim, a implementação de melhorias no mesmo ou até o desenvolvimento de um novo sistema. Quando se fala em sistema, referimo-nos a qualquer produto ou processo. O planeamento de experiências surge, assim, como uma ferramenta poderosa na área da engenharia, permitindo selecionar as variáveis de entrada do sistema mais adequadas de forma a otimizar o sistema.

2.4.1. Definição, terminologia e fundamentos

O planejamento de experiências (*DOE – Design of Experiments*) consiste em planejar a aquisição de dados sobre o funcionamento de um sistema ou processo, através da definição prévia de uma série de testes com vários parâmetros (Soares, 2013). Para tal, após seleção dos fatores e respectivos níveis que poderão afetar a resposta do sistema, é definido um conjunto de testes de forma a analisar a influência desses fatores e da interação entre eles na resposta.

Para entender melhor o conceito de DOE, serão definidos os principais termos usados, segundo a norma ISO 3534-3 (Shahabudeen 2012):

Fator – variável cujos níveis são ajustados para cada teste. É, por isso, uma variável de entrada (*input*), podendo ser também designada por variável independente.

Pode ter duas classificações diferentes:

- Qualitativo (ex.: tipo de máquina, tipo de material, etc.) / Quantitativo (ex.: temperatura, pressão, tempo, etc.)
- Controlável (quando é possível fixar o seu valor) / De ruído (quando não é possível fixar o seu valor, sendo que esta impossibilidade pode dever-se a fatores económicos)

Nível – Valor que determinado fator pode tomar durante a experiência.

Interação – A interação entre fatores acontece quando a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é igual para todos os níveis dos outros fatores.

Resposta – Variável de saída (*output*), podendo ser também designada por variável dependente.

Efeito – Mudança na resposta devido à alteração do nível do fator.

Erro experimental – Variação na resposta quando a mesma experiência é repetida, causada por fatores não controláveis.

Ensaio/Teste – Cada experiência é constituída por um determinado número de testes, sendo que cada um deles é definido pela combinação de níveis dos vários fatores em estudo.

Os princípios básicos do DOE são (Shahabudeen 2012):

- Replicação;
- Randomização;
- Bloqueio.

2.4.2. Tipos de DOE

Existem vários tipos de DOE, cada um com as suas vantagens e desvantagens ao nível de parâmetros como tempo, custo, etc. Os principais tipos de DOE são (Shahabudeen 2012):

- **Plano um único fator** – estuda o efeito de apenas um fator;
- **Plano um fator de cada vez** – cada nível do fator é alterado uma vez mantendo os restantes fatores sempre constantes;
- **Plano todos os fatores de uma vez** – cada teste é feito com todos os fatores ao mesmo nível;
- **Plano fatorial completo** – estuda todas as combinações possíveis dos níveis dos vários fatores e interações de fatores;
- **Plano fatorial fracionado** – estuda apenas parte das combinações, ficando de fora normalmente as interações de maior ordem.

2.4.3. Etapas do DOE

As principais etapas do DOE são (Shahabudeen 2012):

1. Planeamento da experiência (Brainstorming);
2. Design da experiência;
3. Condução da experiência;
4. Análise dos resultados, recorrendo à análise de variância (ANOVA);
5. Confirmação dos resultados.

2.4.4. Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é um processo de análise estatística baseado na decomposição da variação total existente entre uma série de observações. Esta variabilidade pode ser decomposta em causas conhecidas e em outra parte devido a causas desconhecidas, nomeadamente, erro experimental ou ruído (Lima, 2010). Fundamentalmente, a análise de variância é utilizada quando se quer decidir se as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por diferenças significativas nas populações observadas) ou casuais (decorrentes da mera variabilidade amostral). Portanto, essa análise parte do pressuposto que o acaso só produz pequenos desvios, sendo as grandes diferenças geradas por causas reais.

O modelo da ANOVA pressupõe que (Lima, 2010):

- O modelo seja aditivo;
- Os erros normalmente distribuídos e independentes;
- Os erros devem ter a mesma variância.

Na análise de variância são testadas as hipóteses (Galdaméz, 2002):

- **Hipótese nula H_0** ($\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$): as médias populacionais são iguais;
- **Hipótese alternativa H_1** (nem todos os são iguais μ_k): as médias populacionais são diferentes, ou seja, pelo menos uma das médias é diferente das restantes.

Para testar a hipótese H_0 , utiliza-se o teste F apresentado na tabela ANOVA da Figura 15. Nela são apresentados os graus de liberdade (G.L.), a soma de quadrados (S.Q.), o quadrado médio ou variância (Q.M.) E a estatística F (F_0) (Lima, 2010).

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F ₀
Entre Amostras (tratamentos)	a-1	$\sum_{i=1}^k \frac{y_{io}^2}{n_i} - \frac{y_{oo}^2}{n}$	QMA	$F_0 = \frac{QMA}{QME}$
Erro ou Resíduo	n-a	SQE=(SQT-SQA)	QME	
Total	n-1	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2 - \frac{y_{oo}^2}{n}$		

Figura 15 - Tabela ANOVA para um fator (Lima, 2010)

Quando os resultados da ANOVA levam à rejeição da hipótese nula H_0 temos evidências de que as médias entre os níveis diferem significativamente. Essa rejeição é feita quando $F_0 > F_{tabelado}$. Caso contrário, não se rejeita a hipótese nula H_0 , ou seja, não há evidências de diferença significativa entre tratamentos, ao nível α de significância escolhido. Esta condição, encontra-se representada no gráfico de distribuição F da Figura 16 (Galdaméz, 2002).

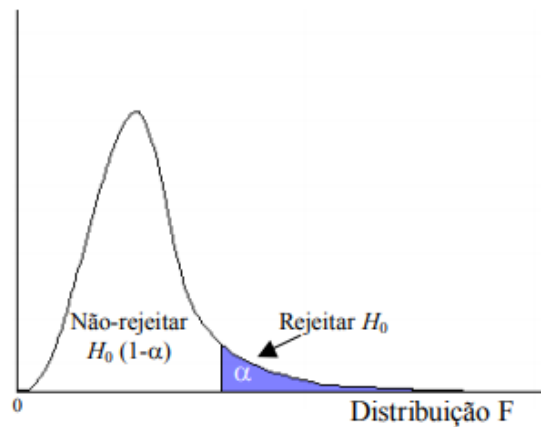


Figura 16 - Regiões de rejeição e não-rejeição para distribuição F (Galdaméz, 2002)

3. Processo de fabrico na Zollern

Para uma melhor integração no projeto, foi efetuado o reconhecimento da fábrica com uma passagem pelos diferentes setores, de forma a conhecer melhor o processo de fabrico da ZCP e identificar em cada etapa/setor os problemas que podem resultar em defeitos na peça final.

Para além disso, foi importante seguir o processo de fabrico das próteses femorais, peças que serão alvo de estudo, desde a injeção de cera para garantir uma menor variabilidade durante o processo e assim diminuir a influência dessa variação nos resultados dos ensaios dos vazamentos em forno *rollover*. Assim, neste capítulo, será descrito o processo de fabrico atual de próteses femorais na ZCP e que se encontra resumido na Figura 17.

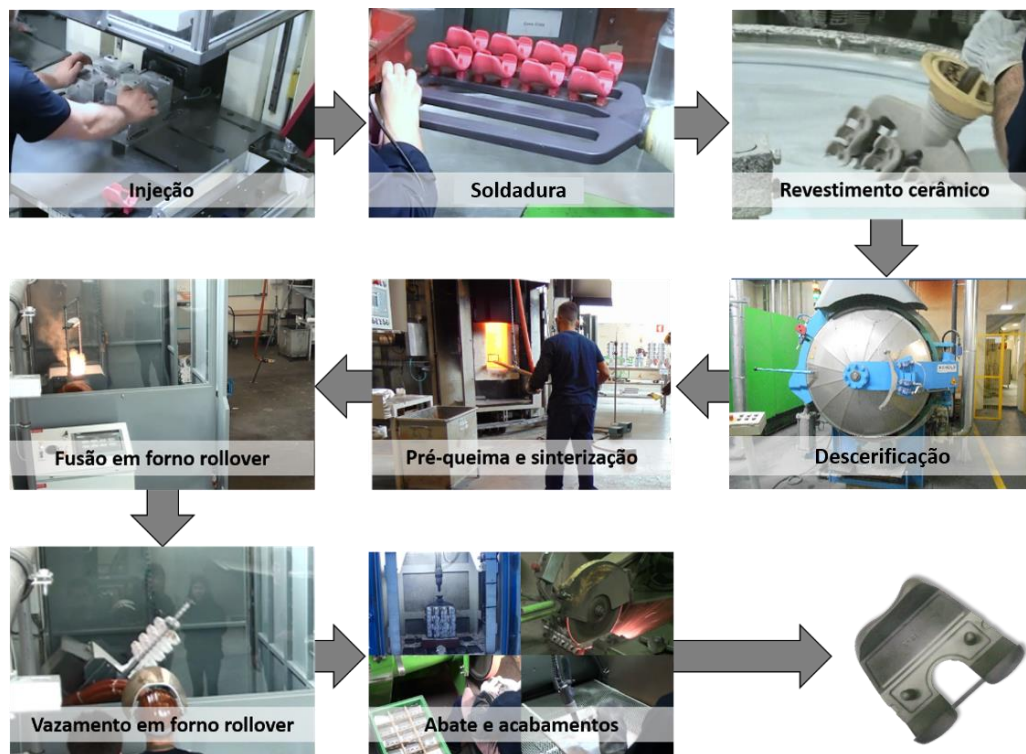


Figura 17 - Processo de fabrico de próteses femorais na ZCP

3.1. Moldes

Os moldes para injeção dos modelos e dos sistemas de gitagem em cera utilizados na ZCP, tanto podem ser fabricados internamente como na casa mãe, na Alemanha. A sua manutenção, limpeza e reparação é garantida internamente. No caso dos moldes para injeção de próteses femorais, estes são produzidos em liga de alumínio na casa mãe. O molde do componente femoral tem apenas uma cavidade.

3.2. Injeção

Na ZCP existem máquinas de injeção de cera de diversos tipos: manuais, automáticas e semi-automáticas (duas delas usadas para o fabrico das gitagens).

Dependendo da aplicação, são utilizados diferentes tipos de cera:

- **Cerita** – cera virgem, de cor vermelha, injetada no estado líquido.
- **Cera plástica** – cera virgem, de cor azul, injetada no estado pastoso. É mais cara que a cerita, sendo por isso utilizada em peças com tolerâncias dimensionais mais apertadas.
- **Cera reciclada** – cera de cor roxa, sendo uma mistura de cera virgem com cera reaproveitada. Difere, por isso, na quantidade de material de enchimento. É usada em peças com tolerâncias dimensionais menos apertadas e também na gitagem.
- **Cera solúvel** – cera de cor amarela, utilizada para criar cavidades nas peças. As peças produzidas em cera solúvel funcionam como machos que são introduzidos nos moldes metálicos. São removidos por ação de um ácido, neste caso, ácido clorídrico.

A injeção das peças em cera para produção de próteses femorais é feita numa máquina semi-automática sendo usada cera virgem Cerita® F28-46M. Os parâmetros utilizados encontram-se na respetiva carta de injeção. Após a injeção de cada peça, estas foram colocadas em “gabarits” de arrefecimento durante uma hora de forma a estabilizar a temperatura e, assim, minimizar o empeno como se pode ver na Figura 18.



Figura 18 - Injeção em cera de próteses femorais e arrefecimento em “gabarits”

Os principais defeitos que surgiram durante a injeção, que levou a não conformidades de algumas peças em cera, foram aparecimento de bolhas e de inclusões de cera reciclada.

3.3. Soldadura

Depois da injeção, segue-se a operação de soldadura. Antes de soldar as peças, é soldada à gitagem uma bacia cerâmica. Existem vários tipos de gitagem (árvore, tarugo, montagem) mas no caso das peças femorais produzidas para os ensaios desta dissertação, foi utilizada a árvore de 4 fina (A4 – 428 XL). Esta árvore possui 4 hastes, onde são soldadas 4 peças em cada lado, de acordo com a carta de colagem, sendo possível agregar 32 peças por árvore. Para facilitar a remoção posterior da cera, foram colocados dois pinos inclinados. A Figura 19 mostra a disposição das peças e dos pinos que facilitam a descerificação.



Figura 19 - Disposição das peças femorais na árvore de 4 fina e pormenor da colagem dos pinos

O cordão de cera que faz a união das peças à gitagem deve ser uniforme e não deve apresentar bolhas ou poros que permitam a penetração do banho cerâmico nesses vazios, o que irá criar arestas vivas e defeitos positivos na carapaça cerâmica. Durante o vazamento pode haver arrancamento dessas partículas o que pode levar ao aparecimento de inclusões cerâmicas nas peças.

3.4. Revestimento cerâmico

Para a produção das carapaças cerâmicas são depositadas sucessivas camadas de material refratário. O número de camadas varia consoante a ordem de fabrico e pode ser manual ou automática. Em cada camada, existem várias etapas:

- Primeiro, realiza-se um pré-mergulho numa mistura de água, molhante e anti espumante de forma a melhorar a adesão da barbotina. O pré-mergulho é aplicado principalmente na primeira camada e esta etapa não é feita em todas as ordens de fabrico;
- O cacho é mergulhado numa barbotina cerâmica que se encontra sob agitação para que haja maior uniformidade do banho. Para além disso, durante a imersão, o cacho faz movimentos de rotação de forma a que a barbotina molhe eficazmente toda a sua superfície;
- O cacho é retirado da barbotina e escorre-se o excesso de barbotina, o que permite obter uma camada mais uniforme;
- É feito o revestimento com partículas refratárias (areia) que pode ser feito em chuveiro ou fluidizador;
- Secagem e endurecimento do revestimento.

A primeira camada, normalmente designada por *facecoat*, é obtida pela imersão do cacho numa barbotina que, geralmente, é mais viscosa e contém partículas refratárias mais finas de forma a obter uma superfície com menor rugosidade. As camadas posteriores, designadas por *backup*, são constituídas por partículas com grão mais grosseiro e servem para conferir

espessura e resistência à carapaça. Na última camada, designada por “branco”, é feito apenas o mergulho no banho cerâmico de forma a selar as partículas de areia da camada anterior.

Neste caso, os cachos das próteses femorais, possuem oito camadas. As três primeiras camadas são manuais e as restantes automáticas. Nas Figura 20, Figura 21 e Figura 22 estão representadas as etapas de cada uma destas camadas.

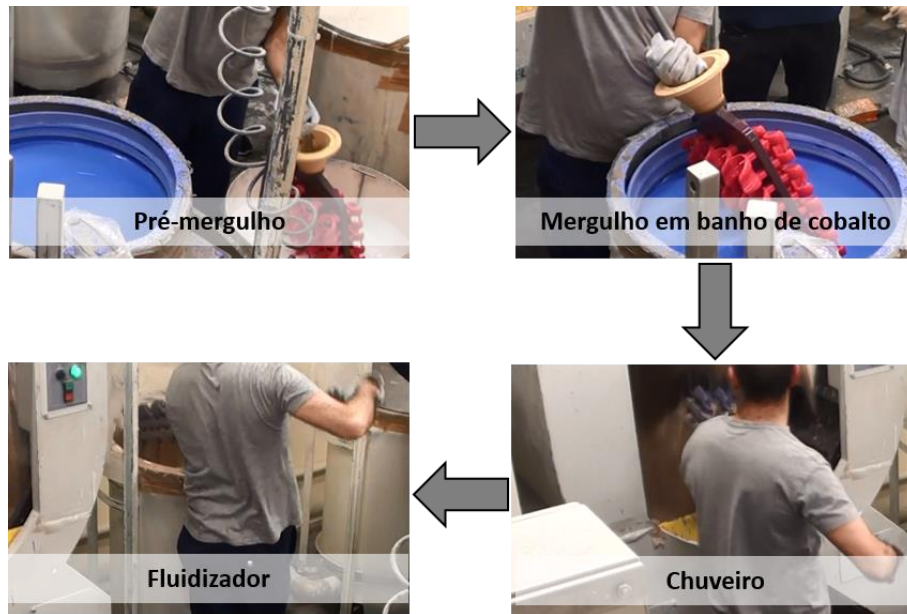


Figura 20 – Revestimento manual da primeira camada



Figura 21 - Revestimento manual da segunda camada

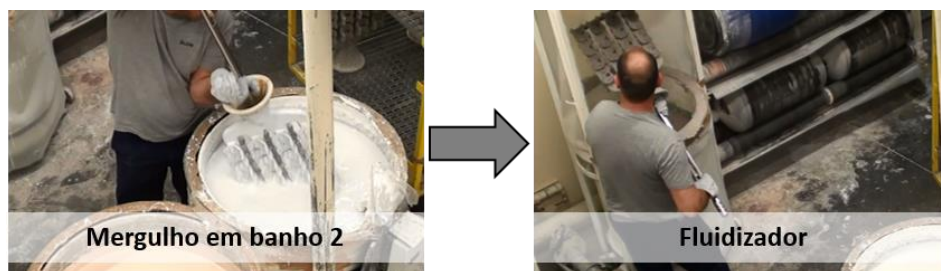


Figura 22 - Revestimento manual da terceira camada

Após todas as etapas de revestimento, são cortados os pinos para facilitar a saída da cera durante a descerificação dos cachos.

3.5. Descerificação e pré-queima

Na ZCP, a descerificação é feita num autoclave de vapor de água (*BoilerClave*) à temperatura de 185°C e pressão de 9 bar durante, aproximadamente, 15 minutos. Esta etapa pode levar ao aparecimento de fissuras na carapaça devido à tensão provocada pela expansão da cera.

Após a descerificação, é feita uma pré-queima de forma a eliminar os resíduos de cera. No caso dos cachos para próteses femorais, estes são colocados no forno rotativo a uma temperatura de 900 a 960°C durante cerca de uma hora e meia, sendo necessário que permaneçam no mínimo 15 minutos na zona de queima.

Se a cera não for totalmente removida da carapaça, durante o vazamento os espaços ocupados por esses resíduos de cera podem transformar-se em poros, após a fusão desses resíduos.

3.6. Sinterização, fusão e vazamento

A etapa de sinterização ocorre no forno rotativo e serve para reforçar estruturalmente a carapaça. O pré-aquecimento da carapaça é feito aquando da sinterização, seguindo, imediatamente, para o vazamento.

Já foram utilizados vários métodos de fusão e vazamento para a produção de próteses femorais, no entanto, a fusão e vazamento destas peças foi realizada no novo forno *rollover* adquirido pela empresa (Figura 23 e Anexo A). O *rollover* é um forno de indução onde o cacho é posicionado invertidamente e com uma rotação de 180° dá-se o enchimento do mesmo. Neste processo, a fusão de metal dá-se por indução eletromagnética em cadinhos cerâmicos, permitindo uma homogeneidade do material uma vez que a energia é distribuída por todo o

volume do líquido devido à agitação do banho provocada pelo campo magnético. A capacidade máxima deste forno é de 30 kg.



Figura 23 - Forno rollover

3.7. Acabamentos e ensaios não destrutivos

Na ZCP, a zona de acabamentos é dividida em Acabamentos I (abate, jato de água, corte e granalhagem) e Acabamentos II (rebarbagem, polimento, soldadura e endireitamento). Os ensaios não destrutivos abrangem inspeção visual, líquidos penetrantes e Raios X.

No caso das próteses femorais, a sequência de acabamentos e ensaios não destrutivos que estas peças seguem, encontra-se resumida na Figura 24. Alguns defeitos detetados após os ensaios não destrutivos são possíveis de recuperar. Na Figura 25, encontra-se a sequência de recuperação de defeitos.

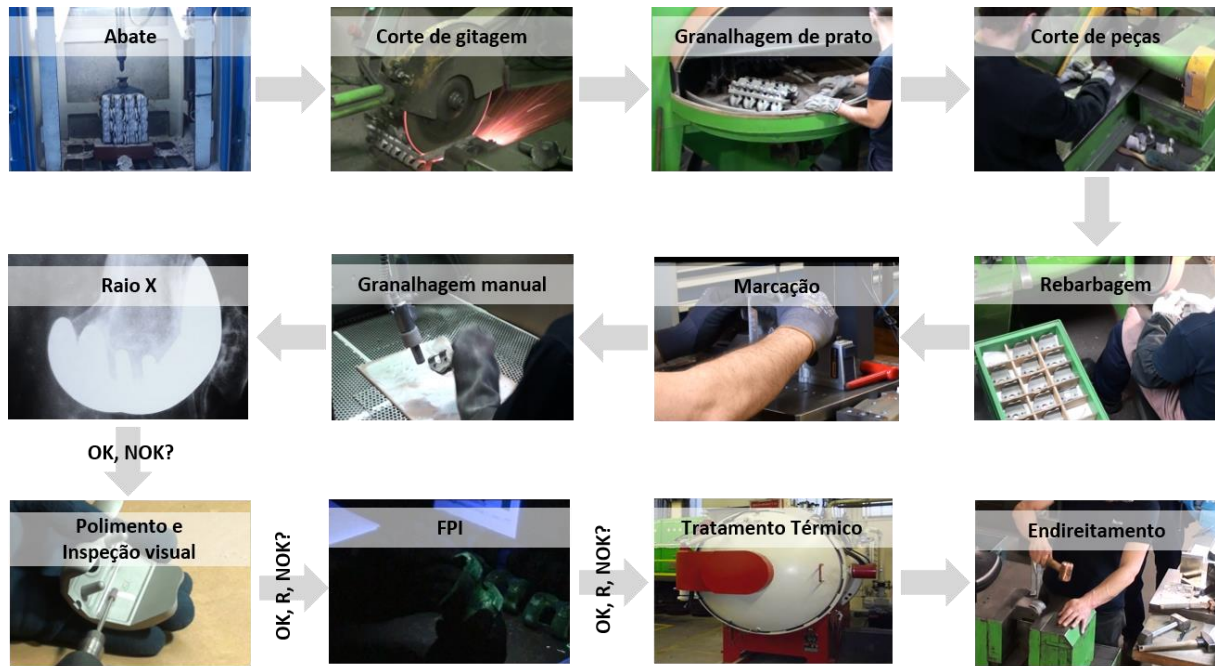


Figura 24 - Sequência de etapas de acabamentos das peças femorais

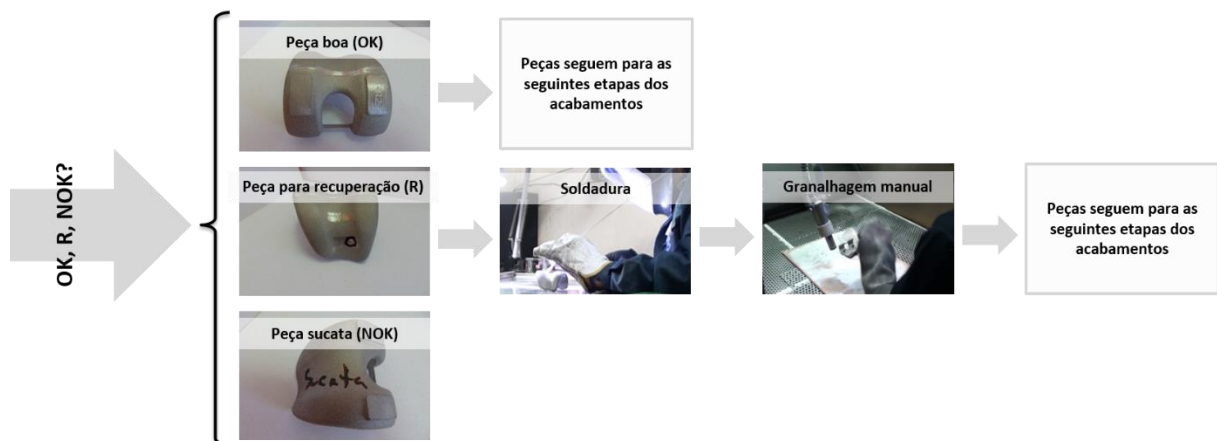


Figura 25 - Sequência de recuperação das peças femorais

Após o arrefecimento, é necessário proceder ao abate da carapaça cerâmica que pode ser manual ou pneumático. Recentemente utilizava-se o abate manual seguido de limpeza dos cachos em jato de água, mas atualmente recorre-se ao abate com martelo pneumático, tendo sido eliminado o jato de água.

De seguida, os cachos metálicos seguem para o corte de gitagem de forma a separar as quatro hastes da árvore que são posteriormente colocadas na granalhadora de prato em quatro

posições diferentes para retirar o que restou da cerâmica. A granalha que se utiliza é corindon que é maioritariamente composta por alumina.

Depois desta primeira granalhagem “grosseira”, é feito o corte de peças e estas seguem em caixas próprias para a rebarbagem grossa dos gitos e, de seguida, para a granalhagem manual com corindon para dar um melhor acabamento e eliminar os resíduos de cerâmica depositados nas pequenas cavidades que não foi possível retirar na granalhadora de prato.

Após a granalhagem, as peças foram inspecionadas através de Raios X para identificar defeitos internos. Foi utilizado o método de chapa radiográfica com um limite de deteção de 0,2 – 0,3 mm dependendo das espessuras. A etapa seguinte foi o polimento manual, realizando-se uma inspeção visual às peças e feita também uma inspeção por líquidos penetrantes, de forma a identificar defeitos superficiais. As peças com defeitos para recuperação são sujeitas a soldadura e, de seguida, essas peças são novamente granalhadas manualmente, como se pode verificar no esquema da Figura 25.

As peças seguem para o tratamento térmico e depois para a secção de endireitamento de forma a garantir as especificações dimensionais impostas pelo cliente.

4. Material e métodos

Este capítulo servirá de preparação para os ensaios que serão planejados utilizando o desgin de experiências. É fundamental conhecer, de antemão os requisitos das próteses impostos pelos clientes de modo a saber qual a variável de saída do sistema e assim analisar os fatores – variáveis de entrada – que poderão afetar essa mesma variável de saída.

4.1. Requisitos do cliente

Os requisitos impostos pelo cliente que garantem a qualidade das próteses englobam vários parâmetros, nomeadamente, composição química, propriedades mecânicas, critérios microestruturais e dimensionais.

Segundo a AESCULAP, a composição química e as propriedades mecânicas devem respeitar a norma ISO 5832-4.

Para controlar defeitos como inclusões, porosidade e outros defeitos de superfície são realizados vários testes, nomeadamente, inspeção visual, líquidos penetrantes e raio X. Existem tabelas com o tamanho aceitável de defeitos em diferentes zonas para cada um destes ensaios mas por uma questão de confidencialidade não serão reveladas nesta dissertação.

As dimensões devem ser respeitadas e controladas de acordo com o desenho que se encontra na Figura 26. A inspeção dimensional é feita através de equipamentos de medição onde se verifica se as peças estão dentro das tolerâncias dimensionais impostas.

As especificações do cliente não foram reveladas nesta dissertação por uma questão de confidencialidade.

- **Líquidos penetrantes (FPI)** – o método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido de muito baixa tensão superficial. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, pode fazer-se sobressair a descontinuidade através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície sob ação de luz ultravioleta. Permite, assim, detetar defeitos na superfície incapazes de serem detetados por inspeção visual.

Nestes ensaios, serão produzidas peças femorais sendo que o tipo de gitagem utilizada é a árvore de 4 fina (A4 – 428 XL). Assim, em cada ensaio serão produzidas 32 peças. Em cada cacho, ou seja, em cada ensaio serão analisadas 12 peças (6 de cada lado da árvore – lado direito, R e lado esquerdo, L) por limitações de tempo. Assim, as referências das peças a analisar são: 3*R11, 3*R22, 3*R31, 3*R33, 3*R41, *R44, 3*L11, 3*L14, 3*L21, 3*L23, 3*L32 e 3*L41. O código de referências das peças encontra-se na Figura 27.

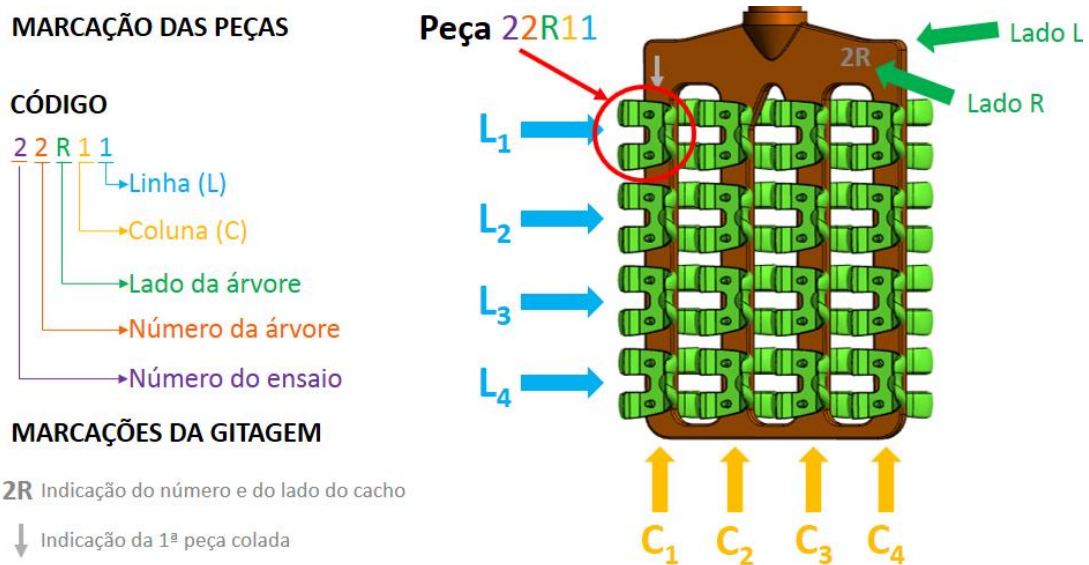


Figura 27 - Esquema de referências das peças

Tendo em conta que se pretende avaliar a qualidade das peças vazadas no forno *rollover*, a variável de resposta do DOE será um índice de classificação que é função da quantidade de defeitos e do custo desses defeitos que por sua vez depende se o defeito é possível de recuperar ou se o defeito implica a rejeição da peça. O custo de um defeito recuperável por soldadura é

diferente do custo de um defeito que rejeite a peça. O custo de um defeito que rejeita a peça é dado pelo custo de produzir uma nova peça enquanto que o custo de um defeito recuperável é dado pelo custo da operação de soldadura. De forma a não revelar os custos da empresa, será atribuído ao custo de um defeito de soldadura o valor de 0,50€ e o custo de um defeito grave que rejeite a peça será de 5€, o que reflete os custos reais em termos proporcionais, mas não em valor absoluto.

Assim, o índice de classificação é dado por:

- **Peça boa** – $I_i = 0$
- **Peça com defeitos para recuperação** – $I_i = 0,5 \times n^{\circ} \text{ de defeitos}$
- **Peça rejeitada** – $I_i = 5$

O índice de classificação de cada cacho (I) será dado pelo somatório do índice de classificação (I_i) de todas as peças analisadas por cacho.

4.2.2. Seleção dos fatores e níveis

Tendo em conta que o processo de fundição por cera perdida acarreta várias etapas, são muitos os fatores que podem influenciar a qualidade final das peças. No capítulo anterior, já foi feito um levantamento dos defeitos em cada setor que podem influenciar a qualidade final das peças. Para selecionar as gamas de funcionamento do forno *rollover*, a seleção de fatores será mais focada nas etapas de sinterização, fusão e vazamento.

Inicialmente foram selecionados vários fatores que poderiam influenciar a qualidade das peças vazadas em forno *rollover*. Os principais fatores selecionados encontram-se resumidos no diagrama de *Ishikawa* da Figura 28.

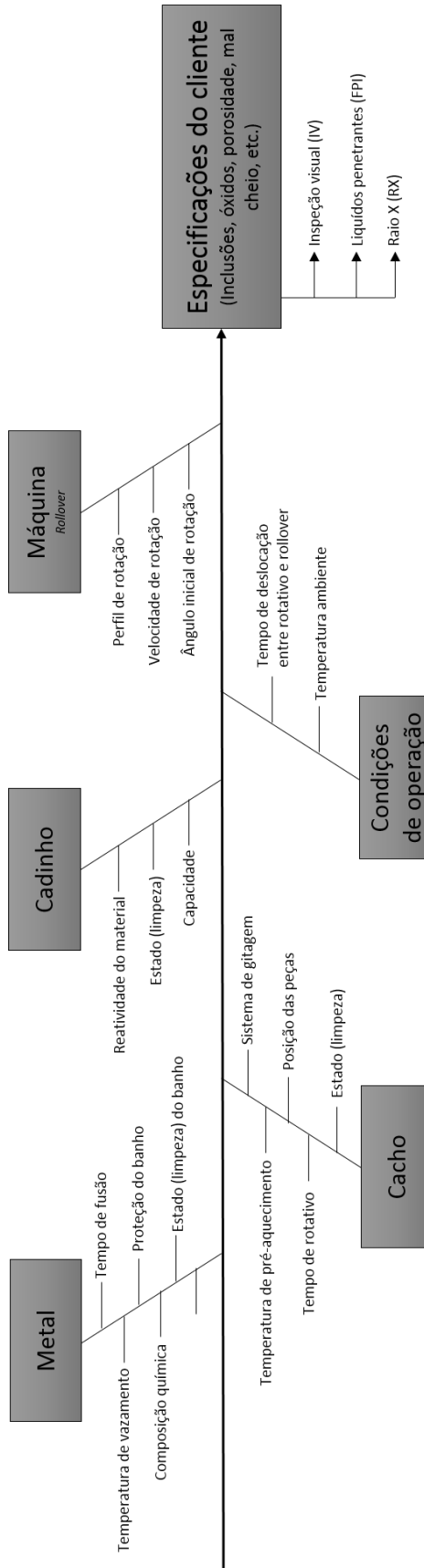


Figura 28 - Diagrama de Ishikawa com os fatores que afetam a qualidade das peças vazadas em forno rollover

- **Temperatura de vazamento** – a temperatura de vazamento afeta a fluidez do metal líquido, por isso, este fator pode levar ao aparecimento de mal cheio no caso da temperatura de vazamento ser baixa. Para além disso, quanto maior a temperatura de vazamento, maior a probabilidade de aparecimento de inclusões;
- **Composição química** – variações na composição química podem levar ao aparecimento de óxidos e/ou inclusões nas peças;
- **Proteção do banho** – a proteção do banho metálico é importante de forma a reduzir as reações entre o banho e a atmosfera, o que pode prevenir o aparecimento de defeitos como óxidos e/ou inclusões;
- **Temperatura de pré-aquecimento do cacho** – uma baixa temperatura de pré-aquecimento do cacho pode levar á perda de sobreaquecimento do metal, levando ao aparecimento de mal cheio;
- **Tempo de pré-aquecimento do cacho** – afeta a permeabilidade do cacho e, consequentemente, pode levar ao aparecimento de porosidade;
- **Sistema de gitagem** – apesar de não ser um fator diretamente ligado à sinterização, fusão ou vazamento, mas sim ao projeto, o sistema de gitagem pode ter muita influência no enchimento;
- **Posição das peças na gitagem** – a disposição das peças na gitagem terá influência na forma como se dá o enchimento;
- **Perfil de rotação** – como foi visto na revisão bibliográfica, o perfil de rotação pode influenciar o enchimento, podendo originar turbulência e consequentemente porosidade nas peças;
- **Tempo de enchimento** – é inversamente proporcional à velocidade de rotação. Se o tempo de enchimento for muito baixo, ou seja, se a velocidade de rotação for muito elevada, pode haver turbulência durante o enchimento. Por outro lado, uma baixa velocidade de rotação pode originar mal cheio;
- **Ângulo inicial de rotação** – como foi referido na revisão bibliográfica, este parâmetro está relacionado com a velocidade máxima atingida pela frente de metal que deve ser inferior a 0,5 m/s. Assim, uma má seleção deste fator pode causar turbulência durante

o enchimento. Pelo gráfico da Figura 6, constata-se que o ângulo inicial de rotação ideal deve estar entre 10 e 20°;

- **Reatividade do material do cadinho** – o material do cadinho pode reagir com os elementos de liga presentes no banho, levando à formação de óxidos e/ou inclusões;
- **Capacidade do cadinho** – a capacidade máxima do cadinho pode influenciar a entrada do metal líquido no cacho, causando turbulência. Se a capacidade do cadinho for muito próxima da quantidade de metal a vaziar, o metal poderá “cair” de uma forma mais abrupta;
- **Estado do cadinho** – um cadinho é utilizado durante um dia de vazamentos, por isso, com o acumular de vazamentos, este vai-se deteriorando, podendo contaminar o banho de fusão;
- **Tempo de deslocação entre rotativo e rollover** – é um parâmetro dependente do operador e que tem influência na perda de sobreaquecimento do cacho cerâmico antes do vazamento;
- **Temperatura ambiente** – pode influenciar a perda de sobreaquecimento durante o transporte do cacho desde o rotativo até ao início do vazamento no rollover;
- **Temperatura máxima do banho** – quanto maior a temperatura do banho, maior a probabilidade de ocorrência de reações químicas que podem levar à formação de óxidos;
- **Tempo de fusão** – quanto maior o tempo de fusão, maior a probabilidade de ocorrência de reações químicas;
- **Estado do banho** – durante a fusão forma-se escória que deve ser limpa de forma a minimizar defeitos como inclusões, óxidos.

Dos fatores controláveis selecionaram-se apenas aqueles que nesta fase seriam possíveis estudar, tendo em conta disponibilidade de produção, tempo, custos, etc. Esses fatores foram: temperatura de vazamento, temperatura de pré-aquecimento do cacho, tempo de enchimento, ângulo inicial de rotação e reatividade do material do cadinho.

Para além do estudo dos fatores isoladamente, o desenho de experiências permite estudar também interações entre fatores. As interações que parecem ser mais relevantes na qualidade das peças obtidas por vazamento rollover são:

- **Temperatura de vazamento x Temperatura de pré-aquecimento do cacho** – esta interação parece ser relevante pois o gradiente de temperatura entre o cacho e o metal não deve ser muito elevado, de forma a que não haja perda de sobreaquecimento;
- **Temperatura de vazamento x Tempo de enchimento** – o tempo de enchimento pode levar a problemas de mal cheio nas peças, no caso de o tempo de enchimento ser muito elevado. Uma forma de evitar esse problema é aumentando a temperatura de vazamento, logo esta interação poderá ter também influência no processo.

Foi necessário reduzir o número de fatores por isso, foi levado a cabo um questionário de forma a selecionar apenas os fatores com mais influência no processo. O questionário serviu também para envolver toda a equipa de engenharia da ZCP neste novo processo de vazamento. O questionário consistiu em classificar a importância de cada um dos fatores na qualidade das peças que será avaliada através de três dos ensaios especificados pelo cliente: inspeção visual (IV), líquidos penetrantes (FPI) e raio X (RX). A escala vai de 1 a 10, onde 1 significa sem importância e 10 muito importante. No Gráfico 1 e Gráfico 2 encontra-se um resumo dos resultados desses inquéritos.

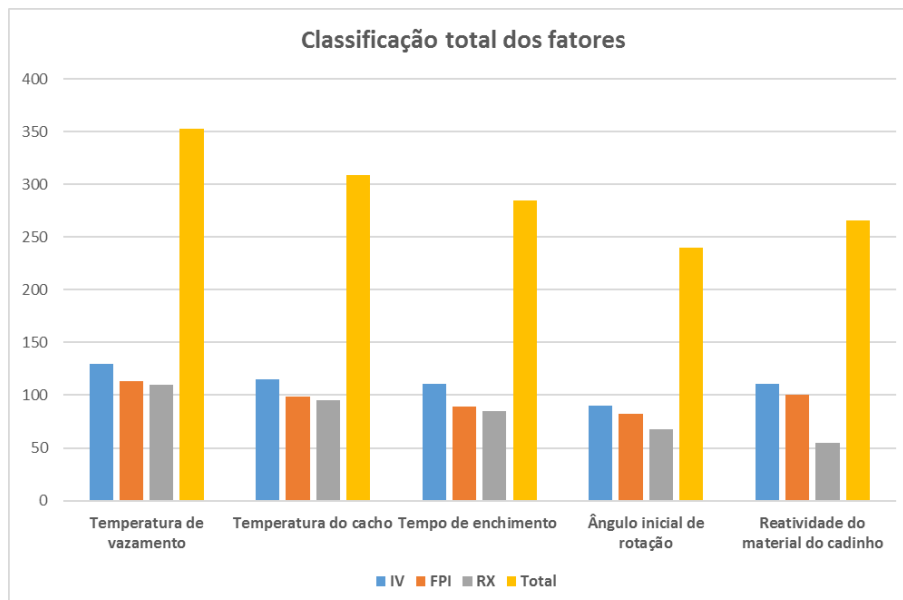


Gráfico 1 - Classificação total dos fatores

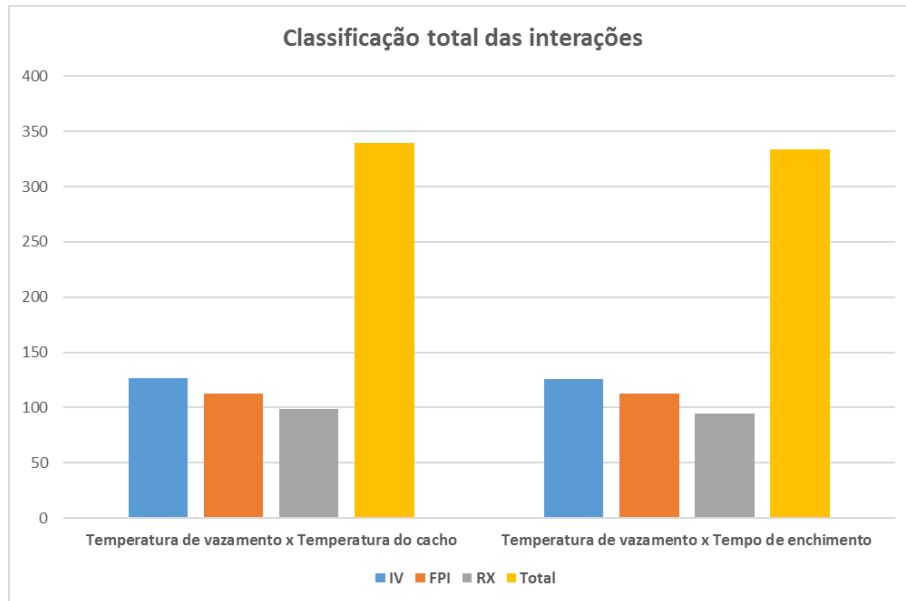


Gráfico 2 - Classificação total das interações

Assim, os fatores selecionados para analisar a qualidade das peças vazadas em forno *rollover* são: A - tempo de enchimento, B - temperatura de vazamento, C - temperatura de pré-aquecimento do cacho. Para além destes fatores, como as interações temperatura de vazamento x temperatura de pré-aquecimento do cacho (interação BC) e temperatura de vazamento x tempo de enchimento (interação AB) parecem ter alguma influência, optar-se-á por fazer um fatorial completo, em vez de fracionado, de forma a estudar estas interações.

Feita a seleção de fatores, é necessário definir o nível de cada fator. Tendo em conta que é um processo novo para a empresa e que, para além disso, existe pouca informação na literatura, o nível de cada fator foi escolhido com base na experiência da empresa noutros métodos de vazamento já utilizados para a produção destas peças. Os níveis selecionados para cada fator encontram-se resumidos na Tabela 13.

Tabela 13 - Fatores selecionados e respectivos níveis

Fator	Nível 1 (-)	Nível 2 (+)
A – Tempo de enchimento (s)	3	5
B – Temperatura de vazamento (°C)	1510 1° OK: 1520 – 1550°C 2° OK: 1510 – 1530°C	1560 1° OK: 1570 – 1600°C 2° OK: 1560 – 1580°C
C – Temperatura de pré-aquecimento do cacho (°C)	1000	1100

Estes fatores serão controlados da seguinte forma:

- **Tempo de enchimento** – controlado diretamente no controlador do forno;
- **Temperatura de vazamento** – controlado através da medição do banho com um termopar do tipo S (Figura 29), antes de se iniciar o vazamento.



Figura 29 - Termopar utilizado e registrador de temperatura

- **Temperatura de pré-aquecimento do cacho** – controlado diretamente no forno rotativo.

4.2.3. Seleção da matriz de experiências

Sabendo o número de fatores e os seus níveis, pode-se selecionar a matriz de ensaios adequada. Num design de experiência onde se recorre ao fatorial completo, o número de ensaios é dado por n^f , onde f é o número de fatores e n é o número de níveis. Ou seja, neste caso, como foram selecionados três fatores com dois níveis cada, o número de ensaios é de $2^3 = 8$. Na Tabela 14, encontra-se a matriz de experiências.

Tabela 14 - Matriz de experiências (A – Tempo de enchimento; B – Temperatura de vazamento; C – Temperatura de pré-aquecimento do cacho)

Cacho	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
36	-	-	-	+	+	+	-
35	+	-	-	-	-	+	+
37	-	+	-	-	+	-	+
38	+	+	-	+	-	-	-
31	-	-	+	+	-	-	+
32	+	-	+	-	+	-	-
33	-	+	+	-	-	+	-
34	+	+	+	+	+	+	+

Apesar de ser aconselhável recorrer à replicação de forma a obter uma estimativa da variância, por uma questão de custos e tempos de produção, não será utilizada replicação, ou seja, só será realizada um ensaio para cada combinação de fatores.

4.2.4. Definição dos restantes parâmetros não considerados na matriz de experiências

Dos fatores que se considera relevantes na obtenção de peças por vazamento *rollover* dentro dos níveis de qualidade especificados pelo cliente, mas que não serão estudados nestes ensaios, é feito um resumo na Tabela 15 de como estes fatores serão ou não considerados nos ensaios.

É importante que todos os fatores que não entram nos ensaios, se mantenham constantes em todos os ensaios de forma a garantir as mesmas condições em todos eles e, assim, evitar que estes fatores influenciem os resultados.

Tabela 15 - Fatores constantes ao longo dos ensaios


Fator	Comentário
Tempo no rotativo	O tempo de rotativo foi de cerca de 1,5 h.
Composição química	<p>Em todos os ensaios deve-se utilizar sempre matéria prima (Figura 30) do mesmo lote, de forma a que variações de composição química entre lotes não influenciem os resultados.</p>  <p>Figura 30 - Carga a utilizar</p>
Proteção do banho	<p>De forma a garantir as melhores condições de ensaio, será utilizado Árgon para proteger o banho de fusão (Figura 31).</p> <p>Caudal: 15 l/min</p>



Figura 31 - Saída de Árgon para proteção do banho

Para proteger ainda mais o banho, sempre que possível utilizou-se uma tampa a tapar a boca do forno (Figura 32).



Figura 32 - Tampa do forno para proteção durante a fusão

Sistema de gitagem

Como já foi referido, utilizar-se-á a árvore de 4 fina em todos os ensaios, já utilizada anteriormente pela empresa, noutros métodos de vazamento (Figura 27).

Posição das peças na gitagem

O cacho será posicionado como se mostra na Figura 33, com o número virado para a porta do *rollover*, de forma a saber para que lado este rodou. O lado para onde o cacho roda será designado por lado R.



Figura 33 - Marcação dos cachos do lado para onde se realiza a rotação do forno

	Entre o cacho e a boca do forno é colocado um anel de fibra cerâmica com 20 mm de espessura.
Ângulo inicial de rotação	Este fator não será considerado por limitações do forno, por isso, o forno realizará uma rotação total (180°) de uma só vez, sem fazer uma aproximação à horizontal antes de começar a encher.
Perfil de rotação	Considerar-se-á um perfil de rotação constante, visto que o forno ainda apresenta algumas limitações na criação de perfis de rotação com vários patamares.
Reatividade do material do cadinho	Será utilizado um cadinho sempre com o mesmo material e capacidade.
Capacidade do cadinho	Material: Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ Capacidade: 30 kg

4.2.4.1. Tempo de deslocamento entre rotativo e rollover

O tempo de deslocamento entre o rotativo e o *rollover* é um parâmetro dependente dos operadores, principalmente, tendo em conta que o processo se encontra numa fase inicial. A variação deste tempo ao longo dos ensaios pode ter influência na perda de sobreaquecimento do cacho cerâmico.

De forma a que este parâmetro não tenha influência na temperatura de pré-aquecimento dos cachos, foram realizados vários testes a frio para definir um tempo constante para todos os ensaios. Assim, se o tempo de deslocamento for igual em todos os ensaios, a perda de sobreaquecimento desde que o cacho sai do forno até que se inicia o vazamento deve ser igual para todos os cachos, considerando que a temperatura ambiente da nave é constante.

O vazamento em forno *rollover* será realizado por dois operadores em simultâneo: operador A e operador B. O operador A será o responsável pelas ações no controlador (controlar a potência, definir os parâmetros de cada vazamento e acionar o vazamento) e pelo transporte do cacho desde o rotativo até ao *rollover*. O operador B realiza a medição das temperaturas do banho, verifica o estado do banho durante a fusão e auxilia na centragem da

bacia com o forno no momento de pousar o cacho. As movimentações de cada operador encontram-se resumidas na Tabela 16 e na Figura 34 encontra-se um esquema do layout da nave com as posições ocupadas por cada operador durante o processo de vazamento em forno *rollover*. O tempo entre o rotativo e o *rollover* vai desde a ação d (saída do cacho do rotativo) até à ação h (início do vazamento no forno *rollover*).

Tabela 16 - Movimentações de cada operador durante a fusão e vazamento em forno rollover

		Operador A		Operador B	
		Ação	Local	Ação	Local
a	Fusão do metal	Faz os ajustes de potência	1	Adição de matéria prima, controlo e limpeza do banho e medição da temperatura do banho	4
b	1ª verificação da temperatura de vazamento	Dá ordem ao Operador B para medir a temperatura	1	Medição da temperatura do banho; Dá o Ok ao Operador A se a temperatura estiver na gama pretendida	4
c	2ª verificação da temperatura de vazamento	Com o Ok do Operador B, avança até ao rotativo e pega na lança para manipular o cacho	1-2	Medição da temperatura do banho; Dá o Ok ao Operador A se a temperatura estiver na gama pretendida	4
d	Saída do cacho do rotativo	Com o Ok do Operador B, abre o rotativo e retira o cacho com a lança	2	-	4

e	Transporte do cacho com a lança até à porta do rollover	Transporta o cacho com a lança até ao <i>rollover</i>	2-3		
f	Posicionamento do cacho no rollover	Pousa a lança	3	Auxilia no posicionamento e centragem do cacho no <i>rollover</i>	4
g	Fecho da porta	Vai até ao controlador	3-1	Sai do <i>rollover</i> para fechar a porta	4-5
h	Início do vazamento	Dá ordem no controlador para iniciar o vazamento	1	-	5

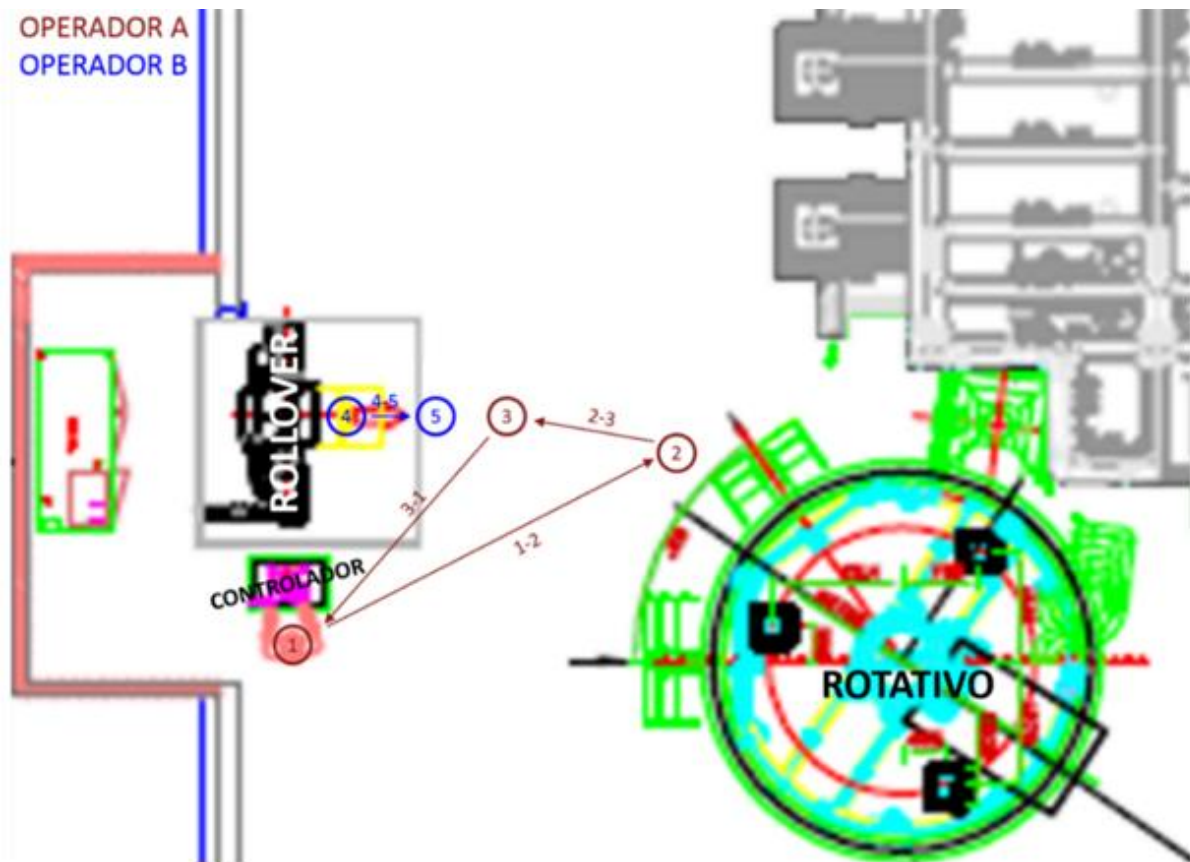


Figura 34 - Movimentações dos operadores durante a fusão e vazamento em forno rollover

Como os ensaios foram realizados a frio, estabeleceu-se que ao valor médio dos ensaios (Tabela 17) se adicionava 5 segundos. Assim, o tempo estipulado que vai desde o momento em que o cacho sai do rotativo até que se inicia o vazamento será de 25 segundos.

Tabela 17 - Ensaios a frio para aferir o tempo entre o rotativo e o rollover

Ensaios	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
Tempo (s)	28,1	22,0	17,6	20,6	17,6	19,3	20,7	15,9	20,2

4.3. Força de aperto

Um parâmetro que não tem influência na qualidade das peças vazadas no forno *rollover*, mas que é importante determinar, é a força de aperto do cacho cerâmico contra a boca do forno. Neste forno, o aperto é feito por dois cilindros hidráulicos de duplo efeito que asseguram o suporte do cacho durante o enchimento do mesmo e, para além disso, a “vedação” entre a boca do forno e a bacia de vazamento de forma a evitar fugas de metal pela fibra cerâmica que fica entre a boca do forno e a bacia. O valor da força de aperto deverá estar compreendido entre a força necessária para garantir a vedação e a força que leva à fratura da carapaça cerâmica.

A força necessária para garantir estanquidade entre a bacia de vazamento e a boca do forno (F_{est}), com a fibra cerâmica a servir de vedante, foi estimada recorrendo a ensaios de compressão no INEGI. Posicionou-se a gola de fibra e a bacia na máquina de ensaios e aplicou-se uma força uniaxial compressiva, obtendo-se a curva Força (N) vs Deslocamento (mm) representada no Gráfico 3.

Pelo Gráfico 3, constata-se que até um deslocamento de cerca de 8 mm, a força varia pouco com o aumento do deslocamento, o que sugere que até este ponto a fibra tem uma grande capacidade de deformação. A partir de um deslocamento de cerca de 8 mm, o aumento da força para que haja um aumento do deslocamento, é muito mais significativo, portanto, a capacidade de deformação da fibra é mais baixa. Assim, um deslocamento de cerca de 8 mm parece ser suficiente para garantir estanquidade da fibra durante o vazamento, a que corresponde uma força de estanquidade $F_{est} = 700$ N.

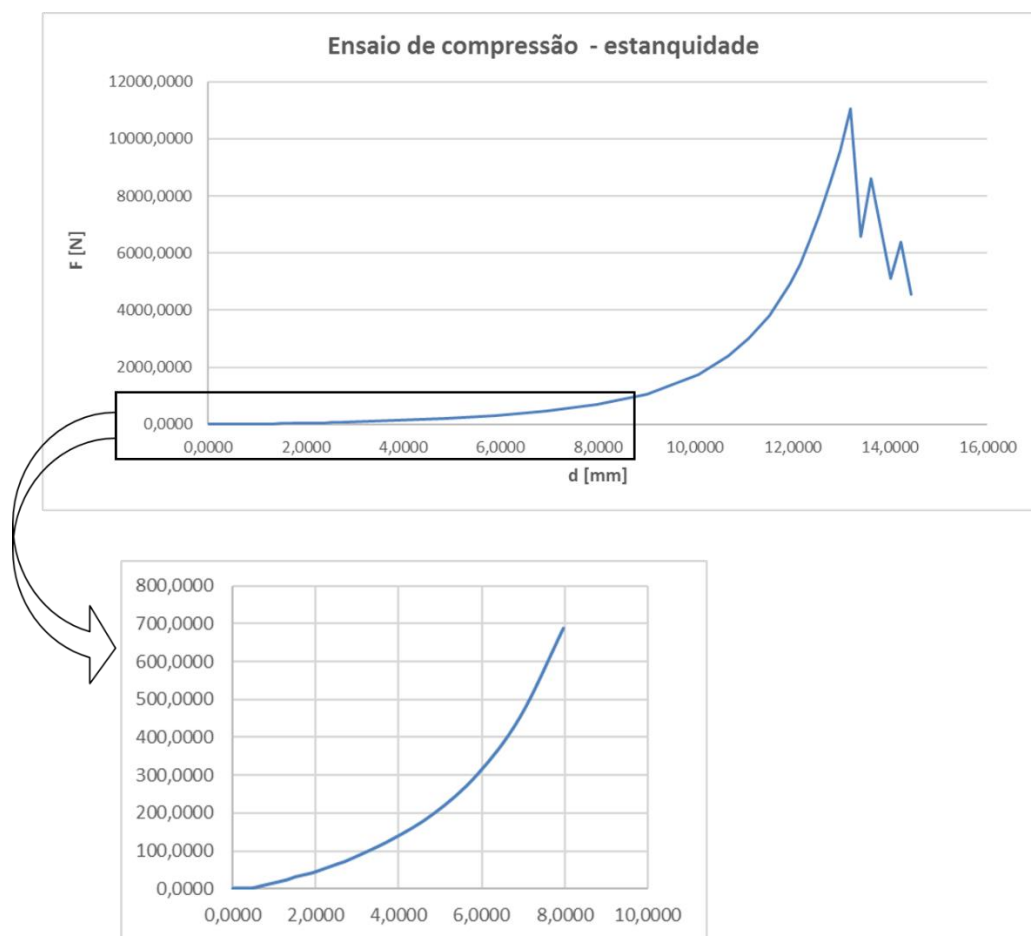


Gráfico 3 - Curva do ensaio de compressão para aferir a força necessária para que garanta estanquidade durante o vazamento

A força de aperto não pode exceder um certo valor limite, que depende da resistência da carapaça cerâmica à compressão, pois esta pode fraturar. De forma a estimar esse limite foi realizado um ensaio de compressão no INEGI, cujos resultados se encontram no Gráfico 4. Os cachos foram posicionados na máquina de ensaios com a bacia para baixo e sujeitos a uma força uniaxial compressiva, obtendo-se a curva de Força (N) vs Deslocamento (mm). Este ensaio foi realizado a frio o que pode levar a resultados um pouco diferentes do que o que acontece durante os vazamentos pois os cachos são sinterizados a uma temperatura entre 1000 e 1100°C. Tendo em conta que com o aumento da temperatura a resistência da carapaça cerâmica aumenta, usando o valor obtido no ensaio de compressão a frio como valor limite superior da força de aperto, coloca-se os cachos no lado da segurança. Pelo gráfico dos dois ensaios realizados, constata-se que em média a força máxima suportada pelo cacho antes da fratura é de 4150 N, portanto a força de aperto não pode exceder esse valor.

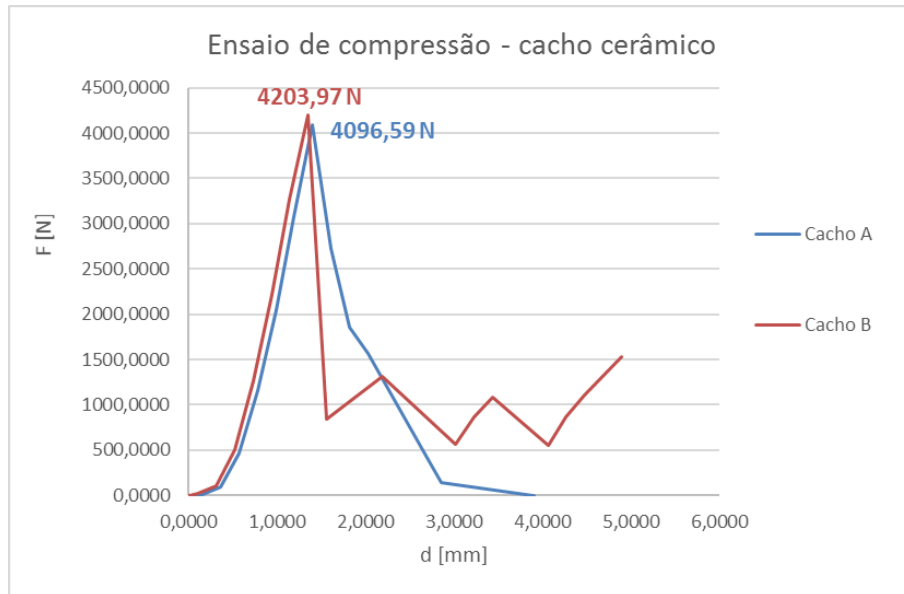


Gráfico 4 - Ensaio de compressão com dois cachos cerâmicos

Assim, tendo em conta os dois ensaios realizados no INEGI, a força de aperto deverá estar compreendida entre 700 e 4150 N.

5. Resultados e discussão

5.1. Fusão, sinterização e vazamento

A realização dos oito vazamentos referentes a cada ensaio, foi dividida em dois dias. No primeiro dia foram vazados quatro cachos, pela ordem 31, 32, 36 e 35. No segundo dia, foram vazados os restantes quatro cachos: 33, 34, 37 e 38.

Em cada dia foi utilizado um cadinho para realizar os quatro vazamentos diários. Na Figura 35, encontra-se o cadinho, após arrefecimento, depois dos quatro primeiros vazamentos e na Figura 36 encontra-se o cadinho depois dos quatro vazamentos do segundo dia. Como se pode constatar por ambas as figuras, formou-se uma pequena gola de escória ao longo dos vazamentos. A escória é uma mistura de óxidos metálicos devido à reação dos elementos que constituem a liga com o oxigénio. Daí ser essencial ter atenção à limpeza do banho durante a fusão para reduzir ao máximo a escória presente no banho.



Figura 35 - Cadinho após primeiro dia de vazamentos

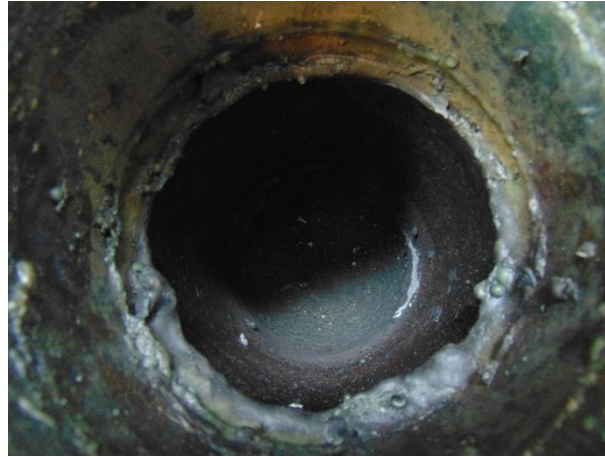


Figura 36 - Cadinho após segundo dia de vazamentos

Em cada dia de ensaios, optou-se por vaziar primeiro um tarugo para a realização da sinterização do cadinho. A fusão para sinterização do cadinho é mais demorada, cerca de 1h30, pelo que se decidiu vaziar primeiro o tarugo para garantir um tempo de fusão aproximadamente igual para todos os ensaios. A sinterização do cadinho é um processo mais demorado pois o aumento de potência deve ser gradual, já que o cadinho se encontra frio e, assim, evita-se um choque térmico que poderia causar fissuras no cadinho. É aconselhável também que a carga de sinterização seja próxima da capacidade máxima do cadinho.

Para a sinterização do cadinho utilizou-se uma mistura de retornos da liga 9100 e 9234 em forma de peças e gitos. A liga 9234, é também uma liga CoCr como a 9100 mas, neste caso, o terceiro elemento de liga com mais peso é o Tungstênio, como se vê na Tabela 18. Comparando a composição química das duas ligas, verifica-se que a percentagem dos elementos W, Ni, Fe e C na liga 9234 é muito superior à percentagem desses mesmos elementos na liga 9100 (ASTM F75) conforme a Tabela 18.

Tabela 18 - Comparação da composição química da liga 9234 com a da liga 9100

Liga 9234			Liga 9100		
	Min	Máx		Min	Máx
Co	Restante		Co	Restante	
Cr	28,00	31,00	Cr	28,00	30,00
W	3,70	5,30	W	0,00	0,20
Ni	0,00	3,00	Ni	0,00	0,50
Fe	0,00	2,00	Fe	0,00	0,70
C	0,90	1,40	C	0,15	0,20
Si	0,00	1,40	Si	0,00	1,00
Mo	0,00	1,40	Mo	6,00	7,00
Mn	0,00	1,00	Mn	0,00	1,00
Ti	0,00	0,15	Ti	0,00	0,10
P	0,00	0,02	P	0,00	0,015
S	0,00	0,015	S	0,00	0,015

No caso dos vazamentos referentes aos oito ensaios com diferentes combinações de fatores, a ideia inicial seria utilizar 100% de matéria prima da liga 9100 em forma de lingotes. Contudo, nos dois últimos vazamentos (cachos 37 e 38) foi necessário utilizar uma mistura de matéria prima da liga 9100 em lingote com retornos da mesma liga em forma de peças. Em cada vazamento utilizou-se uma carga de cerca de 23,5 kg. Como foi referido anteriormente, utilizou-se árgon para proteger o banho de fusão. No entanto, nos últimos dois vazamentos (cachos 37 e 38) não foi utilizado por lapso.*

Apesar da pouca experiência dos operadores neste tipo de fusão, em muitos dos vazamentos conseguiu-se atingir a temperatura pretendida à primeira. No primeiro dia, em que a temperatura de vazamento foi sempre de 1510°C, apenas no primeiro cacho houve uma maior oscilação da temperatura. Ao longo dos vários vazamentos conseguiu-se obter um melhor

controlo de temperatura. No segundo dia de vazamentos, em que a temperatura de vazamento foi sempre de 1560°C, apenas os dois últimos vazamentos (cachos 37 e 38) foram os mais controlados. No entanto, a curva de potência do cacho 37 foi diferente devido à pausa para almoço dos operadores, tendo o forno ficado numa potência de manutenção de 10 kW. Assim, foi necessário realizar um aumento gradual de potência em vez de subir diretamente uma potência de 100 kW como nos restantes vazamentos. As curvas de potência vs tempo de cada ensaio encontram-se no Anexo B.

Na Tabela 19, estão resumidos os parâmetros utilizados em cada vazamento.

Tabela 19 - Parâmetros utilizados em cada vazamento

Cacho	Temperatura de vazamento (°C)			Temperatura do rotativo (°C)	Tempo de enchimento (s)
	Temperatura pretendida	1° OK	2° OK		
31	1510	1524	1516	1100	3
32	1510	1529	1522	1100	5
33	1560	1572	1565	1100	3
34	1560	1572	1566	1100	5
35	1510	1535	1512	1000	5
36	1510	1532	1520	1000	3
37	1560	1590	1570	1000	3
38	1560	1597	1570	1000	5

5.2. Arrefecimento

Após os vazamentos, os cachos foram colocados em carros com divisórias em fibra de forma a evitar o contacto entre eles. No primeiro dia de vazamentos, o último cacho vazado

(cacho 35) foi colocado isolado num carro, sem contacto com fibra, devido à falta de espaço no primeiro carro. Os três primeiros cachos (cachos 31, 32 e 36) foram colocados num carro, havendo contacto de um dos lados de cada cacho com a fibra. A disposição dos cachos nos carros de arrefecimento no primeiro dia de vazamentos encontra-se na Figura 37. No segundo dia, utilizou-se uma nova disposição no carro de arrefecimento, o que permitiu que todos os cachos (cachos 33, 34, 37 e 38) fossem colocados num só carro, como se mostra na Figura 38. No caso dos cachos que foram colocados junto às divisórias, em todos eles, foi o lado R que esteve em contacto com a fibra.



Figura 37 - Carros de arrefecimento do primeiro dia de vazamentos



Figura 38 - Carro de arrefecimento do segundo dia de vazamentos

5.3. Análise das peças

Como foi referido no capítulo de material e métodos, foram selecionadas 12 peças em cada cacho para análise de defeitos recorrendo a três ensaios não destrutivos: Raios X (RX), inspeção visual (IV) e líquidos penetrantes (FPI). As peças foram classificadas em OK (peça sem defeitos), R (peça com defeitos possíveis de reparar) e NOK (peça com defeitos graves que são rejeitadas). Para além disso, são contabilizados os defeitos que surgem quando a peça é rejeitada ou recuperável. No caso da inspeção por Raios X, como se inspecionam defeitos internos, estes não são possíveis de reparar, daí a classificação ser apenas OK ou NOK. Apresenta-se de seguida o resultado desses ensaios.

Durante este subcapítulo serão apresentadas as fotografias das peças que foram rejeitadas durante a inspeção visual. Às peças que foram rejeitas na inspeção por Raios X e líquidos penetrantes não foi possível obter o registo fotográfico dos defeitos, no primeiro caso, por serem defeitos internos e, no segundo, por serem defeitos de dimensão muito reduzida.

5.3.1. Cacho 31

Das 12 peças analisadas, o cacho 31 apresentava 4 peças sem qualquer tipo de defeitos em nenhuma das inspeções, quatro peças possíveis de recuperar e quatro peças rejeitadas. As indicações de defeitos surgiram nos três tipos de ensaios realizados. As peças 31L11 e 31L41 foram rejeitadas logo na inspeção por Raios X porque apresentavam indicações de gás que podem ser provocadas por turbulência durante o enchimento visto que o cacho rodou à velocidade mais rápida. A peça 31R11 foi rejeitada na inspeção visual devido a mal cheio, provavelmente também devido à velocidade de enchimento ser rápida, tendo aprisionado gás e impedindo a definição total da aresta – Figura 39. A peça 31L32 foi rejeitada na inspeção por líquidos penetrantes devido a uma indicação no pino, zona crítica desta peça, onde não se aceita qualquer tipo de defeitos. Os resultados dos três ensaios não destrutivos encontram-se resumidos na Tabela 20.

Tabela 20 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 31 nos ensaios de Raios x, inspeção visual e líquidos penetrantes

Peça	RX		IV		FPI	
	OK, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos
31R11	OK	0	NOK	1	-	-
31R22	OK	0	OK	0	R	1
31R31	OK	0	OK	0	OK	0
31R33	OK	0	OK	0	OK	0
31R41	OK	0	OK	0	OK	0
31R44	OK	0	R	1	OK	0
31L11	NOK	1	-	-	-	-
31L14	OK	0	R	1	OK	0
31L21	OK	0	OK	0	OK	0
31L23	OK	0	OK	0	R	1
31L32	OK	0	OK	0	NOK	1
31L41	NOK	1	-	-	-	-



Figura 39 – Defeito detetado na peça 31R11 rejeitada na inspeção visual

Assim, o cacho 31 apresenta um índice de classificação $I = 22$. Os índices de classificação de cada peça encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Classificação global das peças do cacho 31

Peça	Classificação global	
	OK, R (nº de defeitos), NOK	Índice de classificação (I)
31R11	NOK	5
31R22	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
31R31	OK	0
31R33	OK	0
31R41	OK	0
31R44	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
31L11	NOK	5
31L14	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
31L21	OK	0
31L23	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
31L32	NOK	5
31L41	NOK	5
Total:		22

5.3.2. Cacho 32

Da amostra analisada, não existe nenhuma peça rejeitada no cacho 32. Este cacho apresenta cinco peças boas e sete peças para recuperação. Na inspeção por Raios X não surgiram indicações de defeitos em nenhuma peça. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 22.

Tabela 22 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 32 nos ensaios de Raios x, inspeção visual e líquidos penetrantes

Peça	RX		IV		FPI	
	OK, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos
32R11	OK	0	OK	0	R	1
32R22	OK	0	OK	0	R	1
32R31	OK	0	R	1	OK	0
32R33	OK	0	OK	0	OK	0
32R41	OK	0	OK	0	R	1
32R44	OK	0	R	1	R	1
32L11	OK	0	OK	0	R	1
32L14	OK	0	OK	0	OK	0
32L21	OK	0	OK	0	OK	0
32L23	OK	0	R	1	OK	0
32L32	OK	0	OK	0	OK	0
32L41	OK	0	OK	0	OK	0

Assim, o cacho 32 apresenta um índice de classificação $I = 4$. Os índices de classificação de cada peça encontram-se na Tabela 23.

Tabela 23 - Classificação global das peças do cacho 32

Peça	Classificação global	
	OK, R (nº de defeitos), NOK	Índice de classificação (I)
32R11	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
32R22	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
32R31	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
32R33	OK	0
32R41	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
32R44	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
32L11	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
32L14	OK	0
32L21	OK	0
32L23	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
32L32	OK	0
32L41	OK	0
Total:		4

5.3.3. Cacho 33

O cacho 33 apresenta três peças sem qualquer tipo de defeito, seis peças com defeitos recuperáveis e três peças rejeitadas. Na inspeção por Raios X não surgiram indicações de defeitos em nenhuma peça. As três peças rejeitadas foram detetadas na inspeção visual. A peça 33L21 apresentava uma inclusão de dimensão superior à tolerada pela especificação do cliente – Figura 40. A peça 33R22 apresentava um poro na cavidade (zona crítica) – Figura 41. A peça 33R41 apresentava dois defeitos graves: indicação no pino e uma inclusão de dimensão maior que a admissível – Figura 42. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 24.

Tabela 24 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 33 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes

Peça	RX		IV		FPI	
	OK, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos
33R11	OK	0	R	2	OK	0
33R22	OK	0	NOK	1	-	-
33R31	OK	0	R	2	OK	0
33R33	OK	0	R	1	OK	0
33R41	OK	0	NOK	2	-	-
33R44	OK	0	OK	0	OK	0
33L11	OK	0	R	2	OK	0
33L14	OK	0	OK	0	OK	0
33L21	OK	0	NOK	1	-	-
33L23	OK	0	OK	0	OK	0
33L32	OK	0	R	3	R	1
33L41	OK	0	R	1	R	1



Figura 40 - Defeito detetado na peça 33L21 rejeitada na inspeção visual



Figura 41 - Defeito detetado na peça 33R22 rejeitada na inspeção visual



Figura 42 – Defeitos detetados na peça 33R41 rejeitada na inspeção visual

Foram detetados 13 defeitos distribuídos pelas seis peças que necessitam de recuperação por soldadura. Assim, o cacho 33 apresenta um índice de classificação $I = 21,5$. Os índices de classificação de cada peça encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25 - Classificação global das peças do cacho 33

Peça	Classificação global	
	OK, R (nº de defeitos), NOK	Índice de classificação (I)
33R11	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
33R22	NOK	5
33R31	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
33R33	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
33R41	NOK	5
33R44	OK	0
33L11	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
33L14	OK	0
33L21	NOK	5
33L23	OK	0
33L32	R (4)	$4 \times 0,5 = 2$
33L41	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
Total:		21,5

5.3.4. Cacho 34

Das 12 peças analisadas do cacho 34, apenas uma não apresentava qualquer tipo de defeito. Surgiram duas peças rejeitadas e nove peças para recuperação por soldadura. Na inspeção por Raios X não surgiram indicações de defeitos em nenhuma peça. Ambas as peças rejeitadas foram detetadas na inspeção visual. A peça 34L21 apresentava um poro no pino – Figura 43. A peça 34R44 apresentava uma inclusão junto à cavidade – Figura 44. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 26.

Tabela 26 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 34 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes

Peça	RX		IV		FPI	
	OK, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos
34R11	OK	0	R	1	OK	0
34R22	OK	0	OK	0	R	1
34R31	OK	0	R	1	OK	0
34R33	OK	0	R	1	OK	0
34R41	OK	0	OK	0	OK	0
34R44	OK	0	NOK	1	-	-
34L11	OK	0	R	1	OK	0
34L14	OK	0	R	1	OK	0
34L21	OK	0	NOK	1	-	-
34L23	OK	0	R	1	OK	0
34L32	OK	0	R	1	OK	0
34L41	OK	0	R	1	OK	0

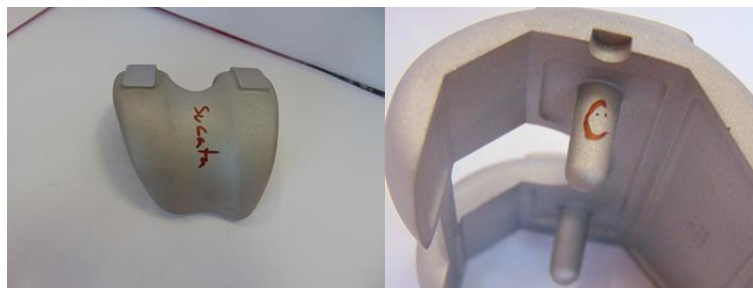


Figura 43 - Defeito detetado na peça 34L21 rejeitada na inspeção visual



Figura 44 - Defeito detetado na peça 34R44 rejeitada na inspeção visual

Assim, o cacho 34 apresenta um índice de classificação $I = 14,5$. Os índices de classificação de cada peça encontram-se na Tabela 27.

Tabela 27 - Classificação global das peças do cacho 34

Peça	Classificação global	
	OK, R (nº de defeitos), NOK	Índice de classificação (I)
34R11	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
34R22	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
34R31	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
34R33	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
34R41	OK	0
34R44	NOK	5
34L11	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
34L14	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
34L21	NOK	5
34L23	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
34L32	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
34L41	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
Total:		14,5

5.3.5. Cacho 35

Das 12 peças analisadas do cacho 35, surgiram cinco peças boas, seis peças para recuperação por soldadura e apenas uma peça rejeitada. Essa peça rejeitada – 35L11 – surgiu na inspeção visual e apresenta mal cheio (Figura 45) que pode ser explicado pelo facto de a velocidade de enchimento ter sido mais lenta e não haver uma compensação de temperatura uma vez que tanto a temperatura de vazamento como a temperatura de pré-aquecimento do cacho estavam no nível mais baixo. Na inspeção por Raios X não surgiram indicações de defeitos em nenhuma peça. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 28.

Tabela 28 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 35 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes

Peça	RX		IV		FPI	
	OK, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos
35R11	OK	0	OK	0	R	2
35R22	OK	0	OK	0	R	2
35R31	OK	0	R	1	R	2
35R33	OK	0	OK	0	R	1
35R41	OK	0	OK	0	OK	0
35R44	OK	0	OK	0	OK	0
35L11	OK	0	NOK	1	-	-
35L14	OK	0	OK	0	OK	0
35L21	OK	0	OK	0	R	1
35L23	OK	0	OK	0	OK	0
35L32	OK	0	OK	0	R	1
35L41	OK	0	OK	0	OK	0



Figura 45 - Defeito detetado na peça 35L11 rejeitada na inspeção visual

Assim, o cacho 35 apresenta um índice de classificação $I = 10$. Os índices de classificação de cada peça encontram-se na Tabela 29.

Tabela 29 - Classificação global das peças do cacho 35

Peça	Classificação global	
	OK, R (nº de defeitos), NOK	Índice de classificação (I)
35R11	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
35R22	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
35R31	R (3)	$3 \times 0,5 = 1,5$
35R33	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
35R41	OK	0
35R44	OK	0
35L11	NOK	5
35L14	OK	0
35L21	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
35L23	OK	0
35L32	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
35L41	OK	0
Total:		10

5.3.6. Cacho 36

O cacho 36 apresenta cinco peças boas e apenas uma peça rejeitada. As restantes seis peças necessitam de recuperação por soldadura. A peça rejeitada – 36L23 – foi detetada na inspeção por Raios X e apresentava uma inclusão. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 30.

Tabela 30 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 36 nos ensaios Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes

Peça	RX		IV		FPI	
	OK, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos
36R11	OK	0	R	1	R	1
36R22	OK	0	OK	0	OK	0
36R31	OK	0	OK	0	OK	0
36R33	OK	0	R	1	OK	0
36R41	OK	0	OK	0	OK	0
36R44	OK	0	OK	0	OK	0
36L11	OK	0	R	1	R	1
36L14	OK	0	OK	0	R	1
36L21	OK	0	R	1	OK	0
36L23	NOK	1	-	-	-	-
36L32	OK	0	OK	0	OK	0
36L41	OK	0	OK	0	R	1

Assim, o cacho 36 apresenta um índice de classificação $I = 9$. Os índices de classificação de cada peça encontram-se na Tabela 31.

Tabela 31 - Classificação global das peças do cacho 36

Peça	Classificação global	
	OK, R (nº de defeitos), NOK	Índice de classificação (I)
36R11	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
36R22	OK	0
36R31	OK	0
36R33	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
36R41	OK	0
36R44	OK	0
36L11	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
36L14	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
36L21	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
36L23	NOK	5
36L32	OK	0
36L41	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
Total:		9

5.3.7. Cacho 37

Apesar do cacho 37 ser aquele que apresenta o maior número de peças boas, é também aquele que apresenta uma maior taxa de peças rejeitadas. Este cacho apresenta seis peças boas, duas peças para recuperação e quatro peças rejeitadas. A peça 37R33 foi rejeitada devido a uma indicação na cavidade que surgiu na inspeção por líquidos penetrantes. As peças 37L11 e 37L21 foram rejeitadas devido a indicações de rechupe na inspeção por Raios X. A peça 37L23 foi rejeitada também na inspeção por Raios X devido a uma inclusão. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 32.

Tabela 32 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 37 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes

Peça	RX		IV		FPI	
	OK, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos
37R11	OK	0	OK	0	OK	0
37R22	OK	0	OK	0	OK	0
37R31	OK	0	R	1	OK	0
37R33	OK	0	OK	0	NOK	1
37R41	OK	0	OK	0	OK	0
37R44	OK	0	R	1	R	1
37L11	NOK	1	-	-	-	-
37L14	OK	0	OK	0	OK	0
37L21	NOK	1	-	-	-	-
37L23	NOK	1	-	-	-	-
37L32	OK	0	OK	0	OK	0
37L41	OK	0	OK	0	OK	0

Assim, o cacho 37 apresenta um índice de classificação $I = 21,5$. Os índices de classificação de cada peça encontram-se na Tabela 33.

Tabela 33 - Classificação global das peças do cacho 37

Peça	Classificação global	
	OK, R (nº de defeitos), NOK	Índice de classificação (I)
37R11	OK	0
37R22	OK	0
37R31	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
37R33	NOK	5
37R41	OK	0
37R44	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
37L11	NOK	5
37L14	OK	0
37L21	NOK	5
37L23	NOK	5
37L32	OK	0
37L41	OK	0
Total:		21,5

5.3.8. Cacho 38

Da amostra analisada, o cacho 38 apresenta quatro peças boas, seis para recuperação e duas peças rejeitadas. A peça 38L23 foi rejeitada na inspeção visual devido a uma inclusão no pino (Figura 46). A peça 38L32 foi rejeitada devido a uma inclusão detetada na inspeção por Raios X. Nos Raios X surgiram mais duas peças com uma indicação, mas esses defeitos são admissíveis tendo em conta as dimensões da especificação do cliente (38R31 – poro e 38R33 – inclusão), por isso, as peças são consideradas OK. As inclusões encontradas nas peças deste

cacho podem ter surgido devido à utilização de retornos. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 34.

Tabela 34 - Classificação das peças e contabilização dos defeitos do cacho 38 nos ensaios de Raios X, inspeção visual e líquidos penetrantes

Peça	RX		IV		FPI	
	OK, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos	OK, R, NOK	Nº de defeitos
38R11	OK	0	OK	0	OK	0
38R22	OK	0	R	1	OK	0
38R31	OK	0	R	2	R	1
38R33	OK	0	R	1	R	1
38R41	OK	0	OK	0	OK	0
38R44	OK	0	OK	0	OK	0
38L11	OK	0	OK	0	R	1
38L14	OK	0	R	1	OK	0
38L21	OK	0	OK	0	OK	0
38L23	OK	0	NOK	1	-	-
38L32	NOK	1	-	-	-	-
38L41	OK	0	OK	0	R	1



Figura 46 - Defeito detetado na peça 38L23 rejeitada na inspeção visual

Assim, o cacho 38 apresenta um índice de classificação $I = 14,5$. Os índices de classificação de cada peça encontram-se na Tabela 35.

Tabela 35 - Classificação global das peças do cacho 38

Peça	Classificação global	
	OK, R (nº de defeitos), NOK	Índice de classificação (I)
38R11	OK	0
38R22	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
38R31	R (3)	$3 \times 0,5 = 1,5$
38R33	R (2)	$2 \times 0,5 = 1$
38R41	OK	0
38R44	OK	0
38L11	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
38L14	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
38L21	OK	0
38L23	NOK	5
38L32	NOK	5
38L41	R (1)	$1 \times 0,5 = 0,5$
Total:		14,5

5.3.9. Comparação entre cachos

Em termos de inspeção visual, o cacho com mais peças rejeitadas foi o 33, o que também se verificou em termos de número de defeitos de sucata. Tendo em conta a percentagem de

peças para recuperação, o pior cacho foi o 34, no entanto, em termos de número de defeitos de recuperação o pior cacho foi o 33. O cacho 34 é também aquele que apresenta o menor número de peças sem defeitos. Assim, na inspeção visual, o cacho 33 foi o pior, seguido do 34.

Na inspeção visual, os cachos 32, 36 e 37 não apresentaram nenhuma peça rejeitada. O cacho 35 foi aquele que teve menos peças para recuperação e também aquele que apresentou mais peças sem defeitos. Em termos de número de defeitos os cachos melhores são o 35 e o 37 com apenas dois defeitos, sendo que um dos defeitos do cacho 35 é um defeito grave. Assim, na inspeção visual o melhor cacho foi o cacho 37, seguido do 32. De salientar que, no cacho 37, apenas 9 peças foram inspecionadas a nível visual pois três delas já tinham sido rejeitadas na inspeção por Raios X.

A comparação dos resultados entre cachos na inspeção visual encontra-se resumida na Tabela 36.

Tabela 36 - Comparação entre cachos – inspeção visual

Cacho	% de peças			Nº de defeitos		
	OK	R	NOK	R	NOK	Total
31	70	20	10	2	1	3
32	75	25	0	3	0	3
33	25	50	25	11	4	15
34	17	67	17	8	2	10
35	83	8	9	1	1	2
36	64	36	0	4	0	4
37	78	22	0	2	0	2
38	55	36	9	5	1	6

Nos líquidos penetrantes, apenas os cachos 31 e 37 apresentaram peças rejeitadas. Em tudo o resto, o cacho 35 é o pior, apresentando defeitos recuperáveis em muitas peças. Assim, em termos de líquidos penetrantes o pior cacho é o 37, seguido do cacho 31.

Nos líquidos penetrantes, o cacho 34 foi o melhor em todos os campos, seguido do cacho 33 que teve mais uma peça para recuperação.

A comparação dos resultados entre cachos na inspeção por líquidos penetrantes encontra-se resumida na Tabela 37.

Tabela 37 - Comparação entre cachos - líquidos penetrantes

Cacho	% de peças			Nº de defeitos		
	OK	R	NOK	R	NOK	Total
31	67	22	11	2	1	3
32	58	42	0	5	0	5
33	78	22	0	2	0	2
34	90	10	0	1	0	1
35	45	55	0	9	0	9
36	64	36	0	4	0	4
37	78	11	11	1	1	2
38	60	40	0	4	0	4

Na inspeção por Raios X, o pior cacho foi o 37, tendo apresentado 3 peças rejeitadas o que representa 25% das peças analisadas por cacho. Os cachos 32, 33, 34 e 35 não apresentaram nenhuma peça rejeitada na inspeção por Raios X. A comparação dos resultados entre cachos no raio X encontra-se resumida na Tabela 38.

Tabela 38 – Comparação entre cachos – Raio X

Cacho	% de peças		Nº de defeitos
	OK	NOK	
31	83	17	2
32	100	0	0
33	100	0	0
34	100	0	0
35	100	0	0
36	92	8	1
37	75	25	3
38	92	8	1

Em termos globais, os cachos 31, 37 e 33 foram aqueles que apresentaram mais peças rejeitadas. Estes cachos têm em comum o facto de terem sido vazados a uma velocidade mais alta (tempo de enchimento de 3s). De seguida, os cachos 34 e 38 têm em comum o facto de a temperatura de vazamento ter sido a mais alta. Isto leva a crer que estes dois parâmetros podem ser os mais influentes na qualidade das peças vazadas no forno *rollover*. Exceção feita ao cacho 31, os cachos do segundo dia de vazamentos foram aqueles que apresentaram uma maior percentagem de peças rejeitadas.

O ranking apresentado na Tabela 39, ordena de forma crescente as peças pela percentagem de rejeições. O desempate entre níveis é feito, primeiro, pela percentagem de peças para recuperação e, de seguida, pelo número de defeitos.

Tabela 39 - Comparação entre cachos – Global – 12 peças

Cacho	% OK	% R	% NOK	Nº total de defeitos	Ranking
31	33	33	33	8	8
32	42	58	0	8	1
33	25	50	25	17	6
34	8	75	17	11	5
35	42	50	8	11	3
36	42	50	8	9	2
37	50	17	33	7	7
38	33	50	17	11	4

Comparando o ranking da Tabela 39 com o ranking da Tabela 40, obtido através da variável de resposta utilizada, constata-se que esta representa de forma adequada a qualidade dos cachos, prejudicando devidamente os cachos com peças rejeitadas, exceção feita ao caso dos cachos 33 e 37. Apesar do cacho 37 ter mais peças rejeitadas, o cacho 33 tinha mais defeitos para recuperação (o cacho 37 tinha apenas 3 defeitos para recuperação e o cacho 33 tinha 13 defeitos para recuperação). Outro “*handicap*” é que não distingue os cachos 34 e 38 que apresentam o mesmo número de peças rejeitadas e o mesmo número de defeitos para a recuperação mas o cacho 34 apresenta apenas 8% de peças boas enquanto que o cacho 38

apresenta 33%. Isto porque os defeitos no cacho 34 estão mais espalhados por várias peças, ao contrário do cacho 38.

Tabela 40 – Variável de resposta

Cacho	Resposta	Ranking
31	22	8
32	4	1
33	21,5	6
34	14,5	4
35	10	3
36	9	2
37	21,5	6
38	14,5	4

Pelo Gráfico 5, percebe-se que os cachos piores são o 31, 33 e 37. É perceptível também de uma forma clara que o cacho 32 é aquele que apresenta melhor qualidade, seguido dos cachos 36 e 35.

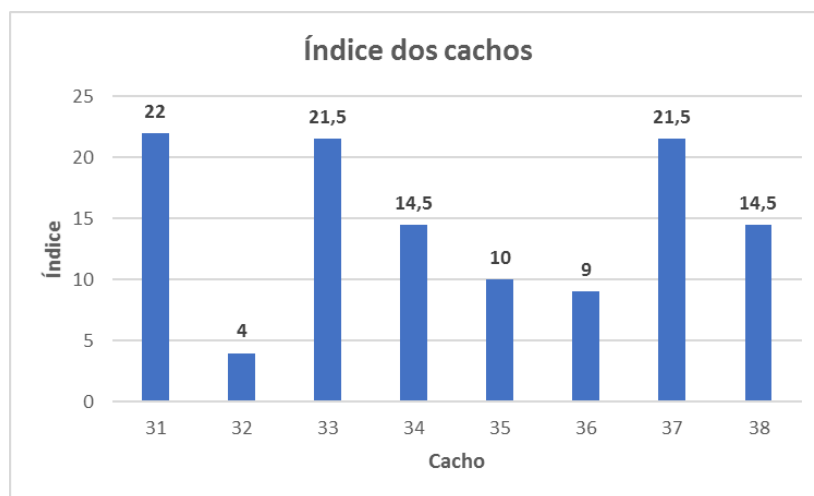


Gráfico 5 – Índice de classificação dos cachos

5.4. Análise de resultados DOE

5.4.1. Apresentação de resultados

Após analisadas as 12 peças de cada cacho e de se ter calculado o índice de classificação dos mesmos, obteve-se a matriz de resultados apresentada na Tabela 41, onde Y é a variável de resposta (índice de classificação de cada cacho). De forma gráfica, os resultados encontram-se resumidos na Figura 47.

Tabela 41 – Matriz com os resultados dos ensaios (A – Tempo de enchimento; B – Temperatura de vazamento; C – Temperatura de pré-aquecimento do cacho)

Cacho	I	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	Y
36	+	-	-	+	-	+	+	-	9
35	+	+	-	-	-	-	+	+	10
37	+	-	+	-	-	+	-	+	21,5
38	+	+	+	+	-	-	-	-	14,5
31	+	-	-	+	+	-	-	+	22
32	+	+	-	-	+	+	-	-	4
33	+	-	+	-	+	-	+	-	21,5
34	+	+	+	+	+	+	+	+	14,5

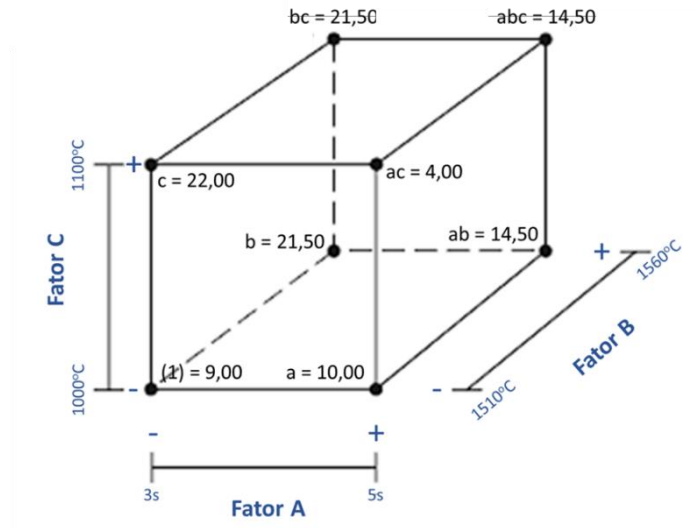


Figura 47 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios

5.4.2. Efeito dos fatores e interações

O cálculo dos efeitos e da soma dos quadrados (necessária para a análise de variância) foi realizado recorrendo ao algoritmo de Yates. Os resultados encontram-se na Tabela 42.

Tabela 42 – Algoritmo de Yates – cálculo de efeitos e soma de quadrados

Tratamento	Y	1	2	3	Efeito	SS
(1)	9,00	19,00	55,00	117,00	29,25	1711,13
a	10,00	36,00	62,00	-31,00	-7,75	120,13
b	21,50	26,00	-6,00	27,00	6,75	91,13
ab	14,50	36,00	-25,00	3,00	0,75	1,13
c	22,00	1,00	17,00	7,00	1,75	6,13
ac	4,00	-7,00	10,00	-19,00	-4,75	45,13
bc	21,50	-18,00	-8,00	-7,00	-1,75	6,13
abc	14,50	-7,00	11,00	19,00	4,75	45,13

Os efeitos dos fatores A, B e C encontram-se resumidos na Tabela 43. Se o tempo de enchimento (A) passar de nível baixo para nível alto, o índice diminui 7,75. Pelo contrário, se a temperatura de vazamento (B) e a temperatura de pré-aquecimento do cacho (C) passarem de nível baixo para nível alto o índice aumenta 6,75 e 1,75 respectivamente. O fator C é aquele que tem menos impacto no processo pois a magnitude do efeito é menor.

Tabela 43 - Efeito dos fatores A, B e C

Fator	A	B	C
Nível baixo	18,50	11,25	13,75
Nível alto	10,75	18,00	15,50
Médio	-7,75	6,75	1,75

Graficamente, os efeitos dos fatores A, B e C encontram-se nos Gráfico 6, Gráfico 7 e Gráfico 8 respectivamente.

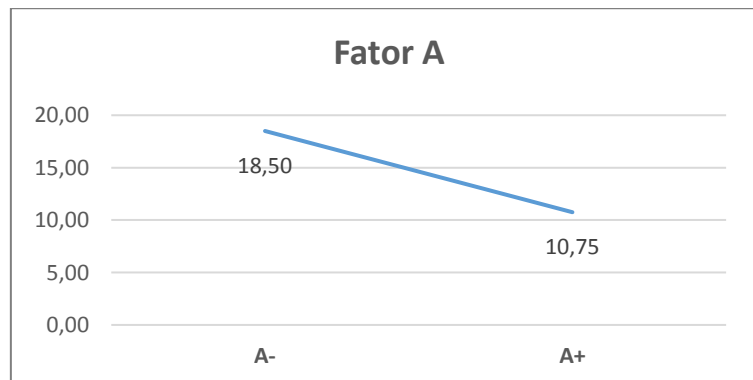


Gráfico 6 - Efeito do fator A (Tempo de enchimento)

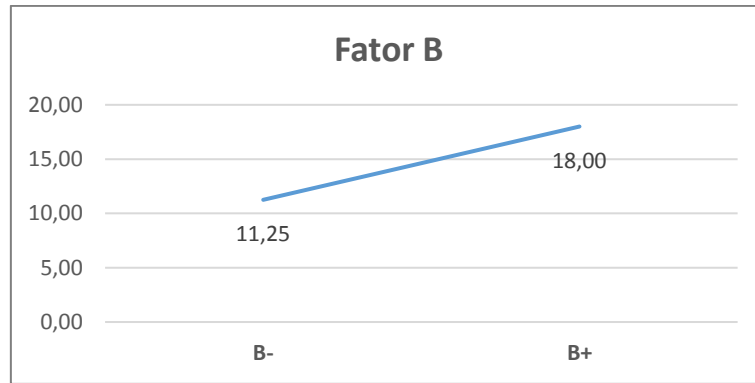


Gráfico 7 - Efeito do fator B (Temperatura de vazamento)

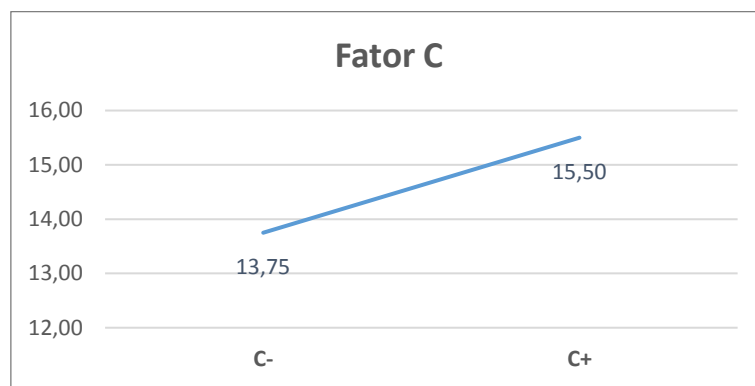


Gráfico 8 - Efeito do fator C (Temperatura de pré-aquecimento)

Para além dos fatores isoladamente, é importante verificar o efeito das interações entre os vários fatores. Na Tabela 44 e na Tabela 45 encontram-se resumidos os efeitos das interações AB, AC, BC e ABC.

Tabela 44 - Efeito das interações AB, AC e BC

		Interação AB (médio: 0,75)		Interação AC (médio: -4,75)		Interação BC (médio: -1,75)			
		A-	A+		A-	A+	B-	B+	
B-		15,50	7,00	C-	15,25	12,25	C-	9,50	18,00
B+		21,50	14,50	C+	21,75	9,25	C+	13,00	18,00

Tabela 45- Efeito da interação ABC

Interação ABC (médio: 4,75)					
	A-		A+		
	B-	B+		B-	B+
C-	9,00	21,50	C-	10,00	14,50
C+	22,00	21,50	C+	4,00	14,50

Pelo Gráfico 9, verifica-se que a interação entre o fator A e o fator B não é muito significativa pois as retas são quase paralelas. No entanto, existe interação entre o fator A e o fator C (Gráfico 10) e entre o fator B e o fator C (Gráfico 11). Não é possível ilustrar graficamente a interação ABC, mas pelo valor médio desta interação (Tabela 45) percebe-se que existe interação entre todos os fatores em estudo.

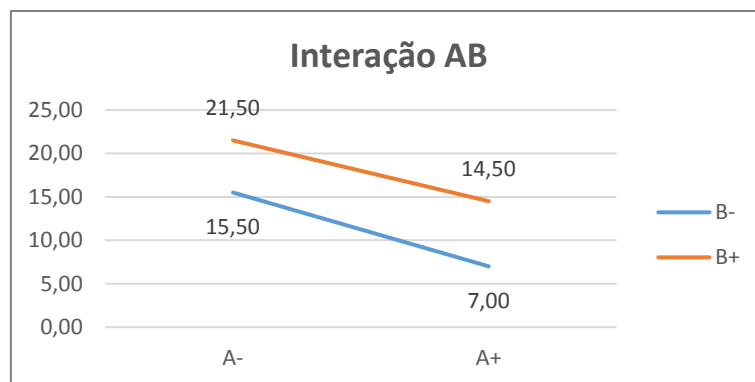


Gráfico 9 - Efeito da interação AB (A – Tempo de enchimento; B – Temperatura de vazamento)

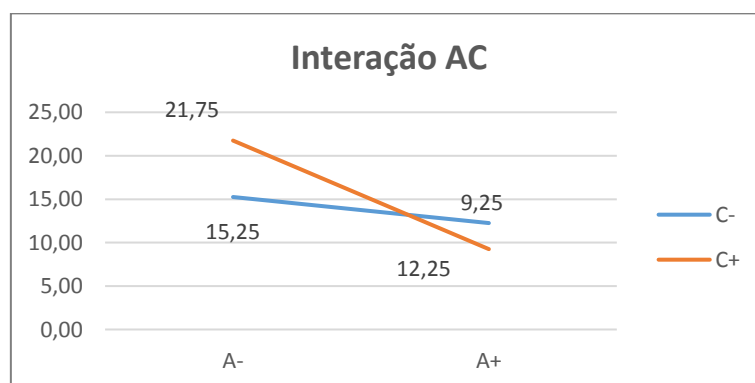


Gráfico 10 - Efeito da interação AC (A – Tempo de enchimento; C – Temperatura de pré-aquecimento)

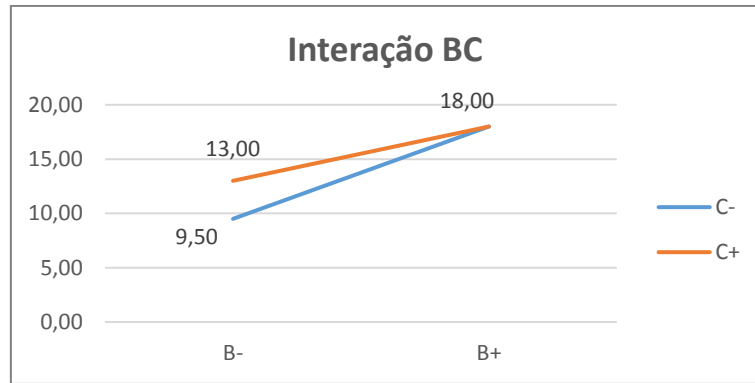


Gráfico 11 - Efeito da interação BC (B – Temperatura de vazamento; C – Temperatura de pré-aquecimento)

5.4.3. Análise de variância (ANOVA)

Num fatorial completo em que não se recorre a replicação dos ensaios, os graus de liberdade associados ao erro são 0, como se vê na Tabela 46. De forma a colmatar essa limitação, existem várias maneiras de averiguar quais os fatores/interações com mais peso no processo, nomeadamente, a percentagem de contribuição de cada um deles ou gráfico de Pareto.

Pela Tabela 46, constata-se que os fatores A e B e as interações AC e ABC são aqueles que apresentam uma maior contribuição no processo. Os restantes fatores e interações têm um peso residual.

Tabela 46 - Percentagem de contribuição de cada fator

	GL	SS	C (%)
A	1	120,13	38
B	1	91,13	29
AB	1	1,13	0
C	1	6,13	2
AC	1	45,13	14
BC	1	6,13	2
ABC	1	45,13	14
Erro	0	0,00	0
Total	7	314,88	100

Pelo gráfico de Pareto dos efeitos (Gráfico 12), verifica-se que, no total, os fatores A e B e as interações AC e ABC contribuem com cerca de 86% dos efeitos.

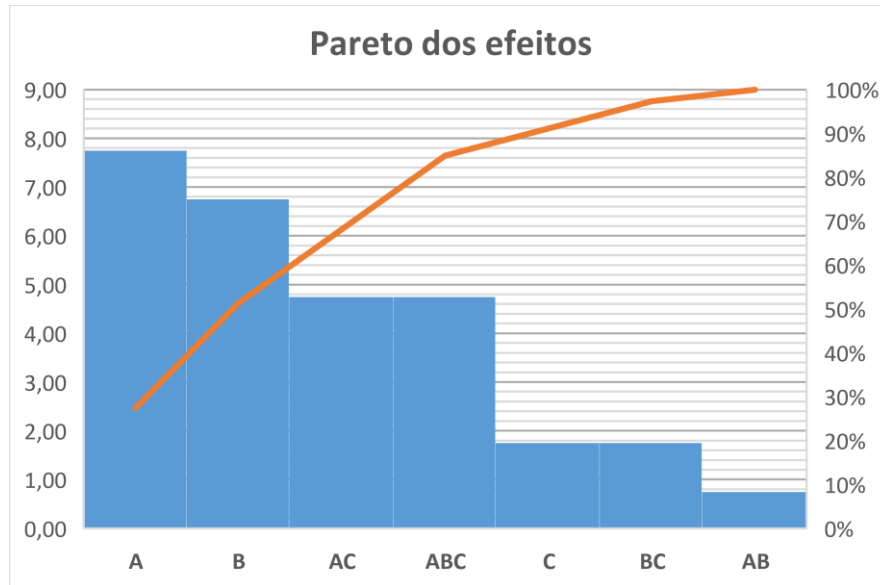


Gráfico 12 - Pareto dos efeitos

Através de todos os métodos anteriores, verificou-se que nem todos os fatores/interações têm uma influência relevante no processo. Aqueles que parecem ter mais influência são: tempo de enchimento (A), temperatura de vazamento (B) e as interações AC e ABC. Normalmente, as interações de maior ordem, neste caso, a ABC não têm um contributo significativo no processo. No entanto, neste caso, a interação ABC parece ter alguma influência no processo o que mostra que todos os fatores em estudo interagem entre si. Na análise de variância (ANOVA) só irão entrar os fatores/interações anteriormente mencionados, sendo que os restantes, por terem pouca contribuição no processo, serão introduzidos no erro experimental. O resultado da análise de variância encontra-se na Tabela 47.

Tabela 47 – Análise de variância (ANOVA)

	SS	GL	MS	F*	valor P	C (%)
A	120,13	1	120,13	26,94	0,014	36,7
B	91,13	1	91,13	20,44	0,020	27,5
AC	45,13	1	45,13	10,12	0,050	12,9
ABC	45,13	1	45,13	10,12	0,050	12,9
Erro	13,38	3	4,46			9,9
Total	314,88	7				100

* para um nível de confiança de 5%, então $F_{crítico}(1;3;0,05) = 10,13$

Para um nível de confiança de $\alpha = 5\%$, os fatores A e B são significativos no processo, uma vez que $F > F_{crítico}$. Apesar do F das interações AC e ABC se encontrar abaixo do $F_{crítico}$ (a diferença entre o F e o $F_{crítico}$ é de apenas 0,01), a probabilidade destas interações serem estas significativas no processo é de cerca de 5%.

5.4.4. Seleção da melhor combinação de parâmetros

Encontrados os fatores significativos, resta selecionar o melhor nível para esses fatores.

Para o fator A, os resultados são melhores a nível alto, ou seja, um tempo de enchimento de 5s, como se pode ver na Tabela 43. Os resultados obtidos parecem fazer sentido uma vez que quanto mais lenta a rotação menor a turbulência no enchimento, o que gera menos porosidade e, para além disso, uma rotação mais lenta diminui os arrancamentos de cerâmica, levando ao aparecimento de menos inclusões. Contrariamente, uma rotação mais lenta pode levar ao aparecimento de mal cheio devido à perda de sobreaquecimento, no entanto, este tipo de defeito surgiu poucas vezes, pois a perda de sobreaquecimento foi compensada pelos outros fatores.

Para o fator B, os resultados são mais favoráveis no nível baixo, ou seja, quando a temperatura de vazamento ronda os 1510°C, como se pode ver na Tabela 43. Mais uma vez, os resultados obtidos parecem seguir uma lógica pois quanto maior a temperatura de vazamento

maior a probabilidade de aparecimento de inclusões tanto cerâmicas como de escória pois a reatividade aumenta com o aumento da temperatura.

Isoladamente, o fator C não se mostrou significativo no processo, no entanto, as interações AC, ABC apresentam significância, por isso, a temperatura de pré-aquecimento do cacho será escolhida tendo em conta estas duas interações. Isoladamente o melhor nível para o fator C seria o nível baixo mas este tem pouca significância, no entanto, tendo em conta as interações ABC e AC o melhor nível é o nível alto (1100°C), como se pode ver na Tabela 44 e Tabela 45. Estas interações apresentam significância devido ao facto de ser necessário compensar a perda de sobreaquecimento de forma a que não surja mal cheio nas últimas peças a serem vazadas devido à perda de sobreaquecimento. Este resultado faz sentido pois se se comparar o cacho 32 com o 35, ambos com o fator A e B no melhor nível, mas que diferem no nível do fator C, o cacho 32 não apresentou peças rejeitadas mas o cacho 35 apresentou uma peça com mal cheio que teve de ser rejeitada. Este defeito ocorreu porque como o cacho 35 tinha uma temperatura de pré-aquecimento mais baixa (1000°C) o metal arrefeceu mais depressa, não permitindo o preenchimento total das últimas peças a encher. Já o cacho 32 que foi pré-aquecido a 1100°C não tinha peças com mal cheio.

Assim, a melhor combinação de fatores é:

- Tempo de enchimento (A): 5s
- Temperatura de vazamento (B): 1510°C
- Temperatura de pré-aquecimento do cacho (C): 1100°C

5.4.5. Modelo de regressão

Tendo em conta que apenas os fatores A e B e as interações AC e ABC são significativos apenas esses serão utilizados para obter o modelo de regressão.

$$\hat{Y} = Y_{modelo} = \beta_0 + \beta_A X_A + \beta_B X_B + \beta_{AC} X_A X_C + \beta_{ABC} X_A X_B X_C$$

Sabendo que:

$$\beta_0 = \text{média da respostas} = \frac{\text{soma das respostas}}{N}$$

E que β_A , β_B , β_{AC} e β_{ABC} são dados por:

$$\beta_f = \frac{\text{efeito de } f}{2}$$

Então:

$$\hat{Y} = Y_{\text{modelo}} = 14,63 - 3,88 X_A + 3,38 X_B - 2,38 X_A X_C + 2,38 X_A X_B X_C$$

As variáveis X_A , X_B e X_C são dados por:

$$X_f = \frac{f - \frac{f_+ + f_-}{2}}{\frac{f_+ - f_-}{2}}$$

Sendo f e f_+ o nível baixo e alto, respetivamente, de cada fator.

$$X_A = A - 4$$

$$X_B = \frac{B - 1035}{25} = 0,04B - 61,4$$

$$X_C = \frac{C - 1050}{50} = 0,02C - 21$$

Assim:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = Y_{\text{modelo}} = & 14,63 - 3,88(A - 4) + 3,38 (0,04B - 61,4) - 2,38(A - 4)(0,02C - 21) \\ & + 2,38 (A - 4)(0,04B - 61,4)(0,02C - 21) \end{aligned}$$

Uma forma de validar o modelo de regressão múltipla é através do coeficiente de determinação R^2 . Este coeficiente é uma medida da variabilidade explicada pelo modelo. O coeficiente de determinação R^2 é dado por:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} = 1 - \frac{13,38}{314,88} = 95,8\%$$

Um grande valor de R^2 não implica necessariamente que o modelo de regressão seja um bom ajustamento, uma vez que a adição de uma variável aumenta sempre o valor deste coeficiente (a adição de uma variável ao modelo faz sempre com que a soma de quadrados da regressão aumente), sem ter em conta se a variável que se adiciona é ou não estatisticamente significativa.

Por este motivo, utiliza-se o coeficiente de determinação ajustado R_{ajust}^2 . Este coeficiente dá uma melhor ideia da proporção de variação de Y explicada pelo modelo de regressão uma vez que tem em conta o número de fatores. Ao contrário do que acontecia com o coeficiente R^2 , o coeficiente R_{ajust}^2 não aumenta sempre quando uma nova variável é adicionada ao modelo. Este só aumenta se de alguma maneira houver vantagem na adição de uma nova variável. O coeficiente de determinação ajustado R_{ajust}^2 é dado por:

$$R_{ajust}^2 = 1 - \frac{\frac{SS_E}{GL_E}}{\frac{SS_T}{GL_T}} = 1 - \left(\frac{GL_E}{GL_T}\right) (1 - R^2) = 1 - \frac{3}{7} \times (1 - 0,958) = 90,1\%$$

Quando a diferença entre R^2 e R_{ajust}^2 é acentuada, há uma boa hipótese de que tenham sido incluídos no modelo termos estatisticamente não significativos. Neste caso, $R^2 = 95,8\%$ e $R_{ajust}^2 = 90,1\%$ estão próximos e são elevados, o que comprova que todas as variáveis incluídas no modelo são significativas.

5.4.6. Análise de resíduos

Para a construção dos modelos de regressão linear foram consideradas algumas hipóteses relativamente aos resíduos. Prioritariamente os resíduos foram considerados independentes e,

para além disso, considerou-se que eram normalmente distribuídos. Os resíduos de um modelo de regressão representam as diferenças entre aquilo que foi realmente observado e o que foi estimado através da equação de regressão, ou seja, a quantidade que a equação de regressão não foi capaz de explicar. Para calcular os resíduos recorreu-se ao algoritmo de Yates invertido que se encontra na Tabela 48.

Tabela 48 - Algoritmo de Yates invertido - cálculo de resíduos

Tratamento	(3)	1	2	3	\hat{Y}	Y	erro ($Y - \hat{Y}$)
abc	19,00	19,00	0	113	14,13	14,50	0,375
bc	0,00	-19,00	113,00	175,00	21,88	21,50	-0,375
ac	-19,00	27,00	0,00	21,00	2,63	4,00	1,375
c	0,00	86,00	175,00	159,00	19,88	22,00	2,125
ab	0,00	-19,00	-38,00	113,00	14,13	14,50	0,375
b	27,00	19,00	59,00	175,00	21,88	21,50	-0,375
a	-31,00	27,00	38,00	97,00	12,13	10,00	-2,125
(1)	117,00	148,00	121,00	83,00	10,38	9,00	-1,375

A análise dos resíduos é útil para se verificar se estes erros têm, aproximadamente, uma distribuição normal com média zero e variância constante. Analiticamente, utiliza-se o teste de qualidade de ajustamento de Kolmogorov-Smirnov (teste K-S), por exemplo, para inferir em relação à suposição da normalidade. Na Tabela 49, encontra-se o teste K-S.

Tabela 49 - Teste K-S

erros	Sn (erro)	F (erro)	Dif_esq	Dif_dir
-2,125	0,125	0,062	0,062	0,063
-1,375	0,250	0,160	0,035	0,090
-0,375	0,375	0,393	0,143	0,018
-0,375	0,500	0,393	0,018	0,107
0,375	0,625	0,607	0,107	0,018
0,375	0,750	0,607	0,018	0,143
1,375	0,875	0,840	0,090	0,035
2,125	1,000	0,938	0,063	0,062

Para um nível de confiança de 5% e tendo em conta que n=8, retira-se da tabela da Figura 48 que o valor máximo admitido para o erro é de 0,454. O valor máximo encontrado foi de 0,143, ou seja, menor que 0,454 por isso constata-se que os erros estão normalmente distribuídos.

Critical values for the Kolmogorov-Smirnov Test for goodness of fit

For completely specified continuous distributions:

1 - α	0.9	0.95	0.99	1 - α	0.9	0.95	0.99
n				n			
1	0.950	0.975	0.995	21	0.259	0.287	0.344
2	0.776	0.842	0.929	22	0.253	0.281	0.337
3	0.636	0.708	0.829	23	0.247	0.275	0.330
4	0.565	0.624	0.734	24	0.242	0.269	0.323
5	0.510	0.563	0.669	25	0.238	0.264	0.317
6	0.468	0.520	0.617	26	0.233	0.259	0.311
7	0.436	0.483	0.576	27	0.229	0.254	0.305
8	0.410	0.454	0.542	28	0.225	0.250	0.300
9	0.387	0.430	0.513	29	0.221	0.246	0.295
10	0.369	0.409	0.489	30	0.218	0.242	0.290
11	0.352	0.391	0.468	31	0.214	0.238	0.285
12	0.338	0.375	0.450	32	0.211	0.234	0.281
13	0.325	0.361	0.432	33	0.208	0.231	0.277
14	0.314	0.349	0.418	34	0.205	0.227	0.273
15	0.304	0.338	0.404	35	0.202	0.224	0.269
16	0.295	0.327	0.392				
17	0.286	0.318	0.381	> 35	$\frac{1.224}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.358}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.628}{\sqrt{n}}$
18	0.279	0.309	0.371				
19	0.271	0.301	0.361				
20	0.265	0.294	0.352				

Figura 48 - Valores críticos do teste K-S

Graficamente, a normalidade dos resíduos pode ser analisada através de gráficos de probabilidade normal dos resíduos. O gráfico de probabilidade normal dos resíduos encontra-se na Figura 49, onde se pode verificar que os vários pontos estão alinhados, o que comprova que os resíduos são normalmente distribuídos.

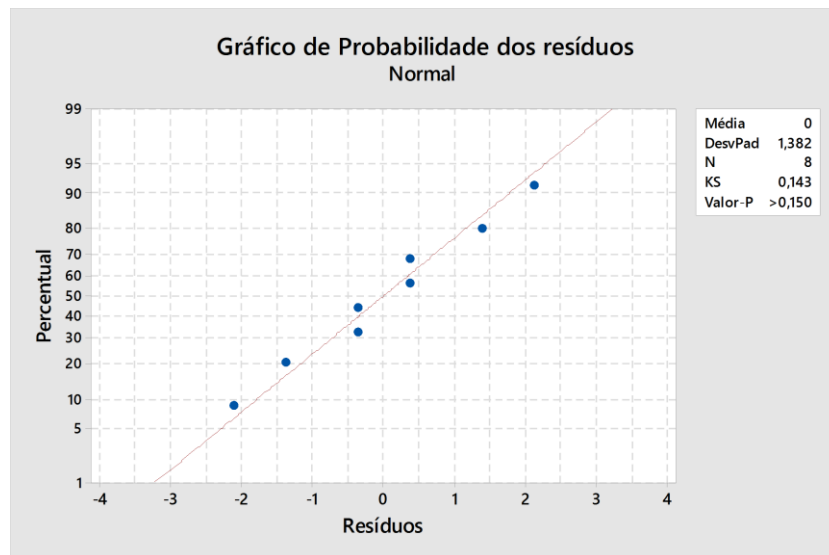


Figura 49 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos

5.4.7. Discussão dos resultados obtidos no DOE

A aplicação do desenho de experiências permitiu estudar a influência do tempo de enchimento (A), da temperatura de vazamento (B) e da temperatura de pré-aquecimento do cacho (C) no vazamento em forno *rollover*. Através da ANOVA, conclui-se que todos os fatores têm influência no processo mas nem todos de forma isolada. Os fatores A e B são significativos, mas o fator C não. No entanto, as interações AC e ABC são significativas, por isso, o fator C tem influência no processo mas não de forma isolada. A melhor combinação de fatores é: tempo de enchimento de 5s, temperatura de vazamento de 1510°C e temperatura de pré-aquecimento do cacho de 1100°C.

Apesar dos resultados obtidos serem satisfatórios, há vários fatores que podem estar a afetar os resultados, nomeadamente:

- Os níveis dos fatores podem ainda não ser os ótimos, uma vez que é um processo novo e não havia um histórico de base para seleção dos melhores níveis;
- Pode haver fatores de ruído que estejam a influenciar o processo, nomeadamente, em termos de controlo do banho de fusão devido à pouca experiência dos operadores neste novo processo de fusão e vazamento;
- A variável de resposta não faz distinção dos defeitos analisados, classificando a qualidade da peça como um todo. Para além disso, pode não ser a mais indicada;
- O tamanho da amostragem (apenas 12 das 32 peças por cacho) pode não refletir a qualidade de todo o cacho;
- O facto de não se ter realizado repetições não permite obter uma estimativa do erro experimental.

5.5. Análise metalográfica dos melhores cachos a nível visual

Após terem sido analisados os resultados a nível macro e retirada a melhor combinação de fatores, optou-se por fazer a análise metalográfica a uma peça do cacho com a melhor combinação de parâmetros. A análise foi feita no plano de corte identificado na Figura 50 e decidiu-se analisar a sanidade da peça, nomeadamente a presença de microrechupes, e a microestrutura da mesma. As peças analisadas encontravam-se ainda no estado bruto de fundição.

No Anexo C, encontra-se a descrição do processo de obtenção das amostras.

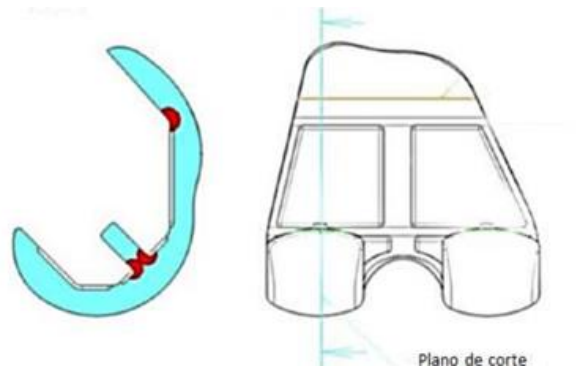


Figura 50 - Plano de corte para análise metalográfica

5.5.1. Sanidade

Segundo o histórico da empresa, em termos de sanidade, aquilo que era mais crítico neste tipo de peças era o aparecimento de microrechupe. Analisaram-se duas peças e verificou-se que a peça 32L23 estava isenta de microrechupe tendo aparecido apenas um cluster de inclusões mas de dimensões admissíveis (Figura 51).

A peça 32L32 apresentou várias indicações de microrechupe. A Figura 52, 53 e 54 mostram as várias indicações de microrechupe da peça 32L32, sendo que a primeira é a indicação mais grave devido à dimensão do microrechupe e do facto de este ser comunicante.

As indicações que surgiram apresentaram dimensões inferiores ao limite de deteção por radioscopia com chapa radiográfica (0,2 a 0,3 mm).

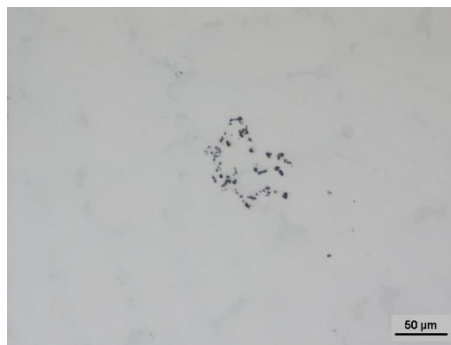


Figura 51 - Cluster de inclusões observado na peça 32L23

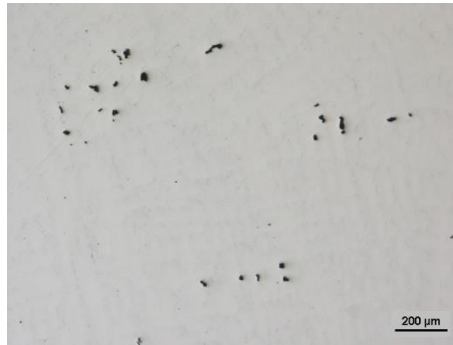


Figura 52 - Microrechupe observado na peça 32L32



Figura 53 – Microrechupe observado na peça 32L32



Figura 54 - Microrechupe observado na peça 32L32

5.5.2. Microestrutura

Analisou-se a microestrutura de cinco zonas diferentes da amostra da peça 32L23, que não apresentou indicações de microrechupes. A análise da microestrutura foi realizada a dois níveis pois a zona junto aos gitos é mais massiva e, por isso, o tempo de ataque inicial não foi suficiente, não contrastando eficazmente a amostra. Mas ao aplicar um tempo de ataque superior, as zonas de menor massividade ficariam queimadas. Assim, fez-se um ataque inicial

e analisou-se a microestrutura das zonas assinaladas na Figura 55 e, de seguida, com um novo ataque analisou-se a microestrutura das zonas assinaladas na Figura 56.

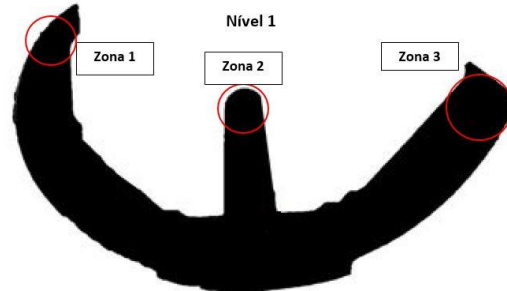


Figura 55 – Mapa das zonas analisadas no primeiro nível de ataque eletrolítico



Figura 56 - Mapa das zonas analisadas no segundo nível de ataque eletrolítico

As microestruturas obtidas em todas as zonas analisadas da amostra, são semelhantes à microestrutura observada na Figura 13 da revisão bibliográfica. É possível observar a matriz de cobalto com precipitados inter e intragranulares. As zonas de maior massividade (zona 4 e 5), junto ao gito, parecem ter um grão maior e carbonetos de maior dimensão. A Figura 57, 58, 59, 60 e 61

mostram a microestrutura da peça nas zonas 1, 2, 3, 4 e 5, respetivamente.

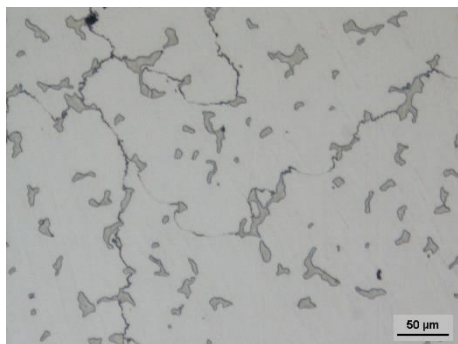


Figura 57 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 1)

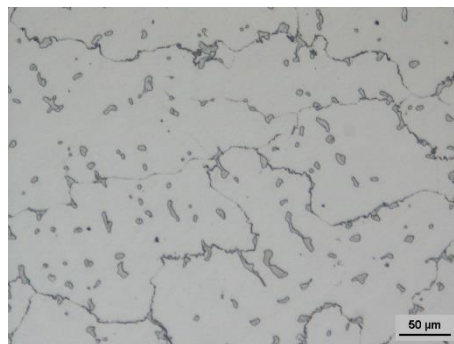


Figura 58 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 2)

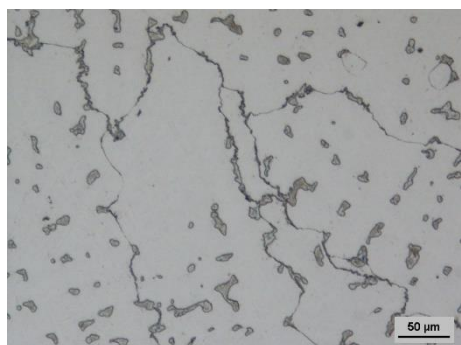


Figura 59 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 3)

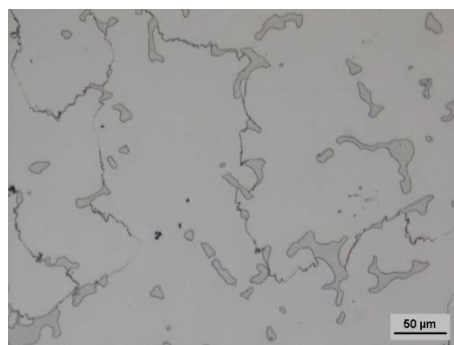


Figura 60 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 4)

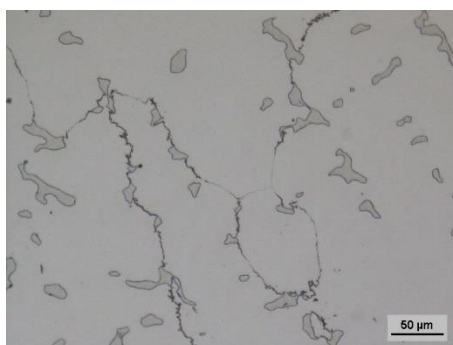


Figura 61 – Microestrutura da peça 32L23 (zona 5)

6. Conclusões

O objetivo geral deste trabalho foi aplicar as técnicas de planeamento e análise de experiências na implementação do vazamento de próteses femorais em forno *rollover*, determinando as gamas de funcionamento do mesmo. Assim, pretendia-se identificar os fatores que mais influenciam o vazamento em forno *rollover* e selecionar os melhores níveis desses fatores de modo a obter peças com níveis de qualidade dentro das especificações do cliente.

De entre os vários fatores, selecionaram-se apenas três fatores que foram estudados a dois níveis cada um: A - tempo de enchimento (3 e 5 s), B - temperatura de vazamento (1510 e 1560°C) e C - temperatura de pré-aquecimento do cacho (1000 e 1100°C). Assim, realizaram-se oito vazamentos com diferentes combinações de fatores. O tempo de enchimento foi programado diretamente no controlador do equipamento. A temperatura de pré-aquecimento do cacho foi programada diretamente no forno rotativo. Quanto à temperatura de vazamento, o parâmetro mais difícil de controlar, foi controlada através da potência e verificada através da medição do banho com um termopar tipo S.

Um parâmetro que não tem influência na qualidade das peças mas que pode comprometer os vazamentos é a força de aperto no forno *rollover*. A força de aperto tem de garantir a sustentação do cacho em rotação e a estanquidade pela compressão suficiente da fibra cerâmica para que não haja fugas de metal. Essa força tem de ser suficientemente baixa para que não haja o risco de fratura da carapaça cerâmica

De forma a garantir uma fiabilidade dos ensaios, foi necessário seguir com rigor todo o processo de fabrico dos cachos cerâmicos de forma a que defeitos provenientes dessas fases do processo não tivessem grande influência nos resultados finais. Para além disso, durante a fusão e vazamento dos vários cachos foi necessário ter atenção a proteção e limpeza do banho e garantir que o tempo que vai desde o instante em que se retira o cacho do rotativo até ao instante em que se inicia o vazamento fosse igual em todos os ensaios.

Após análise das peças vazadas, chegou-se à conclusão que todos os três fatores selecionados se mostraram influentes no processo mas nem todos de forma isolada. O tempo de enchimento foi o fator mais significativo no processo, seguido da temperatura de vazamento. A melhor combinação de fatores foi: tempo de enchimento de 5 s, temperatura de vazamento de 1510°C e temperatura de pré-aquecimento do cacho de 1100°C.

Os resultados obtidos parecem fazer sentido. Um tempo de enchimento menor, gera turbulência no enchimento, levando ao aparecimento de menos porosidade. Para além disso, uma rotação mais lenta diminui os arrancamentos de cerâmica, levando ao aparecimento de menos inclusões. Quanto maior a temperatura de vazamento, maior a probabilidade de aparecimento de inclusões tanto cerâmicas como de escória pois a reatividade aumenta com o aumento da temperatura. Isoladamente, a temperatura de pré-aquecimento do cacho não se mostrou significativa no processo, no entanto, a interação entre todos os fatores e a interação entre o fator tempo de enchimento e temperatura de pré-aquecimento do cacho mostraram-se significativas. Como a rotação foi lenta e a temperatura de vazamento baixa, seria de esperar que houvesse peças com mal cheio, no entanto, o cacho 32, aquele que teve a melhor combinação de parâmetros, não apresentou peças com esse defeito. As interações anteriormente referidas apresentaram significância devido ao facto de ser necessário compensar a perda de sobreaquecimento de forma a que não surja mal cheio nas últimas peças a serem vazadas devido à perda de sobreaquecimento.

A microestrutura observada numa peça do cacho com melhor combinação de parâmetros é semelhante à microestrutura típica desta liga. É possível observar a matriz de cobalto com precipitados inter e intragranulares. Em termos de sanidade, uma das peças apresentava indicações de microrechupes mas com dimensões inferiores ao limite de deteção por radioscopia com chapa radiográfica (0,2 a 0,3 mm). Este facto pode ser uma indicação de que o sistema de gitagem e alimentação pode não ser o mais adequado.

Trabalhos futuros

Em termos de trabalho futuros, seria interessante analisar mais peças dos vários cachos (preferencialmente as 32 de cada cacho) pois as peças analisadas (12 de cada cacho) podem não refletir a qualidade geral do cacho. Para além disso, após se ter a melhor combinação de

fatores, seria interessante realizar ensaios de confirmação, vazando vários cachos com essa combinação ideal de parâmetros.

Em relação ao fator tempo de enchimento, seria interessante testar diferentes patamares de velocidade de enchimento em vez de uma velocidade constante, caso haja a possibilidade de implementar essa função no forno *rollover* da empresa.

Para além disso, seria interessante realizar ensaios com mais fatores, nomeadamente, a reatividade do cadinho, utilizando cadinhos de diferentes materiais.

Referências

- American Foundrymen's Society, Inc. 1993. *Handbook of the Investment Casting Process*.
- Bahrami Nasab, Marjan, Mohd Roshdi Hassan, and B. Sahari. 2010. "Metallic biomaterials of knee and hip - A review." *Trends in Biomaterials & Artificial Organs* 24:69-82.
- Bedolla-Gil, Y., A. Juarez-Hernandez, A. Perez-Unzueta, E. Garcia-Sanchez, R. Mercado-Solis, and M.A.L. Hernandez-Rodriguez. 2009. "Influence of heat treatments on mechanical properties of a biocompatibility alloy ASTM F75." *Revista Mexicana de Física* 55:5.
- Bellefontaine, G. 2010. *The Corrosion of CoCrMo Alloys for Biomedical Applications*: University of Birmingham, School of Metallurgy and Materials.
- Campbell, John. 2015. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design: Second Edition*.
- Chen, Qizhi. 2014. *Biomaterials: A Basic Introduction*.
- Chen, Qizhi, and George A. Thouas. 2015. "Metallic implant biomaterials." *Materials Science and Engineering: R: Reports* 87:1-57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001>.
- Cox, M., and R. A. Harding. 2007. "Influence of tilt filling on Weibull modulus of 2L99 aluminium investment castings." *Materials Science and Technology* 23 (2):214-224. doi: 10.1179/174328407X157263.
- Davis, J. R. 2003. *Handbook of materials for medical devices ed. by J. R. Davis*.
- Lima, Roberval Monteiro Bezerra de. Técnicas de Experimentação Estatística: Planos Factoriais e aplicações. 2010. 85 p. Dissertação (Mestrado em Estatística, Matemática e Computação)- Universidade Aberta, Lisboa, 2010.
- Djambazov, Georgi, and Koulis Pericleous. 2011. *Numerical study of crucial parameters in tilt casting for titanium aluminides*. Vol. 8.
- Duarte, Teresa P. , Rui J. Neto, Rui Félix, and F. Jorge Lino. 2008. "Optimization of Ceramic Shells for Contact with Reactive Alloys " *Materials Science Forum* 587-588:157-161.
- Félix, Rui Manuel Carvalho. 2008. "Desenvolvimento do Fabrico de Próteses por Fundição de Precisão à Medida do Paciente ", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Galdaméz, Edwin Vladimir Cardoza. Aplicação das técnicas de planeamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. 2002. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- Giacchi, J. V., O. Fornaro, and H. Palacio. 2012. "Microstructural evolution during solution treatment of Co–Cr–Mo–C biocompatible alloys." *Materials Characterization* 68:49-57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.03.006>.
- Kaiser, R., David Browne, K. Williamson, and C. O'Brien. 2012. *Effects of Section Size And Cooling Rate on Microstructure and As-Cast Properties of Investment Cast CO-CR Biomedical Alloy*. Vol. 2.
- Landuci, Michel Cinto. 2016. "Caracterização das propriedades mecânicas de biomateriais metálicos."

- Nishizawa, K. Ishida and T. 1990. "The Co-Cr (Cobalt-Chromium) System." *Bulletin of Alloy Phase Diagrams* 11:14.
- Park, J. B., J. I. Lee, H. Cho, and J. H. Ryu. 2017. *Microstructure of metal carbides in CoCrMo for biocompatible artificial knee joint*. Vol. 18.
- Park, Joon B., and Joseph D. Bronzino. 2003. *Biomaterials principles and applications edited by Joon B. Park [and] Joseph D. Bronzino*.
- Pattnaik, Sarojrani, D. Benny Karunakar, and P. K. Jha. 2012. "Developments in investment casting process—A review." *Journal of Materials Processing Technology* 212 (11):2332-2348. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>.
- Pereira, José. 2017. "Interação Metal-Cerâmica no vazamento de aços no processo de Fundição por Cera Perdida." Mestrado Integrado, Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Peterson, Joyce Y. Wong; Joseph D. Bronzino; Donald R. 2013. *Biomaterials: Principles and Practices*.
- Podrez-Radziszewska, M., K. Haimann, W. Dudziński, and M. Morawska-Sołtysik. 2010. "Characteristic of intermetallic phases in cast dental CoCrMo alloy " *Archives of Foundry Engineering* 10 (3):6.
- Ramírez-Vidaurre, L. E., M. Castro-Román, M. Herrera-Trejo, C. V. García-López, and E. Almanza-Casas. 2009. "Cooling rate and carbon content effect on the fraction of secondary phases precipitate in as-cast microstructure of ASTM F75 alloy." *Journal of Materials Processing Technology* 209 (4):1681-1687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.039>.
- Ratner, B. D., Allan Hoffman, F. J. Schoen, J. E. Lemons, J. Dyro, Ørjan Martinsen, R. Kyle, Bernhard Preim, D. Bartz, Sverre Grimnes, Daniel Vallero, Johb Semmlow, W. B. Murray, R. Perez, I. Bankman, S. Dunn, Yoshito Ikada, F. V. Moghe, and A. Constantnides. 2009. *Biomedical Engineering Desk Reference*.
- Rocha, Filipa. 2017. "Melhoria do processo de fundição por cera perdida de próteses de joelho em liga CoCr." Mestrado Integrado, Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rui, Félix, T. Duarte, R. Neto, and J. Lino. 2012. "Projecto e Fabrico de Próteses Maxilo-Faciais Metálicas à Medida do Paciente Parte II." *O Molde* 23 (92):20-23.
- Santos, Luiz Alberto dos. 2012. "Processamento e caracterização da liga 66Co-28Cr-6Mo(%peso) para implantes." Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo.
- Shahabudeen, K. Krishnaiah; P. 2012. *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*.
- Silva-Magalhães, Ana. 2011. *Microfundição por Modelo Perdido - Microcomponentes na Liga CoCrMo (Investment Casting of Microparts made of CoCrMo)*.
- Silva, Paula Cipriano da. 2015. "Blocos metálicos biocompatíveis de Co-Cr-Mo-W para confecção de próteses dentárias por prototipagem CAD/CAM." Centro Universitário de Volta Redonda.
- Soares, Nuno Alexandre da Silva Baptista. Planeamento de Experiências na Soldadura na GE Power Controls Portugal. 2013. 56 p. Dissertação (Mestrado Inegrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.
- System, Arcam EBM. 2007. ASTM F75 CoCr Alloy.
- Williamson, Ruth Kaiser Kenny, Claire O'Brien, and David J. Browne. 2013. "Effects of Section Size, Surface Cooling Conditions, and Crucible Material on Microstructure and As-Cast Properties of Investment Cast Co-Cr Biomedical Alloy." *Metallurgical and Materials Transactions A* 44 (12):9.
- Yodice, Daniel B. 1991. Investment casting process.

Processo de fundição por cera perdida de próteses médicas em ligas CoCrMo vazadas em forno rotativo rollover

Zollern. accessed 15 de abril de 2018. <https://www.zollern.com/>.

Anexos

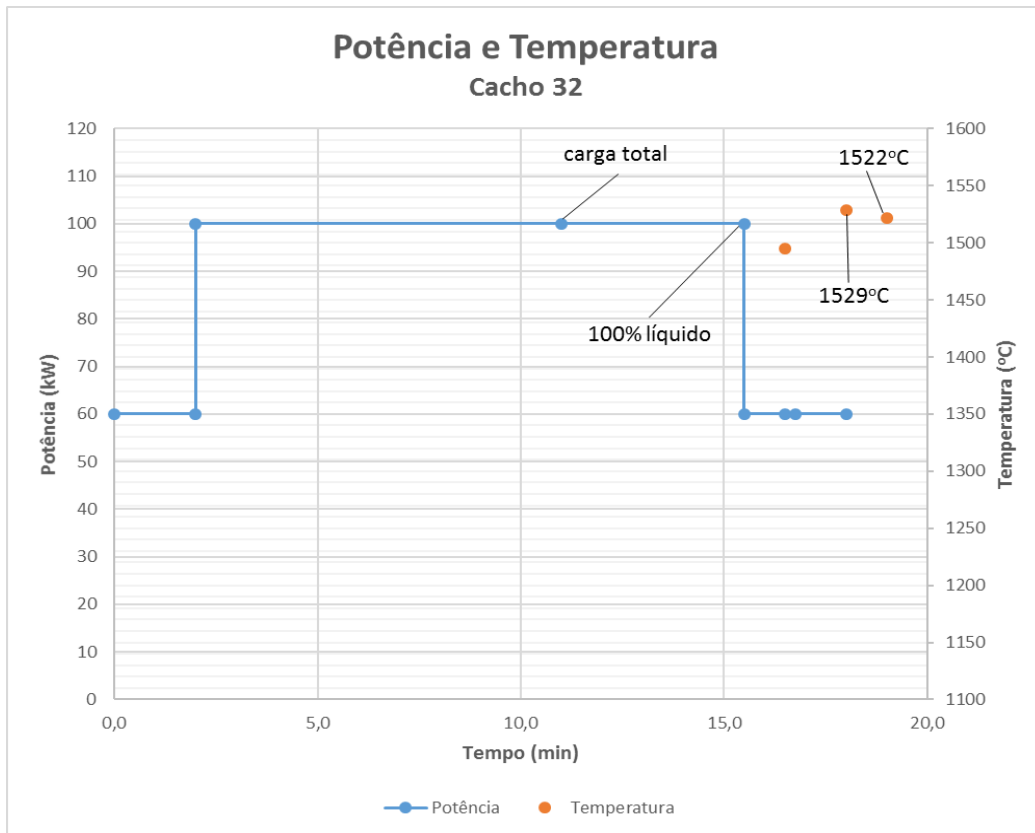
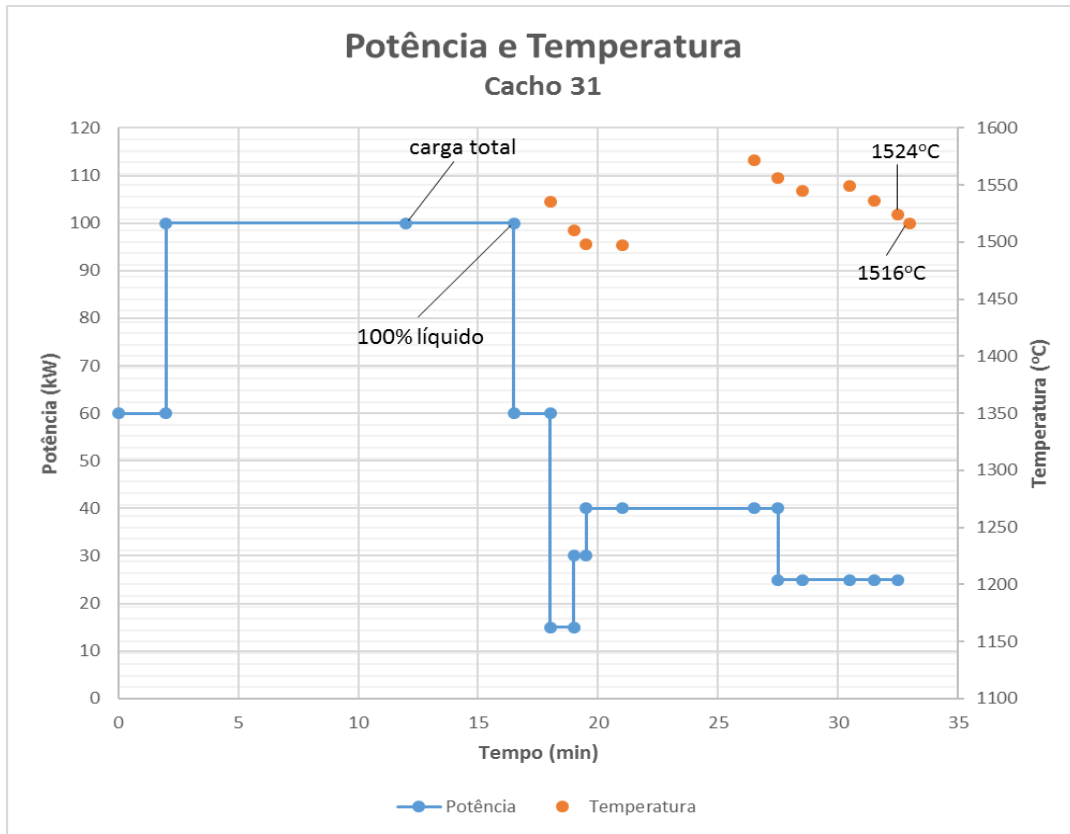
- **Anexo A:** Desenho de definição do forno *rollover*
- **Anexo B:** Curvas de potência vs tempo dos ensaios
- **Anexo C:** Preparação das amostras para análise metalográfica

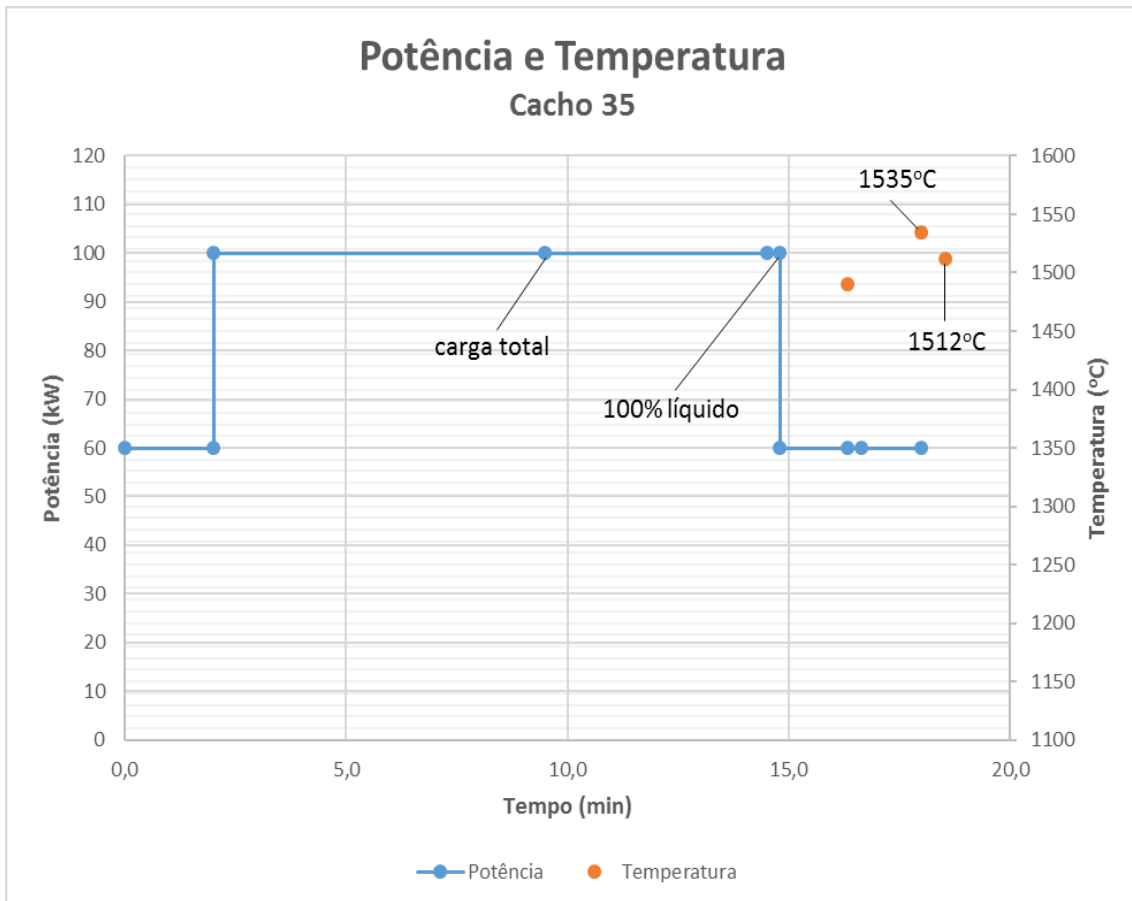
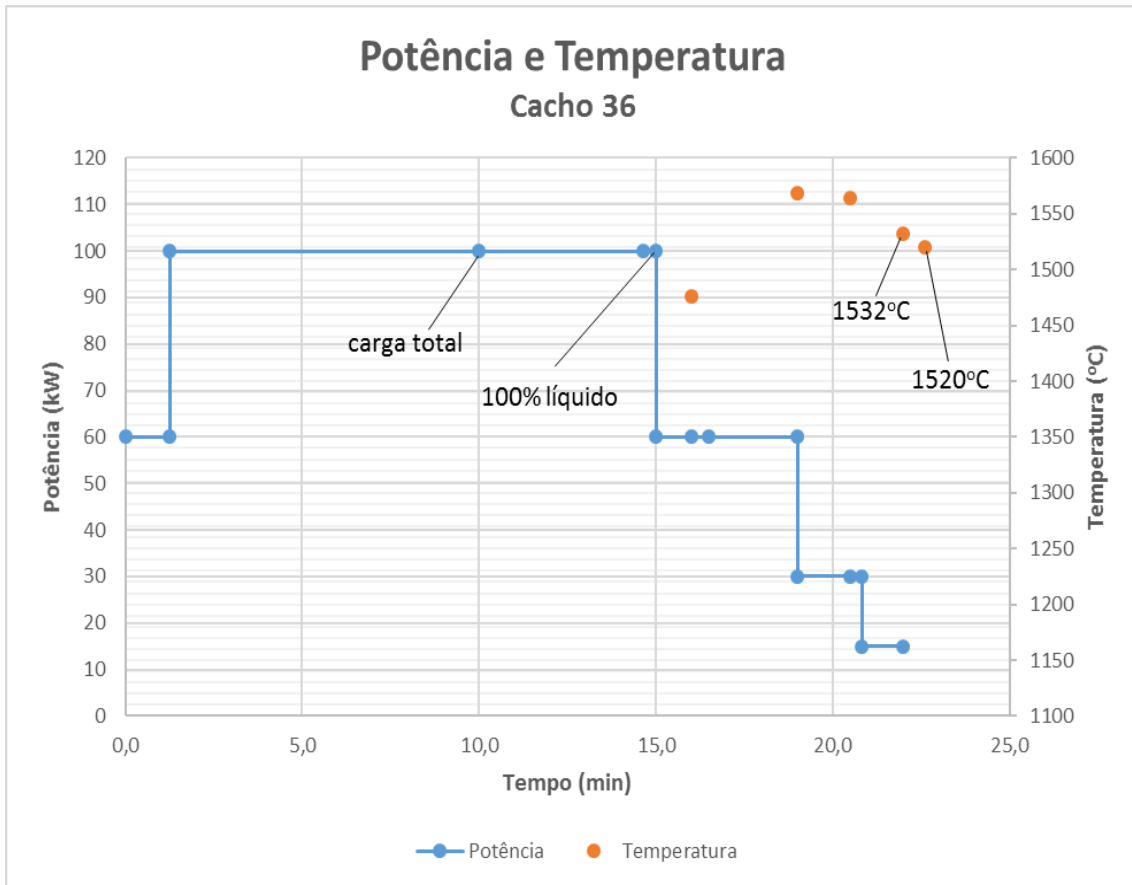
ANEXO A

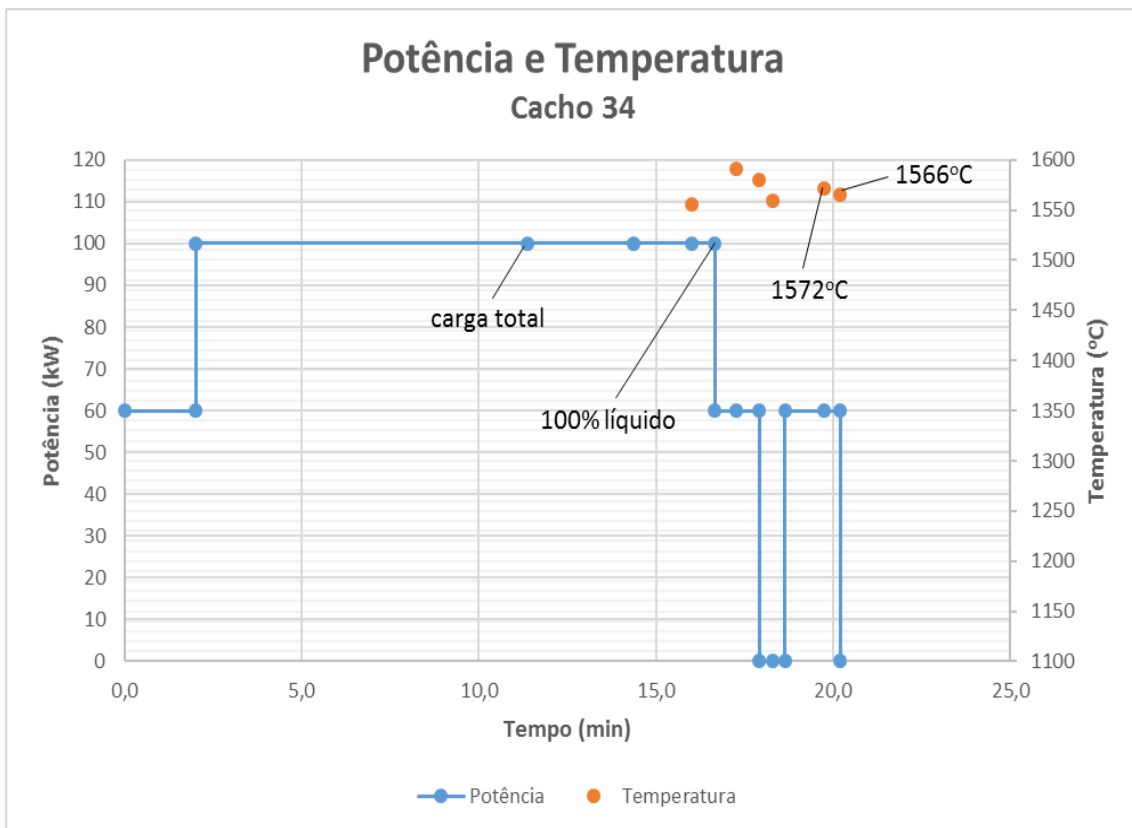
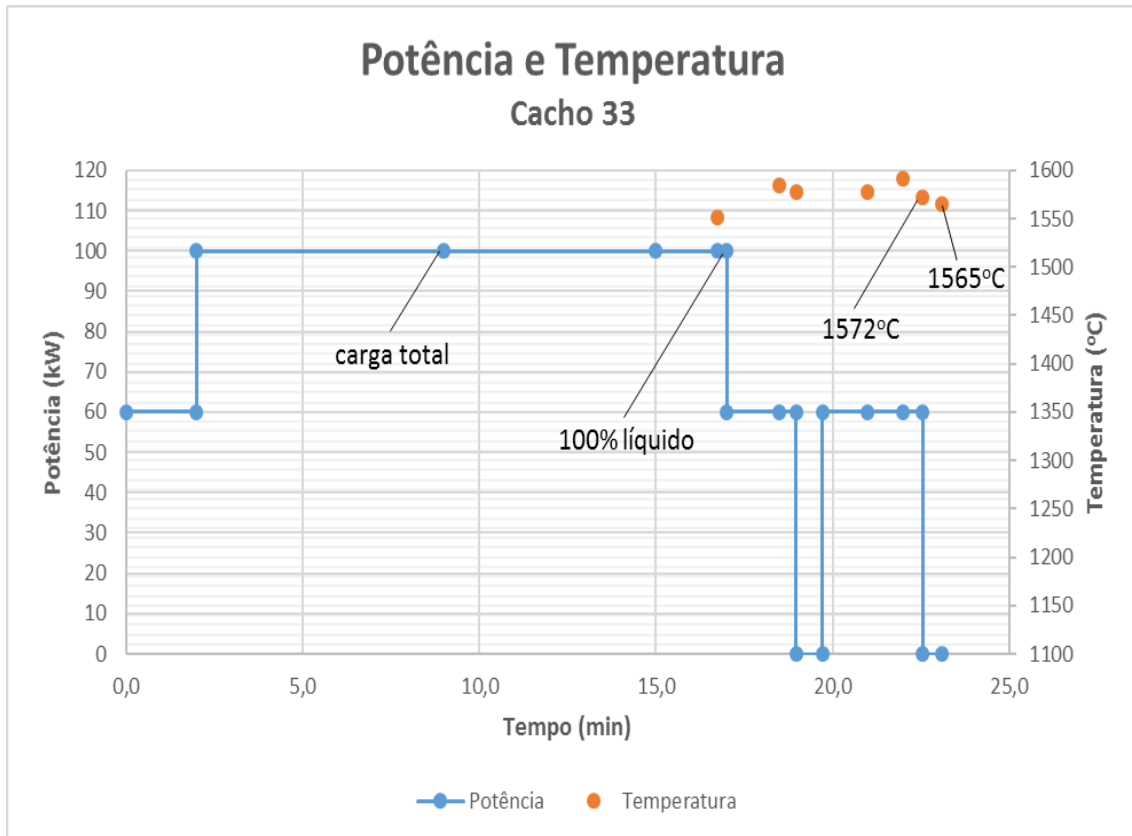
Desenho de definição do forno *rollover*

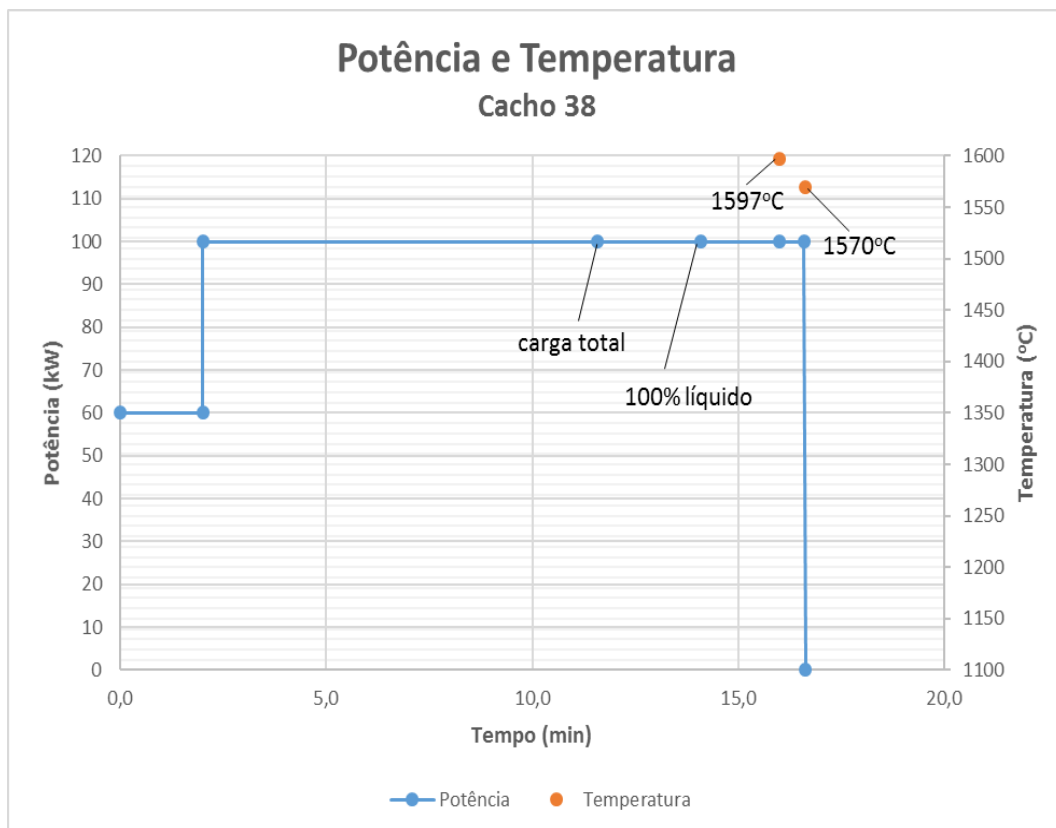
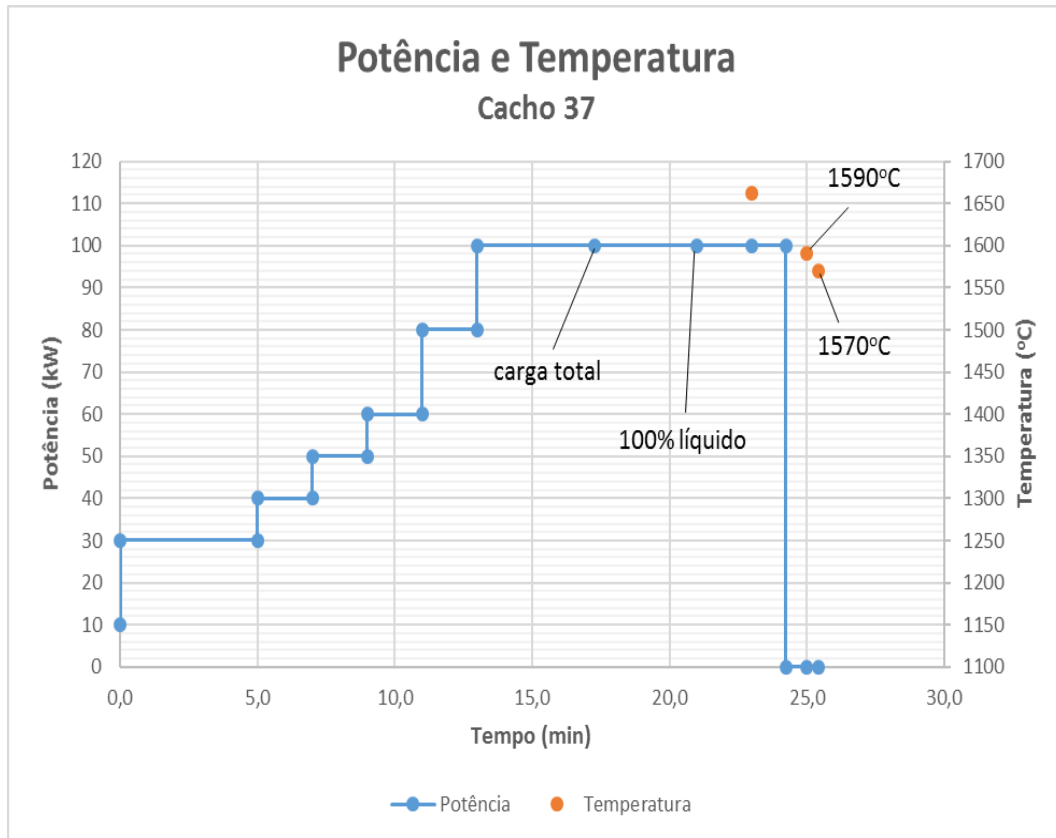
ANEXO B

Curvas de potência vs tempo dos ensaios









ANEXO C

Preparação das amostras para análise metalográfica

Análise da sanidade da peça:

- 1) Corte da peça de acordo com o plano de corte especificado. A máquina de corte utilizada é uma máquina de corte automática com discos de corte abrasivos;



- 2) Criação de pequenos entalhes na amostra cortada com um disco de corte abrasivo de modo a colocar arame à volta da mesma para posterior ataque eletrolítico. O arame foi colocado como se mostra na figura abaixo;



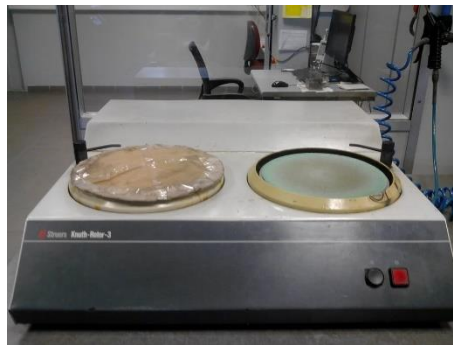
- 3) Montagem em resina para facilitar o manuseamento da amostra durante o polimento;



- 4) Polimento de desbaste sequencial com lixas 120, 320, 1000 e 2500 grit. O equipamento utilizado encontra-se na figura abaixo;



- 5) Polimento de acabamento em panos usando suspensão de diamante para obter um acabamento superficial isento de riscos. O equipamento utilizado encontra-se na figura abaixo.



- 6) Obtenção das micrografias dos defeitos com recurso a microscopia ótica. O microscópio ótico utilizado da Nikon encontra-se na figura abaixo;



Análise da microestrutura da peça:

- 7) Ataque eletrolítico com uma mistura de álcool etílico e ácido sulfúrico, de forma a contrastar a fronteira de grão;

- 8) Obtenção das imagens microestruturais no microscópio ótico anteriormente referido.

