



# DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE PEÇAS SANITÁRIAS COM UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA LASER

**ANDRÉ FILIPE MOREIRA ESTEVES**

outubro de 2023

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE  
RECUPERAÇÃO DE PEÇAS SANITÁRIAS COM UTILIZAÇÃO  
DA TECNOLOGIA LASER**

André Filipe Moreira Esteves

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

# DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE PEÇAS SANITÁRIAS COM UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA LASER

André Filipe Moreira Esteves

1161125

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Luís Miguel Pereira Durão, professor coordenador no ISEP, e coorientação do Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, professor adjunto no ISEP.

**2023**

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus pais e ao resto da minha família por serem os meus maiores conselheiros desde o primeiro dia.

Em segundo lugar, quero agradecer a todos os integrantes que constituem esta grande instituição, o ISEP, que durante todos estes anos foram como uma segunda casa proporcionando variados e bons momentos.

Um agradecimento bastante especial que quero deixar ao Doutor Luís Durão por todo o acompanhamento que me prestou no desenvolvimento desta dissertação. Tenho de frisar que o Doutor Luís Durão foi incansável com todo o auxílio prestado, toda a comunicação e toda a proatividade mostrada.

Tenho de expressar a minha gratidão à LaserMaq por todo o esforço neste estudo, desenvolvimento e construção do protótipo laser, bem como por toda a ajuda que prestaram desde o início desta dissertação.

Quero agradecer também à ARCH Valadares, mais especificamente ao Engenheiro Rocha Ferreira, por toda a disponibilidade, atenção e interesse no desenvolvimento e sucesso desta dissertação.

Tenho também de agradecer à empresa na qual trabalhava, CATIM, pois sem toda a flexibilidade referente aos horários laborais e sem a permissão para utilizar todos os equipamentos necessários, não seria possível a execução desta dissertação.

Em último lugar, deixo aqui o meu agradecimento à engenheira Maria José (ISEP) pelo auxílio prestado para a realização do corte dos provetes cerâmicos.



## RESUMO

A produção de materiais cerâmicos tornou-se crucial na indústria sanitária, já que os mesmos possuem um conjunto ótimo de propriedades quando comparados com outros tipos de materiais, para as aplicações neste tipo de indústria. Como qualquer tipo de indústria, a maximização da eficácia dos processos é sempre algo que se deseja alcançar, contudo a produção de materiais cerâmicos tem sempre defeitos inerentes, tais como poros e fissuras, e por essa mesma razão, todas as peças produzidas e consideradas defeituosas são submetidas a processos de recuperação tradicionais, dependendo da sua viabilidade e exequibilidade.

Dada a insuficiente eficácia dos processos tradicionais de recuperação e tendo sempre em mente a otimização da eficácia produtiva, surgem novas ideias referentes a processos alternativos de recuperação de peças sanitárias, tais como a tecnologia laser. Esta tecnologia possui um potencial enorme vista a possibilidade de conseguir recuperar certos defeitos em meros segundos, pretende-se por isso adquirir o conhecimento necessário para compreender toda a envolvente desta tecnologia, para de seguida se estudar a parametrização mais eficiente do laser de forma a aquecer o vidro na zona defeituosa, em peças brancas numa primeira fase, e assim se realizar a vitrificação do mesmo, substituindo o processo tradicional de recozedura. Para confirmar a eficácia deste novo método, a zona recuperada é analisada com o auxílio de um colorímetro, não podendo exceder o valor de 1 em comparação com o padrão de referência. Desta forma, quando é possível realizar a recuperação do defeito, a peça sanitária em causa poderá ser comercializada, adquirindo assim um retorno económico maior e uma menor acumulação peças defeituosas.

## PALAVRAS-CHAVE

Indústria sanitária; Cerâmica; Defeitos; Recuperação; Laser.



## ABSTRACT

The production of ceramic materials has become crucial in the sanitary industry, as they have an optimal set of properties compared to other types of materials for applications in this type of industry. As with any type of industry, maximizing the efficiency of processes is always something you want to achieve, however the production of ceramic materials always has inherent defects, such as pores and cracks, and for this very reason, all parts produced and considered defective are subjected to traditional recovery processes, depending on their viability and feasibility.

Given the lack of efficiency of traditional recovery processes and always with the optimization of production efficiency in mind, new ideas are emerging regarding alternative processes for recovering sanitary parts, such as laser technology. This technology has enormous potential, given the possibility of recovering certain defects in mere seconds. The aim is therefore to acquire the necessary knowledge to understand the entire environment of this technology, and then study the most efficient parameterization of the laser in order to heat the glaze in the defective area, in white pieces in the first instance, and thus vitrify it, replacing the traditional annealing process. To confirm the effectiveness of this new method, the recovered area is analyzed using a colorimeter and cannot exceed a value of 1 compared to the reference standard. In this way, when it is possible to recover the defect, the sanitary part in question can be commercialized, thus acquiring a greater economic return and a lower accumulation of defective parts.

## KEYWORDS

Sanitary industry; Ceramic; Defects; Recovery; Laser.



# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XI
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Âmbito do relatório.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Metodologia .....	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	2
1.5. Empresa responsável.....	3
2. Materiais cerâmicos .....	4
2.1. Origem.....	4
2.2. Propriedades, tipos, composição e processamento .....	5
2.2.1. Materiais cerâmicos tradicionais .....	7
2.2.2. Materiais cerâmicos técnicos.....	8
2.3. Indústria sanitária.....	9
2.4. Ciclo de fabrico .....	9
2.4.1. Extração das matérias-primas.....	10
2.4.2. Transporte das matérias-primas.....	10
2.4.3. Preparação da mistura cerâmica .....	10
2.4.4. Preparação do vidrado.....	11
2.4.5. Preparação do molde.....	13
2.4.6. Enchimento .....	14
2.4.7. Secagem .....	14
2.4.8. Vidragem .....	14
2.4.9. Cozedura .....	14
2.4.10. Análise de conformidade.....	15
2.4.11. Recuperação.....	15
2.4.12. Embalamento e entrega.....	15
2.4.13. Tratamento de resíduos .....	16
2.5. Defeitos inerentes da Indústria sanitária .....	16
2.5.1. Métodos de inspeção.....	16
2.5.2. Tipos de defeitos.....	18
2.6. Métodos de recuperação de peças defeituosas .....	20
2.6.1. Recuperação a quente .....	20
2.6.2. Recuperação a frio .....	21
2.6.3. Tecnologia Laser.....	21
2.7. Controlo de qualidade através de ensaios .....	25
2.7.1. Ensaio de carga .....	25

2.7.2. Ensaio de absorção de água.....	25
2.7.3. Ensaio de Autoclave .....	26
3. Desenvolvimento do protótipo Laser .....	27
3.1. Tipo de Laser .....	27
3.2. Análise realizada pelo fabricante .....	28
3.2.1. Potência .....	28
3.2.2. Ciclos térmicos .....	29
3.3. Seleção dos componentes.....	31
3.3.1. Fonte laser.....	31
3.3.2. Restantes componentes.....	31
3.4. Construção do protótipo .....	32
3.4.1. Protótipo laser .....	32
3.4.2. Meios de segurança e proteção.....	35
3.4.3. Instrução de trabalho.....	36
4. Trabalho experimental.....	40
4.1. Parâmetros de funcionamento .....	41
4.2. Composição do vidrado.....	42
4.3. Ensaio preliminares.....	43
4.3.1. Interação laser no provete base .....	44
4.3.2. Composição A (sem qualquer aditivo) .....	46
4.3.3. Composição B com CMC .....	47
4.3.4. Composição C com CMC .....	50
4.3.5. Composição D com CMC .....	52
4.4. Ensaio de afinação .....	54
4.4.1. Composição D com álcool polivinílico.....	56
4.4.2. Composição D com decalfix® .....	57
4.4.3. Composição E com decalfix® (adição de um fundente).....	59
4.4.4. Composição F com decalfix® e/ou massa de enchimento.....	60
4.4.5. Composição D .....	62
4.4.6. Composição C.....	64
4.5. Comparação de resultados.....	66
4.5.1. Provede 44 .....	69
4.5.2. Provede 45 .....	69
4.5.3. Provede 46.....	70
4.5.4. Provede 47 .....	70
4.6. Análise com colorímetro .....	71
4.7. Análise dimensional.....	73
5. CONCLUSÃO .....	75
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77
7. ANEXOS .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Empresa responsável [2] .....	3
Figura 2 - Vênus de Dolni Vestonice [4] .....	4
Figura 3 - Módulo de Young vs Massa volúmica [7] .....	5
Figura 4 - Resistência mecânica vs Massa volúmica [7] .....	5
Figura 5 - Tenacidade à fratura vs Módulo de Young [7] .....	6
Figura 6 - Taxa de desgaste vs Dureza [7] .....	6
Figura 7 - Temperatura máxima de serviço [7] .....	6
Figura 8 - Classificação dos cerâmicos tradicionais.....	8
Figura 9 - Tipos de cerâmicos técnicos.....	8
Figura 10 - Peças sanitárias [3].....	9
Figura 11 - Sequência de fabrico [11].....	10
Figura 12 - Moínho industrial (“Ball Mill”) .....	11
Figura 13 - Peças sanitárias com diferentes vidrados [3].....	12
Figura 14 - Molde sanitário [19].....	13
Figura 15 - Forno industrial [21].....	15
Figura 16 - Mecanismo de funcionamento [26].....	17
Figura 17 - Convolutional Neural Network [27] .....	18
Figura 18 - Tipos de defeitos [28].....	18
Figura 19 - Alguns tipos de defeitos (adaptado de [31]).....	19
Figura 20 - Logótipo.....	22
Figura 21 - Densidade de energia vs Potência do laser [38] .....	23
Figura 22 - Aplicação da carga num lavatório [46].....	25
Figura 23 - Ciclos térmicos estudados.....	29
Figura 24 - Perfil de intensidade Gaussiana .....	30
Figura 25 - Convecção Marangoni.....	30
Figura 26 - Protótipo laser.....	32
Figura 27 - Pirómetro .....	32
Figura 28 - Programador .....	33
Figura 29 - <i>Chiller</i> .....	33
Figura 30 - Veio de ajuste de ajuste da distância focal .....	34
Figura 31 - Quadro elétrico .....	34
Figura 32 - Óculos de proteção .....	35
Figura 33 - Protótipo no seu estado inicial.....	36
Figura 34 - Sensor do nível da água .....	36
Figura 35 - Posição da chaves (10) na fonte laser (3).....	37
Figura 36 - Botões de controlo (2).....	38
Figura 37 - Sinais luminosos da fonte laser (3).....	38
Figura 38 - Parte traseira da fonte laser (3) .....	39
Figura 39 - Realização dos poros.....	41
Figura 40 - Provete com poros induzidos.....	41
Figura 41 - Provete 3 (microscópio – 3x).....	45
Figura 42 - Provete 1 .....	46

Figura 43 - Provete 2 .....	46
Figura 44 - Provete 5 (microscópio – 5x).....	47
Figura 45 - Provete 5 .....	47
Figura 46 - Provete 10 (microscópio – 7x).....	49
Figura 47 - Provete 11 (microscópio – 5x).....	49
Figura 48 - Provete 7 .....	49
Figura 49 - Provete 10 .....	49
Figura 50 - Provete 14 (microscópio – 10x).....	51
Figura 51 - Provete 18 .....	52
Figura 52 - Provete 16 .....	52
Figura 53 - Provete 25 (microscópio – 12x).....	53
Figura 54 - Provete 21 .....	54
Figura 55 - Provete 24 .....	54
Figura 56 - Exemplo de um ciclo térmico .....	54
Figura 57 - Batente .....	55
Figura 58 - Medição de um poro sem retoque com uma máquina 3D sem contacto .....	55
Figura 59 - Provete 26 (microscópio – 7x).....	56
Figura 60 - Provete 28 .....	57
Figura 61 - Provete 29 (microscópio – 5x).....	58
Figura 62 - Provete 29 .....	58
Figura 63 - Provete 32 (microscópio – 12x).....	59
Figura 64 - Provete 30 .....	60
Figura 65 - Provete 37 (microscópio – 7x).....	61
Figura 66 - Provete 34 .....	62
Figura 67 - Provete 37 .....	62
Figura 68 - Provete 38 (microscópio – 8x).....	63
Figura 69 - Provete 38 .....	64
Figura 70 - Provete 41 (microscópio – 10x).....	65
Figura 71 - Provete 43 (microscópio – 10x).....	65
Figura 72 - Provete 40 .....	66
Figura 73 - Provete 43 .....	66
Figura 74 - Provete 41 .....	67
Figura 75 - Provete 42 .....	67
Figura 76 - Provete 43 .....	67
Figura 77 - Provete 44 .....	69
Figura 78 - Recuperação nº 44.1.1., 44.2.1. e 44.3.1. (microscópio – 10x).....	69
Figura 79 - Provete 45 .....	69
Figura 80 - Recuperação nº 45.1., 45.2. e 45.3. (microscópio – 10x).....	69
Figura 81 - Provete 46 .....	70
Figura 82 - Recuperação nº 46.1., 46.2. e 46.3. (microscópio – 10x).....	70
Figura 83 - Recuperação nº 47.1., 47.2. e 47.3. (microscópio – 10x).....	70
Figura 84 - Provete 47 .....	70
Figura 85 - Execução de uma leitura feita pelo colorímetro .....	72
Figura 86 - Análise dimensional realizada por uma máquina CMM .....	73
Figura 87 - Medição no topo da recuperação .....	73

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Estudo dos tempos de interação laser (Fonte: [51]) .....	29
Tabela 2 – Estratégia de execução (1-4) .....	44
Tabela 3 - Análise de resultados (1-4).....	45
Tabela 4 - Estratégia de execução (5) .....	46
Tabela 5 – Análise de resultados (5) .....	46
Tabela 6 – Estratégia de execução (6-11) .....	48
Tabela 7 – Análise de resultados (6-11) .....	48
Tabela 8 – Estratégia de execução (12-20) .....	50
Tabela 9 – Análise de resultados (12-20) .....	51
Tabela 10 - Estratégia de execução (21-25) .....	52
Tabela 11 – Análise de resultados (21-25) .....	53
Tabela 12 – Estratégia de execução (26-28) .....	56
Tabela 13 – Análise de resultados (26-28) .....	56
Tabela 14 – Estratégia de execução (29).....	57
Tabela 15 – Análise de resultados (29) .....	58
Tabela 16 – Estratégia de execução (30-32) .....	59
Tabela 17 - Análise de resultados (30-32).....	59
Tabela 18 – Estratégia de execução (33-37) .....	60
Tabela 19 - Análise de resultados (33-37).....	61
Tabela 20 – Estratégia de execução (38).....	63
Tabela 21 - Análise de resultados (38) .....	63
Tabela 22 – Estratégia de execução (39-43) .....	64
Tabela 23 - Análise de resultados (39-43).....	65
Tabela 24 – Estratégia de execução (41-43) .....	68
Tabela 25 - Análise de resultados (44-47).....	71
Tabela 26 – Análise executada com colorímetro .....	72
Tabela 27 – Análise dimensional.....	74



## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de Siglas e Abreviaturas

I.P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
N.A.	Não Aplicável
T <sub>máx</sub>	Temperatura máxima
UV	Ultravioleta
vs	<i>Versus</i>
Wt	<i>Water absorption</i>

### Lista de Unidades

Hz	Hertz
mm	Milímetro
nm	Nanómetro
V	Volt
W	Watt
µm	Micrómetro



# 1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação foi realizada no Instituto Superior de Engenharia do Porto com o objetivo de se conseguir realizar a recuperação de peças cerâmicas na indústria sanitária. Este tema justifica-se pela quantidade excessiva de defeitos que resultam do fabrico de peças sanitárias, como por exemplo, poros, manchas e fissuras. Deste modo, existe a necessidade de novas alternativas para se proceder à recuperação dos mesmos, surgindo assim a tecnologia laser, que sendo uma tecnologia muito versátil e que permite uma ampla parametrização pode conseguir proporcionar uma melhor eficácia na recuperação deste tipo de peças e uma maior eficiência do ciclo de fabrico.

## 1.1. Âmbito do relatório

As peças sanitárias são consideradas peças com acabamentos perfeitos e com garantia de durabilidade de 20 anos. Assim sendo, estas são sujeitas a inspeções pós-produção muito rigorosas para aferição de defeitos, pois são peças muito suscetíveis de comportar defeitos como por exemplo, poros, manchas e fissuras. Estes defeitos podem ter origem nas diversas fases do processo, evidenciando-se na fase de cozedura, já que uma peça nunca coze de maneira completamente uniforme devido à dificuldade de aplicar a camada de vidro homogeneamente, existindo então o aparecimento de heterogeneidades na mesma que se refletem na sua aparência e na distribuição de tensões internas.

Todas as peças produzidas têm de cumprir o propósito de “zero defeitos” para posteriormente poderem ser comercializadas, salvaguardando o risco de devolução. Assim, todas as peças têm de ser inspecionadas visualmente em vários ângulos após a sua produção por um operador devidamente qualificado, contudo esta avaliação deve ser complementada com um colorímetro em que o valor da leitura nunca pode ultrapassar o valor de 1 relativamente ao padrão de referência. Estimam-se que cerca de 40% [1] das peças produzidas apresentam algum tipo de defeito que inviabiliza a sua comercialização, de forma a tentar minimizar esta falha é possível recorrer a dois métodos distintos, a quente, que envolve a recozedura das peças consideradas defeituosas com a aplicação de um vidro na zona defeituosa, ou a frio, aplicando uma resina acrílica foto curável em cima do mesmo com uma luz ultravioleta (somente em zonas não funcionais). Contudo, a recozedura nem sempre tem sucesso pois apesar de, na maioria das vezes, se conseguir recuperar o defeito inicial, podem aparecer novos defeitos devido à desigualdade das tensões internas, sendo aconselhadas realizar apenas 3 recozeduras por cada peça, já que a sua cor vai amarelecendo. Nota-se também que cerca de 10% das peças produzidas são consideradas não recuperáveis, seguindo para o armazém de peças consideradas como quebras [1].

Com vista a uma maior eficácia e eficiência, surge a tecnologia laser, que com a devida parametrização poderá conseguir recuperar estes defeitos obtendo melhores resultados e despendendo de uma duração mais reduzida quando comparada com o processo de recuperação tradicional. A flexibilidade, velocidade e potência do laser torna-o uma alternativa bastante viável, mesmo recuperando apenas defeitos de pequenas dimensões, como pequenos poros, é possível executá-lo com uma única passagem. É importante referir que o custo de recozedura por peça ronda os 10 euros e com a implementação desta nova tecnologia conseguir-se-ia reduzir o custo fixo de recuperação por cada peça para pelo menos 5 euros. [1].

## 1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de uma tecnologia laser capaz de recuperar peças sanitárias consideradas defeituosas. Contudo torna-se também importante ter em conta os seguintes objetivos:

- Implementar um sistema laser, definindo os respetivos parâmetros de funcionamento que permitam atingir a temperatura necessária à vitrificação do vidro de reparação (cerca de 1200 °C), incluindo a monitorização da temperatura durante o processo, assim como a possibilidade de promover uma diminuição da temperatura para se evitar possíveis choques térmicos;
- Criar conjuntos de parâmetros para um ou mais vidrados que fundam à temperatura a definir e cuja diferença de cor não supere o valor de 1 em leitura de colorímetro, para futura automatização do processo.

## 1.3. Metodologia

A metodologia utilizada passa por:

- Estudo e pesquisa bibliográfica de forma a sustentar todo o trabalho realizado;
- Conhecimento das instalações e do protótipo laser a utilizar;
- Primeiras abordagens de ensaios experimentais em provetes cerâmicos para se conhecer o funcionamento do protótipo laser;
- Realização de ensaios preliminares para analisar os parâmetros de funcionamento do protótipo laser e a fusão obtida com os vidrados selecionados;
- Realização de ensaios de afinação para se selecionar os provetes com resultados mais consistentes;
- Análise da repetibilidade dos melhores resultados e sistematização das formulações de parâmetros utilizados nos mesmos com auxílio da microscopia ótica;
- Aferição da conformidade das peças consideradas recuperadas com o colorímetro;
- Análise dimensional dos resultados selecionados.

## 1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, que são:

- Introdução, onde são apresentados todos os pressupostos iniciais sobre esta dissertação, os objetivos e metodologia da mesma, bem como uma breve apresentação da empresa acolhedora;
- Materiais cerâmicos, onde é apresentada toda a pesquisa bibliográfica sobre estes materiais e suas vertentes como, a sua origem, propriedades, ciclo de fabrico.

- Desenvolvimento do protótipo laser, onde são abordados os vários tipos de laser existentes no mercado e qual o mais indicado para este tipo de aplicação. Após esta primeira abordagem é descrito o protótipo laser selecionado e a sua respetiva instrução de trabalho que serve de guia para o trabalho prático a realizar posteriormente;
- Trabalho experimental, onde são demonstrados todos os ensaios práticos realizados com o objetivo de se conseguir obter uma formulação sólida dos parâmetros de funcionamento, que seja considerada viável visualmente e através do exame com colorímetro, realizado após cada recuperação.
- Conclusões, onde se refere tudo aquilo que correu de melhor ou pior durante a aquisição de conhecimentos teóricos sobre este tema e durante o desenvolvimento de todo o trabalho prático. Deste modo, faz-se uma síntese de todo o trabalho realizado com as respetivas sugestões futuras para se conseguir melhorar ainda mais este processo;
- Referências bibliográficas, onde se encontra todas as fontes usadas de forma a credibilizar tudo aquilo que se encontra escrito nesta dissertação;
- Anexos, onde está contemplada toda a informação técnica que não se encontra no corpo da dissertação, dado uma visão mais detalhada sobre as especificações da fonte laser e do pirómetro.

## 1.5. Empresa responsável

A empresa responsável por orientar a presente dissertação é a “ARCH – Advanced Research Ceramic Heritage”.

É uma empresa que conta com mais de 100 anos de história tendo sido originalmente fundada em 1921 [2]. Tem localização em Vila Nova de Gaia, mais especificamente no concelho de Valadares, contando com a ajuda de 141 colaboradores que, por norma, exercem um curso de trabalho limitado a 1 turno das 8 às 17 horas, contudo e dependendo do contexto, podem-se criar 2 turnos de trabalho de forma a obter uma maior cadência produtiva [3].

Recuando a 2019, pode-se identificar que os principais clientes se encontram em território nacional, cerca de 68%. Também se pode fazer esta mesma análise para os fornecedores, em que se identifica que 90% dos fornecedores são portugueses e apenas 10% estão no estrangeiro. É de realçar que a produção anual ronda as 200000 peças sanitárias, e que um lote desta dimensão em 2020 valeu aproximadamente 6.5 milhões de euros [4]. Estes dados referentes a 2019 e 2020 servem para modelar o ano de 2023 pois, nenhum indicador anteriormente citado sofreu uma mudança significativa no ano em questão.

As instalações da empresa (Figura 1) são equivalentes a 8 campos de futebol e estão divididas entre vários departamentos, entre os quais, o departamento de Produção, de Engenharia & ID, Comercial, de Projetos, de Marketing, de Compras, Financeiro, da Qualidade e de Desenho.



Figura 1 –Empresa responsável [2]

## 2. MATERIAIS CERÂMICOS

### 2.1. Origem

Os materiais cerâmicos são dos materiais mais antigos que se podem encontrar no quotidiano, basta recuar aos tempos pré-históricos onde a moldagem manual com argila começava a ganhar utilidade. Prova desta origem bastante antiga é a estátua “Vênus de Dolni Vestonice” (Figura 2) que foi construída através de terracota, um composto da argila. Esta escultura foi descoberta em 1925 e estima-se que tenha cerca de 25000 anos [5].



Figura 2 - Vênus de Dolni Vestonice [4]

Nos primeiros tempos, os materiais cerâmicos eram produzidos principalmente à base de argila, podendo também ser combinada com outros materiais, através da moldagem manual que servia sobretudo para dar forma à peça. Numa segunda fase era necessário realizar o endurecimento da mesma através do contacto direto entre a peça e fogo, de maneira a dar-lhe consistência.

Com o passar dos anos o conhecimento sobre este tipo de materiais e seu processamento foi aumentando, bem como a tecnologia disponível, tornando-se assim possível dar acabamentos específicos às peças fabricadas, como coloração e aplicação de revestimentos.

É ainda de realçar alguns marcos importantes no decorrer da história, tais como [6]:

- Estima-se que em 1775 para aumentar a cadência produtiva de peças cerâmicas, John Turner introduziu alguns mecanismos a vapor de forma a facilitar a produção. Mais especificamente, inovou no sistema de bombagem de água dentro da unidade de fabrico;
- A moldagem manual foi evoluindo cada vez mais e entre 1860 e 1870, foram estabelecidos mecanismos de trabalho que permitiam que as peças a ser moldadas rodassem em torno do seu próprio eixo. Deste modo, a cadência de fabrico seguia mais fluída;
- Ainda no século XIX, começou-se a usar a técnica de “fundição deslizante” com regularidade, já que foram descobertos agentes desfloculantes (soluções à base de combinações de silicatos, fosfatos, acrilatos) que impedem que certas partículas entrem em suspensão na mistura de argila. Assim sendo, o período de secagem da mistura de argila é menor já que esta se encontra com menos quantidade de água e assim se pode passar para a etapa de moldagem mais rapidamente, o que tornou todo o processo bastante mais eficiente.

## 2.2. Propriedades, tipos, composição e processamento

Um material cerâmico é um material não metálico e não polimérico que pode ter uma estrutura amorfa como o vidro, cristalina como os cerâmicos tradicionais, ou ambas. Tem origem inorgânica, não é biodegradável e necessita de um endurecimento a altas temperaturas para ganhar a forma e consistência final.

Fazendo uma análise às propriedades desta família de materiais, comparativamente a outras famílias (metais, polímeros e compósitos), pode-se constatar que a mesma é a que tem os maiores Módulos de Young (Figura 3) e as maiores densidades a par dos metais (Figura 3).

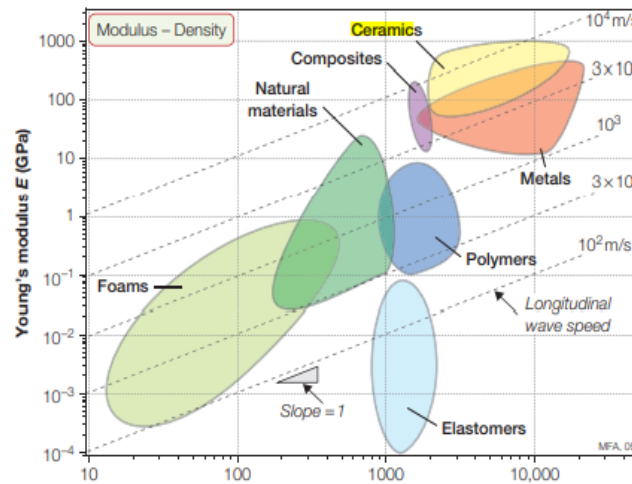


Figura 3 – Módulo de Young vs Massa volúmica [7]

Uma ampla gama de valores de resistência mecânica, mas satisfatórios no geral (Figura 4). Podem-se identificar também condutividades térmicas muito boas mas superadas, por exemplo, por alguns metais [7] e uma ampla de gama de valores de resistividade elétrica.

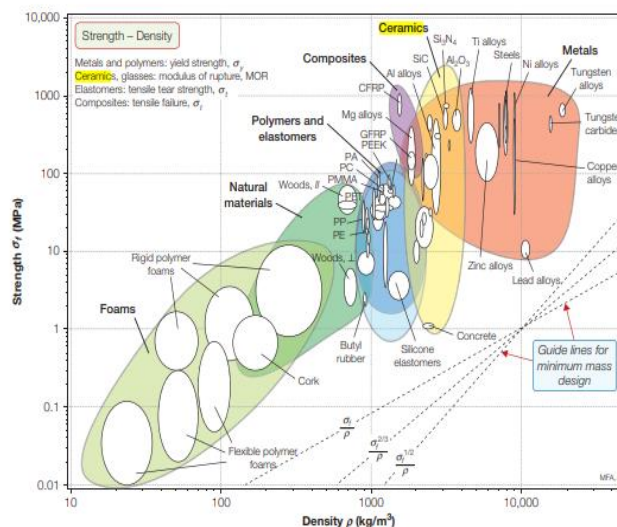


Figura 4 – Resistência mecânica vs Massa volúmica

Valores de tenacidade à fratura apenas satisfatórios na família dos cerâmicos técnicos, sendo que nos outros são consideravelmente baixos (Figura 5).

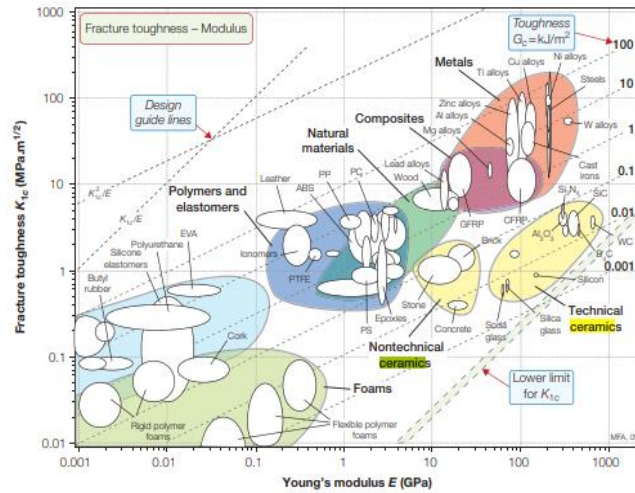


Figura 5 – Tenacidade à fratura vs Módulo de Young [7]

As maiores durezas (Figura 6) e as maiores temperaturas de serviço quando comparados com as restantes famílias de materiais (Figura 7).

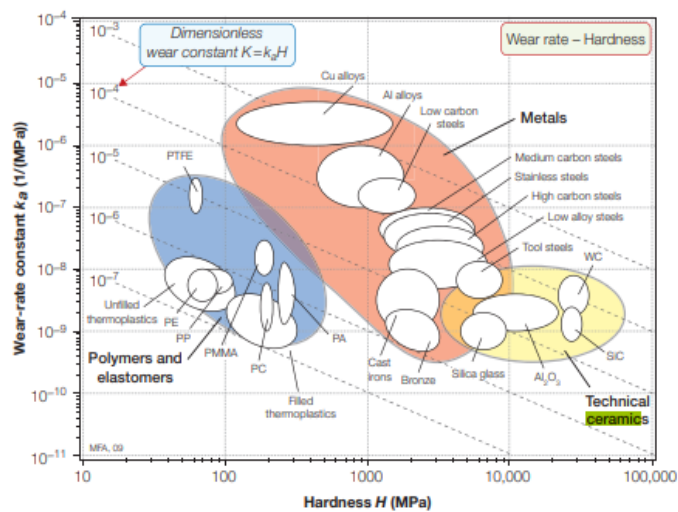


Figura 6 – Taxa de desgaste vs Dureza [7]

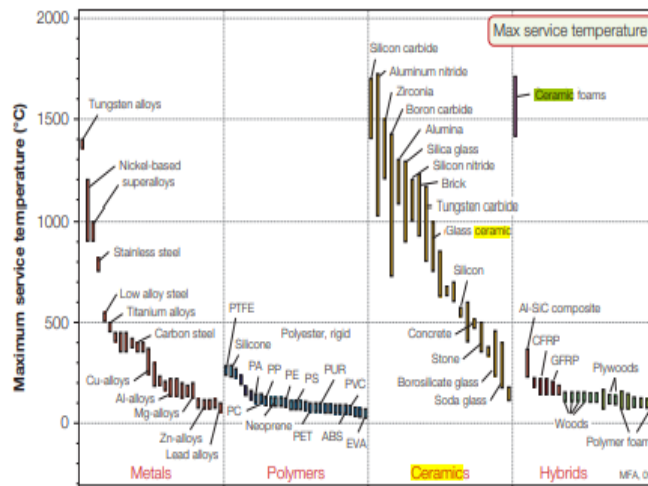


Figura 7 – Temperatura máxima de serviço [7]

É de realçar, que nesta dissertação são apenas abordados os materiais cerâmicos de estrutura cristalina, e não os de estrutura amorfa. Os materiais cerâmicos de estrutura cristalina podem ser divididos em:

- Materiais cerâmicos tradicionais;
- Materiais cerâmicos técnicos.

Os materiais cerâmicos tradicionais são essencialmente constituídos por minerais, sendo os mais comuns:

- Argila, quartzo e feldspato.

De acordo com [8] e [9], o processamento destes materiais pode ser obtido essencialmente por 6 métodos, que são eles:

- Enchimento**, método mais simples devido a necessitar apenas do trabalho manual de um operador em que deforma plasticamente o material com o objetivo de dar forma à peça final. Este método pode ser auxiliado com uma mesa giratória que obriga a peça rodar em torno do seu próprio eixo;
- Extrusão**, o material é obrigado a passar pelo bico de extrusão à temperatura do mesmo, sendo secas e sinterizadas posteriormente com a forma do perfil;
- Prensagem uniaxial**, uma prensa atua contra um molde de maneira a compactar as partículas cerâmicas da peça a fabricar. Este método costuma resultar em peças com uma concentração de tensões não uniformes;
- Injeção**, necessidade de adicionar um agente aglutinante para promover a fluidez da pasta cerâmica (em forma de pó) a ser injetada. Após estarem reunidas as condições necessárias de pressão e temperatura, a mistura cerâmica é obrigada a passar no bico de injeção, solidificando no respetivo molde e obtendo a forma do mesmo;
- Moldagem por deslizamento**, onde a peça a ser fabricada é produzida através de uma mistura de partículas cerâmicas com água ou outro solvente, sendo necessária a filtração dos líquidos em suspensão de forma a ficarem retidas no molde todas as partículas porosas. Deste modo, consegue-se produzir e extrair a peça do molde sem nenhum inconveniente ou dano para a mesma;
- Moldagem vibratória**, onde vibrações são aplicadas à mistura de água com partículas cerâmicas para assim se conseguir aprisionar essas mesmas partículas no molde e escoar a água. No final é necessário retirar a peça do molde com muito cuidado.

### 2.2.1. Materiais cerâmicos tradicionais

Este tipo de materiais cerâmicos tem na sua base a argila e podem ser divididos da seguinte maneira (Figura 8).

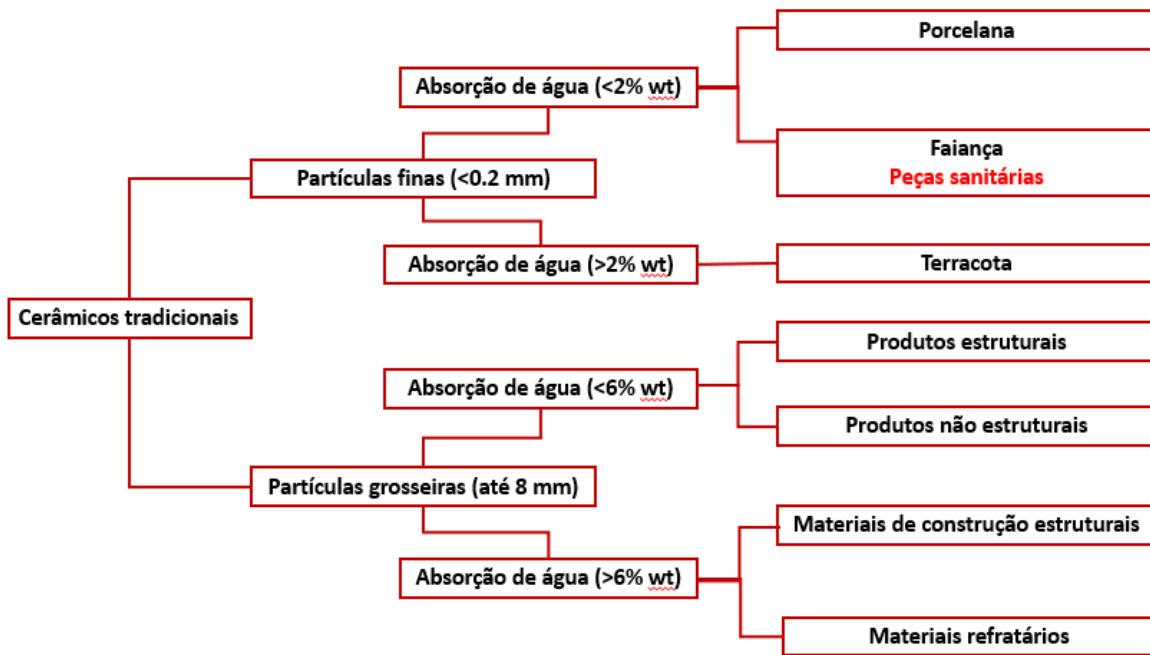


Figura 8 - Classificação dos cerâmicos tradicionais

Adaptado de [9]

### 2.2.2. Materiais cerâmicos técnicos

Os materiais cerâmicos técnicos só foram descobertos no século XX devido ao estudo e combinação de diferentes níveis estruturais, sendo eles o nível atômico, eletrônico, fronteiras de grão, microscópico e macroscópico. Estes materiais cerâmicos distinguem-se pelo facto de terem melhores propriedades mecânicas, elétricas, óticas e magnéticas [9].

Estes materiais podem ser divididos em 4 grupos da seguinte maneira (Figura 9):

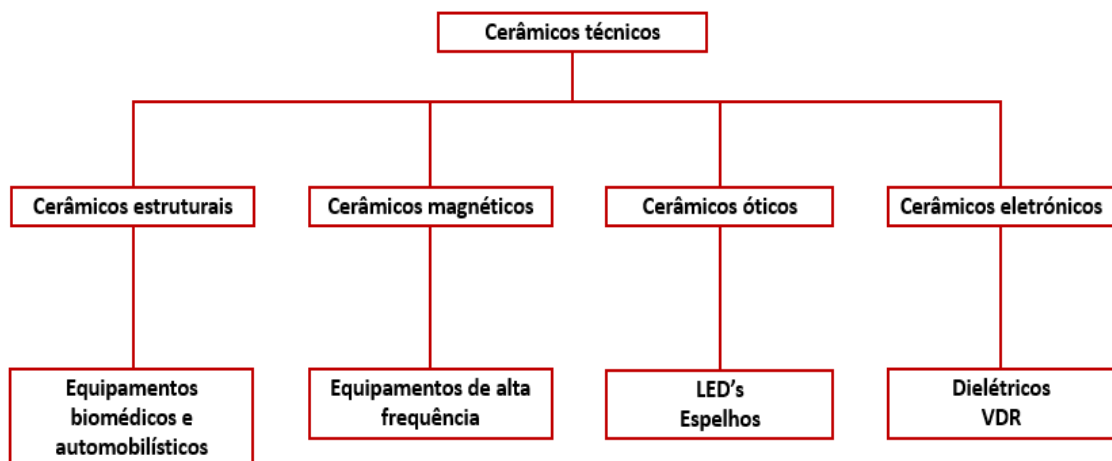


Figura 9 – Tipos de cerâmicos técnicos

Adaptado de [9]

### 2.3. Indústria sanitária

A Indústria sanitária fabrica essencialmente produtos para casas de banho, como sanitas, bidés, lavatórios, banheiras, bases de chuveiros entre outros acessórios complementares (Figura 10).

Os cerâmicos deste tipo de indústria são denominados por cerâmicos tradicionais em que o branco é predominante na maioria das peças, sendo sempre utilizados vidrados com diversos objetivos, como colorir as peças, melhorar a sua aparência, promover uma maior resistência superficial às peças e por consequência, uma maior durabilidade.

É importante realçar que os cerâmicos usados neste tipo de Indústria são cerâmicos que têm uma baixa absorção de água, menor que 0.5%.

O acabamento deste tipo de peças tem de ser tão bom quanto possível pois, o operador não pode notar a olho nu qualquer tipo de imperfeição, tais como poros, fissuras, danos provenientes do vidrado, ou manchas. Caso seja encontrado algum tipo de defeito, essa peça é considerada defeituosa e posteriormente tem de ser analisada a sua viabilidade de recuperação, se a mesma não for possível é considerada como quebra [10].



Figura 10 – Peças sanitárias [3]

### 2.4. Ciclo de fabrico

Na Indústria sanitária, o ciclo de fabrico segue determinadas etapas ditas como padronizadas para realizar o fabrico de peças, independentemente da sua geometria, tamanho ou funcionalidade (Figura 11). O que as distingue é o molde que as executa, sendo que cada peça tem o seu molde específico.

Cada ciclo de produção dura em média uma semana de trabalho a concluir, o que constitui um lote completo, realçando que o mesmo [11] contempla todas as etapas da Figura 11. Por exemplo, se o lote a produzir for exclusivamente de tanques de autoclismos, a sua duração será no máximo 4 dias, contudo a produção de um lote de bacias sanitárias já despenderá de um número maior de dias de trabalho.

O tamanho do lote é estabelecido pela capacidade de carga do forno, contudo o número de peças dentro de cada vagona irá variar conforme se consiga organizar estrategicamente de forma a levar o maior número possível, realçando que quanto mais simples a geometria de cada peça, mais peças suportará o forno.

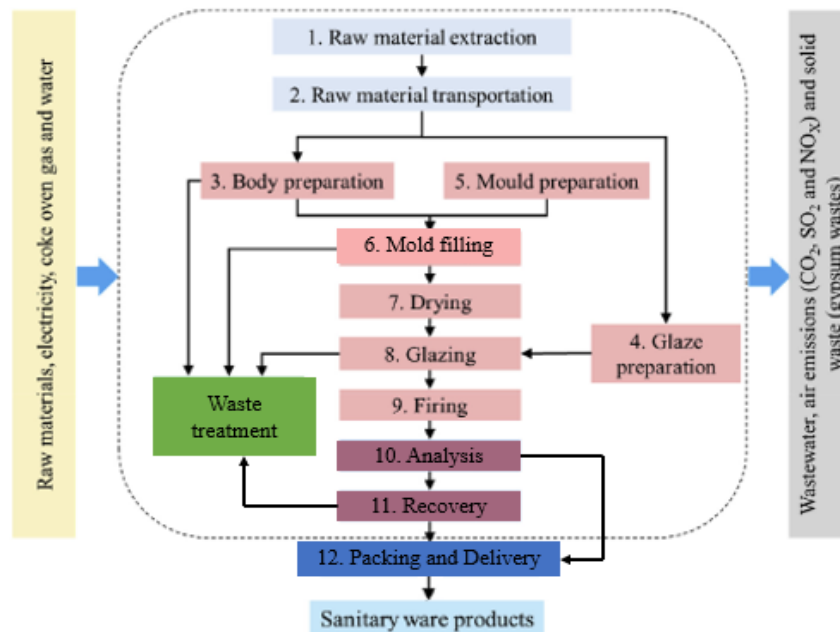


Figura 11 – Sequência de fabrico [11]

De acordo com a Figura 11, pode-se então contabilizar 12 etapas para a conclusão de um lote de peças sanitárias. Sendo as etapas:

### 2.4.1. Extração das matérias-primas

Necessidade de matérias-primas minerais como argilas e caulinos, feldspato, e quartzo para a realização da mistura cerâmica.

### 2.4.2. Transporte das matérias-primas

Todas as matérias-primas e outros recursos necessários têm de ser transportados até às infraestruturas de fabrico, normalmente por camiões de grande porte. Esta etapa pode ser realizada pela própria empresa ou pelo fornecedor.

### 2.4.3. Preparação da mistura cerâmica

A mistura cerâmica consiste inicialmente na moagem e mistura das várias matérias-primas minerais citadas anteriormente (argilas, caulinos, feldspato e quartzo) em suspensão com água e agentes desfloculantes com o auxílio de moinhos industriais e misturadores (Figura 12). Esta etapa tem uma duração entre 3 e 4 horas [12].

Após a suspensão de todas as matérias-primas é necessário ter a certeza que a mesma não contém quaisquer impurezas através de várias peneirações em malhas de tamanho decrescentes, de forma a prevenir o aparecimento de imperfeições ou defeitos no final do ciclo de fabrico.

As **argilas** são responsáveis pelo aumento da plasticidade da peça a fabricar, originando um posterior aumento também da resistência mecânica devido à formação de **mulite** (Silicatos de alumínio) durante a cozedura da mistura cerâmica. Em particular, os **caulinos** ajudam a aumentar

a taxa de alumina no corpo da peça, a taxa de formação de parede e a resistência da mesma à deformação a altas temperaturas.

O **quartzo** serve para dar consistência e corpo à pasta durante a sua sinterização para assim se evitar possíveis deformações que possam existir na estrutura, aumenta ainda a temperatura de vitrificação assim como a tonalidade branca do corpo [12].

Durante a sinterização, o **feldspato** passa do estado sólido para o estado líquido podendo esta transformação ser mais ou menos facilitada dependendo do tipo de feldspato e argila usada. Após esta transformação, parte da fase do feldspato mistura-se e reage quimicamente com as partículas sólidas de silicatos de alumínio originando uma pasta densa de material cerâmico formada por interdifusão das fases de ambas as partes. A restante fase líquida solidifica sem cristalização e assim torna-se possível alcançar uma aparência vítrea nas peças cerâmicas [13].

O uso de aditivos como agentes desfloculantes é necessário para aumentar o teor de sólidos na mistura em suspensão (cerca de 70%), a permeabilidade da peça e não deixar aumentar em demasia a viscosidade da mistura [14].

No final desta etapa é necessário controlar o pH, temperatura, massa volúmica, viscosidade e tixotropia da mistura cerâmica formada para confirmar se os valores obtidos se encontram dentro dos valores admissíveis. Caso se confirme a compatibilidade entre valores, a mistura cerâmica pode ser armazenada em reservatórios apropriados com agitação permanente [12].

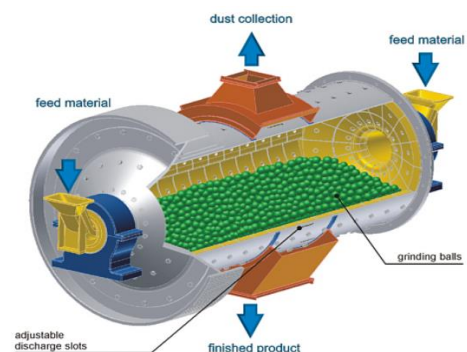


Figura 12 – Moínho industrial (“Ball Mill”)

[14]

#### 2.4.4. Preparação do vidrado

Um vidrado é uma fina camada vítrea fundida na superfície de um corpo cerâmico, sendo este constituído por uma fase vítrea dominante na qual outras fases cristalinas se dispersam e são responsáveis pela opacidade do corpo. Apesar das semelhanças com o vidro, o vidrado distingue-se pelo seu estado físico e por atuar em combinação (reação superficial) com outro corpo, sendo neste caso o material cerâmico.

A ligação entre o vidrado e o material cerâmico é conseguida através da interdifusão de elementos químicos do vidrado para o corpo cerâmico. Contudo e devido também a este facto, o vidrado nunca consegue ser completamente homogéneo já que existem diferentes concentrações de elementos químicos na superfície cerâmica, o que resulta numa espessura não uniforme do vidrado em toda a superfície [15]. Por outro lado, a aplicação manual ou automática do vidrado na peça também influencia em grande parte esta deposição não uniforme.

O vidrado tem como funções principais promover uma maior durabilidade do corpo cerâmico, aumentando a resistência superficial e impermeabilizando a mesma. Tem a capacidade também de melhorar a aparência da peça, requisito esse, que na Indústria sanitária, é considerado muito importante [16].

Para se garantir a qualidade do vidrado é necessário [16]:

- Avaliar o seu comportamento de fusibilidade pois, quanto melhor este comportamento, maior será a sua adesão ao corpo cerâmico;
- Analisar a sua consistência e cor conferindo opacidade ao corpo, tornando-se necessário garantir a sua homogeneidade e espessura promovendo a melhor uniformidade possível aquando do espalhamento do mesmo, conseguindo-se assim evitar vazios ou descontinuidades;
- Verificar se a expansão térmica entre o vidrado e o corpo cerâmico é compatível para se evitar qualquer tipo de expansão durante o arrefecimento, caso contrário irão-se iniciar microfissuras no interior do corpo cerâmico.

Existem vários tipos de vidrados, podendo estes ser divididos em vidrados de baixas e altas temperaturas.

De acordo com [14], os **vidrados de baixas temperaturas** podem ser divididos em:

- **Vidrados alcalinos**, são obtidos essencialmente por óxidos alcalinos como o  $\text{Na}_2\text{O}$  e o  $\text{K}_2\text{O}$  que provêm de sais alcalinos naturais como hidróxidos, carbonatos e sulfatos. Estes vidrados são estabilizados por doses reduzidas de  $\text{CaO}$  e são fundidos a uma temperatura de 900 a 1050 °C;
- **Vidrados de Chumbo**, são obtidos exclusivamente por óxido de chumbo ( $\text{PbO}$ ) e podem ser aplicados diretamente no corpo cerâmico se este contiver dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) ou se forem misturados com areia. A uma temperatura de cerca de 900 a 1050 °C este tipo de vidrado funde, sendo de realçar que o  $\text{PbO}$  não se dissolve com água e que vaporiza a temperaturas superiores a 1100 °C. Atualmente este tipo de vidrado é proibido;
- **Vidrados de Estanho**, inicialmente alcançados através de óxidos de estanho e antimónio, sendo atualmente obtidos através de óxidos de titânio. Estes vidrados não costumam exceder os 1000 °C para fundir e têm a vantagem da sua opacidade puder ser aumentada caso os cristais com um tamanho aproximado de 1  $\mu\text{m}$ , com um elevado índice de refração e cristalino, solidificarem aquando da fusão do vidrado.

Já os **vidrados de altas temperaturas** fundem entre os 1100 a 1350 °C e são derivados dos óxidos alcalinos terrosos, como  $\text{CaO}$  e o  $\text{BaO}$ . É importante notar que para usar este tipo de vidrados, o corpo cerâmico tem de conseguir aguentar a temperatura de reação do vidrado e é normalmente usado feldspato para se conseguir o fabrico deste tipo de vidrados (Figura 13).



Figura 13 – Peças sanitárias com diferentes vidrados [3]

No caso específico da ARCH, os vidrados utilizados têm na sua composição 2 tipos de feldspato (um deles sódico e o outro potássico), quartzo, caulino, pequenas percentagens de cálcio e magnésio na forma de dolomite, silicato de zircônio e óxido de zinco.

### 2.4.5. Preparação do molde

A concepção de um molde é uma etapa de extrema importância pois, o controlo dimensional e geométrico de cada peça produzida depende diretamente do rigor do molde e da sua qualidade de execução. Por essa mesma razão é necessária uma exatidão elevada dos desenhos técnicos de cada molde, sendo que normalmente existem contrações volumétricas associadas ao processo de fabrico, que têm de estar previamente contempladas.

Deste modo, torna-se crucial avaliar as tolerâncias de fabrico mais adequadas, tendo como referência que um corpo cerâmico pode expandir até 20% do seu volume e que uma tolerância aceitável é aquela que não excede em 0.5% a dimensão teórica pretendida [17].

Os moldes são executados fundamentalmente à base de gesso e água, numa proporção de 4:3 respetivamente, sendo necessário um endurecimento posterior dos mesmos a partir de um processo de secagem induzida [11].

Como pontos chave para a realização de moldes sanitários podem destacar-se [18]:

- Elevada resistência térmica para suportar eventuais choques térmicos e evitar a iniciação de microfissuração;
- Elevada estabilidade química;
- Boa permeabilidade e condutividade térmica para se conseguir manter uma transferência de temperatura adequada entre as paredes do molde, permitindo-se assim a solidificação do corpo a fabricar;
- Baixo coeficiente de expansão térmica para evitar distorções dimensionais dentro da estrutura do molde;
- Ser de fácil acesso e abertura de forma a se conseguir extrair a peça sem provocar qualquer empeno.

O tempo de vida de um molde depende diretamente da geometria da peça a que diz respeito [19], sendo que em média costuma durar até aproximadamente 120 enchimentos (Figura 14). Por exemplo, uma coluna sanitária devido à sua simplicidade geométrica pode durar até cerca de 200 enchimentos. Findando o seu tempo de vida, o molde é revendido ao fornecedor para ser reutilizado em outros produtos da sua comercialização, no caso da ARCH S.A.



Figura 14 - Molde sanitário [19]

### **2.4.6. Enchimento**

Uma vez tendo a mistura cerâmica pronta, esta pode ser vertida para o interior da cavidade do molde de forma cuidadosa, para assim se formar o corpo das peças. Durante esta etapa é necessário que as paredes do molde se encontrem o mais secas possível de forma a permitir uma correta absorção da pasta cerâmica (barbotina) [20].

No final desta etapa, todas as peças saídas do molde são denominadas de “peças verdes”.

### **2.4.7. Secagem**

Após o processo de enchimento, todas as peças têm de ser secas para passarem à etapa seguinte. Primeiramente são secas à temperatura ambiente durante um período de 1 a 3 dias e, posteriormente, são secas com a ajuda de ar quente proveniente de um secador durante aproximadamente 12 horas, com o objetivo de reduzir ao máximo a sua humidade, idealmente num valor inferior a 1.5%.

### **2.4.8. Vidragem**

Os vidrados são pulverizados sobre as peças o mais uniformemente possível em estações de trabalho apropriadas. Estas estações podem ou não ter linhas de alimentação automáticas bem como suportes ou mesas rotatórias para facilitar o processo de pulverização do operador em torno da peça.

No final deve-se limpar cuidadosamente a peça para se eliminar qualquer excesso visível, nomeadamente a parte da peça que irá assentar nas vagonas, para evitar que se colem.

### **2.4.9. Cozedura**

Nesta etapa todas as peças são enviadas para o forno a cerca de 1200 °C numa plataforma própria dotada com 40 vagonas, no caso da ARCH.

O ciclo de cozedura costuma durar em média 15 a 20 horas e serve para desencadear as reações físico-químicas entre o vidrado e a peça, de maneira a fundir o vidrado na mesma. É de realçar que o vidrado usado na ARCH começa a fundir aos 1000 °C e funde completamente a cerca de 1100 °C. Este tipo de fornos (Figura 15) têm 3 zonas, uma zona de pré-aquecimento onde vai ocorrer a homogeneização da temperatura das peças com o intuito de minimizar as tensões de origem térmica, e a eliminação da humidade que as peças ainda possam conter [21]. Uma segunda zona de queima ou aquecimento onde se dá a cozedura das peças e a fusão do vidrado nas mesmas.

Por fim, existe uma terceira zona dentro do forno onde se realiza o arrefecimento das peças, arrefecimento esse que é repentino para se criar superfícies brilhantes e lustrosas nas peças [12].



Figura 15 - Forno industrial [21]

#### **2.4.10. Análise de conformidade**

Após o término do ciclo de cozedura, é necessário inspecionar rigorosamente todas as peças fabricadas para concluir a conformidade das mesmas. Para uma peça ser considerada conforme é necessário que a mesma não apresente nenhum defeito, esta análise é realizada através de um escolhedor no chão de fábrica, onde é realizada uma inspeção visual de cada peça em todas as suas faces, esta inspeção deve ser complementada com auxílio de um colorímetro para confirmar o seu veredito quando a peça a ser inspecionada suscita dúvidas ao escolhedor. Caso a peça não apresente nenhum defeito, a mesma segue para a etapa de embalagem e entrega (2.4.12), em caso contrário a mesma segue para a etapa de recuperação (2.4.11).

#### **2.4.11. Recuperação**

Uma vez encontrada uma peça defeituosa pelo escolhedor, a mesma tem de ser submetida a um processo de recuperação, caso apresente viabilidade para tal. A recuperação pode ser realizada a frio, se o defeito se encontrar numa zona não funcional da peça, ou a quente, não sendo relevante onde está localizado o defeito. Se a recuperação não for bem-sucedida, a peça segue para a etapa de tratamento de resíduos (2.4.13).

#### **2.4.12. Embalamento e entrega**

Depois do processo de fabrico concluído, as peças devem ser embaladas de uma forma preventiva e com um elevado rigor pois, os materiais cerâmicos têm uma tenacidade à fratura reduzida e qualquer impacto pode conduzir ao aparecimento de uma microfissuração ou até mesmo de uma fissura aparente na superfície da peça, dependendo do impacto.

Após todas as etapas anteriores estarem concluídas, os lotes de produtos seguem para entrega, pela própria empresa ou parceiros de logística, até aos consumidores finais, ou mesmo serem recolhidos pelos mesmos nas infraestruturas.

### 2.4.13. Tratamento de resíduos

Trata-se de uma etapa muito importante uma vez que este tipo de Indústria provoca águas residuais que têm de ser despejadas, resíduos sólidos que vão para aterros e gases poluentes como dióxido de carbono, de enxofre e óxidos de azoto que são evacuados para a atmosfera.

Todas as alternativas que forem consideradas menos poluentes devem ser postas em prática e todos os resíduos devem ser minimamente filtrados antes de serem despejados. A ARCH, reutiliza todos os resíduos, seja de peças quebradas ou de vidrados excedentes das cabines de vidragem, bem como a pasta resultante dos postos de acabamento nas olarias.

## 2.5. Defeitos inerentes da Indústria sanitária

Como qualquer ciclo de fabrico, há produtos que serão considerados defeituosos. Deste modo, imediatamente após a etapa 2.4.12, anteriormente citada, torna-se obrigatório haver uma inspeção a cada lote produzido para aferir a sua conformidade perante os padrões estabelecidos.

É importante realçar que este tipo de Indústria fabrica peças muito suscetíveis de formarem defeitos devido a inúmeras causas. Causas essas que podem ser originadas pela presença de ar ou impurezas na mistura cerâmica durante a sua moldagem e cozedura, pelas tensões superficiais impostas pelo vidrado ou possíveis contaminantes que estejam presentes no mesmo, pela incorreta homogeneização do vidrado na peça, pelas tensões térmicas induzidas durante os ciclos de aquecimento, ou pela humidade que as peças ainda possam conter [22].

### 2.5.1. Métodos de inspeção

No caso da ARCH, estima-se que cerca de 40% da sua produção é considerada defeituosa [1], sendo esta conclusão sustentada pela inspeção visual feita pelos escolhedores no final de toda a produção, colocando as peças em várias posições para aferir a sua qualidade. É de notar que esta inspeção é um processo completamente manual, o que faz com que cada escolhedor tenha de ter bastante prudência no manuseio de cada peça, sendo normal que no decorrer do tempo de inspeção a precisão dos resultados seja afetada pelo cansaço do operador, o que se traduz numa ineficiência visto a falta de automatismos nesta etapa [23].

A inspeção visual deve ser complementada com o auxílio de um colorímetro, com a finalidade de se verificar que a tonalidade da cor da peça não excede o valor de 1 em comparação com o padrão de referência.

Apesar de serem pouco utilizados neste tipo de indústria, existem outros métodos com um grau de exatidão e automatização maiores para aferir a conformidade de cada peça. Destacam-se entre eles, a termografia, radiografia, líquidos penetrantes, análise através de ruído e algoritmos de visão computacionais.

A **termografia** tem de ter um carácter ativo pois, torna-se necessário promover um aquecimento na peça com um arrefecimento posterior. É aplicada numa câmara infravermelha dotada de sensores que executam o processamento de dados e o seu princípio de funcionamento baseia-se na comparação das diferentes temperaturas superficiais ao longo de toda a peça. Na zona onde se encontra o defeito, a difusão de calor será inferior devido à condutividade do ar ser menor do que

a do material [24]. Contudo, este método de inspeção pode apresentar algumas lacunas para defeitos de dimensões reduzidas já que a variação de temperatura pode não ser considerável.

A **radiografia** através de raios-X consegue ter uma eficácia muito boa na deteção de defeitos já que a peça a analisar absorve a radiação penetrante e obtém-se assim uma imagem que se traduz na projeção das diferenças encontradas. Apesar da eficácia deste método, o mesmo não traz rentabilidade económica quando se constata o reduzido custo de fabrico de uma peça cerâmica, apresentando também limitações referentes a geometrias mais complexas.

Os **líquidos penetrantes** são outro método alternativo e não destrutivo para se efetuar a aferição da conformidade deste tipo de peças, contudo, além de só detetar defeitos superficiais, também não é indicada a sua utilização para peças com geometrias complexas, como uma sanita, por exemplo [25].

Já as **análises por ruído** utilizam um sistema composto por um pêndulo com um martelo de plástico e um amplificador interligado a um computador. O pêndulo acerta na peça sem causar nenhum dano e o ruído produzido é captado pelo sistema amplificador, que é posteriormente processado no computador (Figura 16). Por fim, extraem-se os gráficos referentes aos dados convertidos do ruído e conclui-se que uma peça defeituosa não mostra a mesma tendência na sua curva que uma peça que esteja em perfeitas condições, apresentando uma absorção sonora em algum momento do gráfico [26].

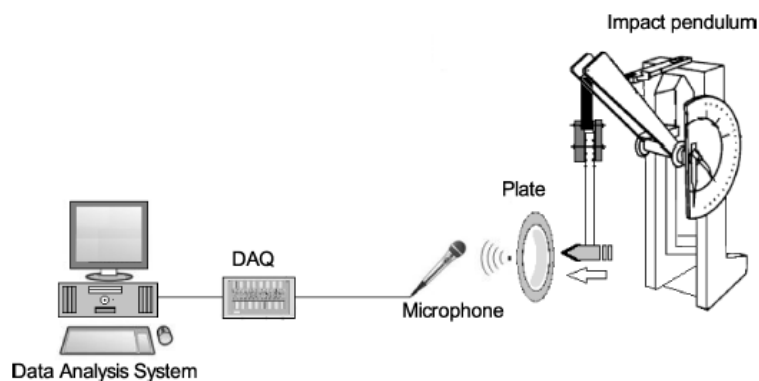


Figura 16 - Mecanismo de funcionamento [26]

Por fim, também se podem utilizar métodos mais avançados como **algoritmos de visão computacionais** como, por exemplo o “*Convolutional Neural Network*”, que têm como finalidade executar um reconhecimento pormenorizado de uma imagem através da identificação de padrões.

Este reconhecimento é realizado através de uma estrutura em camadas com forma triangular, em que cada camada recebe determinados *input's* que posteriormente são transformados em *output's* mais aprimorados através de filtros escolhidos pelo utilizador (Figura 17). Os filtros (normalmente matrizes de 3x3 pixels) representam determinados padrões, o algoritmo vai comparar esses filtros com a imagem inicial (dividindo esta também num conjunto de pixels), conseguindo-se assim realizar um reconhecimento mais pormenorizado com o decorrer das camadas, uma vez que os filtros cada vez vão contendo mais informação [23].

Visto que este método é aplicável a todo o tipo de peças e que um defeito representa algo fora do considerado como normal, estes tipos de algoritmos são bastante eficazes na sua identificação devido a distinguirem facilmente elementos fora do padronizado [27]. Contudo, para usar estes

algoritmos é necessário pessoal altamente qualificado, bem como uma base de conhecimento bem sustentada para agilizar este método e se realizar esta transição.

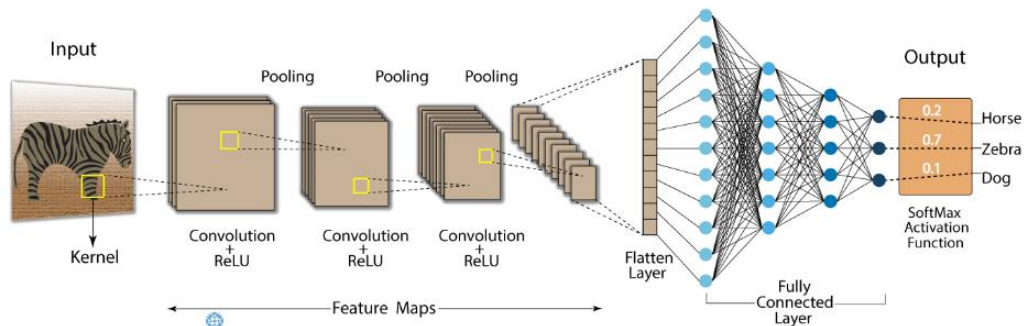


Figura 17 - Convolutional Neural Network [27]

### 2.5.2. Tipos de defeitos

De acordo com [28], os defeitos mais comuns de aparecer nas peças sanitárias são:

- 1) Fendas;
- 2) Riscos;
- 3) Lascas;
- 4) Poros;
- 5) Bolhas;
- 6) Manchas;
- 7) Heterogeneidades derivadas do vidro;
- 8) *Pitting*;

Também é referido por [28] que os defeitos anteriormente citados podem ser divididos em 3 tipos diferentes, que estão representadas na Figura 18.

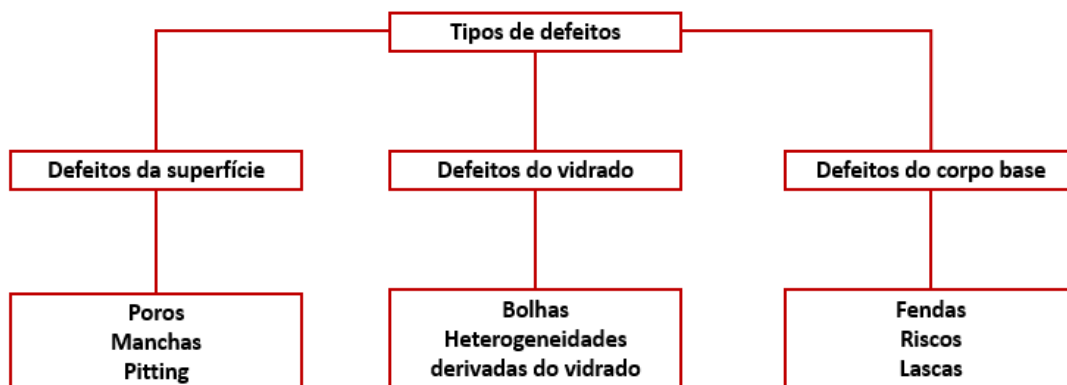


Figura 18 – Tipos de defeitos [28]

**Fendas** podem ser definidas como qualquer tipo de rutura na superfície de um corpo, normalmente com a aparência de uma linha. Estas costumam ser originadas pelas tensões térmicas induzidas no interior de uma peça após os ciclos de aquecimento ou pela diferença entre o coeficiente de expansão térmica da peça e do vidro.

**Riscos** são irregularidades superficiais em que o comprimento é bastante maior que a largura e espessura. Este defeito pode ocorrer durante a inspeção visual aplicada a cada lote devido a ser uma etapa completamente manual que obriga o escolhedor a examinar toda peça e a rodá-la em torno de vários ângulos. Contudo, este defeito tem uma reduzida probabilidade de ocorrência, já que os escolhedores têm os devidos cuidados.

**Lascas**, irregularidades devido à falta de vidrado, normalmente localizadas nos cantos ou nas arestas. Este defeito dá-se quando o corpo cerâmico exerce demasiada compressão sobre o vidrado, resultando no seu descasque devido às tensões não uniformemente distribuídas que permaneceram no corpo. Este fenómeno também pode acontecer devido ao coeficiente de expansão térmica do vidrado ser menor do que o do corpo cerâmico.

**Poros**, vazios com forma circular na superfície do corpo. Durante a cozedura do corpo cerâmico com o vidrado, existe queima de material orgânico que resulta na formação de bolhas de gás, mesmo após a sua fusão (Figura 19). Quando este se encontra fundido, essas bolhas ficam presas no seu interior e quando “explodem” causam danos na superfície do corpo e do vidrado, danos esses que se assemelham a pequenos furos [29].

**Bolhas**, zonas heterogêneas comparativamente com o resto da superfície da peça que foram causadas pela deposição de gotas de água, humidade ou ar (Figura 19).

**Manchas**, discontinuidades referentes à coloração da peça. Este defeito acontece principalmente durante as etapas em que é necessário a utilização do forno, já que a difusão de calor não é perfeitamente uniforme em toda a peça devido à sua geometria e espessura (Figura 19). Deste modo, há zonas onde o sobreaquecimento provocando resulta no aparecimento destas manchas.

**Heterogeneidades derivadas do vidrado**, aparência não uniforme na superfície do corpo (Figura 19). Este defeito deve-se principalmente ao vidrado que não fundiu homoganeamente em toda a superfície do corpo cerâmico, provocando zonas onde existe uma aglomeração maior de vidrado em comparação com outras zonas onde apresentam quase ausência do mesmo.

**Pitting**, pequenas picadas ou crateras na superfície do corpo, com apenas alguns décimos de milímetros e que são originadas devido à concentração elevada de tensões de fadiga debaixo da superfície, as quais vão encurvando nas zonas com maiores tensões de corte [30]. O aparecimento deste defeito também tem origem nas etapas de aquecimento, mas é importante realçar que este defeito é dos mais raros de ocorrer [31].



Figura 19 – Alguns tipos de defeitos (adaptado de [31])

É importante realçar que de acordo com [32], uma peça para ser considerada conforme, tem de preencher pelo menos um dos 3 seguintes requisitos referidos em [32]:

1. Uma área de poros igual ou inferior a 3% comparativamente à área total que é obtida através do corte da camada superior de vidro ao longo da direção da espessura, em relação à área total da superfície cortada;
2. Uma dimensão média de cada poro de 50  $\mu\text{m}$  ou menor, medida em relação à superfície cortada, superfície essa que é obtida cortando a camada superior do vidro ao longo da direção da espessura;
3. Diferença de 50  $\mu\text{m}$  ou menor entre o valor máximo e mínimo de espessura da camada superior do vidro (ausência de corte).

## 2.6. Métodos de recuperação de peças defeituosas

Para se proceder à recuperação de peças defeituosas pode-se optar por 2 caminhos diferentes, dependendo essencialmente da localização do defeito, isto na vertente mais tradicional. Se o defeito estiver localizado numa zona considerada funcional ou que seja visível, deve-se recorrer a uma recuperação a quente, mas caso não esteja localizado numa zona funcional ou não seja visível, já se pode proceder a uma recuperação a frio [4].

### 2.6.1. Recuperação a quente

Este processo engloba 4 partes distintas, a preparação da superfície, aplicação do vidro e da mistura cerâmica, aplicação da cola e a recozedura.

A **preparação da superfície** passa por realizar um tratamento de abrasão na zona onde o defeito está localizado com o objetivo de se retificar a zona considerada defeituosa. Se o defeito for de pequenas dimensões, como por exemplo um poro, um esmeril de carboneto de tungsténio ou uma caneta de percussão será o suficiente para suavizar essa zona [4].

Já se o defeito for de grandes dimensões, como por exemplo uma fenda, a abordagem passará por se usar uma broca com pedra de esmalte em forma cónica [4].

A **aplicação do vidro** na zona do defeito consiste na aplicação de uma primeira camada de vidro com o auxílio de um pincel ou uma escova, o mais homoganeamente possível, para de seguida se realizar a **aplicação da mistura cerâmica** que vai dar corpo ao defeito em causa. É importante referir que esta pasta só pode ser aplicada após a primeira camada de vidro estar bem seca, para isso costuma-se recorrer a um compressor de ar.

A **aplicação da cola** é realizada antes de se levar a peça novamente ao forno de uma forma muito cautelosa. Uma boa aplicação desta cola irá cobrir toda a área referente à mistura cerâmica e tem o objetivo principal de proteger esta zona de maneira a não se desenvolverem fissuras no momento de levar a peça ao forno. Em seguida, mas com um carácter opcional, pode-se aplicar outra camada de vidro com o objetivo de melhorar o aspeto final da peça e prevenir possíveis diferenças de cor que sejam identificáveis a olho nu [22].

Por último, vem a **recozedura** que tem condições em tudo semelhantes com a etapa do ciclo de fabrico, 2.4.9, ou seja, um ciclo com a duração entre 20 a 24 horas com uma temperatura de 1200

°C. No final desta etapa, e se tudo correr dentro do expectável, a peça estará recuperada e livre de qualquer defeito.

### **2.6.2. Recuperação a frio**

Este tipo de recuperação é realizado através de uma resina acrílica foto curável que é aplicada na zona considerada como defeituosa, sendo de seguida curada com uma luz UV. A cor da resina utilizada é sempre compatível com a cor da peça e contém um filtro UV, caso contrário com o decorrer do tempo, a zona recuperada irá começar a amarelecer [4].

Este processo é considerado mais eficiente, uma vez que não envolve tantas preparações e aplicações como na recuperação a quente, dispensando também a recozedura da peça. Contudo e apesar de algumas vantagens, este processo é imperativamente utilizado em zonas defeituosas não funcionais, já que as peças sanitárias estão sempre em contacto com água e a mesma tende a provocar erosão em determinados materiais, como por exemplo as resinas. Este facto põe em causa a integridade da peça, daí o uso deste tipo de recuperação ter de ser muito bem analisado [4].

Os processos de recuperação anteriormente citados têm como desvantagens:

- Processos pouco eficientes devido à quantidade de etapas de execução;
- Reduzido grau de automatização;
- Custos fixos de recozedura, aproximadamente 10 euros por peça;
- Falta de garantia na recuperação completa dos defeitos.

Deste modo, surge então a necessidade da introdução de novas alternativas para estes processos de maneira a extrair uma maior rentabilidade, eficiência e eficácia dos mesmos. Surge assim a tecnologia laser como uma potencial alternativa.

### **2.6.3. Tecnologia Laser**

A tecnologia laser apresenta-se como uma possibilidade viável para a recuperação de peças consideradas defeituosa, sendo este facto justificado por:

- Uma maior eficiência na recuperação de vários defeitos quando comparado com os processos tradicionais, principalmente na recuperação de peças com poros, sendo este o defeito mais comum numa peça sanitária, visto a sua geometria simples e que uma passagem laser seria suficiente para efetuar este tipo de recuperação. Com esta tecnologia, torna-se possível simplificar o processo de recuperação, eliminando algumas etapas;
- Aumentar a rentabilidade, já que através deste processo consegue-se reduzir determinados custos fixos derivados dos processos tradicionais de recuperação. Por exemplo, o custo unitário de recozedura que ronda os 10 euros por peça;
- Proporcionar um maior e melhor planeamento do ciclo de produção, sendo que desta forma as peças consideradas defeituosas iriam deixar de depender exclusivamente do forno para se realizar a sua recuperação.

Esta ideia surgiu do processo de marcação do logótipo da empresa onde cada uma das peças fabricadas (Figura 20) é marcada através de um laser, que é utilizado como fonte de energia do processo em causa. É de realçar que esta marcação pode ser realizada com aplicação do logótipo na superfície do substrato ou diretamente no substrato [4].

Quando o logótipo é aplicado na superfície do substrato é necessário o respetivo substrato e o material de marcação, material esse que pode ter a forma de filme, pó ou pasta, e a sua espessura deve variar entre 0.0127 e 2.54 milímetros. O laser vai seguir o padrão do logótipo e vitrificar o mesmo no substrato, obtendo-se assim a marcação do logótipo sem alteração da espessura do substrato [4].

Quando o mesmo é aplicado diretamente no substrato é necessário que o corpo cerâmico tenha previamente na sua composição um aditivo que seja sensível à radiação [4]. Como na hipótese anterior, o laser é usado como fonte de energia, fundindo o logótipo no substrato. Devido ao pigmento orgânico do aditivo, é necessário que o laser opere com um comprimento de onda na zona visível, ultravioleta ou infravermelha. Contudo, é mais aconselhado usar-se aditivos que absorvam radiação na zona visível ou infravermelha, já que a absorção nestas zonas é mais facilitada, e por sua vez a fusão do logótipo também [33].



Figura 20 - Logótipo

A sigla laser significa *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* e de acordo com [34], o laser só teve origem depois de se estabelecer a luz como radiação composta de campos eletromagnéticos.

Já de acordo com [35], o laser pode ser também definido como um feixe de luz extremamente organizado, focado, coerente, monocromático e puro. A quantidade de energia armazenada no material gerador é diretamente proporcional com a intensidade do laser, ou seja, quanto mais energia armazenada, maior a intensidade do laser. Todas estas características permitem que o laser seja considerado um equipamento muito versátil.

Existem alguns casos de estudo que usam este tipo de tecnologia nas suas várias vertentes, tais como:

- **Parametrização laser**

De acordo com [36], para se conseguir um correto funcionamento do laser é necessário analisar e testar rigorosamente a parametrização do mesmo. Assim sendo, são distinguidos como parâmetros importantes a controlar no laser a sua intensidade, o ângulo de incidência, a polarização, a

coerência temporal e espacial, modo de operação, o comprimento de onda, o número de ciclos, a velocidade de operação, a quantidade de repetições e o número de sobreposições necessárias para criar o padrão final.

Segundo [37] esta tecnologia é testada na recuperação de pequenos defeitos, como poros com um diâmetro entre 0.1 e 0.5 mm, para avaliar a sua eficácia na recuperação dos mesmos. Para tal é usado um laser de CO<sub>2</sub> na gama dos 10600 nm o que comprova que este processo consegue trazer uma maior eficácia obtendo-se uma fusão completa do vidro e deixando o mesmo perfeitamente brilhante, bem como uma melhor eficiência pois, recupera um maior número de peças por unidade de tempo. Pode-se concluir ainda que a potência e o tempo de operação do laser são parâmetros fundamentais a controlar e que neste processo os melhores resultados são evidenciados quando se opera em modo pulsado, conseguindo-se assim uma boa absorção da radiação laser por parte do vidro sem nunca remover material da peça [37].

Segundo [38] a potência do laser está diretamente interligada com a densidade de energia do mesmo, sendo estes inversamente proporcionais. Em suma, quanto maior a densidade de energia do laser maior será a fusão no material, formando-se irregularidades na sua superfície devido às tensões superficiais exercidas, e quanto maior for a potência exercida mais fraca será a ligação entre o revestimento e o substrato (Figura 21). Torna-se então fundamental conseguir conciliar ambas de forma a existir uma boa consolidação entre o revestimento e o substrato.

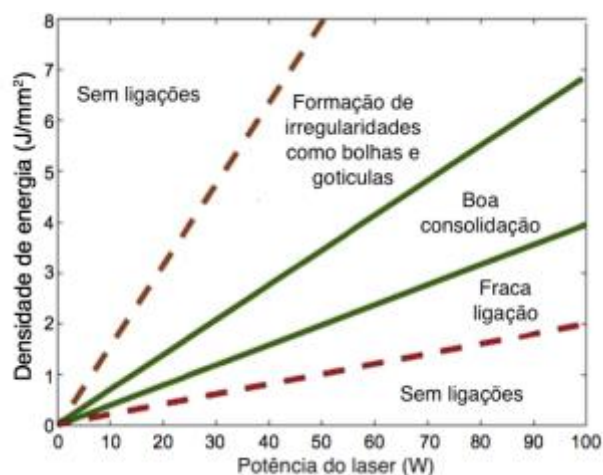


Figura 21 – Densidade de energia vs Potência do laser [38]

Apesar do molibdênio não ser um material cerâmico, de acordo com [39] é possível retirar algumas conclusões referentes ao ângulo de incidência proveniente da utilização da tecnologia laser. É referido que a produção de molibdênio puro é executada através da fusão seletiva com um laser Nd:Yag de 400 W em modo pulsado onde é realçada a importância da ausência de fissuras em toda a produção. Assim sendo, foram realizados ensaios com o laser em 3 ângulos distintos (0°, 67° e 90°) onde se pode concluir que com um ângulo de incidência de 67° a quantidade de fissuras é menor e que as mesmas apresentam menores dimensões quando comparadas com as fissuras a 0° e 90° [39].

- **Diâmetro do laser**

De acordo com [40], a medicina odontológica utiliza este tipo de tecnologia para densificar porcelana dentária com o auxílio de um laser de CO<sub>2</sub> tendo sido concluído que a geometria final de

cada peça depende diretamente do diâmetro do laser utilizado. Esta relação pode ser definida em 3 casos particulares:

- Quando o diâmetro do laser é maior do que o da amostra, esta adquire uma geometria esférica. De realçar que este fenómeno é característico de um aquecimento em forno;
- Quando o diâmetro do laser é igual ao da amostra, esta apresenta uma forma planar;
- Quando o diâmetro do laser é menor do que o da amostra, esta sofre efeitos de Marangoni. Estes efeitos podem ser definidos através da transferência de massa fundida na direção radial por convecção, devido aos diferentes gradientes de tensão superficial criados entre o núcleo da amostra e a sua periferia.

- **Influência nas propriedades mecânicas**

Como foi demonstrado em [41], esta tecnologia foi utilizada para avaliar a influência da mesma na resistência ao corte na junção de amostras cerâmicas. Para isto foi usado um laser de CO<sub>2</sub> que é identificado como o mais adequado para o tratamento da superfície, permitindo obter valores de resistência ao corte satisfatórios e valores de rugosidade elevados. Foi então comprovado que o tratamento laser permite garantir melhores valores de resistência ao corte nas amostras, contudo quanto maior for o número de passagens do laser, mais elevados são os valores obtidos [41].

- **Eficiência do processo**

Já de acordo com [42], esta tecnologia é usada na vedação de juntas em células de combustível de óxido sólido e é considerada inovadora, bem como muito eficiente já que consegue trazer tempos de execução menores quando comparada com outros processos, e com isto uma redução significativa dos custos de produção.

- **Eficácia do processo**

De acordo com [43], foi analisado a viabilidade de usar a fusão seletiva com laser para se obter uma fusão completa do vidro. Deste modo, foi utilizado um laser Nd:Yag e demonstrado com sucesso através de 2 passos, em que o primeiro passa pela fusão completa do vidro sem qualquer formação de fissuras e o segundo pelo controlo rigoroso da cristalização do mesmo.

É ainda identificada a possibilidade de obter camadas vidradas até 100 µm com várias passagens de laser, mas em que a sua velocidade tem de ser baixa para permitir a cristalização de cada camada [43].

Segundo [44], a viabilidade de produzir revestimentos cerâmicos com esta tecnologia é confirmada pelo que o laser permite uma parametrização muito ampla sem qualquer dano para o substrato, quando devidamente utilizado. É também realçada a compatibilidade deste processo com materiais cerâmicos com baixo ponto de fusão, baixa resistência ao desgaste e à corrosão, bem como a redução do risco de aparecimento de fissuras através da melhor adesão possível entre o revestimento e o substrato.

## 2.7. Controlo de qualidade através de ensaios

Após confirmada a inexistência de defeitos em cada uma das peças do lote produzido, é então necessário submeter algumas amostras representativas do lote a determinados ensaios para avaliar principalmente a sua funcionalidade e dimensionalidade. Este controlo de qualidade bastante rigoroso deve-se à garantia de durabilidade dada ao cliente (20 anos).

Existem ensaios considerados obrigatórios, como por exemplo, ensaios de carga e ensaios de absorção de água, e outros considerados como aconselhados de realizar, como por exemplo, ensaios de autoclave.

### 2.7.1. Ensaio de carga

Este tipo de ensaio tem de ser realizado obrigatoriamente em todas as peças que se vão encontrar suspensas, como urinóis e lavatórios. Todas estas peças sanitárias têm de ser assentes em superfícies lisas.

Os urinóis são regidos pela norma EN 997:2018 [45] e a mesma refere que uma carga de  $(4.00 \pm 0.05)$  kN deve ser aplicada gradualmente no centro da abertura do urinol, mais especificamente, em cima de uma viga com uma secção transversal quadrada de  $10000 \text{ mm}^2$ , com a duração de 1 hora.

Os lavatórios já são regidos pela norma EN 14688:2015 [46] e a mesma refere um procedimento de ensaio em tudo semelhante com o dos urinóis. A carga deve ser também aplicada gradualmente, mas com um valor de  $(1.50 \pm 0.01)$  kN em cima de uma viga de madeira com secção transversal quadrada de  $10000 \text{ mm}^2$ , também com uma de duração de 1 hora (Figura 22).

Em qualquer um dos ensaios, a monitorização do mesmo deve ser o mais rigorosa possível e qualquer falha de conformidade deve ser registada, considerando que deformações nos pontos onde a carga é aplicada diretamente não devem ser considerados como uma falha [46]. A aplicação da carga nestes ensaios costuma durar aproximadamente 24 horas de maneira a aumentar a fiabilidade e robustez dos dados experimentais obtidos.

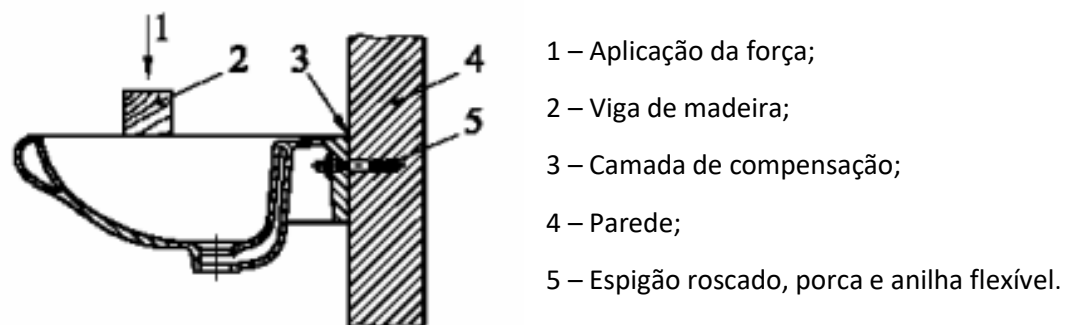


Figura 22 – Aplicação da carga num lavatório [46]

### 2.7.2. Ensaio de absorção de água

Este tipo de ensaio à semelhança do anterior é de cariz obrigatório, uma vez que todas as peças sanitárias têm de ter um coeficiente de absorção de água menor que 5%, contudo uma peça só é realmente considerada aceitável se esse mesmo coeficiente for igual ou menor que 0.5%. A ARCH

foi inovadora em criar um material cerâmico à base de argilas finas, o *Gresanit*, que tem propriedades superiores relativamente a outros cerâmicos mais comuns. Dentro dessas propriedades realça-se uma melhor resistência a fissuras, metade da massa volúmica, melhor resistência mecânica e principalmente um coeficiente de absorção de água menor que 0.5%.

No caso específico de um urinol, para se realizar este tipo de ensaio são necessárias 3 amostras com uma área não vidrada de aproximadamente de 30 cm<sup>2</sup> e 12 mm de espessura. As mesmas devem ser secas a uma temperatura de 110 °C durante (180 ± 5) minutos, arrefecidas num exsiccador e pesadas com a maior exatidão possível [45].

De seguida, as amostras são colocadas num banho com água desmineralizada em que não exista contacto entre elas pelas laterais ou pela parte inferior, com posterior aquecimento do banho até ao ponto de ebulição durante (120 ± 5) minutos. As amostras devem permanecer imersas durante cerca (20 ± 1) horas [45].

No final as amostras são retiradas do banho com uma pinça e secas com um pano para serem pesadas novamente a fim de se calcular (Equação 1) o respetivo coeficiente de absorção de água (Wt).

$$Wt = \frac{Massa\ final - Massa\ inicial}{Massa\ inicial} \times 100$$

(Equação 1)

### 2.7.3. Ensaio de Autoclave

Apesar de não ser um ensaio obrigatório, é um ensaio aconselhado de ser realizado de forma a avaliar a formação de fissuras durante as condições de operação de uma peça.

Este ensaio é regido pela norma EN ISO 10545-11 [47] e é um ensaio recomendado para peças de grandes dimensões, como colunas de chuveiro, devido a possíveis deformações que possam ocorrer. A área das peças a ensaiar deve ser de (25000 ± 150) mm<sup>2</sup> com pelo menos uma face vidrada.

O ensaio vai então avaliar a formação de fissuras na peça a partir da exposição da mesma dentro de uma autoclave a 200 °C com uma pressão entre 3.0 a 4.0 kgf/cm<sup>2</sup> [47]. Sabendo que qualquer fissura torna a peça considerada defeituosa, este ensaio tem grande importância na garantia de qualidade para com o cliente. É de realçar também, que este ensaio se torna obrigatório só no *Gresanit* devido à qualidade garantida nas suas propriedades mecânicas e físicas, como a elevada resistência a fraturas.

Outros ensaios podem ser também realizados, tais como os ensaios de abrasão e de riscos, ensaios a agentes químicos e manchantes, ensaios de resistência à variação de temperaturas e ensaios de drenagem, tendo em consideração que não possuem a mesma importância dos anteriormente citados.

### 3. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO LASER

Vista a eficácia que esta tecnologia poderá trazer no que diz respeito à recuperação de um maior número de peças defeituosas, a eficiência numa maior quantidade de peças recuperadas por hora, aliadas à redução dos custos fixos derivados do processo tradicional de recuperação e à motivação de se realizar este processo a uma temperatura mais baixa (menos danosa para a peça, por consequência), são motivos suficientes para se desenvolver um protótipo laser que consiga recuperar determinados defeitos através da fusão localizada do vidro.

Contudo podem-se identificar outras razões que também impulsionam a mudança do processo tradicional de recozedura por um tipo de tecnologia como este, tais como [48]:

- Volume limitativo dos fornos de cozedura, visto que cada forno está limitado a um certo número de peças;
- Emissões consideráveis de produção de CO<sub>2</sub> provenientes da utilização do forno;
- Elevados consumos energéticos destinados à reparação de peças sanitárias;
- Grande stock de peças defeituosas em armazém, à espera de que seja atingida uma quantidade suficientes para um completo enchimento do forno, que poderá levar peças em que se vai realizar a primeira cozedura e outras que vão sofrer uma recozedura.

#### 3.1. Tipo de Laser

De acordo com [48], os vários tipos de lasers existentes no mercado são categorizados consoante os meios ativos com que operam, ficando assim divididos em lasers de estado líquido, gasoso ou sólido. Os **lasers de estado gasoso** e **sólido** são os que têm maior expressão, tanto ao nível das aplicações possíveis, como em número no mercado. Já os **lasers de estado líquido** não têm tanta expressão devido ao seu elevado consumo de energia, sendo para isso necessário fornecer energia em modo contínuo para o meio ativo manter-se no seu estado excitado. Geralmente estes tipos de lasers necessitam de sistemas de arrefecimento auxiliares para manter o meio ativo na temperatura considerada ideal.

Os **lasers de estado gasoso** são equipamentos que utilizam um meio ativo gasoso para produzir a amplificação da luz coerente. Eles operam através de uma descarga elétrica que excita os átomos ou moléculas do gás para tal estado de excitação, fazendo com que estes emitam luz quando voltam ao seu estado fundamental. Existem vários tipos de lasers de estado gasoso e cada um utiliza um gás diferente como meio ativo, emitindo luz em diferentes comprimentos de onda. Entre estes tipos de lasers, os mais comuns são os lasers de CO<sub>2</sub> que possuem uma alta potência, uma boa eficiência quando comparados com outros tipos de lasers gasosos e são utilizados na indústria de corte e soldadura, principalmente em materiais não metálicos.

Os **lasers de estado sólido** são equipamentos que utilizam um meio ativo sólido para produzir a amplificação da luz coerente. O meio ativo é geralmente um cristal dopado com um ião de um metal de transição, como o ião de neodímio (Nd), sendo que o tipo de cristal usado vai ditar o comprimento de onda de funcionamento. Quando uma fonte de energia é aplicada ao meio ativo os átomos ou os iões dopantes são excitados para um estado energético superior, quando esses

mesmos retornam ao seu estado fundamental, emitem fótons de luz coerente numa determinada frequência, produzindo um feixe de laser com um comprimento de onda de aproximadamente 10000 nm [48].

Para além de **lasers sólidos** em que o meio ativo é um cristal dopado existem também **lasers sólidos de díodos**, cujo meio ativo é composto por um material semiconductor. O comprimento de onda destes lasers depende da escolha do material semiconductor e costumam operar dentro do espectro ultravioleta ao infravermelho, ou seja, engloba o espectro de luz dos 10 nm aos 100  $\mu$ m [49] dentro dos comprimentos de onda de funcionamento e distinguem-se os lasers de fibra e de díodos. Os lasers de díodos para fusão de materiais são conhecidos pela sua precisão e controlo, o que permite que sejam usados numa ampla gama de materiais, incluindo metais, polímeros, cerâmicos, entre outros [48].

Quando comparados os lasers de CO<sub>2</sub>, de Nd:YAG e de díodos, os lasers de díodos são aqueles que apresentam as maiores eficiências de trabalho já que são capazes de converter uma proporção significativa da energia elétrica em luz laser, dependendo de um baixo consumo de energia e podendo ser operados com correntes relativamente baixas. Estes fatores, aliados à disponibilidade comercial dos lasers de díodos, portabilidade e design compacto, facilidade de integração com fibras óticas, número reduzido de espelhos e componentes óticos (facilitando assim a sua manutenção), **fizeram com que se optasse pelo desenvolvimento de um protótipo laser de díodos** [50].

Outra vertente que foi necessária ter em conta na hora de decisão quanto ao tipo de laser a escolher é o aporte térmico do mesmo. Um aporte térmico excessivo mostra que o perfil gaussiano de intensidade de, por exemplo, um laser de fibra é caracterizado por possuir um valor máximo no centro do feixe, que decresce radialmente até à periferia. Esta heterogeneidade na distribuição de energia pode levar ao sobreaquecimento da região central do feixe e isso pode induzir a formação de bolhas através de transformações de fases que ocorrem no vidro neste patamar de aquecimento. Uma forma de mitigar este defeito seria utilizando um laser com perfil de intensidade quadrado ou "*flat-top*", que como o próprio nome sugere, possui uma intensidade uniforme e constante sobre a maior parte da área do material que interage com o feixe laser. Deste modo, a área de reparação estaria a uma temperatura uniforme e poder-se-ia determinar o limiar de temperatura e/ou potência para os quais não existem a formação de defeitos. A utilização de um laser de díodos possuindo um perfil quadrado de intensidade foi então considerada a opção mais adequada para mitigar este defeito e produzir um vidro cerâmico de melhor qualidade [51].

## 3.2. Análise realizada pelo fabricante

### 3.2.1. Potência

Para se conseguir extrair conclusões referentes à potência que a fonte laser deve possuir, o fornecedor (LaserMaq) procedeu a ensaios de fusão superficial em provetes cerâmicos a uma distância correspondente à distância focal do sistema ótico, em condições estáticas e com um laser de carácter meramente ilustrativo. Os ensaios efetuados consistiram em realizar um disparo laser com uma potência pré-definida e um tempo pré-determinado com o objetivo de se analisar o estado da fusão no material, caracterizando-se assim a formação, ou não, de defeitos e eventuais

alterações estruturais do vidro [51]. Na Tabela 1 apresentam-se os parâmetros utilizados nos ensaios.

Tabela 1 - Estudo dos tempos de interação laser (Fonte: [51])

Potência [W]	Tempo [s]					
125	3	5	10	12	14	16
150	3	5	10	12	14	16

Após a realização de todos os ensaios, pode-se definir que um valor de potência de 125 W pode ser tomado como referência na reparação deste tipo de peças, tendo demonstrado, que apesar de terem sido detetados defeitos (fissuras diagonais e perimetrais) que muito provavelmente são de origem térmica, apresentou resultados significativos [51].

### 3.2.2. Ciclos térmicos

No decorrer da seleção de todos os componentes do protótipo laser, o fornecedor avaliou ciclos térmicos distintos com diferentes taxas de aquecimento e arrefecimento, além de diferentes tempos de incidência do feixe laser. A adoção de diferentes ciclos térmicos tem o objetivo de entender melhor a interação laser em superfícies cerâmicas e o surgimento dos defeitos anteriormente citados (3.2.1), que ocorrem quando a superfície cerâmica é exposta a elevadas gradientes térmicos.

Assim sendo, foram avaliados 5 ciclos térmicos diferentes que estão identificados na Figura 23.

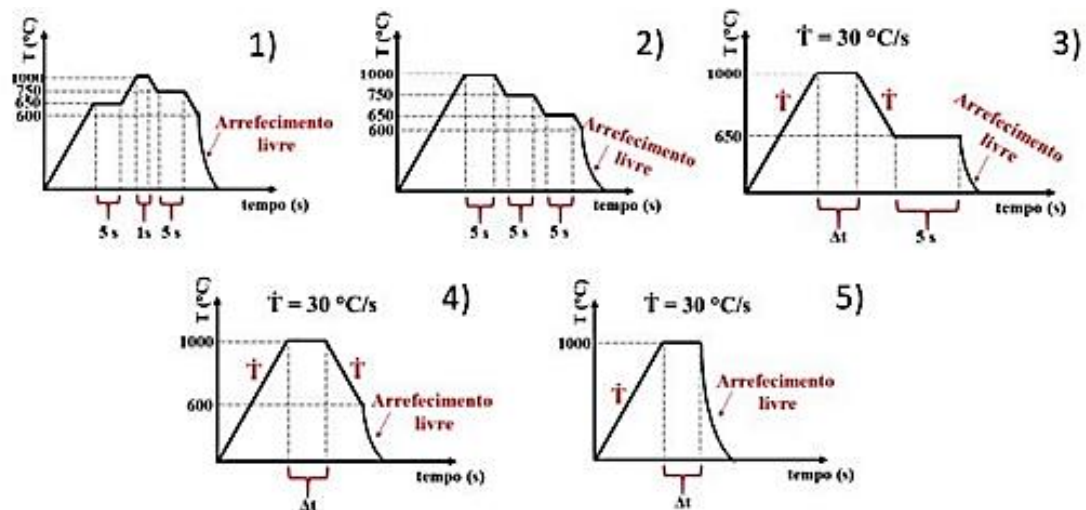


Figura 23 – Ciclos térmicos estudados

Fonte: [51]

Após a análise de todos os ciclos térmicos identificados na Figura 23 conclui-se que [51]:

1. Os defeitos encontrados devem-se principalmente à heterogeneidade da distribuição de energia na superfície do defeito. Podendo-se desta forma concluir que um laser com um perfil de intensidades gaussiano não é aconselhável pois, a intensidade do laser varia à medida que o mesmo se afasta do centro do feixe, possuindo um valor máximo neste local e diminuindo o seu valor radialmente do centro para a periferia (Figura 24).

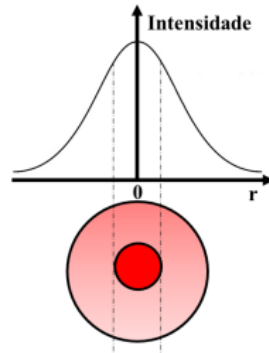


Figura 24 – Perfil de intensidade Gaussiana

Fonte: [51]

2. Dependendo da potência usada pode haver uma inversão da molhabilidade do vidro, e assim se verificar uma depressão na região central do mesmo, que coincide com o ponto onde o feixe laser incide com maior densidade de energia, apresentando um perfil de intensidades gaussiano. Esse perfil de intensidades gera um gradiente de temperaturas na superfície do material, que por sua vez irá induzir um gradiente de tensão superficial do centro para a periferia. Este efeito provoca um movimento fluido-dinâmico do centro para a periferia, sendo responsável pela depressão observada na região central do material onde há contato direto com o feixe laser. Por outro lado, à medida que a depressão aumenta ocorre um fluxo de fluido no sentido inverso, impulsionado pela força gravitacional, conhecido como convecção Marangoni. (Figura 25).



Figura 25 – Convecção Marangoni

Fonte: [51]

3. A utilização de um ciclo térmico apenas com um patamar de temperatura ( $T_{m\acute{a}x}$ ) durante todo o processo pode ser suficiente para causar a fusão completa e homogênea do vidro, quando a duração do mesmo é controlada adequadamente. Deste modo, a utilização de um ciclo térmico apenas com um patamar pode ser tão viável quanto um ciclo térmico com mais do que um patamar, desde que seja devidamente controlado.

### 3.3. Seleção dos componentes

#### 3.3.1. Fonte laser

A seleção da fonte laser a utilizar teve de passar por um estudo prévio, tendo sido estabelecidos os seguintes requisitos como fundamentais [48, 51]:

- Selecionar uma fonte laser que possua uma potência adequada, de forma a atingir as temperaturas que permitam a fusão e um espalhamento uniforme do vidro no defeito. Para isso, é necessário que a fonte laser tenha uma potência regulável tornando o trabalho experimental o mais eficiente quanto possível e que tenha pelo menos 150 W para se averiguar se os novos resultados apresentam semelhanças com os resultados de 3.2.1;
- Que apresente um comprimento de onda próximo de 1060 nm, uma vez que os materiais cerâmicos apresentam uma boa absorção de energia nestas gamas;
- Que apresente um feixe de laser com diâmetro superior ou semelhante ao diâmetro dos defeitos encontrados nas peças sanitárias consideradas defeituosas;
- Uma fonte laser compacta, de fácil manutenção e transporte.

#### 3.3.2. Restantes componentes

Necessidade de um sistema ótico que permita a focagem do feixe laser sobre os defeitos das peças a serem recuperadas. Trata-se de um componente considerado obrigatório pois, quanto melhor a focagem maior será a exatidão e precisão do laser no local a recuperar.

Para um controlo rigoroso da fusão localizada do vidro nas peças cerâmicas é necessário o controlo da temperatura no decorrer de todo o processo. Neste sentido, é necessária a colocação de um pirómetro que permita a medição instantânea da temperatura na peça e que transmita essa mesma informação ao controlador PID, de forma a ajustar automaticamente a potência de saída do feixe de laser para os parâmetros pré-definidos [48]. Com este controlador, torna-se ainda possível definir o ciclo térmico a utilizar, implementando aquecimentos e arrefecimentos controlados, de forma a diminuir, ou mesmo evitar, choques térmicos nas peças.

Um *chiller* para garantir o arrefecimento adequado do sistema, protegendo a integridade dos componentes do laser e mantendo a sua estabilidade durante todo o processo de recuperação.

Por fim, torna-se ainda necessário um batente que possa encostar em cada uma das peças a ser recuperadas e assim se ajustar a distância focal para altura da peça de uma forma simples e rápida.

### 3.4. Construção do protótipo

Após concluído o estudo teórico dos diferentes tipos de lasers e realizadas as primeiras abordagens experimentais procedeu-se por fim à tomada de decisão, a seleção de todos os componentes a integrar no protótipo com posterior montagem [52].

#### 3.4.1. Protótipo laser

Na Figura 26 é possível observar a aparência final do protótipo laser após a montagem de todos os seus componentes.



Figura 26 – Protótipo laser

Como principais especificações técnicas e princípios de funcionamento do protótipo realçam-se [52]:

- Laser de estado sólido, mais especificamente de díodos;
- Potência máxima de 200 W (Anexo 1);
- Comprimento de onda de 1080 nm;
- Leitura em tempo real da temperatura efetuada por um pirómetro, que deve estar colocado a 100 mm do alvo (Figura 27);
- Programador integrado no protótipo para um controlo eficiente e rápido das condições de trabalho ( Figura 28);



Figura 27 - Pirómetro



Figura 28 – Programador

- Possibilidade de regulação da potência de saída do protótipo através da amplitude da escala de trabalho. Esta regulação é realizada através da alimentação externa do protótipo (0 a 10 V), sendo o programador que relaciona o ciclo térmico definido com a potência a aplicar, perante o valor que o utilizador defina. Assim sendo, o programador funciona como um controlador proporcional integral derivativo (PID), ajustando o processo no seu decorrer perante toda a parametrização efetuada pelo utilizador;
- Apesar do laser ser um laser de díodos a transmissão de energia no protótipo é realizada através de fibra ótica, estando assim garantida a adaptação do protótipo em diferentes condições de trabalho dentro de um ambiente industrial. O protótipo tem cerca de 5 metros de cabo de fibra ótica para se tornar possível a sua adaptabilidade a nível industrial;
- Devido à elevada potência que o protótipo consegue atingir e por consequência altas temperaturas, é necessária uma refrigeração externa, optando-se assim por realizar a mesma através de água com um *chiller*, assegurando o seu arrefecimento. Este sistema de refrigeração foi incorporado no corpo do protótipo para que a sua portabilidade seja mais eficiente (Figura 29);



Figura 29 - Chiller

- O protótipo possui uma mesa de trabalho e uma coluna de ajuste com manivela, que tem como função o controlo da distância a que se encontra o cabeçote laser e o pirómetro. Deste modo, consegue-se ajustar a distância focal do laser em relação ao eixo Z da

máquina, utilizando a coluna de ajuste com manivela que se encontra perpendicular à mesa de trabalho (Figura 30);



Figura 30 – Veio de ajuste de ajuste da distância focal

- É importante salientar que a portabilidade do protótipo é um requisito crucial vista a necessidade de movimentação do mesmo em chão de fábrica. Por essa mesma razão foram colocadas rodas no corpo do protótipo de forma a facilitar a sua deslocação;
- O protótipo tem uma alimentação elétrica monofásica de 220 V e 60 Hz;
- Para garantir a segurança e a facilidade de acesso do protótipo, todos os componentes elétricos e eletrônicos foram colocados num quadro elétrico autónomo e fechado, localizado na parte lateral ( Figura 31).



Figura 31 – Quadro elétrico

### 3.4.2. Meios de segurança e proteção

Uma vez conhecidas as especificações deste protótipo, as potências de trabalho que o mesmo pode atingir e consequentes temperaturas para se realizar a fusão do vidro, é necessário definir bem o risco associado a este processo para o utilizador bem como selecionar as medidas de proteção individuais mais adequadas para tal [53].

Posto isto, e visto que a potência máxima do laser são 200 W, é necessário usar meios de proteção de classe IV (usado em potências de trabalho superiores a 5 mW), classe essa que é a mais rigorosa no que toca à segurança do utilizador [54]. Esta classe obriga a utilização de óculos de segurança (Figura 32) apropriados à potência máxima de funcionamento do laser e adverte cautelosamente que a exposição do utilizador deve ser minimizada ao máximo aquando da emissão do mesmo, pele e olhos principalmente [54].



Figura 32 – Óculos de proteção

Focando agora na segurança propriamente dita do protótipo, este laser possui um botão vermelho de emergência que pode ser acionado a qualquer momento, desligando-se assim qualquer emissão que esteja em curso.

### 3.4.3. Instrução de trabalho

Antes de se proceder à indicação da instrução de trabalho do protótipo, torna-se importante proceder à identificação e numeração de todos os componentes do mesmo (Figura 33).

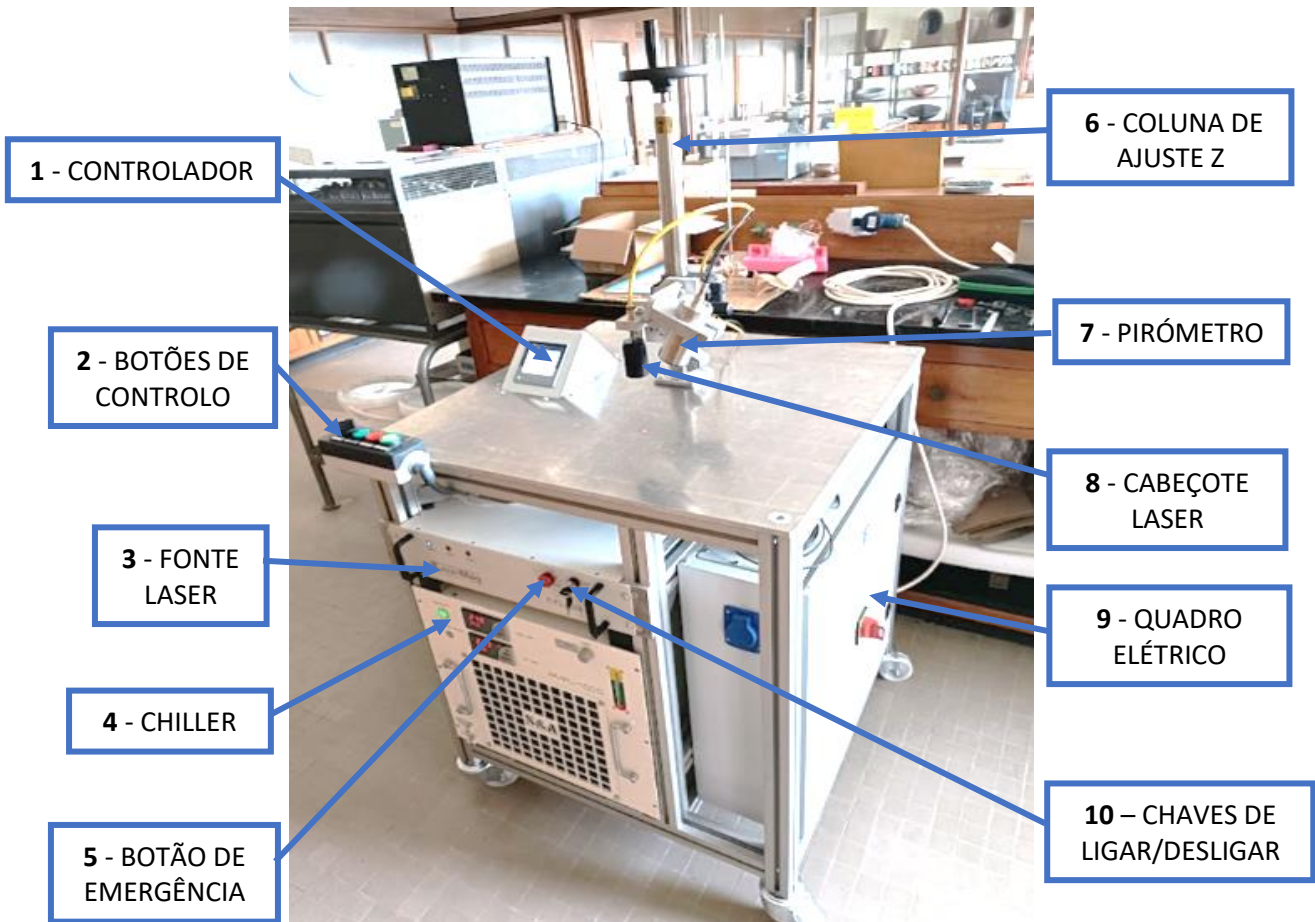


Figura 33 – Protótipo no seu estado inicial

Depois de identificados e numerados todos os componentes do protótipo laser, descreve-se a instrução do mesmo:

1. Ligar o protótipo à tomada (220 V) e de seguida, ligar o quadro elétrico do mesmo (9), rodando o botão vermelho para a esquerda;
2. Verificar se a água do *chiller* (4) se encontra na zona assinalada a verde (Figura 34);



Figura 34 – Sensor do nível da água

3. Rodar as chaves (10) para a posição de “ON” e por consequência, a mira do cabeçote laser fica visível na superfície da mesa automaticamente (Figura 35);



Figura 35 – Posição da chaves (10) na fonte laser (3)

4. Após realizados todos os passos indicados anteriormente, o laser já se encontra completamente ligado e está apto a ser utilizado, bem como o seu controlador (1);
5. Fazer login no menu do controlador (1) com o utilizador “Master”, caso o utilizador tenha de editar algum parâmetro de funcionamento do laser. Caso o utilizador queira só pôr um ciclo térmico previamente criado em funcionamento, não é necessário realizar login;
6. Para criar um ciclo térmico, o utilizador tem de ir ao menu novamente e de seguida entrar em “*Program admistration*”. Nesse submenu o utilizador pode criar os ciclos térmicos que entender com o número de patamares que lhe forem convenientes, definindo apenas a temperatura de cada patamar e o tempo necessário para se atingir esse mesmo patamar de temperatura. O utilizador pode também, a qualquer momento, editar ou apagar qualquer ciclo térmico criado;
7. Depois de escolhido o ciclo térmico que o utilizador pretende pôr em funcionamento, ele deve colocar a peça na mesa de trabalho, ajustar a distância focal através da manivela da coluna de ajuste (6) para a distância desejada e ajustar a inclinação do pirómetro (7) com o auxílio de chaves *umbrako* de tamanho adequado;
8. O utilizador pode regular indiretamente a potência de saída do laser através da regulação da escala funcionamento pois, esta escala quantifica a potência que está a ser utilizada. Após definida a escala de funcionamento e o ciclo térmico de trabalho, o controlador PID atua sobre a escala de funcionamento, ajustando-a e otimizando-a através das leituras efetuadas pelo pirómetro (7) em tempo real, ou seja, a escala de funcionamento é variável ao longo do processo e ditada pelo pirómetro (7). Para regular a escala de funcionamento do laser é necessário ir ao menu do controlador (1), selecionar “*Analog outputs*” e regular o valor para o pretendido. Já para otimizar as leituras realizadas pelo pirómetro é necessário a ajustar a inclinação do pirómetro.

É importante realçar que uma escala de funcionamento de 100% representa o valor mínimo que se pode estabelecer, já que corresponde ao valor de potência máxima (200 W) pois, quanto menor a escala de funcionamento, menor o esforço que o laser necessita de realizar para executar determinado ciclo térmico, e por consequência, consegue utilizar uma potência de trabalho maior. Caso se queira diminuir a potência de trabalho, é necessário aumentar-se a escala de funcionamento para que o laser seja obrigado a realizar um esforço maior devido à maior escala.

Resumidamente, a escala de funcionamento pode variar dentro de um intervalo de valores, os quais são definidos pelo utilizador, durante o processo de recuperação. Esta variação é ditada pelo pirómetro para que as temperaturas e tempos do ciclo térmico sejam rigorosamente cumpridas, sendo que por consequência, a potência de trabalho também varia ao longo de todo o processo;

9. Antes de qualquer arranque de ciclo por parte do utilizador, é necessário que o mesmo cumpra todas as regras de proteção e segurança individual definidas, ou seja, o uso de óculos de proteção de classe IV e diminuir ao máximo a exposição à radiação laser;
10. Após a execução de todos os passos anteriores e as **medidas de segurança terem sido seguidas rigorosamente**, o utilizador pode arrancar com o ciclo térmico escolhido, para isso o mesmo pode optar por um controlo automático ou manual através da regulação do botão 2.A (Figura 36). Caso o utilizador pretenda controlar o protótipo em modo manual, é necessário que pressione fixamente o botão 2.D (Figura 36). Já no caso do modo automático, apenas basta carregar uma vez no botão 2.D (Figura 36) após o botão 2.A estar devidamente regulado.

Sempre que o laser entra em operação a luz 2.B é automaticamente acionada e quando o ciclo termina, a luz deste componente desliga também automaticamente (Figura 36).

A luz 2.C liga só após o acionamento do botão de emergência (Figura 36).

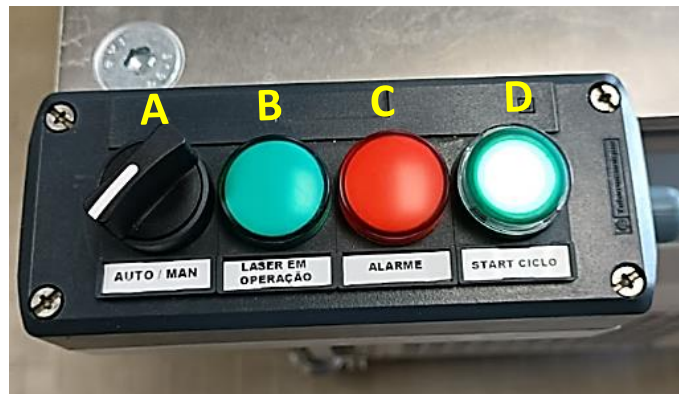


Figura 36 – Botões de controlo (2)

11. Quando o cabeçote laser (8) está em funcionamento, existe o acionamento da luz 3.A (Figura 37);



Figura 37 – Sinais luminosos da fonte laser (3)

12. O botão de emergência (5) pode ser acionado a qualquer momento (Figura 37), e caso a luz 3.B esteja ativa (Figura 37) com respectivo sinal sonoro, aconselha-se o desligamento da fonte laser (3) na sua parte traseira e no botão "AC POWER". (Figura 38).

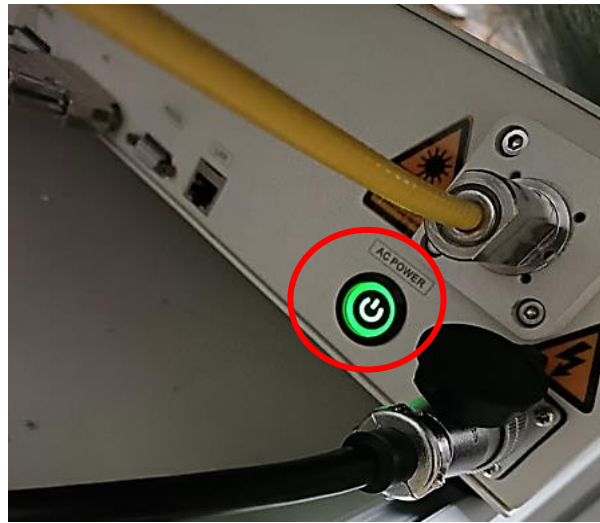


Figura 38 – Parte traseira da fonte laser (3)

## 4. TRABALHO EXPERIMENTAL

Após conhecidos todos os componentes do protótipo laser e a respetiva instrução de trabalho, pode-se iniciar o desenvolvimento do trabalho experimental. Este trabalho tem como principal objetivo estudar os vários parâmetros de funcionamento do laser de forma a se conseguir obter uma formulação adequada entre os mesmos, e em que seja possível a recuperação de peças consideradas defeituosas. Para se atingir os objetivos em causa, é necessário ter em conta o seguinte:

- O processo tem de ser eficiente e não pode ser mais moroso que o processo tradicional de recozedura, que tem uma duração de 20 a 24 horas. Neste período, a quantidade de peças recuperadas está limitada à capacidade do forno e com esta nova tecnologia, estima-se que 2 minutos são mais que suficientes para se concluir a recuperação de uma peça, desde a preparação do vidro ao pós-tratamento da peça (se necessário). Assim sendo, num período de 20 horas prevê-se que se consiga recuperar aproximadamente 600 peças;
- Estima-se que apenas 50% das peças consideradas defeituosas sejam recuperáveis através do processo tradicional de recozedura, sendo uma mais valia promover uma mudança de processo, caso esta nova tecnologia seja mais eficaz do que o processo tradicional, ou seja, a taxa de recuperação tem de ser superior a 50%.
- É também aconselhável conseguir-se utilizar temperaturas menores do que aquelas que são utilizadas no processo tradicional (aproximadamente 1200 °C no patamar de temperatura máxima), já que assim são induzidas menos tensões de origem térmica nas peças e a probabilidade de recuperação tende a ser maior.
- Estima-se que este processo irá trazer uma maior rentabilidade económica se a sua implementação for realizada com sucesso e se os 3 pontos anteriormente citados se verificarem. O custo de recozedura por peça é de aproximadamente 10 euros e assim, este custo seria reduzido. Relativamente aos tempos de preparação estima-se que esta nova tecnologia necessita de aproximadamente do mesmo tempo dos processos tradicionais.

Para se conseguir implementar esta tecnologia é necessário que a recuperação seja considerada conforme e para isso é necessário fundir o vidro na superfície do defeito com um espalhamento homogêneo, apresente uma planeza maior quanto possível em relação à peça base, apresente uma cor igual ou bastante semelhante com a cor da peça base e que não seja possível distinguir a olho nu quer pelo escolhedor, quer pelo cliente final. À posterior e como salvaguarda de qualidade, deve-se utilizar o colorímetro para confirmar a similaridade entre a cor do padrão e a do defeito recuperado, e assim se averiguar se o desvio indicado pelo colorímetro em relação ao padrão de referência é menor do que 1. Caso seja menor que 1, a peça recuperada é considerada conforme neste processo de controlo qualidade.

Para realização do trabalho experimental são usados provetes e estes podem ser divididos em:

- **Azulejos cerâmicos** de cor branca, onde são induzidos poros com diâmetro entre 2 a 3 mm com auxílio de duas canetas de percussão (Figura 39). É de realçar que existe esta variação diametral visto que a indução dos mesmos é realizada de forma manual e que as dimensões dos provetes utilizados variam entre 150 x 150 mm, 150 x 75 mm e 90 x 90 mm (Figura 40).

- **Peças reais consideradas defeituosas** provenientes do chão de fábrica, em que são priorizadas as peças com poros, visto que este é o defeito com maior probabilidade de ocorrência. Os poros deste tipo de peças também têm um diâmetro de aproximadamente 2 a 3 mm.



Figura 39 – Realização dos poros



Figura 40 – Provette com poros induzidos

#### 4.1. Parâmetros de funcionamento

Após identificados os pressupostos fundamentais para se promover a mudança no processo tradicional de recuperação, identificam-se os parâmetros de funcionamento que o utilizador pode alterar diretamente:

- **Escala de funcionamento e potência de trabalho**

Aumentando a escala de funcionamento do laser, diminui-se a potência de trabalho pois, quanto maior a escala de funcionamento exigida pelo utilizador, maior o esforço que o laser tem de realizar e por consequência, menor a potência que consegue oferecer para realizar determinado ciclo térmico. Quando se diminui a escala de funcionamento, a potência de trabalho aumenta por sua vez.

Quando se diminui em demasia a potência de trabalho, conclui-se que existe ausência de fusão do vidro e que o mesmo permanece tal e qual como foi depositado no defeito. Este efeito demonstra que a potência não permitiu que o vidro atingisse a sua temperatura de fusão para começar a fundir.

Já quando se aumenta em demasia a potência de trabalho, conclui-se que se dá uma fusão excessiva do vidro, ao ponto do mesmo se mostrar sobreaquecido e com fraturas, depois de visualizado ao microscópio ótico. Neste caso, este efeito demonstra que a potência de trabalho fez com que se atingisse uma temperatura superior à temperatura de fusão do vidro e por consequência, se instalassem tensões térmicas bastante elevadas provenientes deste aquecimento.

- **Distância focal**

A distância focal representa a distância entre o cabeçote laser e o alvo. A partir de [48] sabe-se que a distância ótima se encontra nos 80 mm e com esta mesma distância sabe-se que o laser se encontra no ponto de melhor focagem e colimação, fazendo com que o feixe laser incida no alvo com máxima intensidade.

É importante realçar que apesar deste laser ser um laser de díodos que tem um perfil quadrado de intensidades, há sempre alguma heterogeneidade na distribuição de energia entre o centro e a periferia, sendo que o centro funde mais rapidamente do que as periferias já que a intensidade de energia é ligeiramente maior. Posto isto, ao aumentar-se a distância focal está-se a tentar aumentar o diâmetro do feixe laser com o intuito de se tentar uniformizar a distribuição da energia tanto no centro, bem como na periferia do defeito já que assim a energia é distribuída homoganeamente por toda a superfície.

Deste modo, várias distâncias focais são testadas ao longo de todo o trabalho experimental para se entender a influência e o comportamento da mesma, tendo sempre presente que o diâmetro do feixe laser deve ser o mais semelhante quanto possível com o diâmetro do defeito a recuperar.

- **Ciclo térmico**

O ciclo térmico permite controlar os aquecimentos e arrefecimentos que se pretendem realizar no retoque. Este protótipo permite realizar ciclos térmicos com um número de patamares ilimitados, tendo apenas de se definir os valores de temperatura de cada um dos patamares e o tempo de subida ou descida até esse mesmo patamar. Como se controlam as variáveis tempo e temperatura consegue-se definir o gradiente térmico de cada ciclo, podendo este facto ser importante para uma análise mais pormenorizada.

Apesar da potência de trabalho ter um papel preponderante na fusão ou não do vidro, as condições de temperatura e tempo estabelecidas no ciclo térmico refletem-se também na presença ou não de fusão do vidro. Assim sendo e apesar da necessidade de escolha adequada da potência de trabalho, se o ciclo térmico definido não for adequado para as condições de trabalho em causa, não ocorrerá uma fusão consistente do vidro. Por estas mesmas razões, a definição de um ciclo térmico adequado e eficiente é de extrema importância.

Visto que este protótipo se trata de um equipamento único, feito à medida mediante determinados requisitos e que não possui nenhum tipo de dado experimental ou estatístico sobre o funcionamento do mesmo, torna-se muito importante ponderar bem todo o trabalho prático a ser realizado. Deste modo e numa primeira fase, optam-se por realizar ensaios preliminares para se entender a influência de cada parâmetro de funcionamento e numa segunda fase realizam-se ensaios de afinação que são considerados ensaios de “ajuste fino”.

## **4.2. Composição do vidro**

Além dos parâmetros de funcionamento que se podem alterar diretamente no laser, o estudo do material de retoque mais adequado a usar é considerado uma etapa fulcral pelo que diferentes materiais apresentam resultados distintos com o mesmo conjunto de parâmetros de. Deste modo, durante o trabalho experimental são utilizadas diferentes composições de vidros para analisar a

viabilidade dos resultados de cada uma, adicionando ou não aditivos nas mesmas, **realçam-se que as composições dos vidrados não são especificadas devido a direitos de confidencialidade.**

Foram utilizadas 6 composições de vidrados que são designadas de:

- **Composição A**, que é considerado o vidro de referência;
- **Composição B**, em que se altera o vidro em relação à composição A, vidro esse que é muito utilizado em chão de fábrica no processo dito normal de fabrico de uma peça;
- **Composição C**, em que se usa um novo vidro e justifica-se esta modificação devido a ser um vidro muito utilizado em chão de fábrica para promover a estética e durabilidade da peça fabricada;
- **Composição D**, em que se substitui o vidro por um com uma aparência mais branca e homogênea;
- **Composição E**, em que é adicionado um fundente ao vidro D;
- **Composição F**, em que é somente usado um fundente em detrimento de um vidro propriamente dito.

Os aditivos utilizados são essencialmente aglutinantes que servem para controlar a viscosidade do vidro, retardando a velocidade de secagem do mesmo e fazendo com que o mesmo impregne na peça mais facilmente. Este fenómeno acontece visto que estes aditivos são agentes tixotrópicos que fazem com que o vidro se torne menos viscoso quando aplicadas forças de corte (por exemplo, agitação mecânica) mas quando essas forças não são mais aplicadas, o vidro retorna gradualmente à sua viscosidade inicial. É de salientar que todos estes aditivos são misturados com o vidro e aplicados manualmente.

Os aditivos utilizados no decorrer do trabalho prático foram os seguintes:

- **CMC**, Carboximetilcelulose, é um aglutinante que é adicionado em cru ao vidro no chão de fábrica e devido a este facto, escolhe-se este aditivo para avaliar a viabilidade do mesmo.
- **Álcool polivinílico**, funciona essencialmente como um aglutinante também e foi escolhido seguindo a recomendação de [51].
- **Decalfix<sup>®</sup>**, funciona como aglutinante, tem uma consistência de cola e o surgimento deste aditivo provém do decalque do logótipo da empresa nas peças fabricadas.
- **Massa de enchimento**, não é um aglutinante, mas serve para preencher o defeito em profundidade e assim, a espessura da camada de vidro depositada no defeito torna-se menor.

### 4.3. Ensaios preliminares

O principal objetivo destes ensaios é entender a influência tanto quanto melhor de cada um dos parâmetros de funcionamento do laser que o utilizador pode modificar, avaliando o resultado obtido em cada dos provetes. Visto que este protótipo é um equipamento único, estes tipos de ensaios servem essencialmente para orientar o trabalho prático a desenvolver, afinando determinadas estratégias de execução.

Estes ensaios são ainda mais justificados após se perceber inicialmente que o pirômetro não se encontrava posicionado corretamente no protótipo já que as especificações técnicas do mesmo aconselham que ele esteja a uma distância de 100 mm do alvo (Anexo 2). Contudo, pela construção do protótipo só é possível colocar o pirômetro a pelo menos 150 mm do alvo. Assim sendo e até se ajustar corretamente a distância do pirômetro ao alvo, todos os ensaios realizados são considerados preliminares já que não é possível ter uma leitura fidedigna da temperatura durante todo o processo e por consequência, o controlador PID obriga o laser a operar com um esforço de 100%, já que o mesmo apresenta leituras muito desfasadas entre o valor medido e o valor teórico de cada patamar de temperatura.

É importante referir que estes ensaios são constituídos por **25 provetes** (150 x 150 mm, 150 x 75 mm) e vista a importância da escolha da composição do vidro, **agrupam-se os vários ensaios realizados por tipo de composição de vidro**, tanto na primeira fase (ensaios preliminares) como na segunda fase de ensaios (ensaios de afinação).

### 4.3.1. Interação laser no provete base

Antes de se introduzir o uso de qualquer tipo de vidro, é importante perceber como varia a interação laser somente com a superfície do provete e analisar se o feixe causa algum tipo de efeito na sua superfície, variando os parâmetros de funcionamento.

Esta primeira abordagem é composta pelos 4 primeiros provetes.

- **Estratégia de execução** (Tabela 2)

Tabela 2 – Estratégia de execução (1-4)

Provete nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Tempo total (s)	Distância focal (mm)
1	N.A.	200 a 215	27	60
2		215	27 a 31	80
3		215 a 235	31 a 35	118
4		235	36	118

Ao longo destes ensaios foi-se aumentando a **escala de funcionamento** para se diminuir a **potência** e aumentando a **distância focal** já que é notório a quantidade excessiva de energia que está a ser depositada no provete. O **tempo total de ciclo** foi sendo também aumentando por consequência, para contrabalançar a diminuição da **potência** e o aumento da **distância focal**, e assim se entender a influência do mesmo.

- **Análise de resultados** (Tabela 3)

Tabela 3 - Análise de resultados (1-4)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
1	Perfuração localizada	Cor transparente (Figura 41)	Pequena auréola à volta	N.A.
2	Fusão excessiva, especialmente no centro (Figura 41)		Formação de pequenos resíduos provenientes do provete base	
3			Sem qualquer resíduo (Figura 41)	
4				



Figura 41 – Provete 3 (microscópio – 3x)

Após realizados todos os ensaios dos provetes 1 a 4, as principais conclusões são:

1. Apesar da recomendação da distância focal ser de 80 mm [48], confirma-se que uma distância focal menor que esse valor de referência não traz qualquer valor acrescido para o processo pois, o laser provoca perfurações localizadas no provete (Figura 42), ao invés de fusões localizadas (**Provete 1**);
2. Os bordos de cada provete devem ser evitados para a realização de ensaios, já que os bordos do provete não são tão uniformes em termos de espessura como o seu centro (Figura 43). Este facto foi confirmado depois de se obter resultados com aparências distintas com a mesma combinação de parâmetros utilizados (**Provete 2**);
3. Os ensaios realizados no centro do provete mostram que os resultados obtidos apresentam uma boa repetibilidade (**Provete 3**);

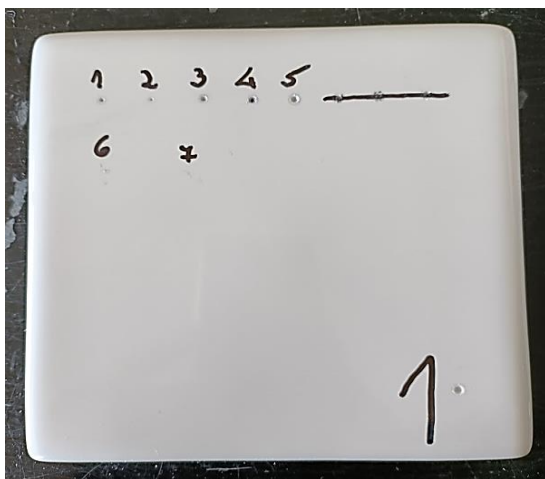


Figura 42 – Provete 1



Figura 43 – Provete 2

#### 4.3.2. Composição A (sem qualquer aditivo)

A partir do **provete 5** são executados ensaios com retoque realizado em cima do defeito, defeitos esses que são poros induzidos manualmente com uma caneta de percussão e um diâmetro entre 2 a 3 mm.

Nesta primeira análise com retoque, utiliza-se a **composição A** que é muito utilizada em chão de fábrica e sem qualquer tipo de aditivo.

- **Estratégia de execução** (Tabela 4)

Tabela 4 - Estratégia de execução (5)

Provete nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Tempo total (s)	Distância focal (mm)
5	Composição A	218	20 a 30	135

Uso de uma **escala de funcionamento** intermédia às usadas do provete 1 a 4 e aumento da **distância focal** para que o diâmetro da mira laser seja maior que o diâmetro do poro.

- **Análise de resultados** (Tabela 5)

Tabela 5 – Análise de resultados (5)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
5	Fusão incompleta (Figura 44)	Cor esbranquiçada, aparência muito heterogênea do centro à periferia e vidro muito quebradiço (Figura 44)	Auréola e resíduos de vidro não fundido à volta (Figura 44)	Côncavo

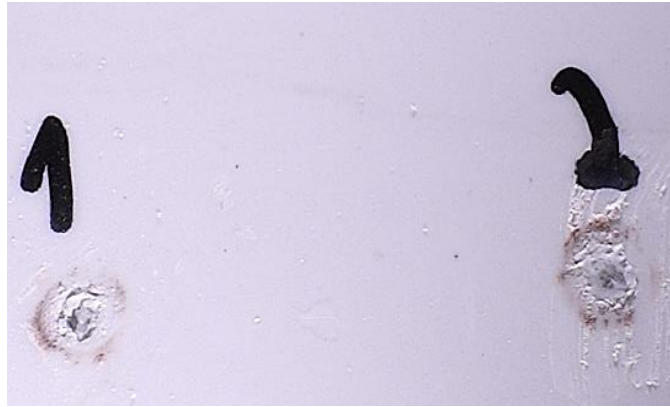


Figura 44 – Provet 5 (microscópio – 5x)

As principais conclusões retiradas após os ensaios do provete 5:

- Neste provete aumenta-se a **distância focal** para se começar a entender quais os limites viáveis de trabalho deste parâmetro. Deste modo, conclui-se que uma distância tão elevada como 135 mm pode provocar uma auréola à volta do defeito que corresponde aproximadamente ao diâmetro do feixe laser, diâmetro esse que é superior ao diâmetro do defeito. É importante salientar que este tipo de auréola não é passível de eliminação mesmo com um pós-tratamento com lixa própria para materiais cerâmicos;
- A composição A não é uma escolha adequada devido à aparência muito heterogênea dos defeitos e principalmente devido ao vidroado ficar quebradiço, ao ponto de sair ao se limpar o provete (Figura 45).



Figura 45 – Provet 5

### 4.3.3. Composição B com CMC

Devido à inviabilidade da composição A, passa-se a utilizar uma nova composição, **composição B**, juntamente com **CMC** (Carboximetilcelulose). Com esta nova combinação, **vidrado B com CMC**, testam-se os provetes 6 ao 11.

- **Estratégia de execução** (Tabela 6)

Tabela 6 – Estratégia de execução (6-11)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
6	Fusão excessiva	Cor transparente e com algumas bolhas de ar	Resíduos de vidro não fundido nos bordos	Côncavo
7	Fusão menos excessiva em comparação com 6	Cor já menos transparente no centro	Resíduos de vidro não fundido nos bordos e um pouco de auréola	Convexo
8	Fusão excessiva	Cor transparente e com algumas bolhas de ar	Sem resíduos	Convexo
9	Boa e homogênea fusão	Cor esbranquiçada e homogênea	Sem resíduos	Convexo e com relevo considerável
10	Boa fusão principalmente no centro (Figura 46)	Cor branca e homogênea (Figura 46)	Sem resíduos (Figura 46)	Côncavo
11	Boa e homogênea fusão (Figura 47)	Cor branca e homogênea (Figura 47)	Resíduos mínimos de vidro nos bordos não fundidos (Figura 47)	Menos côncavo que os anteriores

Primeiramente é feita uma análise comparativa entre as **distâncias focais** que apresentaram uma maior potencialidade até ao momento (118 mm e 135 mm) com os mesmos **tempos de ciclo** para entender melhor a influência da **distância focal** com esses mesmos tempos.

Vista a auréola verificada no provete 5 com uma **distância focal** de 135 mm, nos provetes 10 e 11 é usada apenas uma **distância focal** de 118 mm com diferentes variações na escala de funcionamento e no tempo total de ciclo com o objetivo de se obter uma maior amostra de resultados provenientes de parâmetros diferentes e assim, se orientar melhor as escolhas futuras referentes a estes parâmetros.

- **Análise de resultados** (Tabela 7)

Tabela 7 – Análise de resultados (6-11)

Provete nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Tempo total (s)	Distância focal (mm)
6	Composição B + CMC	218	10 a 30	118
7			10 a 30	135
8			15	118
9			15	135
10		225	20 a 45	118
11		225 a 215	40	118



Figura 46 – Provete 10  
(microscópio – 7x)



Figura 47 – Provete 11  
(microscópio – 5x)

Após realizados todos os ensaios dos provetes 6 a 11, as principais conclusões são:

1. É possível fundir o vidro com sucesso e de maneira até excessiva (Figura 48) tendo a necessidade de se proceder a mais ensaios para se adequar os resultados obtidos (**Provete 6 e 7**);
2. O controlo do aquecimento no defeito é fulcral devido ao laser incidir com maior energia no centro e assim, haver diferentes gradientes de temperatura entre o centro e a periferia. Apesar deste tipo de laser possuir um perfil quadrado de intensidades em detrimento de um perfil Gaussiano, que é um perfil que denota bastante mais esta heterogeneidade, a intensidade de energia que incide no centro do defeito acaba por ser sempre maior do que nas periferias e é então provocado este efeito (**Provete 8**);
3. Além de ser possível fundir completamente o vidro, é possível fundir o mesmo com uma cor branca (Figura 49). Apesar da cor não se encontrar perfeita, entende-se que este vidro tem potencial para ser mais bem afinado e se conseguir obter uma fusão mais homogénea e com melhor aparência (**Provete 9, 10 e 11**).

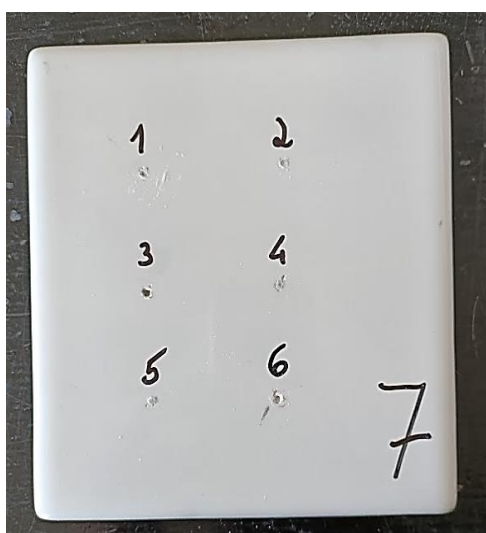


Figura 48 – Provete 7

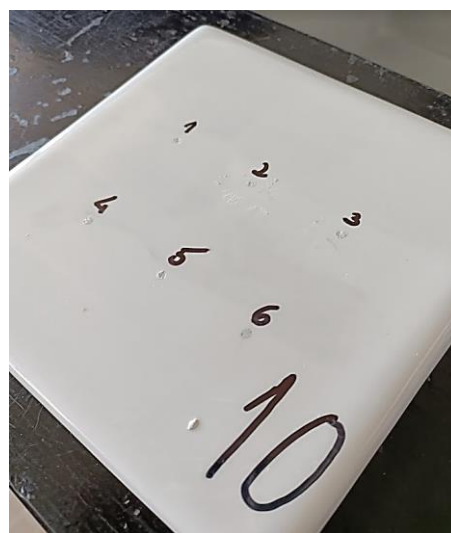


Figura 49 – Provete 10

#### 4.3.4. Composição C com CMC

Apesar do potencial apresentado pela **composição B**, torna-se necessário ensaiar outras composições de vidrados para se ter uma amostra suficiente para se proceder a uma escolha consistente. Assim sendo, utiliza-se uma nova **composição C**, que é usada durante o ciclo de fabrico de peças cerâmicas, juntamente com CMC.

Esta nova combinação, **composição C com CMC**, é compreendida entre os provetes 12 a 20, onde são testados provetes com poros induzidos (provetes 12 e 13), bem como poros reais com cerca de 2 a 3 mm provenientes de peças consideradas defeituosas em chão de fábrica, mais concretamente, manípulos de tanques de autoclismos. (provetes 14 a 19).

- **Estratégia de execução** (Tabela 8)

Tabela 8 – Estratégia de execução (12-20)

Provete nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Tempo total (s)	Distância focal (mm)
12	Composição C + CMC	215 a 200	40	118
13		200	40 a 35	
14			40	135
15			35	
16			30	
17			15	
18				
19			40 a 15	
20				118

Vista a alteração do vidrado, usa-se novamente uma estratégia de execução semelhante ao realizado nos provetes 6 a 11, em que se realiza principalmente um confronto direto entre as **distâncias focais** de 118 e 135 mm variando o **tempo total de ciclo**. O ponto de partida desta análise é o provete 12 em que se replica a estratégia de execução do provete 11 com uma **escala de funcionamento** de 215%, **tempo total de ciclo** de 40 segundos e uma **distância focal** de 118 mm.

Nesta estratégia de execução, os **tempos de ciclo** são diminuídos devido aos resultados obtidos apresentarem fusões excessivas, diminuindo-se assim o tempo de incidência para adequar o resultado da fusão.

- **Análise de resultados** (Tabela 9)

Tabela 9 – Análise de resultados (12-20)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
12	Fusão excessiva mas incompleta	Cor esbranquiçada mas heterogénea ao longo do retoque	Resíduos de vidro não fundido nos bordos e pequena auréola	Côncavo
13				
14	Fusão excessiva (Figura 50)	Cor transparente e com muitas bolhas de ar (Figura 50)	Sem resíduos (Figura 50)	Convexo
15	Fusão excessiva acompanhada com fratura	N.A.	N.A.	N.A.
16	Boa fusão	Cor branca mas retoque com um pouco de relevo	Sem resíduos	Convexo
17				
18	Fusão excessiva	Cor transparente e com algumas bolhas de ar		Plano
19	Boa fusão	Cor branca		
20	Fusão excessiva	Cor transparente e fissuras radiais aparentes	Cor transparente e com algumas bolhas de ar	Côncavo



Figura 50 – Provete 14 (microscópio – 10x)

Após realizados todos os ensaios dos provetes 12 a 20, as principais conclusões são:

1. A utilização desta nova composição mostra-se como uma solução bastante viável e satisfatória quando comparada com as composições A e B devido a se conseguir obter superfícies com muito boa aparência após fusão. Este facto é evidenciado pela cor mais branca que estes retoques apresentam e pela maior uniformização do mesmo em toda a sua superfície (**Provetes 12, 13, 16, 17 e 19**);
2. Uma fusão bem-sucedida em superfícies curvas, mais especificamente, nos bordos do provete (Figura 52 e Figura 51) e com uma aparência final bastante sólida (**Provetes 14, 16 e 18**);



Figura 52 – Provete 16



Figura 51 - Provete 18

#### 4.3.5. Composição D com CMC

Sempre com o objetivo de melhorar a aparência final do retoque, tanto ao nível da cor, uniformidade e relevo, testa-se uma nova composição para ver se esta apresenta melhores que resultados que os anteriormente identificados.

Para um retoque ser considerado conforme, é necessário que o mesmo funda completamente do centro para a periferia e mostre total homogeneidade (1º critério), apresente uma cor branca e sem resíduos (2º critério), bem como se adapte à geometria do defeito, tapando-o completamente com ausência de relevo (3º critério). Assim sendo e para se simplificar o processo, nos **provetes 21 e 22** apenas se avalia a qualidade da fusão (1º critério) e a aparência do retoque (2º critério), descartando-se assim a adaptabilidade do mesmo ao defeito (3º critério). Para isto, deposita-se o vidrado somente na superfície base do provete, sem ser no interior do defeito.

Já os **provetes 23 a 25** seguem a mesma estratégia dos provetes anteriores, em que se deposita o vidrado no interior do defeito e se tenta retocar os defeitos aliando estes 3 critérios.

- **Estratégia de execução** (Tabela 10)

Tabela 10 - Estratégia de execução (21-25)

Provete nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Tempo total (s)	Distância focal (mm)
21	Composição D + CMC	200 a 350	18 a 35	118
22		350 a 280	33 a 35	
23		280 a 200	33 a 18	
24		280 a 350	33 a 35	
25		160		128

Nesta estratégia de execução, aumenta-se bastante a **escala de funcionamento** para se tentar uniformizar a fusão entre o núcleo e a periferia, bem como se entender a partir de que valor a fusão deixa de ter viabilidade. Usa-se também outro valor de **distância focal** no provete 25 (128 mm) com

o objetivo de melhorar a aparência entre o núcleo e a periferia, analisando-se assim a sua viabilidade.

- **Análise de resultados** (Tabela 11)

Tabela 11 – Análise de resultados (21-25)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
21	Fusão incompleta	Cor branca mas aparência muito heterogênea	Resíduos de vidro não fundido nos bordos e grande auréola	N.A.
22	Fusão completa	Cor branca	Sem resíduos	
23	Fusão excessiva	Cor transparente	Pequena auréola	Côncavo
24	Fusão incompleta	Cor esbranquiçada mas aparência muito heterogênea	Resíduos de vidro não fundido nos bordos e grande auréola	
25	Fusão completa (Figura 53)	Cor esbranquiçada (Figura 53)	Um pouco de resíduos de vidro não fundido nos bordos (Figura 53)	

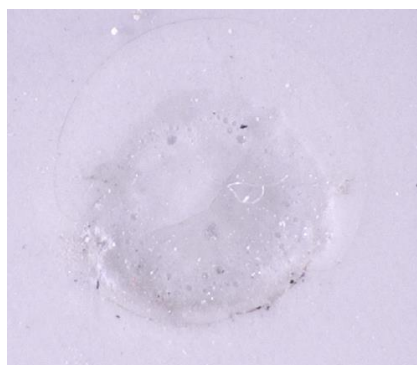


Figura 53 – Provete 25 (microscópio – 12x)

Após realizados os ensaios dos provetes 21 a 25, as principais conclusões são:

1. Vista a dificuldade de uniformização da fusão nos bordos ao contrário do que acontece no centro, aumenta-se a escala de funcionamento e por consequência diminui-se a potência. Deste modo, tenta-se homogeneizar a fusão no vidro em toda a sua superfície e minimizar a indução de tensões térmicas no mesmo pois, na maior destes ensaios está-se a dar o abatimento da camada central fundida. Contudo esta estratégia de execução não se mostrou a mais adequada já que os resultados se mostraram muito dispersos e sem qualquer repetibilidade, bem como se conclui que para se uniformizar o centro com a periferia, a estratégia deve passar pelo ajuste da distância focal e não pela escala de funcionamento.
2. Com esta estratégia é analisado também o limite máximo da escala de funcionamento que ainda possibilita a obtenção de um retoque com fusão completa. Deste modo, é concluído que uma escala de funcionamento igual ou superior a 350% não é viável (Figura 54 e Figura 55) para se atingir os resultados pretendidos (**Provetes 21 e 24**);

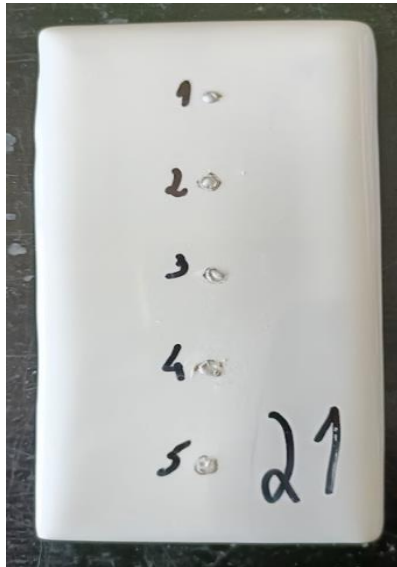


Figura 54 – Provete 21

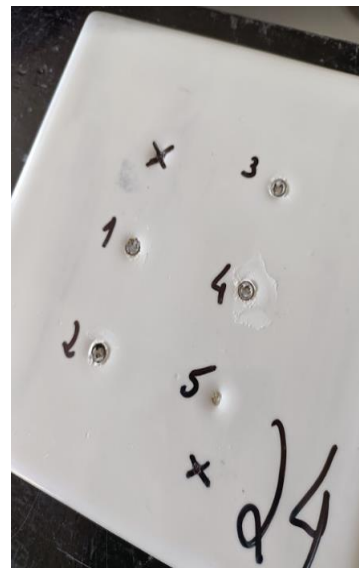


Figura 55 – Provete 24

#### 4.4. Ensaios de afinação

Após conclusão dos ensaios preliminares e respetiva reconstrução da peça onde encaixa o pirómetro para o mesmo estar posicionado a 100 mm do alvo como determinam as suas especificações e realizar leituras fidedignas, são realizados novos ensaios que têm fundamentalmente um carácter de afinação dos ensaios preliminares previamente realizados.

Com o pirómetro corretamente posicionado no protótipo, já se pode dar a devida importância a cada um dos ciclos térmicos definidos pois, até ao momento só era possível definir com exatidão o tempo total de ciclo. Assim sendo, utilizam-se vários ciclos térmicos (Figura 56) com a definição dos respetivos patamares de temperatura ( $T_x$ ), a duração de cada um deles ( $t_2$ ) e o tempo necessário para se atingir esse mesmo patamar de temperatura ( $t_1$ ), com o intuito de realizar a otimização dos mesmos tanto quanto possível para se obter eficácia no resultado final com a menor temperatura, aliada aos restantes parâmetros de funcionamento do laser.

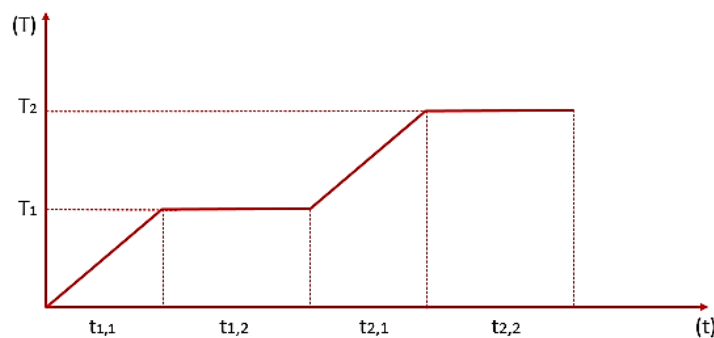


Figura 56 – Exemplo de um ciclo térmico

É de realçar que também é incorporado um batente (Figura 57) no protótipo para se conseguir fixar a distância focal independentemente da espessura ou altura da peça a recuperar e deste modo, é evitada a utilização de equipamentos de medição auxiliar, como o paquímetro para definir esta distância.

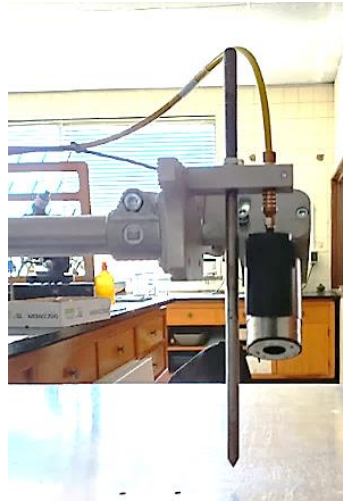


Figura 57 – Batente

Nestes ensaios utilizam-se somente **azulejos cerâmicos como provetes**, onde são induzidos poros através de uma caneta de percussão, com 2 a 3 mm de diâmetro (Figura 58). Estes ensaios são compostos por 22 provetes.

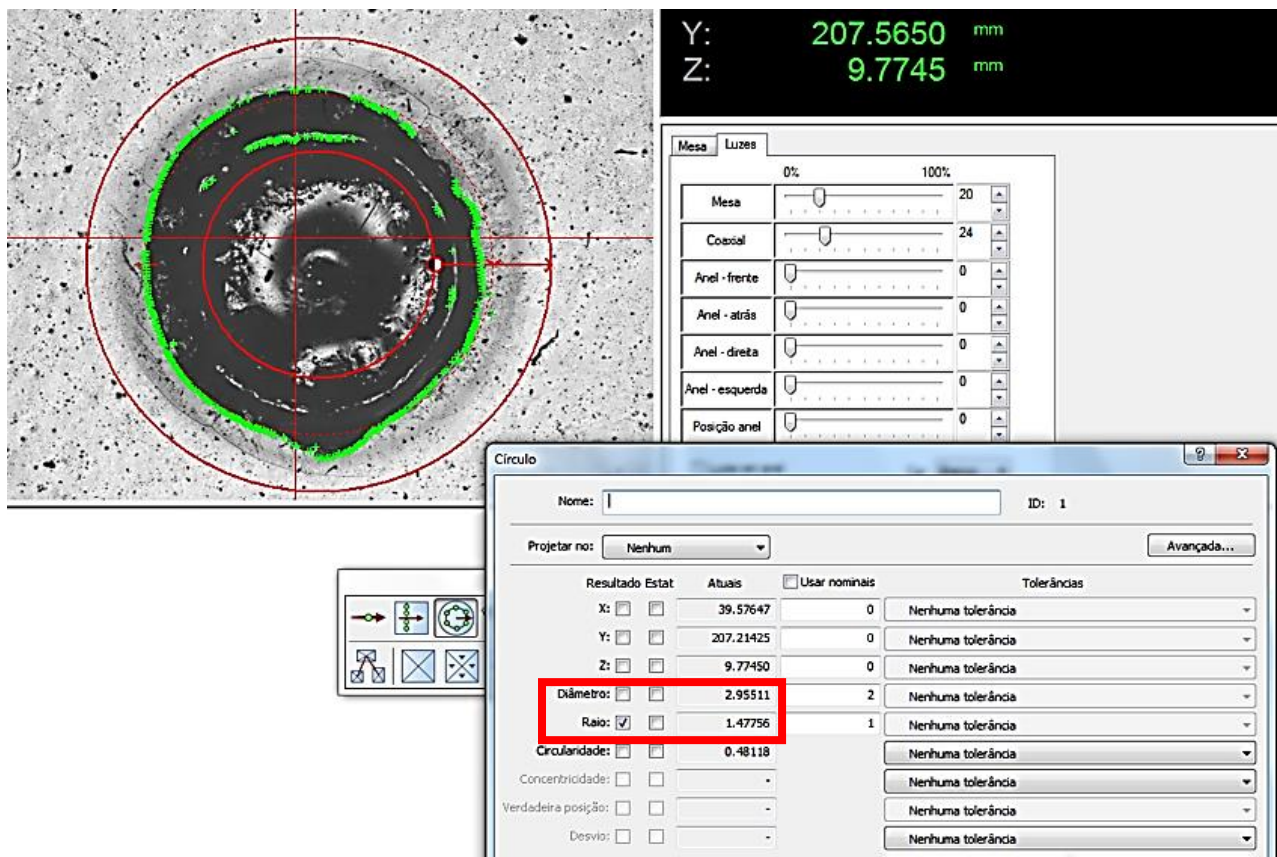


Figura 58 - Medição de um poro sem retoque com uma máquina 3D sem contacto

Zeiss 3D UPMC Ultra

#### 4.4.1. Composição D com álcool polivinílico

Com o objetivo de se tentar eliminar a auréola que fica retida à volta do retoque, o aglutinante é alterado para um álcool polivinílico seguindo a recomendação de [51].

- **Estratégia de execução** (Tabela 12)

Tabela 12 – Estratégia de execução (26-28)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
26	Fusão excessiva mas incompleta ao longo do poro (Figura 59)	Aparência heterogénea mas cor branca (Figura 59)	Resíduos de vidro não fundido nos bordos (Figura 59)	Formação de uma pequena superfície esférica no poro
27				
28				

Visto o resultado bastante sólido que o provete 25 apresentou (Figura 53), nestes novos ensaios usa-se a mesma **distância focal** de 128 mm. A **escala de funcionamento** mantém-se em quase todos os ensaios a 170% já que se realizaram previamente alguns ensaios a branco com esta nova composição para se perceber a partir de que valor já se consegue provocar fusão no retoque.

Os **ciclos térmicos** escolhidos têm por base o que se pratica no chão de fábrica em que a temperatura máxima do forno ronda os 1200 °C e o número de patamares serve para homogeneizar o aquecimento, evitando choque térmicos bruscos, o que por sua vez induz menos tensões térmicas na peça.

- **Análise de resultados** (Tabela 13)

Tabela 13 – Análise de resultados (26-28)

Provete nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Distância focal (mm)	Ciclo térmico		
				Nº de patamares	Tempo de ciclo (s)	Temperatura de ciclo (°C)
26	Composição D + álcool polivinílico	170	128	2	36	600 a 1200
27		170 a 200	128	2 e 3	36	800 a 1200 e 800 a 1100
28		170	128	3	36	800 a 1200

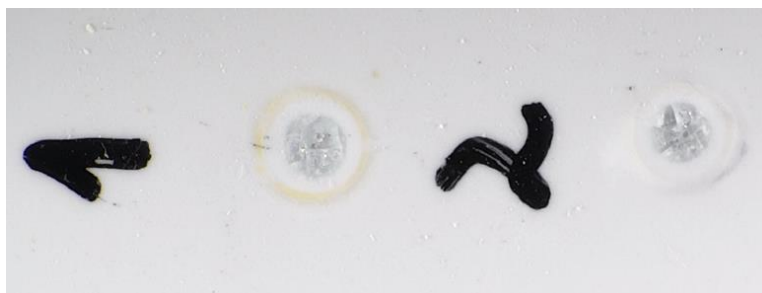


Figura 59 – Provete 26 (microscópio – 7x)

Após realizados os ensaios dos provetes 26 ao 28, as principais conclusões são:

- O álcool polivinílico não é uma opção que apresenta viabilidade devido a ter uma reação de polimerização muito rápida, o que faz com que não seja eficiente o seu uso pois, por cada aplicação realizada é necessário refazer sempre novamente a mistura já que a viscosidade da mesma diminui muito em breves segundos;
- Nenhum dos provetes ensaiados apresentou resultados dignos de se explorar mais esta composição com este novo aglutinante, já que em todos o retoque tem tendência a fugir para um dos lados (Figura 60) e formar uma pequena superfície esférica. Deste modo, não há recobrimento de toda a superfície do poro.



Figura 60 – Provede 28

#### 4.4.2. Composição D com decalfix®

Vista a inviabilidade do álcool polivinílico e tendo-se sempre o objetivo de melhorar a aparência final do retoque realizado, utiliza-se decalfix® que é uma espécie de cola e normalmente é usada no decalque do logótipo da empresa nas peças fabricadas.

- **Estratégia de execução** (Tabela 14)

Tabela 14 – Estratégia de execução (29)

Provede nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Distância focal (mm)	Ciclo térmico		
				Nº de patamares	Tempo de ciclo (s)	Temperatura de ciclo (°C)
29	Composição D + decalfix®	170 a 140	128	2	36	800 a 1200, 800 a 1000, 800 a 900 e 600 a 900

A **temperatura máxima do ciclo térmico** foi sendo diminuída visto um dos objetivos principais desta dissertação, que é a tentativa de recuperação a uma temperatura menor do que aquela que é utilizada no ciclo térmico tradicional (1200 °C). Assim sendo, foi se ajustando a **escala de**

**funcionamento** para se chegar a um compromisso entre a **temperatura máxima** e a **potência de trabalho** de modo a se conseguir realizar a fusão do retoque.

É importante também referir que numa primeira abordagem com uma **escala de funcionamento** de 170% não se consegue realizar qualquer fusão no retoque então, este facto impulsiona o aumento da potência de trabalho.

- **Análise de resultados** (Tabela 15)

Tabela 15 – Análise de resultados (29)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
29	Fusão excessiva (Figura 61)	Cor esbranquiçada (Figura 61)	Um pouco de resíduos de vidro não fundido nos bordos em alguns poros (Figura 61)	Muito irregular, desde côncavos a convexos

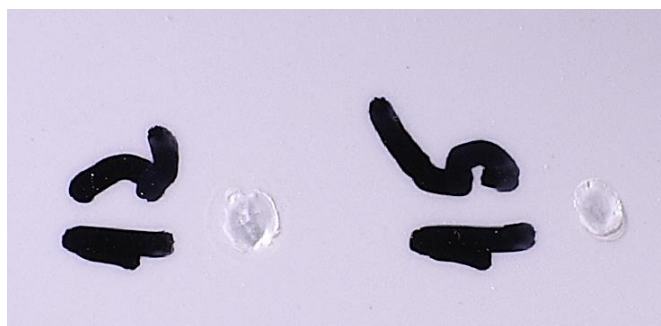


Figura 61 – Provete 29 (microscópio – 5x)

Com o provete 29 pode-se concluir que fundamentalmente:

- Após realizado um ensaio a branco, constata-se que este aglutinante obriga a aumentar-se a potência de trabalho, caso contrário não há sequer fusão do retoque;
- Testam-se várias temperaturas máximas de trabalho para se começar a entender se é possível obter uma boa fusão sem ter de submeter o retoque a uma temperatura tão elevada como 1200 °C;
- Este aglutinante apresenta um retoque com uma aparência mais homogénea e limpa, bem como com ausência de auréola. Contudo constata-se que existe falta de repetibilidade dos resultados ao longo dos ensaios realizados já que com os mesmos parâmetros de funcionamento é raro se conseguir replicar um resultado (Figura 62).



Figura 62 – Provete 29

#### 4.4.3. Composição E com decalfix® (adição de um fundente)

Para a o retoque ser de mais fácil execução adiciona-se um fundente ao mesmo para se diminuir a sua viscosidade e tensão superficial do vidro. Este fundente também ajuda a baixar a temperatura máxima do processo.

- **Estratégia de execução** (Tabela 16)

Tabela 16 – Estratégia de execução (30-32)

Provete nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Distância focal (mm)	Ciclo térmico		
				Nº de patamares	Tempo de ciclo (s)	Temperatura de ciclo (°C)
30	Composição E + decalfix®	170	128	2	25	600 a 900 e 600 a 700
31		160			25	600 a 720 e 600 a 700
32	Composição E + decalfix® + Massa de enchimento	170			25 a 32	600 a 700

Neste caso, iniciam-se os testes com um ensaio a branco com o último **ciclo térmico** realizado no provete 29 e a **escala inicial** usada no mesmo de 170%, e logo se conclui que a **potência de trabalho** se encontra excessiva. Assim sendo, opta-se por diminuir a temperatura máxima do **ciclo térmico** já que esta **escala de funcionamento** está a originar uma fusão minimamente uniforme.

É importante referir que no provete 32 usa-se uma massa de enchimento com o intuito de preencher o poro em profundidade e a fusão do retoque ser mais facilitada, visto que assim o retoque é apenas uma fina camada superficial que provavelmente irá fundir mais facilmente por não ter de fundir em profundidade. Realça-se também que no provete 32 regula-se apenas o **tempo de ciclo** para analisar a possibilidade de afinamento da cor do retoque.

- **Análise de resultados** (Tabela 17)

Tabela 17 - Análise de resultados (30-32)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
30	Fusão incompleta (Figura 63)	Cor branca mas muito heterogénea do centro para a periferia (Figura 63)	Resíduos de vidro não fundido nos bordos (Figura 63)	Alguns convexos e outros côncavos, falta de repetibilidade
31				
32				



Figura 63 – Provete 32 (microscópio – 12x)

Com esta combinação de ensaios pode-se concluir que:

- Na aplicação do retoque, o consegue ajudar a baixar a temperatura máxima do ciclo térmico pois, a temperatura máxima é reduzida de 1200 °C para 700 °C. Perante estes argumentos a utilização do fundente poderá ser benéfica;
- Contudo nestes 3 provetes é constatado que não houve repetibilidade nos resultados obtidos, todos os resultados mostraram-se muito dispersos apesar do uso dos mesmos parâmetros de funcionamento de uns para os outros (Figura 64). Assim sendo, resta entender se este facto é causado pelo fundente ou não, sendo necessários mais ensaios para se retirar conclusões sólidas.



Figura 64 – Provetes 30

#### 4.4.4. Composição F com decalfix® e/ou massa de enchimento

Nesta nova composição testa-se somente o fundente, em vez do fundente juntamente com um vidrado. Neste novo conjunto de ensaios, o fundente é aditivado com decalfix®, podendo ainda ser acrescentada massa de enchimento em profundidade no poro. Deste modo, consegue-se analisar o fundente em várias situações e entender se o uso do mesmo apresenta realmente viabilidade.

- **Estratégia de execução** (Tabela 18)

Tabela 18 – Estratégia de execução (33-37)

Provetes nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Distância focal (mm)	Ciclo térmico		
				Nº de patamares	Tempo de ciclo (s)	Temperatura de ciclo (°C)
33	Composição F + decalfix® + massa de enchimento	170	128	2	20 a 28	600 a 700
34		190 a 155		2	20 a 25	600 a 700 e 600 a 650
35		155 a 195		2 e 3	20 a 30	600 a 650 e 200 a 650
36		155 a 185		3	20 a 45	200 a 650
37		170 a 200		3	30 a 40	

Estes testes experimentais são iniciados com referência no provete 32, usando uma **escala de funcionamento** de 170%, um **ciclo térmico** com 2 patamares e **temperaturas** entre os 600 e 700 °C. Contudo logo de imediato é constatado que a repetibilidade dos resultados tende a piorar então, foi-se prolongando o tempo de ciclo com o intuito de melhorar a repetibilidade dos mesmos.

A partir daqui (provetes 34 a 37) foram-se realizando ensaios em branco antes de se começarem os ensaios propriamente ditos para analisar a **escala de funcionamento** e **tempo de ciclo** mais adequados a utilizar, contudo e em todos estes casos a repetibilidade de resultados obtida foi muito fraca, o que obriga a um uso de parâmetros muito aleatórios de uns provetes para os outros.

Resta então lembrar que sempre que se aumenta a **escala de funcionamento** é com o objetivo de se atenuar a fusão excessiva que foi obtida, quando se diminui a **escala** é com o objetivo de aumentar a potência de trabalho já que a fusão foi insuficiente ou incompleta, e quando se aumenta o **tempo de incidência** é com o intuito de se uniformizar a fusão do centro para a periferia.

- **Análise de resultados** (Tabela 19)

Tabela 19 - Análise de resultados (33-37)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
33	Alguns resultam numa fusão incompleta e outros numa fusão excessiva (Figura 65)	Aparência bastante heterogénea (Figura 65)	Resíduos de vidro não fundido nos bordos em alguns, outros com auréola e noutros sem qualquer tipo de resíduo (Figura 65)	Alguns convexos e outros côncavos, falta de repetibilidade (Figura 65)
34				
35				
36				
37				



Figura 65 – Provete 37 (microscópio – 7x)

Com este conjunto de provetes foi possível concluir que:

- Os resultados muito dispersos e a falta de repetibilidade dos mesmos (Figura 66 e Figura 67) é muito provavelmente originada pelo uso do decalfix<sup>®</sup> já que o mesmo contém uma percentagem de água considerável e assim, torna-se difícil controlar a viscosidade da mistura na aplicação do retoque. A única maneira para tornar o uso desta mistura viável é sempre que se aplicar o retoque tem de se realizar uma mistura nova, contudo este cenário não traz qualquer eficiência para o processo quando se transpõe o mesmo para o chão de fábrica;

- Apesar da utilização de aditivos trazer inúmeras vantagens, entende-se que a composição do vidrado deve ser o mais elementar quanto possível, ou seja, o mais adequado é usar somente o vidrado como material de retoque e não realizar uma mistura com mais do que um elemento pois, assim é expectável que se consiga obter repetibilidade entre os resultados.
- É também de realçar que apesar das mais valias que o fundente pode trazer, as composições que o englobam mostram-se com uma aparência insatisfatória, falta de repetibilidade dos resultados obtidos e a fusão nem sempre se apresenta coerente e consistente. Deste modo, considera-se que a composição E e F são inviáveis.

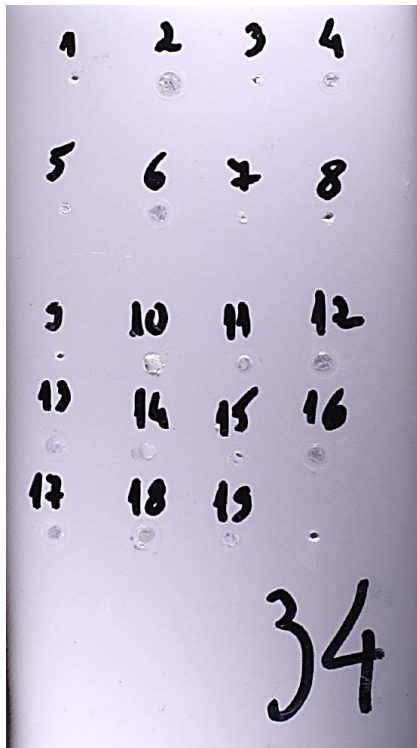


Figura 66 – Provete 34



Figura 67 – Provete 37

#### 4.4.5. Composição D

Vistas as conclusões dos provetes 30 a 37, volta-se à composição D para analisar a sua potencialidade e repetibilidade quando usada sozinha na realização do retoque, já que esta composição a par da composição C foram aquelas que apresentaram os resultados mais consistentes entre todos os ensaios realizados.

Como esta composição tem uma consistência de pó, a sua impregnação no poro torna-se difícil, recobrando-se então o mesmo com um pouco de CMC para a sua impregnação ser mais facilitada e eficiente. É importante realçar que não se mistura a CMC nesta composição, que se escolhe a CMC visto que a mesma contém uma percentagem de água bastante menor que o decalfix® e que a mesma é sempre adicionada aos vidrados tradicionais utilizados em chão de fábrica para controlar a sua viscosidade.

- **Estratégia de execução** (Tabela 20)

Tabela 20 – Estratégia de execução (38)

Provete nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Distância focal (mm)	Ciclo térmico		
				Nº de patamares	Tempo de ciclo (s)	Temperatura de ciclo (°C)
38	Composição D	170 a 130	128	3	35	200 a 650

Já que se utiliza o vidro D sem qualquer tipo de aditivo, entende-se que uma **escala de funcionamento** de 170% não é suficiente para provocar uma fusão completa. Deste modo, vai-se diminuindo a **escala de funcionamento** para a **potência de trabalho** aumentar por consequência e assim, se executar uma fusão completa.

Os valores do **ciclo térmico** e da **distância focal** mantêm-se à semelhança dos provetes anteriores já que os mesmos se estão a mostrar consistentes.

- **Análise de resultados** (Tabela 21)

Tabela 21 - Análise de resultados (38)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
38	Fusão quase completa ou excessiva (Figura 68)	Aparência um pouco inconsistente mas com uma cor esbranquiçada (Figura 68)	Ausência de resíduos mas aparecimento de uma leve auréola (Figura 68)	Alguns planos e outros côncavos (Figura 68)



Figura 68 – Provete 38 (microscópio – 8x)

Após a realização dos ensaios do provete 38 conclui-se que:

- O uso somente deste vidro não é adequado já que a repetibilidade apesar de não se apresentar tão fraca como nos provetes anteriores, ainda não demonstra um bom resultado (Figura 69). Posto isto, o uso apenas deste vidro não é considerado uma opção viável.



Figura 69 – Provette 38

#### 4.4.6. Composição C

Seguindo a metodologia identificada em 4.4.5, usa-se agora a somente a composição C, que também tem uma consistência de pó, com o objetivo de entender se esta consegue proporcionar resultados mais consistentes que os obtidos nos ensaios anteriores. Neste caso, usa-se a mesma estratégia de 4.4.5 em que se faz um recobrimento prévio do poro com CMC para uma melhor impregnação desta composição.

- **Estratégia de execução** (Tabela 22)

Tabela 22 – Estratégia de execução (39-43)

Provette nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Distância focal (mm)	Ciclo térmico			Número de passagens
				Nº de patamares	Tempo de ciclo (s)	Temperatura de ciclo (°C)	
39	Composição C	170 a 130	128	3 e 4	35 a 40	200 a 650, 200 a 750, 200 a 850 e 200 a 900	1
40		40 a 50					
41		130 a 140	138	4	50	200 a 850	1 e 2  Com escalas de funcionamento iguais quando são usadas duas passagens
42							
43		120 a 140					

Antes de se iniciar um provete com um retoque realizado apenas com esta composição procede-se a alguns ensaios em branco e constatam-se de imediato resultados bons e consistentes. Assim sendo, realizam-se várias regulações nos parâmetros de funcionamento do provete 39 que servem como orientação para os provetes posteriores.

Vai-se diminuindo a **escala de funcionamento** para se aumentar a **potência**, já que com 170% a fusão não estava a ocorrer adequadamente e percebe-se que um valor entre 130% a 140% é o valor mais adequado.

Aumenta-se também a **distância focal** em 10 mm e o **número de patamares** do ciclo térmico para 4 para uma melhor uniformização da aparência entre o núcleo e a periferia.

Através do provete 39 testam-se também vários **ciclos térmicos** pois, inicialmente é constatado que uma temperatura máxima de 650 °C não consegue promover uma fusão completa.

Devido aos resultados consistentes desta composição, testa-se uma nova estratégia que passa por se proceder a mais do que uma **passagem** com o laser com mais do que uma aplicação respetivamente com o intuito melhorar a geometria final do retoque, ou seja, torná-lo o mais plano quanto possível para que não seja notado nenhum relevo quando se toca no mesmo.

- **Análise de resultados** (Tabela 23)

Tabela 23 - Análise de resultados (39-43)

Provete nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque
39	Fusão quase completa ou completa (Figura 70 e Figura 71)	Aparência muito consistente e cor branca (Figura 70 e Figura 71)	Um pouco de resíduos de vidro não fundido nos bordos em apenas alguns ou ausência de qualquer resíduo (Figura 70 e Figura 71)	Côncavos (Figura 70)
40				
41				
42				Plano (Figura 71)
43				



Figura 70 – Provete 41 (microscópio – 10x)

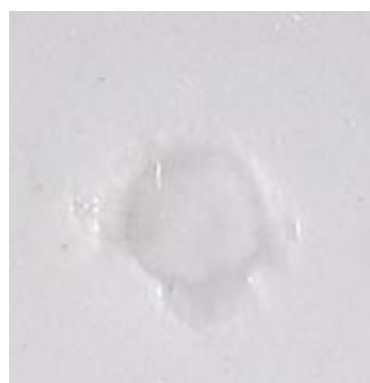


Figura 71 – Provete 43 (microscópio – 10x)

Após o término destes ensaios é possível concluir que:

- A utilização apenas desta combinação para a realização do retoque apresenta os melhores resultados quando comparada com todas as composições anteriormente usadas. Os resultados além de apresentarem uma aparência muito boa e homogénea, a fusão mostra-se completa na maior parte dos casos. É importante também referir que em nenhum destes

ensaios foi obtida uma auréola à volta do retoque, o que faria com que a recuperação fosse considerada não conforme (Figura 72 e Figura 73);

- Um facto muito importante que tem de ser realçado, é que em todos os ensaios feitos a repetibilidade mostra-se excelente já que não há dispersão dos resultados obtidos usando os mesmos parâmetros de funcionamento. Este facto é muito importante porque quando este processo for transposto para o chão de fábrica é essencial que a repetibilidade seja o mais elevada para que a taxa de recuperação seja também mais elevada do que a do processo tradicional de recuperação;
- Um número de passagens superiores a 1 mostra resultados bastante viáveis, contudo 3 passagens já é considerado um número abusivo porque pode levar à fratura do provete então, duas passagens são consideradas o número ideal. Esta estratégia tem o intuito de melhorar a planeza do retoque principalmente quando o mesmo se encontra côncavo pois, após a primeira passagem laser deixa-se o provete repousar, arrefecer e realiza-se outra aplicação de vidro. Deste modo, é dobrada a quantidade de vidro que é depositada no poro, aumentando a planeza do mesmo e eliminando algum possível relevo (Figura 73).

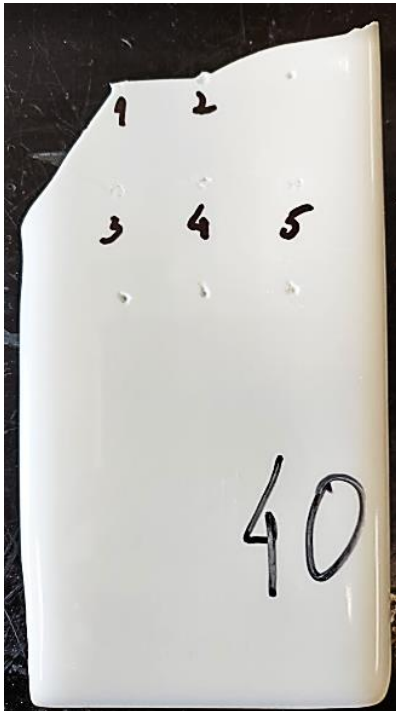


Figura 72 – Provete 40

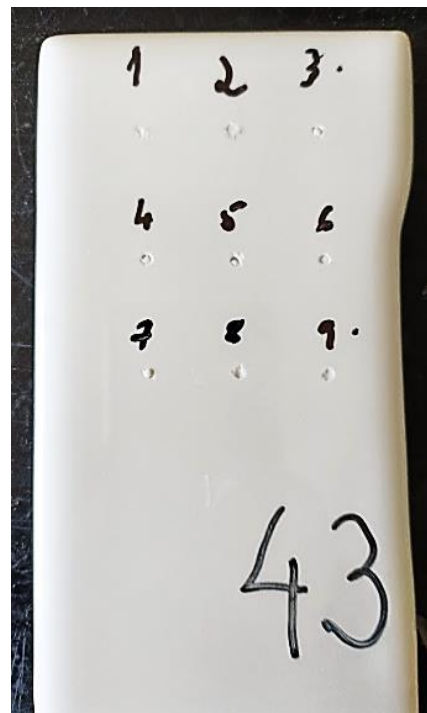
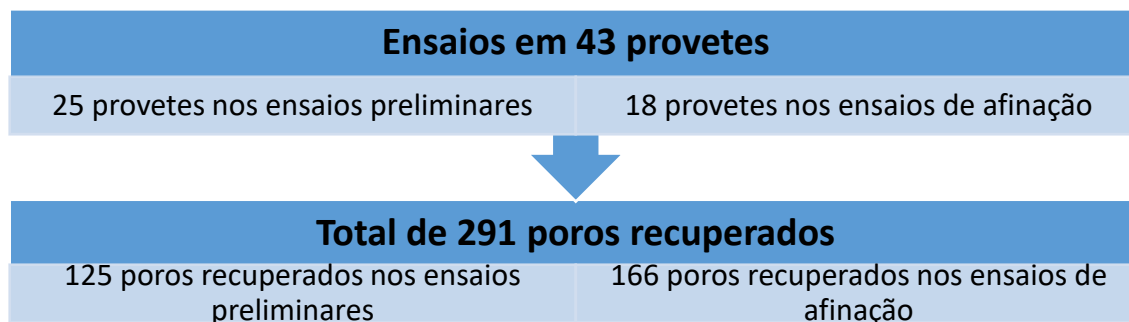


Figura 73 – Provete 43

#### 4.5. Comparação de resultados

Em suma, conclui-se que foram realizados:



Para um retoque ser considerado conforme este tem de cumprir os 3 critérios anteriormente citados, que são:

1. Fusão completa com homogeneidade entre o núcleo e a periferia;
2. Superfície sem qualquer resíduo e com uniformidade na cor entre o retoque e a peça base, neste caso só foram testadas peças/provetes brancos;
3. Superfície do retoque tem de ser tão plana quanto possível, ou seja, quando examinada ao toque não pode apresentar um relevo considerável.

Tendo por base estes critérios e analisando novamente todos os 43 provetes visualmente e ao microscópio, conclui-se claramente que o uso somente da composição C com um leve recobrimento do defeito com CMC é a opção mais viável para se obter conformidade na recuperação. Assim sendo, opta-se por se escolher os 3 melhores provetes em que foi utilizada esta composição e posteriormente as duas melhores recuperações de cada um deles para serem realizadas novamente com o objetivo de se avaliar a eficácia de cada recuperação e a repetibilidade dos resultados obtidos.

Os provetes realizados com esta composição “ideal” foram os provetes 39 ao 43 e excluindo o provete 39, que foi aquele em que se ajustou um maior número de parâmetros de funcionamento para se orientar os provetes seguintes, todos os outros são escolhas válidas. **Posto isto, escolhem-se os provetes 41, 42 e 43 para realizar esta última comparação** (Figura 74, Figura 75 e Figura 76).

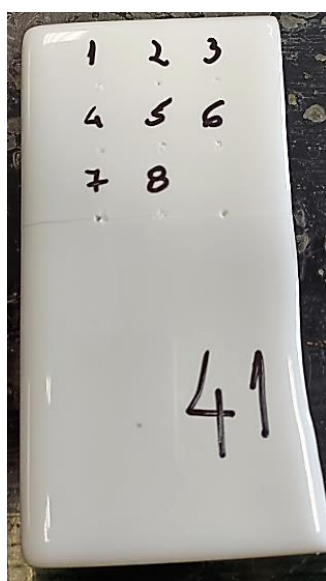


Figura 74 – Provetes 41

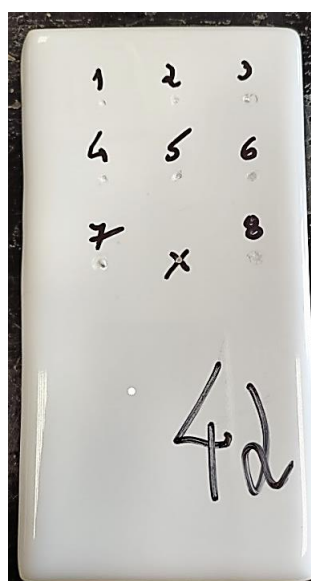


Figura 75 – Provetes 42

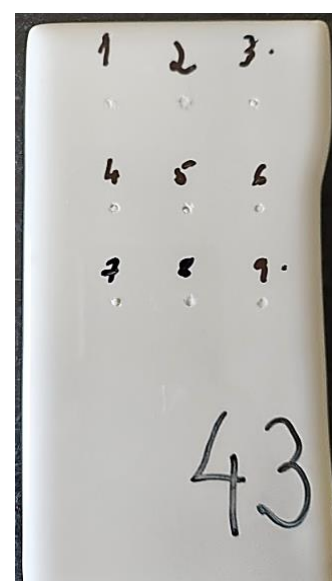


Figura 76 – Provetes 43

De acordo com a numeração de cada um destes 3 provetes escolhem-se as seguintes recuperações:

- Provete 41 – Recuperação 1 e 8;
- Provete 42 – Recuperação 1 e 4;
- Provete 43 – Recuperação 3 e 9.

Após a escolha das melhores recuperações de cada um destes 3 provetes, identificam-se os parâmetros de funcionamento de cada uma detalhadamente.

- **Estratégia de execução** (Tabela 24)

Tabela 24 – Estratégia de execução (41-43)

Provete nº e recuperação nº	Material	Escala de funcionamento (%)	Distância focal (mm)	Ciclo térmico			Número de passagens
				Nº de patamares	Tempo de ciclo (s)	Temperatura de ciclo (°C)	
41.1.	Composição C	140	138	4	50	200 a 850	1
41.8.		135					
42.1.		130					2
42.4.		140					
43.3.	Composição C	130	138	4	50	200 a 850	2, sendo que a primeira passagem é imediatamente interrompida quando se vê que o vidro começa a fundir
43.9.		120				200 a 900	2

Estando bem identificados os parâmetros de funcionamento usados em cada uma destas recuperações, procede-se à realização de 4 novos provetes em que se replica as estratégias de execução usadas anteriormente. Em cada um destes provetes é testada cada uma das recuperações 3 vezes com o intuito de concluir quais os melhores resultados, bem como verificar a eficácia e repetibilidade de cada um.

**4.5.1. Provete 44**

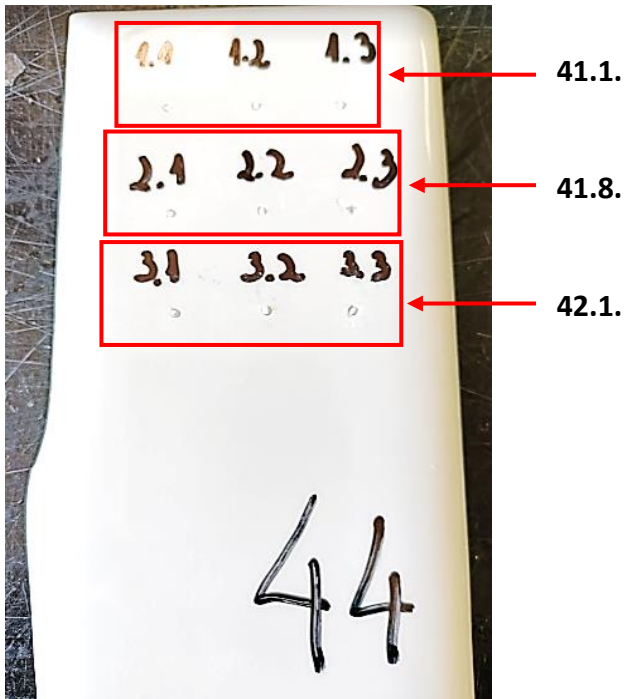


Figura 77 – Provete 44



Figura 78 – Recuperação nº 44.1.1., 44.2.1. e 44.3.1. (microscópio – 10x)

**4.5.2. Provete 45**

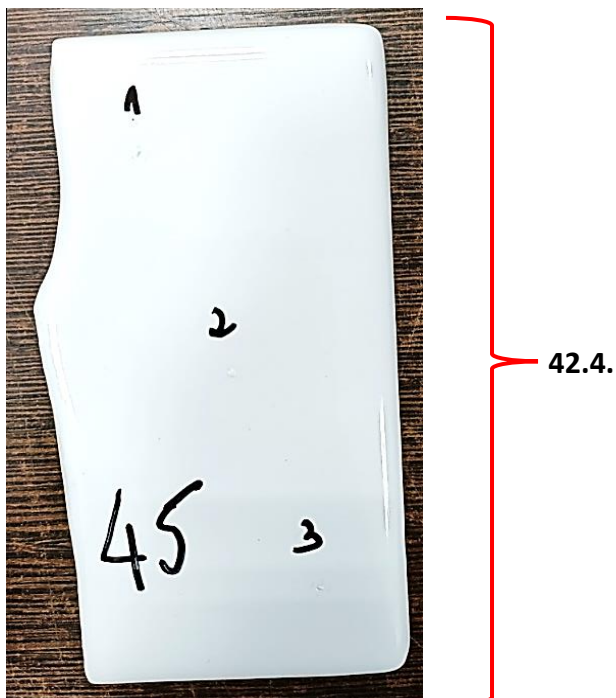


Figura 79 – Provete 45

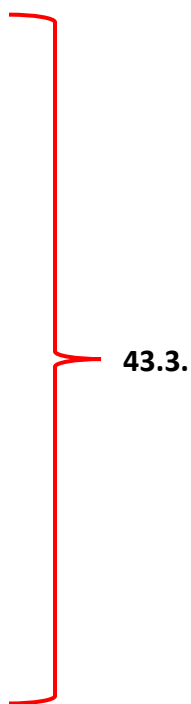


Figura 80 – Recuperação nº 45.1., 45.2. e 45.3. (microscópio – 10x)

### 4.5.3. Provete 46



Figura 81 – Provete 46



43.3.



Figura 82 – Recuperação nº 46.1., 46.2. e 46.3. (microscópio – 10x)

### 4.5.4. Provete 47

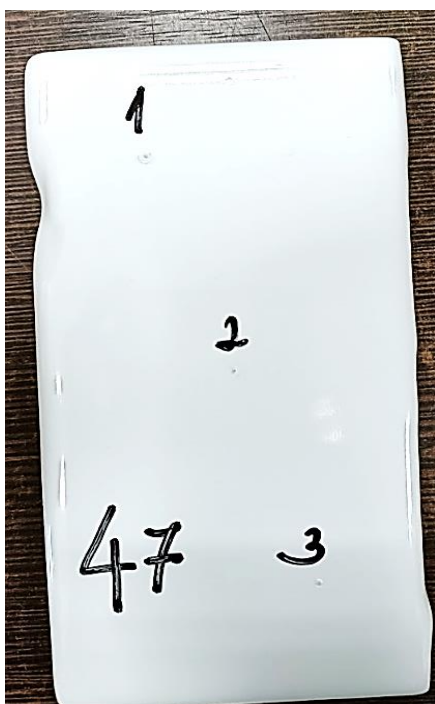
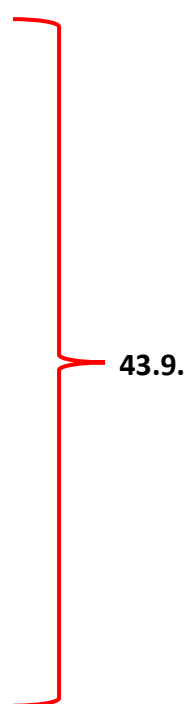


Figura 84 – Provete 47



43.9.



Figura 83 – Recuperação nº 47.1., 47.2. e 47.3. (microscópio – 10x)

Após realizada cada uma das análises visuais e ao microscópio dos provetes 44, 45, 46 e 47 procede-se a uma síntese dos resultados obtidos na Tabela 25.

- **Análise de resultados** (Tabela 25)

Tabela 25 - Análise de resultados (44-47)

Provete nº e recuperação nº	Fusão	Aparência	Sujidade/Resíduos	Geometria do retoque	Repetibilidade
44.1.1.	Fusão completa	Aparência muito consistente e cor branca	Sem qualquer resíduo mas nota-se que a fusão depositou-se mais no centro e não tanto nos bordos, originando esta geometria de retoque	Convexo	Muito Boa
44.1.2.					
44.1.3.					
44.2.1.					
44.2.2.					
44.2.3.					
44.3.1.					
44.3.2.					
44.3.3.					
45.1.	Cor branca e aparência muito boa	Sem qualquer resíduo	Plano	Muito Boa	
45.2.					
45.3.					
46.1.	Cor esbranquiçada e aparência heterogénea	Leve auréola à volta e presença de resíduos bem como de sujidade dentro e à volta do retoque	Côncavo	Satisfatória	
46.2.			Plano		
46.3.					Sem qualquer resíduo
47.1.	Fusão completa	Cor branca	Um pouco de vidrado não fundido nos bordos mas apenas numa zona em específico	Plano mas o pouco de vidrado não fundido nos bordos faz com que fique convexo nesse sítio	Boa
47.2.					
47.3.					

#### 4.6. Análise com colorímetro

Além de todos os critérios anteriormente citados para uma recuperação ser considerada conforme, o valor lido pelo colorímetro (Figura 85) tem de ser inferior a 1 para a sua conformidade ser confirmada (Tabela 26).



Figura 85 – Execução de uma leitura feita pelo colorímetro

Tabela 26 – Análise executada com colorímetro

Provete nº	Recuperação nº	Leituras	Média	Desvio padrão	Conformidade
44	1.1.	0.1 0.2 0.3	0.20	0.10	OK
	1.2.	0.5 0.5 0.6	0.53	0.06	
	1.3.	0.3 0.4 0.3	0.33		
	2.1.	0.9 1.0 1.1	1.00	0.10	NÃO OK
	2.2.	0.3 0.2 0.5	0.33	0.15	OK
	2.3.	1.0 1.0 0.9	0.97	0.06	
	3.1.	0.7 0.8 0.9	0.80	0.10	
	3.2.	0.4 0.5 0.5	0.47	0.06	
	3.3.	0.4 0.3 0.6	0.43	0.15	
1.	0.6 0.8 0.5	0.53			
45	2.	0.8 0.8 0.7	0.77	0.06	OK
	3.	0.5 0.6 0.9	0.67	0.21	
	1.	0.3 0.5 0.7	0.50	0.20	
46	2.	0.4 0.8 0.7	0.63	0.21	OK
	3.	0.4 0.5 0.8	0.57		
	1.	1.0 1.1 1.0	1.03		
47	2.	0.3 0.5 0.6	0.47	0.15	OK
	3.	0.2 0.5 0.6	0.37		

Com o uso de apenas desta composição, composição C, pode-se concluir que quase todas as recuperações são consideradas conformes após análise realizada com o colorímetro, comprovando-se a potencialidade da mesma. Apenas a recuperação 2.1. do provete 44 e a recuperação 1. do provete 47 foram consideradas não ok devido a terem apresentado uma média de valores superior a 1. Esta falta de conformidade até pode ter sido eventualmente causada pelo utilizador ao inspecionar cada uma das recuperações.

#### 4.7. Análise dimensional

Para confirmar a avaliação visual da geometria de cada recuperação procede-se a uma análise dimensional através de uma máquina de medição por coordenadas com contacto, em que depois de se alinhar e referenciar cada provete na mesa da máquina, a mesma compara a altura de cada recuperação, mais especificamente no seu centro, em relação ao provete base. Ou seja, a superfície de cada provete é considerada o ponto zero em altura e a máquina a partir daí determina o desfasamento de cada recuperação (Figura 86 e Figura 87).



Figura 86 – Análise dimensional realizada por uma máquina CMM

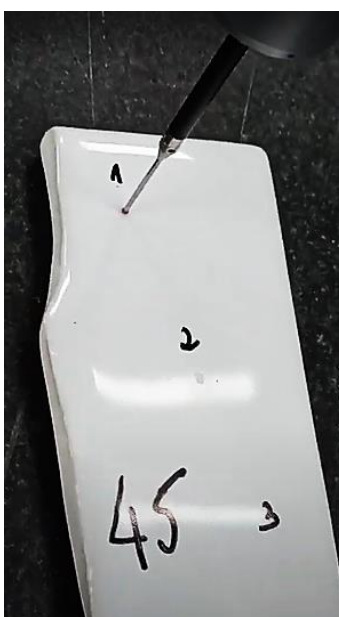


Figura 87 – Medição no topo da recuperação

Tabela 27 – Análise dimensional

Provete nº	Recuperação nº	Leituras ( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )
44	1.1.	87.2 88.9 96.3	90.82	4.81
	1.2.	52.2 46.3 65.5	54.66	9.86
	1.3.	152.6 122.0 108.9	127.83	22.43
	2.1.	218.9 218.8 225.3	220.99	3.70
	2.2.	81.2 73.9 66.8	73.98	7.20
	2.3.	53.5 68.7 59.8	60.66	7.65
	3.1.	6.8 13.6 7.5	9.30	3.72
	3.2.	329.1 318.5 311.5	319.70	8.89
	3.3.	342.3 332.8 279.8	318.44	33.79
45	1.	-51.6 -51.4 -54.5	-52.48	1.72
	2.	15.5 14.0 12.6	14.04	1.44
	3.	39.9 35.1 40.4	38.51	2.92
46	1.	-86.4 -83.4 -71.9	-80.54	7.65
	2.	253.0 250.9 241.2	248.34	6.30
	3.	63.4 63.9 87.7	71.69	13.87
47	1.	-8.90 -27.10 -10.94	-15.65	9.97
	2.	50.8 76.7 42.6	56.71	17.82
	3.	144.2 197.2 195.9	179.14	30.23

Uma recuperação para ser considerada completamente conforme não pode apresentar um relevo que seja possível de detecção quer pelo escolhedor, quer pelo cliente final. Assim sendo, esta análise dimensional tem o objetivo de determinar o relevo de cada uma das recuperações realizadas e avaliar por consequência, se a espessura de cada retoque é uniforme em toda superfície através da realização de 3 leituras em zonas diferentes.

Terminada esta análise, é possível entender que o **provete 45** foi aquele que apresentou os valores médios mais próximos de zero, que é o ideal para não ser notado qualquer relevo, e os valores mais reduzidos de desvios padrão, ou seja, a superfície de cada uma das recuperações deste provete encontra-se essencialmente com a mesma espessura.

Por outro lado, a **recuperação 3.3.** do **provete 44** foi aquela que mostrou a média mais elevada de valores, ou seja, ao se tocar na superfície da mesma percebe-se de imediato a presença de um relevo acentuado. Esta recuperação foi também aquela que apresentou o valor mais elevado de desvio padrão, o que demonstra que a camada de retoque obtida tem uma espessura irregular na sua superfície, que é caracterizada por um desfasamento considerável entre as 3 leituras efetuadas em zonas distintas.

## 5. CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como principais objetivos a implementação de um sistema laser capaz de recuperar peças sanitárias consideradas defeituosas, compreendendo a definição dos seus parâmetros de funcionamento que permitam a vitrificação do vidro para que se assim possa substituir o método tradicional de recuperação e que esta parametrização permita diminuir a temperatura máxima de processo (1200 °C tradicionalmente), bem como garanta uma diferença de cor não superior a 1 após análise com o colorímetro.

Após o término de todos os trabalhos, considero que esta dissertação foi muito enriquecedora já que me levou a conhecer a indústria cerâmica nas suas variadas vertentes. Atualmente, é possível afirmar que este processo de recuperação único e inovador tem realmente potencial e pode claramente ser uma solução ao processo de recuperação tradicional de recozedura em forno, principalmente na recuperação de poros que são os defeitos maioritariamente encontrados em chão de fábrica.

Apesar de não se ter chegado a uma formulação de parâmetros de funcionamento que se possa identificar como 100% perfeita para efetivar a recuperação de um poro, conseguiu-se obter resultados muito promissores e viáveis. Posto isto, pode-se afirmar que:

- O protótipo construído desempenhou bastante bem as funções requeridas e mostrou-se adequado para realizar este tipo de recuperação por todas as suas especificações técnicas. De futuro, seria interessante conseguir-se otimizar o ajuste da inclinação do pirómetro para se conseguir efetuar sempre leituras exatas independentemente da distância focal;
- A distância focal deve ser aquela que compatibiliza o diâmetro da mira laser com o diâmetro do poro a recuperar pois, se o diâmetro da mira laser for muito superior ao diâmetro do poro, a probabilidade de aparecimento de uma auréola à volta do poro é bastante elevada. Contudo, se o diâmetro da mira laser for menor que o diâmetro do poro, a probabilidade de não se realizar uma fusão completa do vidro é elevada;
- O uso de apenas uma composição de vidro sem qualquer aditivo apresentou os melhores resultados já que apesar dos aditivos trazerem vários benefícios, os mesmos pioraram o controlo da repetibilidade dos resultados, tornando-os muito dispersos. Deste modo, a composição que demonstrou melhores resultados foi a composição C em que apenas se usou CMC para executar um leve recobrimento do poro e assim, facilitar a impregnação do vidro;
- Duas passagens laser mostraram-se mais eficazes do que somente uma já que deste modo, foi possível controlar mais adequadamente a geometria do retoque, tornando-o mais plano;
- O provete que apresentou as melhores recuperações foi o **provete 45** em que foi utilizada somente a composição C, uma escala de funcionamento de 140%, uma distância focal de 138 mm, um ciclo térmico de 4 patamares com temperaturas compreendidas entre os 200 e 850 °C, e uma duração total de 50 segundos.

- Realça-se também que todas as recuperações do **provete 45** foram consideradas OK após análise com o colorímetro, que este provete foi aquele que apresentou as leituras mais próximas de zero após análise dimensional, os desvios padrão mais reduzidos e por consequência, foi o provete que apresentou o relevo menos considerável após toque;

Apesar da formulação de parâmetros de funcionamento ainda não se encontrar a 100%, pode-se afirmar que se cumpriram os objetivos propostos para esta dissertação, principalmente com a descida da temperatura de cozedura para os 850 °C.

Relembrando os 3 critérios definidos em [32] e que basta um deles ser cumpridos para uma peça ser considerada conforme, conclui-se que o terceiro critério pode ser avaliado e verificado positivamente já que refere que o valor máximo de uma recuperação não pode ultrapassar em 50  $\mu\text{m}$  o valor de referência que, neste caso, se situa na base do provete. Através da análise dimensional (4.7) realizada percebe-se que duas das três recuperações executadas no **provete 45** são consideradas conformes perante este critério, e que apenas uma das recuperações excedeu este valor limite em somente 2.48  $\mu\text{m}$ , ou seja, com uma simples melhoria do processo já implementado, facilmente se conseguiria tornar esta recuperação também conforme. Relativamente aos outros dois critérios, o primeiro critério não pode ser avaliado visto que a maioria dos defeitos recuperados tratam-se de poros induzidos manualmente, e o segundo critério não é cumprido em nenhum dos casos já que o diâmetro dos poros é de aproximadamente 2 a 3 mm.

Como perspectiva futura é aconselhável realizar-se uma análise mais detalhada com duas passagens em que se difere os parâmetros de funcionamento na segunda passagem e se possível, testar vidrados diferentes com esta mesma estratégia de execução.

Outra possibilidade futura será testar novos materiais de retoque sem serem apenas materiais cerâmicos ou materiais ligados à indústria sanitária pois, desde que o retoque seja impercetível ao olho humano e ao toque pode-se utilizar qualquer tipo de material.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. R. Ferreira, Entrevistado, *Indústria Sanitária*. [Entrevista]. 2022.
- [2] Valadares, ARCH, “A nossa história”, 2022. [Online]. Disponível em: <https://archvaladares.com/historia/>. [Acedido em 23 de outubro de 2022].
- [3] ARCH - Advanced Research Ceramic Heritage, “ARCH Valadares”, 2022. [Online]. Disponível em: <https://arch.pt/>. [Acedido em 23 de outubro de 2022].
- [4] R. Costa, “Desenvolvimento de um processo de recuperação de louça sanitária através da tecnologia laser”, *Tese de Mestrado, ISEP, Porto*, 2021.
- [5] M. Králík, “Fingerprint on the Venus of Dolní Vestonice I”, *Anthropologie – International Journal of Human Diversity and Evolution*, pp. 107-113, 2002.
- [6] F. Hannah, *Ceramics twentieth-century design*, USA: E. P. Dutton, ISBN 0-525-24412-3, 1986.
- [7] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, USA: Elsevier, ISBN 978-1-85617-663-7, 2011.
- [8] S. Somiya, *Advanced Technical Ceramics*, Japão: Academic Press Japan Inc, ISBN 0-12-654630-4, 1984.
- [9] S. J. Schneider, *Volume 4 Engineered Materials Handbook - Ceramics and Glasses*, USA: ASM International, ISBN 0-87-170-282-7, 1991.
- [10] A. Halicka, “Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate”, *Construction and Building Materials*, p. 11, 2013.
- [11] J. Lv, “Life cycle assessment and life cycle costing of sanitary ware”, *Journal of Cleaner Production*, p. 16, 2019.
- [12] E. Martini, “A industrial approach to ceramics: sanitaryware”, *Sapienza University of Rome*, 2017.
- [13] K. Kim, “LCD waste glass as a substitute for feldspar in the porcelain sanitary”, *Ceramics International*, p. 6, 2015.
- [14] E. Allen, “Ball Mill - Highly Efficient Grinding And Milling Machine”, 2014. [Online]. Disponível em: <https://www.everysingletopic.com/ball-mill-highly-efficient-grinding-and-milling-machine/>. [Acedido em 6 de novembro de 2022].
- [15] J. M. Trinitat Pradell, “Ceramic technology. How to characterise ceramic glazes”, *Archaeological and Anthropological Sciences*, vol. nº 12, 2020.
- [16] A. Bernasconi, “Influence of composition on some industrially relevant properties of traditional sanitary-ware glaze”, *Ceramics International*, p. 12, 2012.

- [17] S. Miranda, "Ceramic sanitary wares: Prediction of the deformed shape after the production process", *Journal of Materials Processing Technology*, p. 11, 2014.
- [18] S. Jones, "Improved sol based ceramic moulds for use in investment casting", *Tese de Doutorado, Universidade de Birmingham, Birmingham*, p. 100, 1993.
- [19] SACMI, "Sistemas de desmoldagem para produção de instalações para banheiro", 2022. [Online]. Disponível em: <https://sacmi.com/pt-pt/Ceramics/Loucas-Sanitarias/Linha-de-nucleo-inteligente/Moldagem>. [Acedido em 1 dezembro 2022].
- [20] C. Cuvilla-Suarez, "Reduction of water and energy consumption in the sanitary ware industry by an absorption machine operated with recovered heat", *Journal of Cleaner Production*, p. 18, 2021.
- [21] Keramischer Ofenbau, "Keramischer Ofenbau builds a new tunnel kiln plant in India", 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.keramischerofenbau.de/keramischer-ofenbau-builds-a-new-tunnel-kiln-plant-in-india/>. [Acedido em 12 de novembro de 2022].
- [22] J. M. M. Fernandes, "Estudo da tecnologia laser na reparação de defeitos", *Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro*, 2017.
- [23] B. Teng, "Research on Ceramic Sanitary Ware Defect Detection Method Based on Improved VGG Network", em *2020 International Conference on Applied Physics and Computin*, Beijing, 2020.
- [24] F. Calado, "Deteção de defeitos de delaminação e porosidade em materiais cerâmicos por termografia ativa infravermelha e imagens microscópicas digitais", *57º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, p. 12, 2013.
- [25] L. M. Durão, "Caraterização de materiais - Ensaio não destrutivos", 2020. [Online]. Disponível em: <https://moodle.isep.ipp.pt/>. [Acedido em 11 de novembro de 2022].
- [26] T. C. Akinci, "The Defect Detection in Ceramic Materials Based on Time-Frequency Analysis by Using the Method of Impulse Noise", *Archives of Acoustics*, p. 10, 2011.
- [27] D. Breach, "Convolution Neural Networks", 2020. [Online]. Disponível em: <https://developersbreach.com/convolution-neural-network-deep-learning/>. [Acedido em 16 de novembro de 2022].
- [28] M. Kumru, "Assessing the visual quality of sanitary ware by fuzzy logic", *Applied Soft Computing*, p. 11, 2013.
- [29] Zschimmer & Schwarz Ceramco, "Pin-holes on ceramic surface after firing: causes and remedies", 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.zschimmer-schwarz-ceramco.it/en/zs-lab/how-to/08-pin-holes-on-ceramic-surface-after-firing-causes-and-remedies-1>. [Acedido em 2 de dezembro de 2022].
- [30] L. Magalhães, "Tribologia - textos de apoio", 2020. [Online]. [Acedido em 16 de novembro de 2022].

- [31] Sunrex sanitary ware, "Quality Control At Sunrex", 2022. [Online]. Available: <https://www.cnsunrex.com/services/quality/>. [Acedido em 2 de dezembro de 2022].
- [32] T. Mori, "Sanitary ware and method of manufacturing sanitary ware", *Patent Application Publication*, p. 22, 2019.
- [33] F. Herren, "Laser marking of ceramic materials, glazes, glass, ceramics and glasses", *United States Patent*, p. 5, 1991.
- [34] V. Salvador, *Laser e suas aplicações em Ciência e Tecnologia*, São Paulo: Livraria da Física, ISBN 978-85-88325-98-2, 2008.
- [35] Jornal de Notícias, "Laser foi inventado há 50 anos", 2010. [Online]. Disponível em: <https://www.jn.pt/inovacao/laser-foi-inventado-ha-50-anos-1572105.html>. [Acedido em 1 de dezembro de 2022].
- [36] A. D. Zanet, "Laser surface texturing of ceramics and ceramic composite materials – A review", *Ceramics International*, p. 14, 2020.
- [37] K. Osvay, "Laser treatment of white China surface", *Applied Surface Science*, 2005.
- [38] R. F. A. Goulas, "Laser sintering of ceramic materials for aeronautical and astronautical applications", em *Laser Additive Manufacturing*, Woodhead Publishing Series, 2017, pp. 373-398.
- [39] D. Wang, "Densification and crack suppression in selective laser melting of pure molybdenum", *Materials & Design*, p. 9, 2017.
- [40] X. Li, "Laser densification of extruded of dental porcelain bodies in multi-material laser densification (MMLD) process", *Department of Materials Science and Engineering*, p. 8, 2004.
- [41] A. O. Abdullah, "Effect of repeated laser surface treatments on shear bond strength between zirconia and veneering ceramic", *The journal of prosthetic dentistry*, p. 6, 2020.
- [42] S. Rodríguez-López, "Effect of repeated laser surface treatments on shear bond", *Journal of the European Ceramic Society*, p. 10, 2015.
- [43] N. Basile, "Processing of a glass ceramic surface by selective focused beam laser treatment", *Ceramics International*, p. 8, 2015.
- [44] A. Horcher, "Advanced ceramic coatings on aluminum by laser treatment of filled organosilazane-based composites", *Ceramics International*, p. 9, 2022.
- [45] European Standard, "EN 997", *WC pans and WC suites with integral trap*, p. 62, 2018.
- [46] European Standard, "EN 14688", *Sanitary appliances - Wash basins - Functional requirements and test methods*, p. 29, 2015.
- [47] ISO, "ISO 10545-11", *Ceramic tiles — Part 11: Determination of crazing resistance for glazed tiles*, p. 3, 1994.

- [48] LaserMaq, “Sistema inovador de reparação de vidrados sanitários por aplicação localizada de energia laser - 1º Relatório”, Lisboa, 2018.
- [49] L. Science, “What is electromagnetic radiation?”, 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.livescience.com/38169-electromagnetism.html>. [Acedido em 10 de maio de 2023].
- [50] Y. M. Nikolay K. Tolochko, “Absorptance of powder materials suitable for laser sintering”, *Rapid Prototyping Journal*, 1 setembro 2000.
- [51] LaserMaq, “Sistema inovador de reparação de vidrados sanitários por aplicação localizada de energia laser - 2º Relatório”, Lisboa, 2020.
- [52] LaserMaq, “Sistema inovador de reparação de vidrados sanitários por aplicação localizada de energia laser - 3º Relatório”, Porto, 2021.
- [53] Trotec, “Segurança com Lasers - Classes de segurança internacionais”, 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.troteclaser.com/pt-pt/saiba-mais-e-suporte/faqs/as-maquinas-de-gravacao-a-laser-sao-seguras>. [Acedido em 23 de abril de 2023].
- [54] LaserTo, “Laser Conhecimento Segurança”, 2020. [Online]. Disponível em: <https://pt.laserto.com/laser-safety-knowledge>. [Acedido em 15 de maio de 2023].
- [55] Valadares, “Coleção sanitário - Neoclássica”, 2021. [Online]. Disponível em: <https://archvaladares.com/categoria-produto/colecoes-sanitario/neoclassica/page/2/>. [Acedido em 3 de junho de 2023].

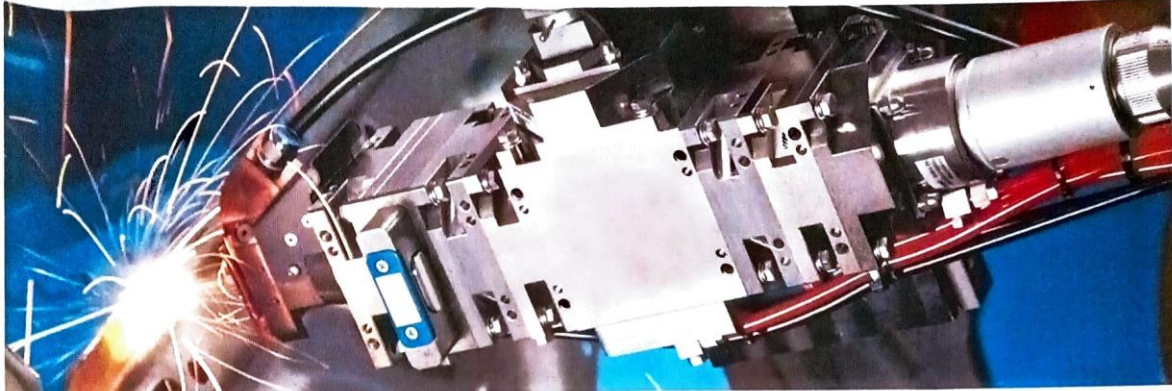
## **7. ANEXOS**

Anexo 1 – Especificações fonte laser

Anexo 2 – Especificações pirômetro

Anexo 1 – Especificações fonte laser

Seamless upgrades Match Accuracy Instantly improve



CYL-200



1.0µm Single Mode Continuous Fiber Laser User manual

## 2.0 Description of Product

### 2.1 Product characteristics

CYL-200W-4000W single-mode 1.0 $\mu$ m continuous fiber laser uses the latest technology and optimum design. It has the advantages of high electro-optical conversion efficiency, long service life, high safety, and reliability. With good output beam quality and strong anti-high reflective ability, which can be widely used in laser cutting, welding, drilling, 3D printing and other fields.

We have established a scientific after-sales service system with Internet technology. Each equipment has a unique identity code (that stores the original technology and material information of the machine), which can be used for remote real-time monitoring online, providing users with fault warning, quick technical support and after-sales service.

Our laser with its high quality, high reliability and excellent cost performance, can meet the diverse needs of customers, customization and good after-sales service, which is an ideal choice for system integrators and equipment manufacturers.

### 2.2 Product advantage

- High electro-optic conversion efficiency greatly reduces power consumption cost.
- Strong anti-high reflective ability, suitable for processing different materials
- Remote real-time monitoring.
- Long service life, high safety and reliability.
- Personalized customization.
- Good after-sales service system.
- Excellent performance-to-price ratio.

### 2.3 Main applications

Laser cutting, laser welding, laser cladding, laser brazing, laser surface heat treatment, etc.

### 2.4 Specification

Performance		Min.	Typ.	Max.	Remarks	
Optical characteristics	Central wavelength	(nm)	1070	1080	1090	
	Spectral bandwidth	(nm)		3	5	-3dB
	Short time power stability	(%)		$\pm 1$		
	Long time power stability	(%)		$\pm 2$		
	Laser opening time	( $\mu$ s)		50-100		
	Laser shutdown time	( $\mu$ s)		100-200		
	Power regulation range	(%)	10		100	
	Beam quality	(M <sup>2</sup> )			1.3	QBH-20/400
					2.8	QBH-50/360
	Modulation frequency	(KHz)	5		20	100%output
Red light Power	(mW)	5		60		
Output characteristics	Output connector		QBH		Customizable	
	Output fiber core diameter	( $\mu$ m)		20	100	
	Output fiber length	(m)		15		Customizable
	Output cable bending radius	(mm)	200			
	Work model			Continuous/modulation		CW/Modulate

Electrical cooling characteristics	State of polarization		Random		Random
	Communication interface		RS232 / AD / Super terminal		
	Power supply	(V)		220	
	Structure		Rack		

## 2.5 Order information

C	Y	L	-					/	S	-	Q	B	H	-				/			
C	CW	Y	YDF 10µm	Fiber laser	Output power	Mode	Output connector	Output fiber core diameter	Fiber length												
Q	QCW	E	EDF EYDF 15µm		600 500W	S Single	QBH QBH	20 20/400	15 15m												
					1000 1000W	M Multi	LOC LOC	25 25/400	20 20m												
P	PULSE				1500 1500W	H Asymmetric reflection	QCS QCS	50 50/360	XX Customizable												
					2000 2000W			100 100/360													
					3000 3000W			150 150/360													

## 3.0 Product Installation

### 3.1 Actual configuration list

Please refer to the packing list in the packing box.

### 3.2 Unpacking and inspection

Through specially designed packaging materials and boxes, We ensures that the laser can always be fully protected during transportation. Nevertheless, to prevent the unpredictable situation in the transportation process, the user still needs to carefully check whether the packing box is placed correctly and whether there is any damage such as collision, cracking and flooding outside the box before opening the box. Once the external box is found to be abnormal, please inform us in time so that we can deal with it as soon as possible.

After unpacking, please check whether the packing list is consistent with the actual items. If in doubt, please contact us in time.

When the laser is taken out of the box, attention should be paid to avoid the collision or violent vibration to the laser. When taking out the coiled laser output cable, we should pay special attention to it, do not twist, bend, pull the laser output cable, and avoid the collision and vibration of the laser output head.

**CAUTION: laser output cable is a precise optical device, twisting or overbending the output cable, vibration and impact of the laser output head will cause irreparable damage to the laser.**

**Anexo 2 – Especificações pirômetro****MANUAL****Series 5**  
IN 5 IMPACPyrometer

## 2 Introduction

### 2.1 Appropriate use

The IN 5 is a stationary infrared thermometer for non-contact temperature measurement of non-metallic surfaces or painted, coated or anodized metals with temperature ranges between -32 and 900 °C.

For optimal match of the instrument to the application the pyrometers are equipped ex works with the desired optics (for every instrument 3 different optics are available).

### 2.2 Scope of delivery

Instrument with selected optic, works certificate, operation manual.



**Note:** The connection cable is not included with the instrument and must be ordered separately (see section 7, **Reference numbers**).

### 2.3 Technical data

Temperature Ranges:	0 ... 100 °C (MB 1) 0 ... 200 °C (MB 2) 0 ... 300 °C (MB 3) 0 ... 400 °C (MB 4) 0 ... 500 °C (MB 5) 0 ... 900 °C (MB 9) -32 ... 50 °C (MB 0.5) -32 ... 900 °C (MB 9L) (Further MB on request)
IR Detector:	Thermopile
Data Handling:	Digital
Spectral Range:	8 ... 14 μm
Power Supply:	24 V DC (10 ... 30 V)
Power Consumption:	Max. 20 mA
Load:	Max. 700 Ω @ 24 V (max. 100 Ω @ 12 V)
Response Time $t_{90}$ :	0.08 s; adjustable in the pyrometer: 0.5 s; 1 s; 2 s; 5 s
Analog Output:	4 ... 20 mA (linear)
Parameters:	Adjustable on the pyrometer: Emissivity, Exposure time
Emissivity $\epsilon$ :	0.2 ... 1 adjustable
Measurement Uncertainty: Dependent on object temperature T and ambient temperature $T_{amb}$ ( $\epsilon = 1$ , $t_{90} = 1$ s)	T = -32 ... 0 °C: 1.5 °C ( $T_{amb} = 15 ... 30$ °C) 2 °C ( $T_{amb} = 0 ... 15$ or $30 ... 63$ °C) T = 0 ... 300 °C: 0.6% of reading in °C or 1 °C ( $T_{amb} = 15 ... 30$ °C) 1% of reading in °C or 1.5 °C ( $T_{amb} = 0 ... 15$ or $30 ... 63$ °C) T = 300 ... 900 °C: 1% of reading in °C ( $T_{amb} = 15 ... 30$ °C) 1.3 % of reading in °C ( $T_{amb} = 0 ... 15$ or $30 ... 63$ °C)

Repeatability: ( $\epsilon = 1$ , $t_{90} = 1$ s)	0.3% of reading in °C or 0.6 °C <sup>1</sup>
Noise Equivalent Temperature Difference (NETD): ( $\epsilon = 1$ , $T_{amb} = 23$ °C)	@ $t_{90} = 80$ ms: 0.2 °C (@ 23 °C measuring temperature) @ $t_{90} = 1$ s: 0.05 °C (@ 23 °C measuring temperature)
Protection Class:	IP65 (DIN 40050)
Ambient Temperature:	0 ... 70 °C
Storage Temperature:	-20 ... 70 °C
Rel. Humidity:	Non-condensing conditions
Weight:	Approx. 410 g
Housing:	Stainless steel
Operating Position:	Any
Optics:	Germanium (Ge)
CE-label:	According to EU directives about electromagnetic immunity

<sup>1</sup>Whichever value is greater. The instrument must be at a const. amb. temp. for min. 15 min. and has to be connected to the power supply.

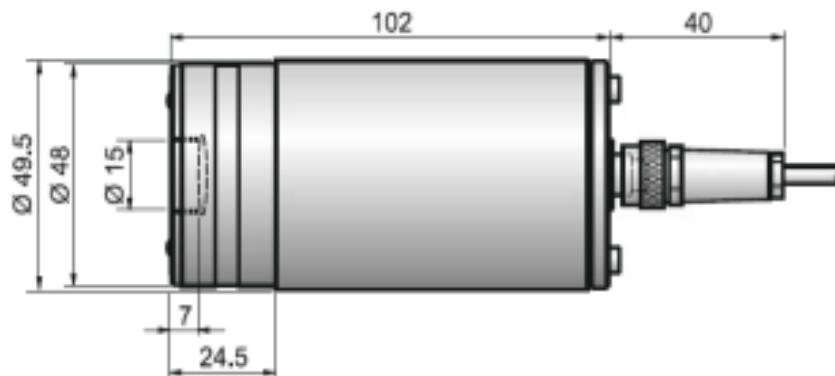
**Note:** The determination of the technical data of this pyrometer is carried out in accordance with VDI/VDE directive IEC TS 62942-2, "Determination of the technical data for radiation thermometers".



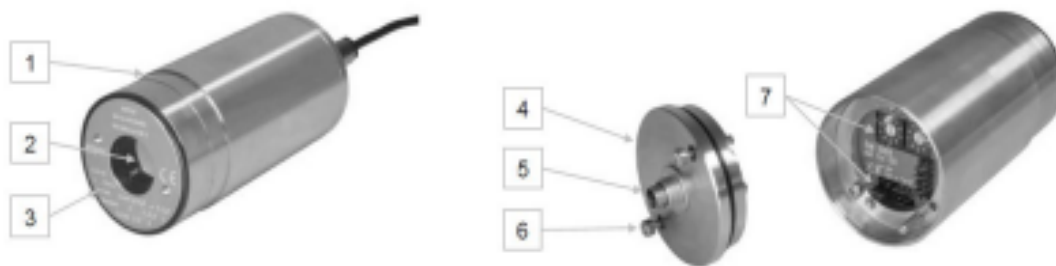
The calibration / adjustment of the instruments was carried out in accordance with VDI/VDE directive "Temperature measurement in industry, Radiation thermometry, Calibration of radiation thermometers", VDI/VDE 3511, Part 4.4.

For additional details on this directive, see <http://info.lumasenseinc.com/calibration> or order the directive from "Beuth Verlag GmbH" in D-10772 Berlin, Germany.

## 2.4 Dimensions



## 2.5 Physical User Interface



- 1** Stainless steel housing
- 2** Optics
- 3** Type label
- 4** Rear panel

- 5** Electrical connection
- 6** Fixing screws for rear panel
- 7** Settings at the pyrometer