



**Paulo Henrique dos
Santos Batista**

**Desenvolvimento de soluções otimizadas de
iluminação para fornos industriais**



**Paulo Henrique dos
Santos Batista**

**Desenvolvimento de soluções otimizadas de
iluminação para fornos industriais**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizado sob orientação científica de Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e com a supervisão de José António Almeida, Diretor Técnico e Fabril da Empresa Ramalhos S.A..

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Professor Associado com Agregação (Aposentado) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (arguente)

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Quero agradecer primeiramente ao meu orientador, o Professor Doutor Fernando Neto, pela sua orientação, disponibilidade e pela motivação dada no decorrer deste projeto.

À *Ramalhos S.A.* e aos seus colaboradores, em especial ao meu supervisor na empresa, Eng. José António, pela ajuda e confiança que me proporcionou ao longo do estágio, aos meus colegas do gabinete técnico da empresa, pelo apoio prestado e pela amizade e a todos os colaboradores que de certa forma fizeram parte deste trabalho, pela disponibilidade em ajudar e por todos os contributos para o meu enriquecimento profissional.

À minha família, em especial aos meus pais pela oportunidade que me deram de realizar os meus estudos e pela motivação dada ao longo deste tempo e ao meu irmão, à minha irmã e ao meu padrinho por todo o apoio e incentivo.

Aos meus amigos por todos os momentos que me proporcionaram não só durante este período de estágio mas também durante todos os 5 anos do curso.

Um muito obrigado a todos!

Palavras-chave

Iluminação LED; fornos industriais; transferência de calor; arrefecimento de LEDs; convecção natural; convecção forçada

Resumo

O presente relatório encontra-se associado ao estágio curricular realizado na empresa *Ramalhos S.A.* e tem por finalidade descrever todo o processo de desenvolvimento de soluções de iluminação em câmaras de fornos industriais. Como objetivo principal deste trabalho destaca-se a integração de uma solução de iluminação LED como substituto à iluminação atual, obtida por meio de lâmpadas de halogéneo. Esta substituição é necessária, devido à descontinuidade do uso de certas lâmpadas de halogéneo, prevista a curto prazo. O ambiente onde se situam as luminárias LED encontra-se sujeito a elevadas temperaturas, o que levanta dificuldades técnicas associadas à aplicação deste novo meio de iluminação. Desta forma, foi necessário o desenvolvimento de um sistema de arrefecimento capaz de garantir temperaturas inferiores à temperatura limite da luminária LED dada pelo fabricante. Em estudo estiveram dois dos fornos industriais da empresa na qual se realizou este estágio, sendo estes o *Turboram* e o *Modulram*. Procurou-se obter mais conhecimentos sobre os dois fornos em questão, nomeadamente acerca da melhor localização possível para a aplicação da iluminação LED. Realizou-se uma pesquisa acerca dos sistemas de arrefecimento de LEDs existentes atualmente e estudados pela comunidade científica e elaborou-se uma análise da concorrência, procurando obter conhecimento sobre a utilização desta tecnologia nos fornos industriais de outras marcas. Procedeu-se à inventariação de possíveis alternativas de soluções de arrefecimento com base em conhecimentos teóricos e de seguida conduziram-se vários ensaios experimentais para a obtenção de resultados que permitissem confirmar as hipóteses sugeridas anteriormente. Por fim, obtiveram-se desenhos para produção de protótipos dos fornos num estado final após o estudo experimental. Utilizando técnicas de arrefecimento de baixo custo de aplicação, o estudo apresentado neste relatório levou à obtenção de valores de temperaturas abaixo do limite crítico de 100°C. No caso do *Turboram* foram criados vários furos nas regiões superior e inferior da porta do forno, de modo a criar um canal ascendente de ar no interior desta, o que levou a uma redução da temperatura registada na luminária LED dos 104°C para os 52°C, comparando ao caso atual sem qualquer furação. Já no *Modulram*, após os vários ensaios experimentais com arrefecimento devido à convecção natural, conseguiu-se uma diminuição na temperatura dos 113°C para os 94°C. Como maior conclusão deste projeto, demonstra-se que efetivamente é possível e viável a substituição das lâmpadas de halogéneo por iluminação LED nas condições exigentes dos fornos industriais.

Keywords

LED lighting; industrial ovens; heat transfer; LED cooling; free convection; forced convection

Abstract

This report is associated with the curricular internship at *Ramalhos S.A.* and aims to describe the entire process of developing lighting solutions for chambers of industrial ovens. The main objective of this work is the integration of a LED lighting solution as a substitute for current lighting, obtained through halogen lamps. This replacement is necessary due to the short-term discontinuation of certain halogen lamps. The environment where the LED luminaires are located is subject to high temperatures, which raises technical difficulties associated with the application of this new lighting medium. Thus, it was necessary to develop a cooling system capable of guaranteeing temperatures below the limit temperature of the LED luminaire given by the manufacturer. Two of the industrial ovens of the company in which this internship took place were studied. These were *Turboram* and *Modulram*. More knowledge was sought about the two ovens in question, namely about the best possible location for the application of LED lighting. Research has been carried out on the existing LED cooling systems currently studied by the scientific community and a competitive analysis has been carried out, seeking to gain insight into the use of this technology in third-party industrial ovens. Possible cooling solutions were inventoried based on theoretical knowledge and then several experimental tests were conducted to obtain results to confirm the hypotheses suggested above. Finally, designs for production of prototype ovens in a final state were obtained after the experimental study. Using low-cost cooling application techniques, the study presented in this report led to temperatures below the critical limit of 100°C. In the case of the *Turboram*, several holes were drilled in the upper and lower regions of the oven door to create an upward air channel inside it, leading to a reduction in the temperature of the LED luminaire from 104°C to 52°C, compared to the current case without any drilling. In *Modulram's* case, after several experimental tests with cooling due to free convection, a decrease in the temperature from 113°C to 94°C was achieved. As a major conclusion of this project, it is demonstrated that it is effectively possible and feasible to replace halogen lamps with LED lighting in the demanding conditions of industrial ovens.

Índice

I	Enquadramento	1
1	Introdução	3
1.1	<i>Ramalhos S.A.</i>	3
1.2	Enquadramento do trabalho a desenvolver	4
1.3	Motivação e objetivos	5
2	Estado da Arte	7
2.1	Arrefecimento de LEDs	7
2.1.1	Métodos passivos de arrefecimento de LEDs	8
2.1.2	Métodos ativos de arrefecimento de LEDs	10
2.1.3	Outras abordagens para a gestão térmica de soluções LED	11
2.2	Análise de concorrência	12
2.3	1º Forno em estudo: O <i>Turboram</i>	14
2.3.1	Características principais	14
2.3.2	Escolha da localização dos LEDs no forno	15
2.4	2º Forno em estudo: O <i>Modulram</i>	17
2.4.1	Características principais	17
2.4.2	Escolha da localização dos LEDs no forno	18
2.5	Solução atual: Lâmpadas de halogéneo	20
2.6	Solução proposta: Lâmpadas LED	22
2.6.1	Introdução	22
2.6.2	Ofertas comerciais existentes e escolha das lâmpadas/luminárias LED a utilizar	24
II	<i>Turboram</i>	29
3	Soluções Propostas	31
3.1	Composição da porta do forno <i>Turboram</i>	31
3.2	Propostas de melhoria da porta	35
3.2.1	Furação inferior e superior na porta	35
3.2.2	Escudo de radiação	38
3.2.3	Aplicação da luminária LED na zona inferior da porta	40
4	Metodologia	41
4.1	Aplicação das luminárias LED na porta	41
4.2	Aplicação da proposta de melhoria: Furação superior e inferior	43

4.3	Equipamento utilizado nas medições	44
4.3.1	Medição de temperaturas	44
4.3.2	Medição da velocidade do ar	44
4.4	Preparação da porta para a colocação dos instrumentos de medição	45
4.5	Organização dos ensaios experimentais a realizar	46
5	Ensaio Experimentais	49
5.1	Caracterização da luminária LED <i>77.116.1002.36</i> com uso de câmera termográfica	49
5.2	Caracterização da porta do forno no seu estado atual	53
5.3	Medição de temperaturas após a furação proposta na porta	55
5.3.1	Primeiros testes aos LEDs com o forno ligado	55
5.3.2	Distribuição de temperaturas na furação superior	59
5.3.3	Testes de comportamento térmico dos LEDs com e sem furação	60
5.3.4	Influência da furação inferior nas temperaturas dos LEDs	61
5.3.5	Influência do diâmetro da furação nas temperaturas dos LEDs	62
5.4	Influência da furação proposta no consumo elétrico do forno	64
5.5	Medição da velocidade de ar na calha interior da porta do forno	65
6	Análise e Discussão dos Resultados Experimentais	67
6.1	Análise do comportamento térmico dos LEDs com e sem furação	67
6.2	Análise da distribuição de temperaturas na furação superior da porta	71
6.3	Análise da influência da furação inferior nas temperaturas dos LEDs	72
6.4	Análise da velocidade do ar na calha interior do lado direito da porta	75
6.5	Análise de outras configurações e localizações possíveis para as luminárias LED	76
6.5.1	Módulo LED <i>BJB 77.116.1005</i> à temperatura ambiente	76
6.5.2	Viabilidade da aplicação da luminária LED <i>BJB 77.116.1005</i> no lado da dobradiça da porta	77
6.5.3	Viabilidade da aplicação da luminária LED <i>BJB 77.116.1005</i> na zona inferior da porta	81
III	Modulram	83
7	Soluções Propostas	85
7.1	Arrefecimento da luminária LED por convecção natural	85
7.2	Arrefecimento a ar da luminária LED por convecção forçada	88
7.3	Arrefecimento da luminária LED utilizando um tubo de calor	90
7.4	Arrefecimento da luminária LED com circulação de água	90
8	Metodologia	91
8.1	Projeto e aplicação da nova cavidade lateral para iluminação LED	91
8.2	Preparação do forno para a colocação das sondas de medição	94
8.3	Organização dos ensaios experimentais a realizar	95

9	Ensaaios Experimentais	97
9.1	Testes de arrefecimento por convecção natural	97
9.1.1	Medição de temperaturas após aplicação da nova cavidade de iluminação	97
9.1.2	Influência do isolamento aplicado nas laterais da cavidade	98
9.1.3	Influência da chapa lateral externa do forno no arrefecimento da luminária LED	99
9.1.4	Influência da abertura para renovação de ar no arrefecimento da luminária LED	101
9.1.5	Influência do uso de vidro duplo no arrefecimento da luminária LED	103
9.2	Testes de arrefecimento por convecção forçada	103
9.2.1	Características do ventilador usado	103
9.2.2	Uso de ventilação no topo do forno <i>Modulram</i>	104
9.2.3	Uso de ventilação na zona de trás do forno <i>Modulram</i>	105
10	Análise e Discussão dos Resultados Experimentais	107
10.1	Análise da influência do isolamento aplicado nas laterais da cavidade . . .	107
10.2	Análise da influência da chapa exterior do forno <i>Modulram</i>	108
10.3	Análise da influência da abertura no topo da cobertura do forno <i>Modulram</i>	110
10.4	Comparação entre a utilização de vidro simples e vidro duplo	112
10.5	Análise da influência do uso do ventilador no topo da cobertura do forno .	113
10.6	Escolha da melhor posição para aplicação de ventiladores na traseira do forno	115
IV	Considerações Finais	117
11	Protótipos finais	119
11.1	Protótipo <i>Turboram</i> 5T com iluminação LED	119
11.2	Protótipo <i>Modulram</i> 2T com câmara normal com iluminação LED	121
12	Conclusões adquiridas	123
12.1	Conclusões do estudo no forno <i>Turboram</i>	123
12.2	Conclusões do estudo no forno <i>Modulram</i>	125
12.3	Trabalhos futuros	125
	Bibliografia	127
A	Desenhos técnicos do protótipo final <i>Turboram</i>	131
B	Desenhos técnicos do protótipo final <i>Modulram</i>	135

Lista de Tabelas

2.1	Características técnicas de soluções LED da <i>Vossloh-Schwabe</i> . [36]	25
2.2	Características técnicas de soluções LED da BJB. [1]	26
2.3	Características técnicas do <i>OSRAM Parathom Dim GU10</i> . [23]	26
2.4	Preços unitários de luminárias LED da gama <i>BJB 77.116</i> .	28
3.1	Valores de $\bar{N}u$ e \bar{h} calculados para os casos de cavidades e canais verticais.	38
5.1	Temperaturas registadas nos vários pontos de medição, tanto na placa posterior como anterior.	54
5.2	Temperaturas medidas pelas três sondas no lado da dobradiça da porta.	56
5.3	Temperaturas medidas pelas três sondas no lado do fecho da porta.	57
5.4	Temperaturas medidas na zona frontal das luminárias LED.	58
5.5	Suma das configurações usadas no ensaio de influência da furação inferior.	61
5.6	Temperaturas principais após a 2 ^a furação efetuada.	63
5.7	Consumo elétrico antes e após a furação proposta.	64
5.8	Alteração da velocidade do ar com a abertura progressiva da furação superior, mantendo a furação inferior aberta.	66
5.9	Alteração da velocidade do ar com a abertura progressiva da furação superior e com a furação inferior tapada.	66
6.1	Temperaturas medidas na zona do dissipador de calor da luminária LED <i>BJB 77.116.1005.36</i> .	77
6.2	Temperaturas após a aplicação de uma luminária LED <i>BJB 77.116.1005.36</i> no lado da dobradiça da porta.	81
7.1	Valores típicos de coeficientes de transferência de calor por convecção [16].	90
9.1	Temperaturas máximas atingidas nos Casos 3, 4 e 5.	101
9.2	Temperaturas máximas atingidas nos Casos 6 e 7.	102
9.3	Temperaturas máximas atingidas nos Casos 11, 12 e 13.	106

Lista de Figuras

2.1	Esquema do funcionamento de um tubo de calor [25].	9
2.2	Arrefecedor termoelétrico igual ao usado por X. Lin <i>et al.</i> [17].	11
2.3	Iluminação LED de alguns dos fornos ventilados da empresa <i>Unox</i> [32].	12
2.4	Iluminação LED dos modelos de convecção da <i>FINES</i> [11].	13
2.5	Iluminação LED dos modelos da <i>distform-mychef</i> [4].	13
2.6	<i>Combi</i> de dois fornos <i>Turboram</i> [26].	14
2.7	Iluminação atual na porta de um <i>Turboram 10T 80x60</i>	16
2.8	Pormenor na vista de cima da porta de um <i>Turboram 9T</i>	16
2.9	Forno <i>Modulram</i> de 3 câmaras [26].	17
2.10	Iluminação atual numa cavidade na lateral de uma câmara do forno <i>Modulram</i>	19
2.11	Lâmpada de halogéneo utilizada nos fornos <i>Turboram</i> [23].	21
2.12	Lâmpada de halogéneo utilizada nos fornos <i>Modulram</i> [23].	21
2.13	Princípio de funcionamento de um LED [2].	22
2.14	Extreme O, lâmpada LED para aplicação em fornos [35].	24
2.15	Luminária <i>Extreme L</i> da <i>Vossloh-Schwabe</i> [36].	27
2.16	Luminária <i>Extreme REVO</i> da <i>Vossloh-Schwabe</i> [36].	27
2.17	Luminária <i>77.116</i> da <i>BJB</i> [1].	27
3.1	Vista frontal da porta <i>Turboram 9T</i>	32
3.2	Corpo da porta do <i>Turboram 9T</i>	32
3.3	Zona interior da porta. (a) Com vidro interior, a verde. (b) Vidro interior removido.	33
3.4	Modelo 3D da luminária LED a aplicar na porta do <i>Turboram</i>	33
3.5	Luminária LED aplicada na porta do <i>Turboram 9T</i>	34
3.6	Zona posterior da luminária LED aplicada na porta do <i>Turboram 9T</i>	34
3.7	Vista de cima da porta de um <i>Turboram 9T</i> , com furação superior e inferior.	35
3.8	Cavidade retangular vertical. Adaptado de [16].	35
3.9	Escoamento num canal vertical, induzido por convecção natural. Adaptado de [16].	37
3.10	Vista de trás da porta de um <i>Turboram 9T</i> , com a aplicação de um escudo de radiação (à esquerda na figura).	40
4.1	Aplicação da luminária LED <i>BJB 77.116.1002.36</i> no lado da dobradiça da porta.	42
4.2	Aplicação da luminária LED <i>BJB 77.116.1002.36</i> no lado do fecho da porta.	42
4.3	Furação superior inicial, com 2x43 furos de diâmetro 7 mm.	43

4.4	Furação inferior inicial, com 2x43 furos de diâmetro 7 mm.	43
4.5	Equipamento utilizado para realizar medições de temperaturas na <i>Ramalhos</i>	44
4.6	Micromanómetro utilizado para a medição da velocidade do ar. Adaptado de [7].	45
4.7	Furos laterais no lado da dobradiça da porta, para colocação das sondas de medição de temperatura.	46
5.1	Imagem termográfica e respetiva fotografia da luminária LED após ser aquecida a 70°C.	51
5.2	Imagem termográfica e fotografia da luminária LED desligada.	52
5.3	Imagem termográfica e fotografia da zona de trás da luminária LED ligada.	52
5.4	Imagem termográfica e fotografia da lateral da luminária LED quando ligada.	52
5.5	Pontos utilizados na medição de temperaturas de uma porta de um <i>Turboram 5T</i>	53
5.6	Assimetria da porta do <i>Turboram</i> em relação à câmara do forno.	55
5.7	<i>Setup</i> para medição das temperaturas nos dois furos laterais da calha direita.	55
5.8	Pormenor da zona do fecho da porta, evidenciando a dificuldade presente para a medição de temperaturas nesta região.	57
5.9	Câmara do forno de ensaios de 5 tabuleiros, com iluminação LED.	58
5.10	<i>Setup</i> para medição das temperaturas do ar à saída da furação superior.	59
5.11	Exemplo de um dos estados da furação superior, onde foram abertos apenas 16 furos do lado da dobradiça.	60
5.12	Exemplo de um dos estados da furação superior, onde foram abertos apenas 16 furos do lado do fecho.	60
5.13	Exemplo de um dos estados da furação inferior utilizada neste teste.	61
5.14	Nova furação superior com 44 furos com diâmetro de 7 mm e 42 furos com diâmetro de 10 mm.	62
5.15	Nova furação inferior com 86 furos com diâmetro de 10 mm.	62
5.16	Tubo de <i>Pitot</i> colocado no interior da calha do lado direito da porta do forno, por meio do furo F1.	65
6.1	Variação das temperaturas do lado da dobradiça com a abertura da furação superior no sentido direita-esquerda.	68
6.2	Variação das temperaturas do lado da dobradiça com a abertura da furação superior no sentido esquerda-direita.	69
6.3	Influência do sentido de abertura da furação superior na T_{SondaLED} da luminária LED do lado da dobradiça.	70
6.4	Variação das temperaturas do lado do fecho com a abertura da furação superior no sentido esquerda-direita.	70
6.5	Distribuição de temperaturas na furação superior.	71
6.6	Influência da furação inferior e da aparadeira nas temperaturas do lado da dobradiça da porta.	72
6.7	Forno <i>Turboram</i> com uma calha aparadeira por debaixo da porta.	73
6.8	Variação das temperaturas com a alteração das condições de entrada e saída do ar, após a 2 ^a furação.	74

6.9	Variação da velocidade do ar no interior da calha do lado da dobradiça com a alteração das condições de entrada e saída de ar.	75
6.10	<i>Setup</i> para a medição de temperaturas no dissipador de calor da luminária <i>BJB 77.116.1005</i>	77
6.11	Aplicação da nova luminária no lado da dobradiça da porta, com um refletor cujo ângulo de reflexão é de 155°.	78
6.12	Iluminação no forno após se alterar o ângulo de reflexão para 162°.	78
6.13	Iluminação no forno após se alterar o ângulo de reflexão para 155°.	79
6.14	Refletor no lado do fecho da porta que permite a reflexão da fração de luz que chega a esta zona para o interior do forno.	79
6.15	Iluminação no forno após a aplicação final da luminária de maior comprimento e de dois refletores. (a) Forno sem tabuleiros. (b) Forno com tabuleiros.	80
6.16	Aplicação real da luminária LED na zona inferior da porta.	82
6.17	Iluminação no forno com tabuleiros após se aplicar uma luminária LED na zona inferior da porta.	82
7.1	Placa intermédia da lateral direita de uma câmara <i>Modulram</i> atual, com os componentes elétricos montados.	86
7.2	Esquema da nova cavidade na lateral direita, onde a distância da luminária LED à câmara é máxima.	86
7.3	Esquema da nova cavidade na lateral direita, onde a luminária LED se encontra numa distância intermédia em relação à câmara do forno.	87
7.4	Furação atual na lateral direita do forno <i>Modulram</i>	88
7.5	Abertura na placa superior com filtro, para arrefecimento da lateral direita do forno <i>Modulram</i>	88
8.1	Montagem da chapa com a luminária LED e os refletores.	92
8.2	Modelação 3D da nova cavidade de iluminação.	93
8.3	Componentes do novo sistema de iluminação montados.	93
8.4	Placas laterais direitas alteradas de forma a colocar a nova cavidade de iluminação.	94
8.5	Zona traseira da cavidade de iluminação, totalmente isolada nos lados.	94
8.6	Posicionamento das sondas para a realização dos ensaios no forno <i>Modulram</i>	95
9.1	Comparação da iluminação na câmara de ensaios. Com a luminária ligada (em cima) e desligada (em baixo).	98
9.2	Sistema de iluminação com luminária LED sem isolamento aplicado nas laterais.	99
9.3	Lateral direita do forno <i>Modulram</i> com chapas extra-perfuradas.	100
9.4	Lateral direita do forno <i>Modulram</i> com chapas de rasgos retangulares.	100
9.5	Aberturas na cobertura do forno para saída de ar quente.	101
9.6	Aberturas na traseira do forno <i>Modulram</i>	102
9.7	Vista lateral do vidro duplo aplicado.	103
9.8	Ventilador aplicado no topo do forno, criando extração de ar quente.	105
9.9	Ventiladores aplicados na traseira do forno, um por câmara.	106

10.1	Evolução das temperaturas em estudo com o tempo de funcionamento do forno, para os Casos 1 e 2.	108
10.2	Comparação da evolução da T_{LED} com o uso de várias chapas exteriores.	109
10.3	Comparação da evolução da $T_{Ambiente}$ com o uso de várias chapas exteriores.	110
10.4	Evolução das temperaturas em estudo com o tempo de funcionamento do forno, para os Casos 5 e 6.	111
10.5	Evolução das temperaturas em estudo com o tempo de funcionamento do forno, para os Casos 4 e 7.	112
10.6	Comparação da evolução das temperaturas entre os casos 5 e 9.	113
10.7	Evolução das temperaturas em estudo com o tempo de funcionamento do forno, para os Casos 6 e 10.	114
10.8	Evolução da temperatura da luminária LED com o tempo, para várias configurações com os ventiladores na traseira do forno.	115
11.1	Alterações na chapa da porta, assinaladas a vermelho.	119
11.2	<i>LED Driver</i> preferível para o uso com a luminária LED <i>BJB 77.116.1005</i> [24].	121

Parte I

Enquadramento

Capítulo 1

Introdução

O presente relatório tem por intuito descrever o processo de desenvolvimento de soluções otimizadas de iluminação para dois fornos industriais, cuja finalidade é a cozedura de produtos alimentares como o pão, *croissants*, pastéis de nata, *pizzas*, entre outros produtos de padaria/pastelaria. O primeiro forno em estudo é designado por *Turboram* e é um forno de convecção (forno ventilado), sendo que o segundo forno em estudo é um forno de módulos, sem ventilação, designado por *Modulram*. Este projeto surge no âmbito do estágio curricular decorrido na *Ramalhos S.A.*, integrado no 2.^o semestre do 5.^o ano do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, da Universidade de Aveiro.

1.1 *Ramalhos S.A.*

A *Ramalhos* é uma sociedade anónima em que a sua sede social situa-se no lugar do Covão, freguesia de Valongo do Vouga, concelho de Águeda, distrito de Aveiro. Como atividade principal, o fabrico de fornos e acessórios para panificação, pastelaria e restauração é a base desta instituição, que, até meados do mês de Junho de 2019, contava com 135 trabalhadores.

Como princípios da empresa e fundamentais ao desenvolvimento sustentável de qualquer atividade, a *Ramalhos S.A.* destaca a força empreendedora, a inovação permanente, a visão estratégica de longo prazo e, o comprometimento na completa satisfação dos clientes [26].

Atualmente a *Ramalhos S.A.* pertence ao grupo ARA-SGPS, S.A. que, para além da Entidade de Acolhimento deste estágio, detém ainda as empresas *Exporlux*, *Soneres*, *Light Design* e *SAB*. Dando seguimento ao espírito empreendedor do grupo, foi constituída a *Ramalhos-Brasil*, empresa sediada no Brasil, país este que apresenta uma das maiores economias do mundo, e que se posiciona como plataforma para todo o mercado da América Latina [26].

Relembrando o seu passado, a *Ramalhos* teve a sua origem em 1967 e a sua génese remonta a uma pequena unidade produtora de fornos de alvenaria de cariz meramente familiar. Impulsionada pelo reconhecimento da qualidade, eficácia e êxito dos produtos comercializados e serviços prestados, a empresa rapidamente foi expandindo, fortalecendo-se com as indispensáveis estruturas materiais, humanas, organizativas e financeiras [26].

Tendo conseguido a liderança do mercado nacional nas primeiras décadas da sua

existência, a *Ramalhos* iniciou a sua internacionalização nos finais dos anos 80, tendo conseguido afirmar-se como marca de referência nos principais mercados internacionais [26]. No ano de 2018 a empresa apresentou uma percentagem de exportação de 74,7% e no ano de 2019, desde o seu início até ao mês de Maio, inclusive, esta taxa fixou-se nos 75,2%. A exportação é de tal forma importante para a empresa que esta conta hoje com parceiros em todo o mundo. Nos primeiros cinco meses do ano de 2019, os principais mercados de vendas da empresa incluíam a Espanha, com uma percentagem do valor de vendas na ordem dos 45,96%, o mercado nacional, com 24,83%, o Brasil, com 18,84%, a França com 4,80% e os Estados Unidos, com 2,45%. Esta instituição vende de forma sistemática para 26 países, em todos os 5 continentes.

A experiência internacional obrigou a empresa a alargar substancialmente a sua gama de equipamentos e a reger-se pelos mais elevados parâmetros de qualidade dos mercados mais exigentes [26]. Hoje em dia a vasta gama de produtos da empresa inclui fornos de convecção, em que um exemplo destes é o forno *Turboram*, em estudo neste projeto, fornos modulares, como o *Modulram*, também em análise neste estágio, fornos de tubos anelares, fornos de lar fixo, fornos rotativos e ainda fornos para leitões. Em todas estas gamas existe um grande número de variantes, com características adaptadas em função das necessidades dos clientes. No ano de 2018 a empresa contou com um número total de 3713 fornos vendidos das mais variadas gamas. Destes, 3201 foram exportados. No mesmo ano, 1482 fornos *Turboram* foram vendidos, correspondendo a 39,9% das vendas. Uma outra gama de fornos com elevada saída é o *Turboram XL*, semelhante ao anterior no sentido de se situar na categoria de fornos de convecção, mas em dimensões bastante superiores. A percentagem de vendas deste produto atingiu os 30,0% no ano de 2018. Os fornos estáticos, modulares situam-se na terceira posição de vendas com uma percentagem de 16,21% do total de vendas. Sendo dois dos fornos mais vendidos anualmente, a importância dos fornos em estudo e do seu constante aprimoramento é enorme. O projeto de desenvolvimento de soluções de iluminação efetuado neste estágio curricular procura incorporar a filosofia de inovação permanente dos produtos, que constitui um aspeto característico da *Ramalhos S.A.*.

1.2 Enquadramento do trabalho a desenvolver

A iluminação em fornos industriais é atualmente assegurada na maioria dos casos por lâmpadas de halogéneo. O tema em estudo deste estágio vem na necessidade existente na substituição destas lâmpadas por iluminação LED, face à descontinuidade da utilização de lâmpadas de halogéneo prevista a curto prazo.

Nos dois fornos industriais em estudo, pertencentes à marca da empresa *Ramalhos S.A.*, é possível a obtenção de temperaturas superiores aos 300°C no seu interior, o que, por transferência de calor, aquece os componentes envolventes, sujeitando toda a vizinhança a temperaturas elevadas. O principal obstáculo ao desenvolvimento pretendido neste trabalho reside no facto de que, a altas temperaturas e num longo período de tempo, a luminosidade do LED tende a diminuir, assim como o seu tempo de vida, existindo ainda a alteração da sua cor. Alguns estudos apontam para que um aumento de 10 a 15°C na temperatura de junção do LED possa diminuir o seu tempo de vida em 50% [37]. Também num outro estudo verificou-se que, para 70% de luminosidade de saída do LED e para uma temperatura da junção de 63°C, o tempo de vida útil do LED calculado

seria de 37.000 horas, ao passo que para uma temperatura de 74°C este tempo seria de apenas 16.000 horas, correspondente a uma redução de 57% no tempo de vida útil, com o aumento de apenas 11°C [15].

Também a possibilidade de o LED ou outros componentes se danificarem devido ao ambiente extremo a que estarão sujeitos alerta para um desenvolvimento cuidado de uma solução que promove o arrefecimento do meio envolvente da lâmpada ou luminária LED.

Normalmente, a luminária LED tem um valor máximo de temperatura a que pode estar sujeita, definido pelo fabricante. Este valor tipicamente anda à volta dos 80°C, no entanto, no caso de módulos LED especiais ou de lâmpadas LED fabricadas para aplicações em ambientes extremos, estas temperaturas podem variar na ordem dos 120°C ou até mesmo 140°C. Este parâmetro, associado à luminosidade do LED tornam-se decisivos neste desenvolvimento, já que é necessária uma boa iluminação no interior do forno de forma a serem visíveis os alimentos no processo de cozedura, em qualquer zona da câmara do forno.

O uso da iluminação LED em fornos industriais é uma tecnologia recente e como tal existe pouca ou nenhuma investigação pela comunidade científica. A nível de mercado mundial, a falta de informação sente-se aquando de uma pesquisa em torno das maiores empresas produtoras de fornos industriais.

O estudo proposto visa à procura de possíveis soluções capazes de minimizar as temperaturas na região do LED, tendo em consideração aspetos não só térmicos, mas também dimensionais e espaciais relacionados com os dois equipamentos distintos em estudo.

1.3 Motivação e objetivos

A principal motivação deste trabalho trata-se da falta de existência de situações semelhantes já existentes no mercado mundial, o que faz deste desenvolvimento um desafio necessário, já que a substituição da solução de iluminação utilizada em fornos industriais atualmente por iluminação LED prevê-se necessária num horizonte próximo. Desta forma, o presente trabalho presume-se com um valor acrescentado para a empresa *Ramalhos S.A.*, assim como para o aluno.

Outras motivações são a possibilidade de aplicação dos conhecimentos retidos ao longo do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica numa situação prática, nomeadamente a aplicação de conhecimentos de transferência de calor, assim como a integração do aluno numa empresa, o que contribui para a experiência profissional do mesmo.

Com o intuito de se obterem resultados positivos no espaço de tempo existente para o desenvolvimento deste tema de estágio, traçaram-se os objetivos listados abaixo, comuns ao trabalho a desenvolver em cada forno:

- Escolha de uma solução LED com uma luminosidade aceitável tendo em conta a sua aplicação;
- Inventariação de possíveis soluções capazes de satisfazer as necessidades térmicas do projeto e ainda serem adequadas à capacidade de industrialização da empresa;
- Realização de ensaios experimentais associados às soluções propostas com o propósito de comparar valores com o caso atual e averiguar a viabilidade das soluções;

- Desenvolvimento da proposta para eventual obtenção de um protótipo.

No final deste estágio é importante a obtenção de um sistema que não só permite a existência da iluminação LED nos fornos em estudo como também vá ao encontro da melhor solução a nível térmico e económico.

Capítulo 2

Estado da Arte

Nesta secção será realizada uma abordagem ao estado da arte de vários modos. No subcapítulo 2.1 serão abordadas algumas das soluções de arrefecimento de LEDs já estudadas pela comunidade científica e já existentes. O subcapítulo 2.2 tem por objetivo aludir às soluções usadas em fornos industriais de empresas concorrentes, num panorama mundial. Os subcapítulos 2.3 e 2.4 têm por finalidade a contextualização do trabalho a realizar, tendo em conta os fornos industriais em estudo. Desta forma, a familiarização com estes equipamentos será retratada abordando algumas das suas características principais assim como a escolha da posição dos LEDs nos dois fornos. O subcapítulo 2.5 aborda a situação atual de iluminação, procurando encontrar conhecimentos necessários sobre as lâmpadas de halogéneo. No subcapítulo 2.6 é introduzida a nova solução de iluminação, as lâmpadas LED, procurando-se ainda analisar as várias ofertas comerciais existentes, assim como proceder à escolha das lâmpadas/luminárias LED a utilizar nos estudos deste projeto.

2.1 Arrefecimento de LEDs

Um LED possui uma eficiência energética, definida como a razão entre a energia fornecida ao LED com utilidade para a iluminação (energia útil) e a energia total fornecida ao mesmo, na ordem dos 30%, o que comparativamente a uma lâmpada incandescente, com uma eficiência de apenas 5%, é um valor bastante apreciável. No entanto, por outras palavras, é necessário ter em conta que 70% da energia consumida por um LED é convertida em calor (energia dissipada) [18].

O método mais comum de arrefecimento de lâmpadas ou luminárias LED passa pelo uso de dissipadores de calor acoplados à estrutura LED. Estes dissipadores de calor não são mais do que um conjunto de alhetas, que permitem a obtenção de taxas de transferência de calor mais elevadas, devido ao aumento da área de contacto com o ar ambiente. O calor gerado no LED deve ser conduzido para a placa subjacente ao mesmo e de seguida para dissipadores de calor ou caixas/quadros das luminárias LED, onde, por último, é libertado para o ambiente envolvente através de convecção [15].

O arrefecimento pode ocorrer de forma passiva ou ativa. Estas são diferenciadas pelo facto de serem utilizados equipamentos externos consumidores de energia ou não. De uma forma genérica, esta separação está relacionada com o uso de convecção natural ou forçada para a devida dissipação do calor gerado. No caso da iluminação LED a convecção

natural é preferível, já que não necessita do uso adicional de ventiladores ou outro tipo de consumo elétrico. Também o baixo barulho associado a esta solução torna-a a mais apreciada. No entanto, dissipadores de calor por convecção natural são menos efetivos, termicamente, assim como menos compactos e mais pesados, sendo por isso necessário um design dos mesmos cuidado, por forma a garantir a performance térmica requerida [18; 34]. Os meios de arrefecimento ativos são usados predominantemente em lâmpadas LED de maiores potências [22].

2.1.1 Métodos passivos de arrefecimento de LEDs

Estudos associados ao design da eficiência de dissipadores de calor por convecção natural para aplicações LED têm sido alvo de alguma atenção por parte da comunidade de transferência de calor, focando essencialmente em variantes usando as clássicas alhetas do tipo pino ou alhetas em linha reta [18]. Nomeadamente, Costa e Lopes [34] desenvolveram um dissipador de calor radial tendo como aspetos de design não só a performance térmica mas também a redução do peso do componente, já que este irá garantir custos associados ao seu fabrico inferiores. A temperatura crítica da luminária LED usada neste estudo era de 70°C e foi considerada uma temperatura ambiente na ordem dos 35°C. O projeto levou ao encontro de um dissipador de calor com uma massa final de 0,244 kg e uma resistência térmica de 1,271°C/W.

Outros estudos focaram também no material utilizado no fabrico dos dissipadores de calor. A grande maioria dos estudos utiliza ligas de alumínio. No entanto, o processo de fabrico associado é crítico neste aspeto, já que a condutibilidade térmica do alumínio pode variar significativamente dependente do mesmo. Dissipadores de calor de alumínio extrudido têm condutibilidades térmicas bastante superiores às do alumínio fundido [22]. Já a condutibilidade térmica de estruturas de alumínio obtidas por processos aditivos situa-se por volta de 175 W/mK, sendo este um valor inferior ao de alumínio comum obtido por extrusão [18]. Alexandersen *et al.* [18] estudaram através de otimização de topologia dissipadores de calor em alumínio obtidos por processos aditivos e compararam resultados com alhetas de pinos cilíndricos. No estudo a temperatura ambiente usada foi de 23,5°C. Verificou-se que a performance das alhetas de pinos é inferior à dos *designs* em estudo, obtidos por processos aditivos, para ambas as orientações, vertical e horizontal. A resistência térmica obtida para a solução de alhetas do tipo pino revelou-se 20% superior. O estudo concluiu que, colocando as alhetas nas extremidades da estrutura de suporte, deixando assim o centro oco, obtêm-se velocidades do fluxo superiores. A existência de alhetas no núcleo, como acontece nas alhetas de pinos, gera uma pressão estagnada nessa região. Estes pontos de estagnação aumentam a força de arrasto, não permitindo o fluxo de ar acelerar. Com uma maior velocidade no núcleo obtêm-se melhores valores de coeficiente de transferência de calor, o que compensa a falta de alhetas. Cho *et al.* [8] desenvolveram um compósito de termoplástico baseado em grafeno, obtido por um processo de injeção, para uso em dissipadores de calor. Os resultados foram satisfatórios, concluindo que este compósito pode ser usado em aplicações de gestão térmica aplicadas a componentes eletrónicos, como LEDs.

O tratamento superficial de dissipadores de calor também é um aspeto relevante, já que este influencia a dissipação do calor por radiação. Estudos apontam para uma contribuição máxima dos efeitos da componente de radiação térmica no total de calor transferido em dissipadores de calor radiais na ordem dos 27% [3]. Park *et al.* [3]

estudaram os efeitos da emissividade na transferência de calor. Para o aumento da mesma, de 0,2 para 0,8, a temperatura obtida diminuiu $1,5^{\circ}\text{C}$ e o *ratio* entre a componente de radiação e o total de calor transferido aumentou de 12,2% para 25,6%. Jang *et al.* [5] também estudaram o efeito da emissividade na dissipação de calor. Experimentalmente comparou-se um dissipador de calor de alumínio sem tratamento superficial, levando a uma emissividade de 0,1, com um dissipador com tratamento superficial de anodização do alumínio em preto, com emissividade de 0,8. Os resultados mostram que a resistência térmica do dissipador de calor com o tratamento superficial é 13% menor que a do dissipador de calor sem qualquer tratamento superficial. Este tratamento aumenta a emissividade do material e como tal a taxa de transferência de calor por radiação. No mesmo estudo, verificaram-se computacionalmente os resultados anteriores. Comparando duas emissividades, de 0 ou seja, apenas considerando convecção natural, e de 0,9, obteve-se um *ratio* entre a transferência de calor por radiação e a transferência de calor total de aproximadamente 25%, para o ultimo caso. Os resultados com o valor da emissividade de 0,9 reduziram a resistência térmica em 21,9%, comparando ao caso com emissividade igual a 0.

Uma outra tecnologia de arrefecimento passivo de componentes eletrónicos, como LEDs de alta potência e/ou LEDs em condições de trabalho extremas passa pelo uso do tubo de calor [13].

O tubo de calor não é mais que um tubo fechado nas suas extremidades, onde, no seu interior, existe um fluido, tipicamente água, onde ocorre a sua mudança de fase, de modo a potencializar a dissipação de calor. O seu princípio de funcionamento encontra-se esquematizado na Figura 2.1. Uma das extremidades do tubo de calor é colocada em contacto com uma fonte de calor, como os LEDs. Quando se dá a transferência de calor da fonte para o tubo, ocorre a evaporação do fluido operante, fazendo com que o vapor se movimente até à outra extremidade. Esta outra região deve-se encontrar conectada a um dissipador de calor e preferencialmente num local ventilado. Após a dissipação do calor para o meio ambiente, o fluido operante condensa. O fluido retorna novamente até ao lado evaporador do tubo de calor, através de ação capilar, caso o tubo de calor contenha no seu interior um material poroso que permita este efeito, ou por ação de forças gravitacionais, caso o lado condensador se encontre sobre o evaporador. Com a repetição deste ciclo esta tecnologia permite a obtenção de elevadas taxas de transferência de calor [25]. Outras vantagens desta tecnologia são o seu baixo custo de fabrico e a sua fácil manutenção [13].

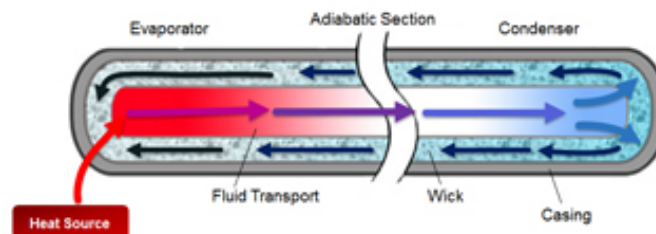


Figura 2.1: Esquema do funcionamento de um tubo de calor [25].

G. Sosoi, et al. [13] estudaram, através de simulação computacional, o uso desta tecnologia para o arrefecimento de LEDs de elevada potência. Neste estudo foi utilizado um tubo de calor conectado, no seu lado do evaporador, à junção do LED e o lado do condensador possuía 10 alhetas radiais para a dissipação do calor. Nesta simulação, a lâmpada situa-se numa região a 30°C e onde o ar encontra-se estagnado (velocidade do ar nula). O tubo de calor atravessa essa região, uma região isolada e por fim uma zona exterior na qual se encontra o lado do condensador. Esta última região encontra-se a 35°C e a velocidade do ar na mesma foi variada entre 5 casos: 0 km/h; 0,1 km/h; 0,4 km/h; 0,7 km/h e 1,0 km/h. O tubo de calor simulado funciona através da ação da gravidade, já que se encontra numa posição vertical, onde o condensador está sobre o evaporador. A potência do LED a simular foi de 10 W. Os resultados mostram uma descida de temperatura da junção do LED com o aumento da velocidade do ar na região do condensador do tubo de calor. A temperatura da junção do LED máxima disponibilizada pelo fabricante neste caso seriam os 80°C. Foram conseguidas temperaturas inferiores a este valor a partir do terceiro caso (velocidade do ar=0,4 km/h), onde se registou uma temperatura de 78,15°C. Neste estudo confirmaram que a utilização de um tubo de calor pode reduzir a temperatura da junção dos LEDs. Esta temperatura está fortemente dependente das condições do espaço onde ocorre a condensação do fluido operante no interior do tubo de calor.

2.1.2 Métodos ativos de arrefecimento de LEDs

No campo do arrefecimento ativo de lâmpadas de maiores potências alguns estudos também foram conduzidos. Mais recentemente, X. Lin *et al.* [37] estudaram o uso da combinação de um arrefecedor termoelétrico e um dissipador de calor de micro canais com água como fluido operante com o intuito de melhorar a gestão térmica de lâmpadas LED de elevada potência e compararam os resultados a outros três modelos distintos, sendo estes o uso de apenas um dissipador de calor com micro canais, o uso de um dissipador de calor comum arrefecido a ar por convecção natural e o uso de um arrefecedor termoelétrico combinado com um dissipador de calor a ar. Um arrefecedor termoelétrico, conforme ilustrado na Figura 2.2, é um dispositivo que converte energia elétrica em energia térmica e que pode ser utilizado em aplicações de arrefecimento ou de aquecimento. O dispositivo é constituído por duas placas. Quando lhe é aplicada uma corrente elétrica uma destas torna-se quente e a outra fria [21]. Na aplicação em LEDs a placa fria fica conectada ao substrato do LED enquanto que a placa quente fica conectada ao dissipador de calor, seja este de micro canais ou arrefecido a ar. O módulo LED em estudo tinha uma potência de 20 W e o design das soluções apresentadas neste artigo teve em consideração a sua aplicação em faróis de automóveis, pelo que o espaço confinado foi um aspeto importante.

O estudo concluiu que a utilização de um arrefecedor termoelétrico combinada com um dissipador de calor a ar é a pior solução para a dissipação do calor e que a solução com a maior *performance* de arrefecimento é a constituída pelo arrefecedor termoelétrico e pelo dissipador de calor de micro canais. A influência de fatores como a corrente aplicada ao arrefecedor termoelétrico, a temperatura ambiente, a temperatura de entrada da água no dissipador de calor de micro canais e a velocidade do fluxo da água foi estudada. O fator mais importante foi a corrente aplicada ao arrefecedor termoelétrico, seguido da temperatura da água na entrada no dissipador de calor, a temperatura ambiente e por



Figura 2.2: Arrefecedor termoelétrico igual ao usado por X. Lin *et al.* [17].

último a velocidade do fluxo de água. Desta forma, a temperatura do LED pode ser controlada mais eficazmente ajustando a corrente aplicada e/ou a temperatura da água na entrada do dissipador de calor.

A temperatura do LED obtida em condições de trabalho severas, onde a temperatura ambiente é de 80°C e a temperatura da entrada da água era de 55°C foi de apenas 60°C. A corrente aplicada ao arrefecedor foi de 2 A e a velocidade do fluxo foi 0,49 m/s. Concluiu-se que é possível obter temperaturas do LED inferiores à temperatura ambiente através do uso do arrefecedor termoelétrico.

2.1.3 Outras abordagens para a gestão térmica de soluções LED

Não só o arrefecimento de LEDs procura aumentar o tempo de vida útil de um LED. Este tempo define-se como aquele necessário até que se atinjam 70% de manutenção de luminosidade, ou seja, quando o fluxo de luminosidade do LED é 70% daquele que o LED teria quando nunca utilizado anteriormente. Este tipo de convenção é muitas vezes denominado por L_{70} .

Um outro sistema que não procura o arrefecimento dos LEDs mas que ainda assim busca uma melhor gestão térmica destes componentes trata-se do uso de um *driver* que de uma forma inteligente protege os LEDs contra o sobreaquecimento. Este sistema consiste na redução da corrente aplicada ao LED, o que irá reduzir a luminosidade produzida, que por sua vez reduz a temperatura na junção. A corrente aplicada pode ser atenuada até um mínimo de 25% daquilo que seria a corrente normalmente aplicada ao LED [15].

No caso em estudo neste estágio o arrefecimento dos LEDs deverá ter em conta que a temperatura ambiente na localização das luminárias LED é muito mais elevada do que aquela utilizada nos estudos referidos anteriormente. Por esse motivo o calor gerado não será dissipado para o ambiente de uma forma simples. Assim, o uso de dissipadores de calor por convecção natural torna-se uma opção viável apenas se, por outros métodos, se conseguirem obter temperaturas ambiente mais baixas. O arrefecimento ativo poderia ser uma alternativa bastante mais viável, no entanto, as propostas de soluções iniciais para o trabalho em estudo passam pelo uso da convecção natural como método de dissipação de calor, pelas vantagens que esta traz.

2.2 Análise de concorrência

De modo a obter mais informações sobre o estado atual da iluminação em fornos industriais, foi realizada uma pesquisa em catálogos e *sites* das empresas consideradas as mais importantes a nível mundial, na área dos fornos industriais para padaria e pastelaria. A análise da concorrência tornou-se um processo complicado, devido à falta de informação existente acerca do uso de iluminação LED nesta área.

A análise incidiu sobre fornos de empresas como a alemã *MIWE*, a sueca *Revent*, a italiana *Unox*, a sueca *Sveba Dahlen*, a alemã *Wachtel*, a eslovena *FINES*, a espanhola *Distform-mychef*, entre outras. Uma característica importante é que, comparando os fornos de marcas concorrentes aos respetivos da *Ramalhos*, ou seja, tanto em fornos de convecção como em fornos de radiação, verifica-se que, regra geral, as temperaturas máximas obtidas nos fornos da concorrência são inferiores às dos fornos da *Ramalhos*. Por exemplo, fornos de convecção da *Unox* atingem uma temperatura máxima de 260°C, ao passo que o *Turboram*, da *Ramalhos*, pode elevar a sua temperatura até mais de 300°C [28; 33]. Já os fornos sem ventilação operam a temperaturas ainda superiores. Os fornos da gama *D-Series* da *Sveba Dahlen* podem operar a 330°C e os *FIN-DEKO* da *FINES* podem ser regulados até aos 300°C [11]. O correspondente da *Ramalhos* deste tipo de fornos é o *Modulram*. Esta gama de fornos atinge uma temperatura máxima superior a 350°C [27]. O arrefecimento das luminárias LED pode tornar-se mais complexo quanto maior for a temperatura máxima do forno, dependendo sobretudo da localização das mesmas.

Os resultados desta análise mostram que a iluminação LED já é uma tecnologia incorporada pela *Unox*, assim como pela *FINES* e a *Distform-mychef*. Os modelos *CHEFTOP MIND.Maps PLUS*, *BAKERTOP MIND.Maps PLUS* e *BAKERLUX SHOP.PRO* da *Unox* são três dos quais utilizam iluminação LED integrada nas portas dos fornos. Destes, os dois primeiros utilizam luminárias conforme a apresentada na Figura 2.3 [32; 33]. Segundo a marca a luz branca característica da iluminação LED traduz-se numa vantagem face à iluminação com luzes de halógeno, já que não interfere com a cor da comida [31].



Figura 2.3: Iluminação LED de alguns dos fornos ventilados da empresa *Unox* [32].

A *FINES* utiliza iluminação LED nos seus fornos de convecção, com características muito semelhantes ao forno de convecção da *Ramalhos*, o *Turboram*, nomeadamente nos *HTB* e *HTB mini*. A forma de iluminação não é explícita, indicando-se apenas nos catálogos que se utiliza iluminação LED interior de alta densidade. A título de exemplo, a marca revela no seu catálogo a aplicação de iluminação LED através da Figura 2.4 [11].



Figura 2.4: Iluminação LED dos modelos de convecção da *FINES* [11].

A *distform-mychef* utiliza iluminação LED de alta tecnologia integrada na porta dos seus fornos. Mais uma vez, mais nenhuma informação é revelada, sendo a constituição desta solução representada na Figura 2.5 [4]. Embora a imagem não seja nítida, dá a entender que a fonte de iluminação do forno se encontra numa das laterais do forno.



Figura 2.5: Iluminação LED dos modelos da *distform-mychef* [4].

De uma forma genérica, conclui-se que a iluminação LED em fornos industriais não é uma tecnologia comum. Foram encontrados alguns exemplos desta tecnologia aplicada a fornos ventilados mas nenhum exemplo de aplicação em fornos modulares. Desta forma, a complexidade deste trabalho agrava-se, assim como o mesmo se torna único. Por outro modo, as soluções a propor no caso dos fornos *Turboram* e *Modulram* poderão não derivar diretamente da análise da concorrência, o que não invalida a importância da mesma.

2.3 1º Forno em estudo: O *Turboram*

2.3.1 Características principais

O *Turboram* é um forno industrial ventilado, ou seja, por meio de convecção forçada, promove a cozedura por ar quente de vários produtos, sendo exemplos destes folhados, *croissants* e pão pré-congelado. Esta gama inclui fornos com várias dimensões, entre os quais se destacam o *Turboram 5T 60x40* e o *Turboram 9T 60x40*. O primeiro, conforme apresentado na Figura 2.6, em baixo, permite colocar cinco tabuleiros, tem uma largura de 930 mm, profundidade de 880 mm, uma altura de 670 mm e possui uma potência elétrica de 9,4 kW. O segundo, apresentado na Figura 2.6, em cima, possui a mesma largura e profundidade do primeiro, no entanto tem maior altura, de 1030 mm, o que permite acumular 9 tabuleiros. Devido ao seu espaço superior, também as resistências utilizadas neste forno têm potências maiores, sendo a potência nominal deste forno de 13,0 kW [28].



Figura 2.6: *Combi* de dois fornos *Turboram* [26].

Entre as principais características deste equipamento industrial destacam-se as listadas abaixo [28].

- A construção do forno é totalmente em aço inox;
- Possui um sistema de vapor por injeção;

- A porta do forno é constituída por 2 vidros, com a inclusão de um espaçamento entre ambos, que permite a refrigeração dos mesmos por convecção natural;
- Possibilidade de abertura fácil do vidro interior para limpeza e substituição das lâmpadas
- A iluminação das câmaras tem a opção de temporização para economia do consumo;
- O ventilador utilizado permite a opção entre 2 velocidades distintas, para adaptação a diferentes produtos;
- O motor do ventilador tem auto-inversão para uma maior uniformidade de cozedura;
- Possui avisos de manutenção.

2.3.2 Escolha da localização dos LEDs no forno

Num começo do estágio tentou-se procurar qual a melhor localização no forno para colocar as luminárias LED. Todas as placas em aço inox da câmara do forno são revestidas por isolamento térmico constituído por duas camadas de lã de rocha e uma camada de lã de vidro. Esta situação restringe a colocação de luminárias LED nas paredes laterais, superior ou inferior do forno. Além deste impedimento, também as temperaturas alcançadas nesta localização não seriam satisfatórias para os LEDs e o seu arrefecimento poderia ser comprometido. Outra desvantagem na colocação dos LEDs nas paredes do forno é o facto de os tabuleiros esconderem as luminárias quando possuem os produtos a cozer, o que irá reduzir a iluminação no interior do forno. Na situação atual são utilizadas quatro lâmpadas de halógeno localizadas na porta. Em fornos de dimensões superiores, como é o caso do *Turboram 9T 60x40* ou do *Turboram 10T 80x60*, duas lâmpadas do lado do fecho da porta (lado esquerdo) estão localizadas mais em cima, enquanto que do lado da dobradiça da porta (lado direito) as duas lâmpadas estão numa zona inferior de acordo com a Figura 2.7. Esta diferença de alturas permite uma melhor uniformidade de iluminação no forno. São também utilizados dois refletores, um de cada lado, para permitir a alteração na direção de iluminação de forma a que esta incida sobre as superfícies que constituem a câmara do forno.

A característica principal da porta de um *Turboram* é, conforme descrito na listagem anterior, a existência de dois vidros, separados por um canal de ar com uma espessura considerável. A Figura 2.8 mostra um pormenor da vista superior de um modelo 3D de uma porta de um *Turboram 9T*. A verde encontra-se o vidro interno da porta e a preto o vidro externo da porta. Entre ambos, para além do corpo em si da porta é possível observar um espaçamento de ar para refrigeração. Mais vistas e pormenores da porta de um *Turboram* serão abordados no capítulo seguinte. Esta característica tem como vantagens a obtenção de uma resistência térmica satisfatória, o que permite a retenção do calor no interior da câmara do forno. As temperaturas na porta são bastante mais reduzidas que aquelas que se obteriam caso a luminária LED estivesse diretamente incorporada na câmara do forno.

Por todos os motivos descritos anteriormente a escolha da localização dos LEDs iniciou na porta do forno, onde será necessário o uso de luminárias LED com aplicação especial em portas de fornos. Numa situação inicial, a posição dos LEDs escolhida foi nas



Figura 2.7: Iluminação atual na porta de um *Turboram 10T 80x60*.

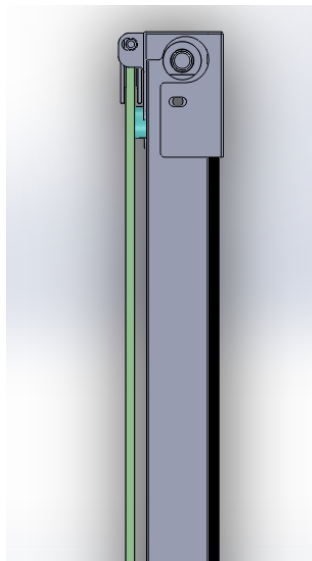


Figura 2.8: Pormenor na vista de cima da porta de um *Turboram 9T*.

calhas laterais da porta, colocando uma luminária LED de cada lado. Desta forma, nos fornos de 5 tabuleiros estas seriam colocadas relativamente a meio da porta e nos fornos de maiores dimensões seriam colocadas com diferentes alturas, de um lado mais em cima e no outro lado mais em baixo, conforme o estado atual das lâmpadas de halogéneo.

2.4 2º Forno em estudo: O *Modulram*

2.4.1 Características principais

A gama *Modulram* apresenta uma extensa lista de fornos com várias dimensões. O seu nome tem origem no facto de ser um forno completamente modular, sendo este constituído por câmaras totalmente independentes e onde existe a possibilidade de sobreposição das mesmas até 5 níveis, caso pedido pelo cliente, sendo que o mais comum são fornos com 3 ou 4 câmaras. É um forno elétrico, compacto e ideal para laboração à vista do público, sendo ideal para a hotelaria e pequena padaria/pastelaria. Por possuir uma vasta gama de variantes a sua composição é adequada às necessidades específicas do cliente [27]. Na Figura 2.9 encontra-se um exemplo de um *Modulram Classic* de 3 câmaras independentes.



Figura 2.9: Forno *Modulram* de 3 câmaras [26].

As características principais deste modelo são as listadas abaixo:

- É um forno estático, onde não existe ventilação e portanto o processo de cozedura dos produtos ocorre sobretudo por transferência de calor por radiação.
- Por câmara são controladas 3 temperaturas, do teto (zona superior da câmara), do lar (zona inferior da câmara) e da porta (zonas superior e inferior próximas da porta). As duas primeiras temperaturas são diretamente selecionadas no painel ao passo que a temperatura da porta é ajustada através de uma percentagem acrescentada ao valor das anteriores, de forma a permitir uma melhoria na cozedura do produto [27];

- As câmaras têm a possibilidade de quatro alturas úteis, sendo estas designadas por câmaras normais (16 cm de altura), altas (21 cm), super altas (26 cm) e super-super altas (31 cm) [27];
- Todas as placas do forno são construídas em aço inoxidável [27];
- As câmaras são de construção especialmente reforçada para suportar temperaturas de 350°C, ou superiores a pedido [27];
- Possibilidade de adição de um sistema de vapor independente por cada câmara. A ligação de água e vapor é realizada em cobre e aço inoxidável [27].
- Por câmara existem resistências tubulares no teto e no lar, que permitem uma rápida subida de temperatura [27].
- Os lares são construídos em material refratário, ou seja, um material capaz de manter as suas propriedades físico-químicas mesmo a elevadas temperaturas, com 25 mm de espessura. Este componente encontra-se sobre as resistências do lar e os tabuleiros com o produto a cozer são colocados diretamente sobre o mesmo [27];
- As portas deste forno são de construção muito robusta com 30 mm de espessura e com vidro temperado duplo [27];
- Possui isolamento térmico em todas as faces da câmara do forno, excetuando-se a porta. Este sistema de isolamento foi desenvolvido de forma a manter o exterior do forno a temperaturas ligeiramente superiores à temperatura ambiente [27].

A largura e a profundidade deste tipo de câmaras podem assumir variados valores, permitindo a capacidade de colocar um ou vários tabuleiros, também estes com dimensões variadas. Desta forma o número de resistências a utilizar por câmara depende das dimensões do forno e, na gama dos *Modulram Classic* com resistências de 240 W, a potência elétrica total do forno para o aquecimento pode variar dos 3,36 kW para o caso do *Modulram* de apenas 1 tabuleiro, até aos 12,32 kW para o caso do *Modulram* de maiores dimensões. No caso de câmaras especiais onde é necessário obter temperaturas mais elevadas, como é o caso dos módulos para pastéis de nata, as resistências usadas podem possuir uma potência superior [27]. É importante referir que para qualquer câmara do *Modulram* existe um termostato de segurança que desativa o funcionamento do forno quando se atingem os 400°C.

Para além dos fornos *Modulram Classic* e das câmaras especiais para pastéis de nata, existem ainda os fornos modulares para *pizzas*, conhecidos como *Modulram Pizzaiolo*. Estes diferem-se do modelo clássico já que possuem dimensões e potências das resistências diferentes, sendo especialmente concebidos para *pizzas*. Também o seu exterior é diferente, já que a sua fachada pode ser construída na cor antracite ou negra, para se obter um aspeto mais atrativo. A potência elétrica deste tipo de fornos é bastante superior à dos fornos normais, já que para a cozedura destes produtos são necessárias temperaturas maiores que as típicas dos fornos clássicos [27].

2.4.2 Escolha da localização dos LEDs no forno

No estado atual as lâmpadas de halogéneo possuem uma aplicação numa cavidade na lateral do forno, protegida por um vidro de 5 mm de espessura, conforme se demonstra

na Figura 2.10. Na grande parte dos casos das câmaras *Modulram* existe apenas uma lâmpada de halogéneo por forno, excetuando-se fornos em que a profundidade útil interior é de 1,40 ou 1,65 m. Nestes casos colocam-se duas lâmpadas de halogéneo sempre no mesmo lado do quadro elétrico e do painel do forno, de forma a facilitar a instalação elétrica. Tipicamente todos estes componentes encontram-se no lado direito do forno, como é o caso do exemplo da Figura 2.9. A pedido do cliente é possível a construção de fornos onde o painel se encontra do lado esquerdo e nestes casos também a iluminação do forno se encontra nesta região.



Figura 2.10: Iluminação atual numa cavidade na lateral de uma câmara do forno *Modulram*.

Após a análise do estado da iluminação atual no forno procurou-se encontrar uma outra localização possível para as lâmpadas/luminárias LED no forno. No lado oposto ao quadro elétrico, tipicamente o lado esquerdo do forno, torna-se complicada a colocação de fontes de iluminação, já que nesta zona existe um sistema de molas da porta que permitem a abertura/fecho da mesma. Desta forma o espaço é bastante reduzido o que condiciona a aplicação/manutenção das lâmpadas. Também o facto de ser o lado oposto ao Q.E. obriga a que a ligação elétrica seja realizada entre os dois lados do forno, o que condiciona esta solução, já que os fios condutores teriam de ser atravessados por regiões onde as temperaturas são severas, o que poderia levar a avarias. Na zona de trás do forno a aplicação de uma fonte de iluminação LED é condicionada pelo facto de poder existir um sistema de vapor. Tipicamente este tipo de fornos utiliza este sistema, que é colocado na zona de trás do forno, não deixando qualquer espaço para a colocação das lâmpadas LED.

A zona superior da câmara do forno (teto) possui as resistências expostas no seu interior, o que obviamente anula esta possibilidade. Já a porta deste tipo de fornos possui um eixo de rotação horizontal e é sobretudo constituída por vidro duplo, não possuindo qualquer espaço para uma colocação da iluminação LED na porta do forno, considerando as geometrias existentes para este tipo de soluções.

Em suma, uma aplicação semelhante à situação atual é a mais vantajosa, onde a lâmpada/luminária LED deverá encontrar-se numa cavidade na lateral direita do forno comum. Nesta região existe algum espaço limitado devido à presença dos componentes do quadro elétrico, especialmente no caso das câmaras com alturas menores. No entanto é ainda possível alguma alteração à situação atual, caso necessária, por forma a beneficiar o arrefecimento das novas lâmpadas a integrar. O número de lâmpadas/luminárias LED também é uma variável do projeto, já que está fortemente conectada à luminosidade no interior do forno e ao espaço disponível.

2.5 Solução atual: Lâmpadas de halogéneo

As lâmpadas de halogéneo têm uma série de aplicações atualmente e destacam-se das demais em especial pela sua elevada luminosidade e por serem compactas. É no entanto importante referir que este tipo de lâmpadas já se encontra disponível há mais de meio século. Em 1955, Elmer Friedrich e Emmett Wiley desenvolveram a primeira lâmpada de halogéneo na *General Electric* em Nela Park, Ohio. Nesta descoberta, Friedrich observou que, ao usar pequenas concentrações de iodo nas redondezas do filamento, este permitiria que se obtivessem temperaturas mais elevadas [10].

Após o primeiro desenvolvimento, Frederick A. Mosby, também na *General Electric*, desenvolveu uma lâmpada de halogéneo mais eficiente e adaptou a lâmpada para um uso mais regular. Um outro progresso ocorreu na *Philips*, quando os seus engenheiros criaram uma lâmpada que utiliza bromo como o seu halogéneo. Esta lâmpada é mais eficiente que a de iodo e tornou-se um *standard* [10].

A lâmpada de halogéneo, também conhecida como lâmpada de halogéneo e tungsténio é uma forma avançada de lâmpadas incandescentes comuns. A sua designação deriva do facto de esta lâmpada possuir um filamento de tungsténio e, para além disso, um gás halogéneo no interior do seu bulbo. Nas lâmpadas incandescentes normais, os átomos de tungsténio sujeitos a elevadas temperaturas soltam-se do filamento. Estes átomos são depois depositados dentro do bulbo, levando ao enegrecimento das lâmpadas normais. Com o decorrer do tempo o filamento acaba por se ir tornando menos espesso até ocorrer a sua quebra [10].

Com o uso de um gás halogéneo gera-se um processo designado por ciclo de halogéneo. Este ciclo ocorre quando os átomos de tungsténio se unem quimicamente com as moléculas do gás, logo após serem libertados do filamento, não se depositando no bulbo. Quando o halogéneo arrefece, os átomos de tungsténio são novamente depositados no filamento. O halogéneo é assim muito importante pois permite parar com o enegrecimento da lâmpada e aumentar o tempo necessário para a quebra do filamento de tungsténio. De facto, inclui-se uma vantagem deste tipo de lâmpadas relativamente às incandescentes, pois o seu tempo de vida irá aumentar além de se tornar possível a elevação de temperaturas do tungsténio, em segurança. Esta temperatura superior permite também que se obtenha maior luminosidade. Neste tipo de lâmpadas o bulbo é de quartzo, para permitir o uso de temperaturas elevadas no seu interior [10].

Entre outras vantagens deste tipo de lâmpadas destacam-se o seu custo reduzido de produção e o facto de não ser necessário tempo de aquecimento, o que significa que a luminosidade máxima é obtida instantaneamente. Como maior desvantagem do seu uso destaca-se o facto de serem sensíveis à oleosidade deixada pela pele humana. Se a

lâmpada for tocada, o óleo será aquecido e pode causar a rutura do bulbo. Assim, estas lâmpadas têm risco de explosão, causando a projeção de cacos de vidro quente para o exterior [10].

As lâmpadas de halogéneo utilizadas no forno ventilado *Turboram* são o modelo *Halostar Standard* da *OSRAM*, com uma potência de 20 W. Um exemplo de uma lâmpada destas é apresentado na Figura 2.11. Como características técnicas principais, tem um fluxo de iluminação de 320 lumen, possui uma temperatura de cor de 2800 K e um tempo de vida estimado de 2000 horas. A eficiência energética está avaliada com classificação C [23].



Figura 2.11: Lâmpada de halogéneo utilizada nos fornos *Turboram* [23].

Já no caso do forno modular, *Modulram*, as lâmpadas de halogéneo usadas são o modelo *Halogen Decostar 51S Standard* do tipo GU 5.3, conforme a Figura 2.12 e possuem uma potência de 20 W, um fluxo de iluminação de 210 lumen, uma temperatura de cor de 2800 K e um tempo de vida estimado de 4000 horas. Para o caso destas lâmpadas, a eficiência energética avalia-se com classificação C [23].



Figura 2.12: Lâmpada de halogéneo utilizada nos fornos *Modulram* [23].

É sobretudo devido à eficiência energética associada a este tipo de solução de iluminação que se inicializou a descontinuação das mesmas em Portugal e nos restantes Estados-membros da União Europeia.

Quando comparadas a lâmpadas LED, estas com uma classificação igual ou superior a A, as lâmpadas de halogéneo têm um consumo de eletricidade muito superior, além de uma menor durabilidade. Alguns estudos efetuados indicam que se podem poupar milhares de milhões de dólares por ano em custos energéticos para a iluminação, com a substituição pela iluminação LED, já que se conclui que uma lâmpada de halogéneo gasta entre cinco a oito vezes mais eletricidade que uma lâmpada LED [19; 22].

Do ponto de vista ambiental, esta substituição tem um enorme impacto, já que permitiria um menor valor de emissões de dióxido de carbono, tendo em conta que, uma grande parte da energia elétrica em Portugal é assegurada por centrais termoelétricas com queima de combustíveis fósseis [19].

2.6 Solução proposta: Lâmpadas LED

2.6.1 Introdução

Sendo as lâmpadas LED um forte candidato a uma substituição no futuro de lâmpadas incandescentes normais, lâmpadas de halogéneo ou até outro tipo de lâmpadas, não só na área de iluminação em foco neste estudo, mas numa vasta gama de aplicações de iluminação, torna-se importante a obtenção de um conhecimento mais profundo sobre estas lâmpadas. O LED, sigla de *light-emitting diode*, ou seja, díodo emissor de luz, é uma fonte de luz que usa semicondutores e eletroluminescência para criar luz. Como esquematizado na Figura 2.13, o processo de eletroluminescência trata-se de um fenómeno ocorrente quando um material emite luz sendo atravessado por uma corrente elétrica ou um campo elétrico. Os LEDs possuem uma junção entre dois semicondutores, designada por junção p-n. Os eletrões passam de um cristal semicondutor para o outro, ocupando os designados "buracos de eletrões" que não são mais que a falta de carga negativa (eletrões) nesse semicondutor. No decorrer da passagem de eletrões é libertada energia, sendo assim emitidos fotões. A geração de luz ocorre num comprimento de onda específico, que pode ser alterado dependendo do material semicondutor utilizado, permitindo a obtenção de LEDs de várias cores distintas. A passagem de corrente na junção p-n é apenas possível num sentido, daí a possibilidade de os LEDs poderem ser usados como díodos [5; 9; 14].

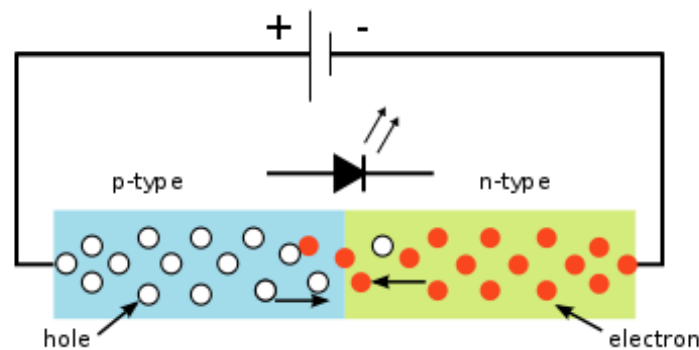


Figura 2.13: Princípio de funcionamento de um LED [2].

O fenómeno de eletroluminescência foi primeiramente observado por Henry Joseph Round, em 1907, mas foi apenas em 1961 que se descobriu o primeiro LED moderno,

sendo este um LED emissor de luz infravermelha. Este acontecimento deve-se ao trabalho de James R. Biard e Gary Pittman. Vários outros desenvolvimentos foram investigados e obtidos, com o intuito de se obter LEDs com luzes de diferentes cores. O primeiro LED de luz visível foi produzido por Nick Holonyak Jr., em 1962, com uma luz vermelha. Outra meta muito importante deve-se a Shuji Nakamura, que desenvolveu o primeiro LED de luz azul, utilizando como semicondutor o nitreto de gálio.

O LED de luz azul tem a sua importância pois foi a partir deste que se obteve o tão desejado LED de luz branca. Este é o LED que chamou a atenção do público em geral, como um potencial substituto de outras fontes de iluminação de luz branca [9]. Um parâmetro capaz de medir a brancura de um LED é a chamada temperatura de cor. Atualmente a temperatura de cor de um LED pode variar entre 2.540 a 10.000 K, o que significa que é possível obter brancos mais amarelados, designados por brancos quentes como também brancos mais azulados, designados por brancos frios. Quando comparadas às temperaturas de cor das lâmpadas de halogéneo, situadas em torno dos 2.700K e sendo por isso classificadas como um branco amarelado, as temperaturas de cor dos LEDs brancos podem ser muito superiores, possibilitando a obtenção de um branco mais natural, ideal para certos tipos de aplicação [20].

Como vantagens do uso da iluminação LED destaca-se, como já referido anteriormente, o baixo consumo energético e a elevada durabilidade quando utilizados em determinadas condições. O baixo consumo leva a que a eficácia luminosa dos LEDs, definida em lumens por watt seja também elevada quando comparada por exemplo à das lâmpadas de halogéneo, variando entre 28 e 150, conforme a aplicação. Os tempos de vida dos LEDs variam entre 20.000 e 50.000 horas. Existem ainda produtos designados por LEDs de alta qualidade que podem operar por mais de 100.000 horas, quando propriamente utilizados. Esta longevidade é aproximadamente 10 vezes maior que a de lâmpadas comuns. Entre outros benefícios está o facto de os LEDs serem recicláveis, a resistência que estes possuem contra qualquer tipo de impacto, comparativamente a lâmpadas de bulbo de vidro e o potencial na criação de ambientes de iluminação interessantes, relacionados com as várias cores disponíveis [9; 15; 22; 34].

Apesar de todas estas vantagens no seu uso, apresenta também algumas desvantagens. A principal está na verdade diretamente relacionada com o tema deste trabalho, já que os semicondutores são sensíveis ao calor e podem ser danificados pelo mesmo. Além disso, o tempo de vida útil de um LED está diretamente relacionado com a temperatura da junção a que estão expostos, no sentido em que uma maior temperatura diminui significativamente o tempo de vida do LED e conseqüentemente a sua luminosidade é reduzida ao longo do tempo [9; 15]. Outros obstáculos ao seu uso são por exemplo o facto de os LEDs utilizarem alguns metais raros. Também é notável ter em conta que, a luminosidade de um LED por si só não é muito elevada, pelo que é comum o uso de módulos, ou seja, aglomerados LED [22].

A temperatura máxima a que um LED é permitido operar é muitas vezes designada na literatura como temperatura crítica ou temperatura da junção e é dependente do fabricante. Um valor típico para este parâmetro são os 80°C [18]. Existem lâmpadas LED construídas com o especial propósito de serem aplicadas em ambientes mais agressivos, como é o caso de fornos. Nestes casos as temperaturas críticas de funcionamento estarão por volta dos 100°C a 120°C. Um exemplo de uma lâmpada deste género é a apresentada na Figura 2.14, que pertence a uma linha especial para aplicação em fornos, com uma temperatura crítica de 120°C [35].



Figura 2.14: Extreme O, lâmpada LED para aplicação em fornos [35].

2.6.2 Ofertas comerciais existentes e escolha das lâmpadas/luminárias LED a utilizar

A iluminação LED é caracterizada por um conjunto de parâmetros. São exemplos dos mesmos a temperatura crítica de operação, a temperatura de cor, o ângulo de feixe, o fluxo de luminosidade, etc.

Uma fase embrionária deste projeto incidiu na pesquisa sobre estes parâmetros, de modo a ser possível uma comparação detalhada de várias soluções de iluminação LED existentes. Segue-se uma lista dos parâmetros de escolha do LED, assim como uma breve descrição dos mesmos.

- Aplicação. Não sendo um parâmetro por si só, o tipo de aplicação da solução LED é decisivo na escolha do mesmo;
- Ângulo de feixe. Ângulo no qual a luz é distribuída. Um maior ângulo de feixe mantém a luminosidade (em *lumens*), mas diminui a intensidade do feixe (em *candelas*). A escolha deste parâmetro depende do tipo de aplicação [6];
- Temperatura de cor. Temperatura à qual um corpo negro atinge uma determinada cor quando aquecido. A escala de temperaturas de cor permite obter uma classificação respetivamente aos vários tipos de brancos existentes na iluminação LED. Menores temperaturas de cor correspondem a brancos mais amarelados e maiores temperaturas de cor correspondem a brancos mais azulados [20];
- Temperatura crítica. Temperatura máxima a que a junção do LED pode ser submetida. Depende do fabricante;
- Fluxo luminoso. Medida da energia libertada na forma de luz visível por uma fonte de luminosidade. A unidade SI do fluxo luminoso é o *lumen* [30];
- Voltagem de entrada. Voltagem nominal que deve ser fornecida ao LED. Este parâmetro é importante já que dependendo do mesmo pode ser necessário o uso de uma fonte de alimentação (LED *driver*) ou não. Uma maior voltagem aplicada aumenta a luminosidade, no entanto pode danificar a lâmpada LED, assim como diminuir o seu tempo de vida;

- Consumo energético. Potência de consumo da luz LED. Como referido no subcapítulo anterior o consumo energético da iluminação LED é muito baixo comparado a lâmpadas de halogéneo;
- Eficácia luminosa. Medida da eficiência da luz LED. É medida em *lumen* por *Watt*;

No âmbito deste projeto o parâmetro mais relevante é obviamente a temperatura crítica. No entanto, também o fluxo luminoso combinado com o ângulo do feixe são relevantes, já que é importante garantir a iluminação na totalidade da câmara do forno. Uma análise comparativa foi efetuada e registada nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 entre três soluções LED da *Vossloh-Schwabe* criadas para especial aplicação em fornos, duas soluções da BJB: a *BJB 77.110* e a *BJB 77.116* e ainda uma lâmpada LED comum do tipo GU10 da *OSRAM*. Esta última é a única lâmpada que não é fabricada especialmente para a aplicação em fornos (daí a sua baixa temperatura crítica), tendo servido apenas para efeitos de comparação com os demais modelos, visto já se terem realizado testes experimentais na empresa com esta lâmpada, sem resultados positivos. Alguns modelos possuem ainda algumas variações, com características diferentes dentro da mesma família de lâmpadas/luminárias.

Algumas destas soluções de iluminação estão apresentadas nas Figuras 2.15, 2.16 e 2.17, sendo estas as que permitem ser incorporadas na porta do forno, como a *Extreme L* da *Vossloh-Schwabe*, a *Extreme REVO*, também da *Vossloh-Schwabe* e a *77.116* da *BJB*.

Tabela 2.1: Características técnicas de soluções LED da *Vossloh-Schwabe*. [36]

LED	<i>VS Extreme O</i>	<i>VS Extreme Revo</i>	<i>VS Extreme L</i>
Aplicação	Cavidade	Porta	Porta
Ângulo do feixe [°]	160	60	120
Temperatura de cor [K]	3000	3000	3000
	4500	4000	4000
Temperatura crítica [°C]	110	110	110
Fluxo luminoso [lm]	150	125 LCH035 130 LCH038	145 ExtremeL-250 200 ExtremeL-400 365 ExtremeL-700
Voltagem [V]	2,98	12 LCH35 24 LCH038	12
Consumo [W]	2,1	1,3	3,2 ExtremeL-250 5,4 ExtremeL-400 9,7 ExtremeL-700
Ef. luminosa [lm/W]	71,4	96,2 LCH035 100,0 LCH038	45,3 ExtremeL-250 37,0 ExtremeL-400 37,6 ExtremeL-700

Começando por analisar a temperatura crítica, as soluções da *Vossloh-Schwabe* são as que possuem as maiores temperaturas limite. De facto, só por este motivo as mesmas poderiam ser a escolha desejada, em especial o modelo *VS Extreme L* já que a sua geometria o torna ideal para uma aplicação na porta. Quanto ao fluxo luminoso o modelo

Tabela 2.2: Características técnicas de soluções LED da BJB. [1]

LED	<i>BJB 77.110</i>	<i>BJB 77.116</i>
Aplicação	Cavidade	Porta
Ângulo do feixe [°]	60	120
Temperatura de cor [K]	3500	3000
Temperatura crítica [°C]	-	100
Fluxo luminoso [lm]	100	290 77.116.1001.36 290 77.116.1002.36 430 77.116.1005.36
Voltagem [V]	-	12
Consumo [W]	3,1	3,8 77.116.1001.36 3,8 77.116.1002.36 5,2 77.116.1005.36
Ef. luminosa [lm/W]	32,3	76 77.116.1001.36 76 77.116.1002.36 83 77.116.1005.36

Tabela 2.3: Características técnicas do *OSRAM Parathom Dim GU10*. [23]

LED	<i>OSRAM Parathom Dim GU10</i>
Aplicação	Cavidade
Ângulo do feixe [°]	36
Temperatura de cor [K]	3000
Temperatura crítica [°C]	40
Fluxo luminoso [lm]	350
Voltagem [V]	220-240V 50/60 Hz
Consumo [W]	4,6
Ef. luminosa [lm/W]	76,09

BJB 77.116.1005.36 apresenta o melhor valor, com 430 lm, ficando imediatamente à frente do *VS Extreme-L-700* com 365 lm. É no entanto devido à eficiência luminosa que se tornam evidentes as vantagens no uso da gama *BJB 77.116*, com mais do dobro da eficiência dos *VS Extreme L*.

A *BJB* possui representantes em Portugal que, já mesmo antes do início deste projeto, tinham contacto com a *Ramalhos*. Por este motivo a aquisição de amostras para testes desta marca torna-se um processo facilitado e a já existência de duas amostras do modelo *77.116.1002.36* levou à escolha do mesmo para a realização de propostas de arrefecimento e para a realização de experimentações com o mesmo.

Em termos físicos, os três modelos da gama *77.116* variam apenas em termos de comprimento e número de LEDs. O modelo inicialmente escolhido (*BJB 77.116.1002.36*) situa-se no meio das três possíveis soluções, com um comprimento de 230 mm e possuindo



Figura 2.15: Luminária *Extreme L* da *Vossloh-Schwabe* [36].



Figura 2.16: Luminária *Extreme REVO* da *Vossloh-Schwabe* [36].

15 LEDs. Após o contacto com um representante da *BJB*, obteve-se também informação relativa ao tempo de vida médio destas luminárias, sendo este de 50.000 horas operando em condições de temperatura crítica e com a voltagem nominal aplicada.



Figura 2.17: Luminária *77.116* da *BJB* [1].

Na análise comparativa anterior não foram tidos em conta custos, visto que grande parte dos mesmos são desconhecidos. No entanto, foram posteriormente disponibilizados os valores relativos ao *BJB 77.116.1002.36* e ao *BJB 77.116.1005.36*, apresentados na Tabela 2.4. Para a aquisição de 5.000 quantidades, cada luminária *77.116.1002.36* é 1,7 € mais barata que cada *77.116.1005.36*.

Tabela 2.4: Preços unitários de luminárias LED da gama *BJB 77.116*.

Ref. BJB	Descrição	QT.	Preço Unitário
<i>77.116.1002.36</i>	Kit de led comprimento 230 mm	1.000	15,98 €
	290 lm / 3.000 K	5.000	14,80 €
<i>77.116.1005.36</i>	Kit de led comprimento 312 mm	1.000	17,80 €
	430 lm / 3.000 K	5.000	16,50 €

No caso do primeiro forno em estudo, o *Turboram*, para a aplicação inicialmente pensada, ou seja, a utilização de duas luminárias LED na porta do *Turboram 5T*, uma de cada lado, a aplicação de duas luminárias *77.116.1005.36* é 11,49% mais cara que a aplicação de duas luminárias *77.116.1002.35*. Também é possível a utilização de apenas uma *77.116.1005.36*, já que a mesma possui uma luminosidade superior, além de que o seu comprimento a torna uma ótima solução para o *Turboram 5T*. Caso se comprove que esta solução é suficiente para a iluminação em toda a câmara do forno, esta teria um preço de aquisição 44.26% inferior ao de duas luminárias *77.116.1002.35*.

Para o caso dos *Turboram* de maiores dimensões poderá ser necessário o uso de mais do que duas luminárias, onde eventualmente quatro seria o valor mais provável. No entanto, o benefício do uso de duas lâmpadas em diferentes alturas, análogo ao caso atual com as quatro lâmpadas de halogéneo, pode ser também empregue, caso os requisitos térmicos e de iluminação se verifiquem.

Excetuando o modelo da *OSRAM*, todas as outras lâmpadas LED com aplicação em cavidades possuem um fluxo luminoso muito baixo, entre os 100 e os 150 lumen. Desta forma a iluminação no interior do segundo forno em estudo, o *Modulram*, seria muito reduzida e, como tal, insuficiente para todo o espaço a iluminar. Deste modo foi rejeitada a alternativa de utilização destas lâmpadas na cavidade do *Modulram*, onde, embora este tipo de aplicação se mantenha neste tipo de fornos, é possível aplicar uma qualquer luminária de aplicação típica numa porta como substituição. Assim, a escolha para esta gama de fornos modulares incidiu também nas luminárias LED da *BJB*, nomeadamente nas *77.116.1002.36* e *77.116.1005.36*.

De forma a ser possível testar não só a possibilidade de aplicação devido às temperaturas elevadas, como também questões de iluminação no interior dos fornos, foram posteriormente requisitadas cinco amostras de luminárias *77.116.1002.35*, assim como outras duas amostras da *77.116.1005.36*.

Parte II

Turboram

Capítulo 3

Soluções Propostas

Após os vários estudos iniciais acerca das condições existentes no forno *Turboram* para a aplicação das luminárias LED e após a escolha destas e da sua localização, procedeu-se ao *design* de soluções de arrefecimento dos LEDs, com base na sua geometria e posicionamento. O bom conhecimento da geometria e dos vários componentes que constituem a porta do forno ventilado estudado é fundamental e como tal esta abordagem é realizada no subcapítulo 3.1. Já no subcapítulo 3.2 pretende-se estudar mais pormenorizadamente o problema de transferência de calor existente na porta e as várias alternativas possíveis para a sua resolução.

3.1 Composição da porta do forno *Turboram*

Inicializando este processo, foi modelada em 3D, com o uso do *software SolidWorks 2019*, uma porta de um *Turboram 9T* com as dimensões atuais. De seguida foi criado um modelo 3D da luminária que será utilizada para a experimentação, a *BJB 77.116.1002.36*.

A porta do *Turboram 9T* tem 959,5 mm de altura, 770,5 mm de largura e uma espessura de 56 mm, contando com o vidro interior. Na vista de frente, como mostra a Figura 3.1, a porta possui um sistema de abertura/fecho do lado esquerdo, sendo que a porta fica fixa ao corpo do forno do lado direito, permitindo apenas o seu movimento de rotação segundo um eixo vertical, ilustrado a amarelo na mesma Figura 3.1. A porta leva ainda duas molduras, uma de cada lado, para permitir a fixação do vidro externo, assim como para tapar o interior do corpo da porta.

O corpo da porta sem a aplicação dos vidros, sistema de abertura/fecho e outras peças, como mostra a Figura 3.2, é oco, onde depois de tapado pelo vidro externo e as molduras forma uma cavidade no interior da porta.

No lado interior da porta, ou seja, a zona em contacto com o interior do forno, existe um vidro interno com 752 mm de largura, 904 mm de altura e 5 mm de espessura, exibido na Figura 3.3, a verde. Uma característica importante desta porta é que este vidro é de fácil remoção, o que facilita o acesso às lâmpadas de halogéneo, para eventual substituição. Quando removido, no ponto (b) da Figura 3.3, a porta possui dois refletores para direcionar a luz proveniente das lâmpadas de halogéneo para o interior da câmara do forno, a amarelo e alguns furos para a colocação das lâmpadas atuais. Na mesma Figura 3.3, a vermelho, está representado o vidro externo. É notável referir que as cores apresentadas são apenas para facilitar a leitura da figura, não exibindo as cores reais dos

componentes.

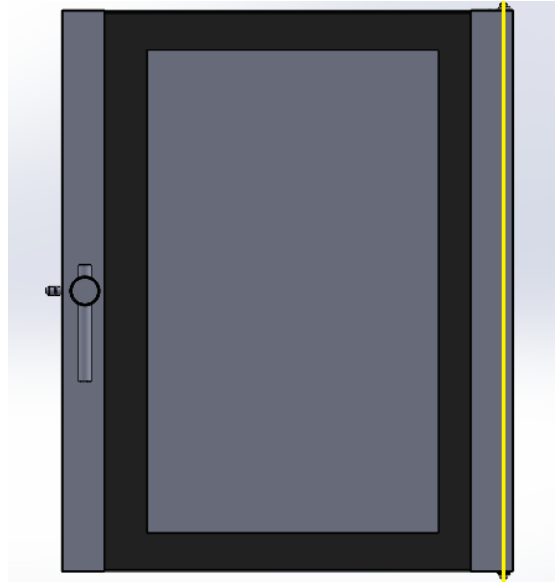


Figura 3.1: Vista frontal da porta *Turboram 9T*.



Figura 3.2: Corpo da porta do *Turboram 9T*.

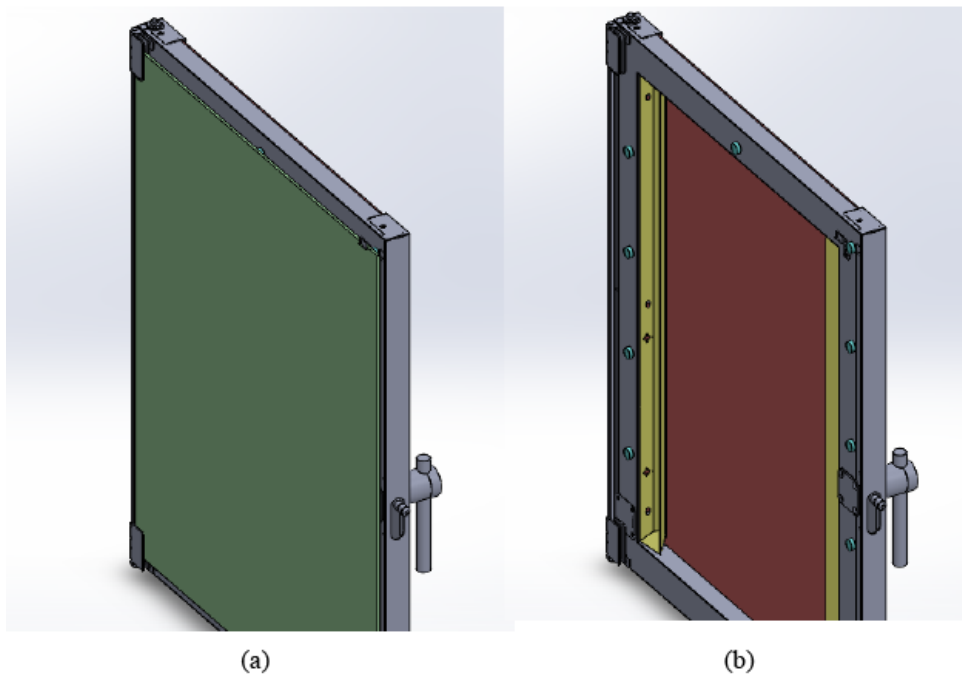


Figura 3.3: Zona interior da porta. (a) Com vidro interior, a verde. (b) Vidro interior removido.

Com o conhecimento de algumas cotas disponibilizadas pelo fabricante, assim como com o uso de um paquímetro, foi criado um modelo 3D da luminária *BJB 77.116.1002.36*. Na Figura 3.4 mostra-se a vista de frente deste modelo 3D. Esta luminária possui um conjunto de pequenas alhetas no lado de trás como dissipador de calor. No interior da luminária está a placa com o conjunto de LEDs, situada proximamente ao dissipador de calor para permitir a condução do calor. A zona inferior é aberta, permitindo assim a entrada de ar entre a placa de LEDs e a zona frontal. Já nesta zona, está presente um vidro fosco, resistente a altas temperaturas, a verde na Figura 3.4.



Figura 3.4: Modelo 3D da luminária LED a aplicar na porta do *Turboram*.

A luminária LED é colocada na lateral da porta, direcionada para o refletor que por sua vez irá refletir a luz para o interior da câmara do forno, como se ilustra na Figura 3.5. Para se tornar possível esta aplicação é feito um corte na zona lateral do corpo da porta com as dimensões necessárias a que a zona de trás da luminária LED, onde existe o dissipador, se encontre no interior da calha da porta, ficando a luminária à face

da porta. É necessário também realizar um corte no refletor de modo a que este não se encontre à frente dos LEDs e, por questões de falta de espaço, é necessário fazer um corte na zona superior da luminária LED, de forma a que a sua largura seja constante ao longo do comprimento. A fixação a realizar é a sugerida pelo fabricante das luminárias, onde apenas é necessário efetuar um furo para colocação de um rebite com rosca interna e aplicar um parafuso M4 na zona superior. A parte inferior da luminária é apenas encaixada na chapa da porta.

A Figura 3.6 mostra a zona posterior da luminária LED após a aplicação, com o dissipador de calor na calha de ar, dentro da porta. As pequenas alhetas deste dissipador são cruciais no arrefecimento dos LEDs, que nesta situação pretende-se que se encontrem o mais afastados da câmara do forno possível, de modo a que estejam sujeitos a um menor fluxo de calor.

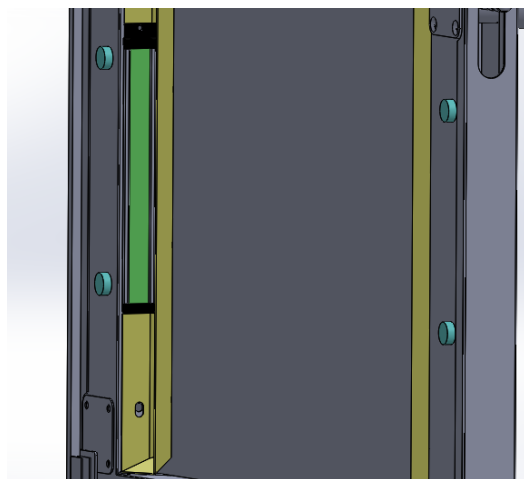


Figura 3.5: Luminária LED aplicada na porta do *Turboram 9T*.

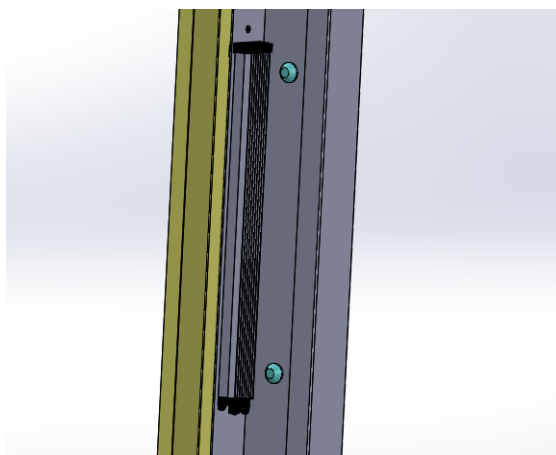


Figura 3.6: Zona posterior da luminária LED aplicada na porta do *Turboram 9T*.

3.2 Propostas de melhoria da porta

3.2.1 Furação inferior e superior na porta

Após a escolha da luminária LED a testar no forno industrial *Turboram*, procedeu-se à obtenção de soluções que, com fundamento teórico, poderiam reduzir as temperaturas na localização dos LEDs. A primeira proposta de melhoria foi a criação de uma furação na zona inferior e superior da porta, com a eventual possibilidade de criação de um fluxo ascendente de ar por convecção natural. Deste modo pensou-se, num estado inicial, efetuar uma furação, como mostra a Figura 3.7, com 2 linhas e 43 colunas de furos de diâmetro igual a 7 mm.

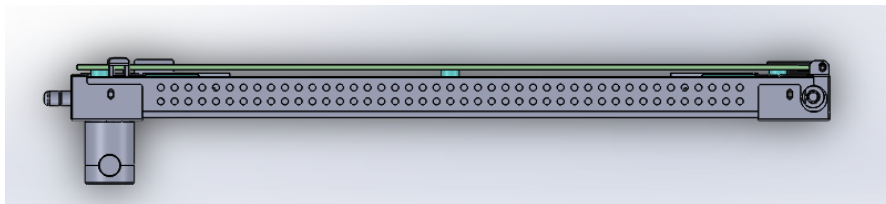


Figura 3.7: Vista de cima da porta de um *Turboram 9T*, com furação superior e inferior.

A convecção livre, ou natural, é uma situação na qual a velocidade do ar não é forçada por um meio exterior. Esta ocorre quando uma força corporal, normalmente o campo gravitacional, atua num fluido no qual existe um gradiente de densidades, tipicamente provocado por um gradiente de temperaturas [16].

No estado atual do forno *Turboram*, o ar encontra-se totalmente confinado no interior da porta. Esta situação aproxima as laterais da porta, localização prevista para a aplicação das luminárias LED, do caso de duas cavidades retangulares verticais. Designa-se por cavidade retangular um espaço com a configuração de um paralelepípedo em que duas das paredes opostas são mantidas a temperaturas diferentes, T_1 e T_2 , em que as restantes paredes da cavidade se encontram isoladas da vizinhança [16]. Na Figura 3.8 encontra-se uma situação semelhante à descrita.

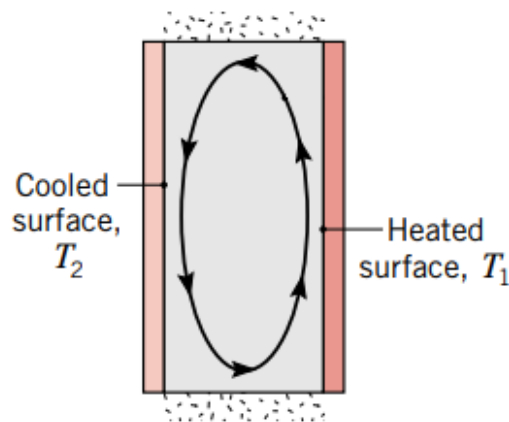


Figura 3.8: Cavidade retangular vertical. Adaptado de [16].

Considerando que as placas verticais da porta do forno se encontram a temperaturas constantes, a placa que cria a cavidade e que se encontra na zona interior da porta, ou seja, mais próxima da câmara do forno, encontra-se a uma temperatura T_1 elevada, enquanto que a placa da porta na zona exterior está a uma temperatura T_2 mais baixa. Conforme observado na Figura 3.8, o fluxo do ar no interior da cavidade apresenta um movimento de recirculação, em que o ar aquece e ascende junto à placa quente e arrefece, descendo, junto à placa mais fria. A transferência de calor neste tipo de ocasiões pode dar-se apenas por condução no ar, caso o número de *Rayleigh* seja inferior a 10^3 , ou em casos onde este número seja superior, por convecção natural [16].

O número de *Rayleigh* é um valor adimensional que mede a magnitude relativa entre forças de impulsão e forças viscosas no fluido e pode ser usado para distinguir o tipo de escoamento existente em convecção natural, podendo este ser laminar ou turbulento. O seu valor, para o caso de cavidades retangulares, pode ser calculado pela Equação 3.1 [16].

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_1 - T_2)L^3}{\alpha\nu} \quad (3.1)$$

Onde g é a aceleração da gravidade, β é o coeficiente de expansão térmica volumétrico do fluido, L é o espaçamento entre as duas placas verticais não isoladas, α é a difusividade térmica do fluido e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Obtendo-se os valores dimensionais para um forno *Turboram 5T*, o espaçamento entre as placas não isoladas, L , tem um valor de 34 mm, a largura destas placas, w , é de 70 mm e a altura da cavidade, H , considerou-se com um valor de 430 mm, já que se deve considerar para efeito da cavidade apenas a região intermédia da porta, tendo em conta a influência das extremidades, que são abertas, como mostra a Figura 3.2. O número de *Nusselt* médio pode ser dado pela Equação 3.2 [16]. É de notar que a utilização da Equação 3.2 gera resultados coerentes apenas para valores de H/L menores de 10. No caso utilizado este valor é um pouco superior, pelo que o número de *Nusselt* é apenas aproximado daquele que efetivamente se pratica.

$$\bar{Nu}_L = 0,22 \left(\frac{Pr}{0,2 + Pr} Ra_L \right)^{0,28} \left(\frac{H}{L} \right)^{-1/4} \quad (3.2)$$

Pr representa o número de *Prantl*, outro valor adimensional que é dependente da temperatura do fluido em questão. O número de *Nusselt* médio é um valor adimensional que é proporcional ao coeficiente de transferência de calor por convecção médio no interior da cavidade, \bar{h} , e relacionam-se pela Equação 3.3, onde k_f é a condutibilidade térmica do fluido, neste caso do ar.

$$\bar{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k_f} \quad (3.3)$$

No caso proposto, pretende-se alterar a configuração de cavidade retangular da porta para algo semelhante a um canal vertical. Este é o caso de duas placas verticais separadas por uma distância S e a temperaturas distintas entre si. O canal é aberto nos topos, como se exemplifica na Figura 3.9 e um fluxo de ar entre as placas é induzido pela diferença de temperaturas entre o ar ambiente que envolve o canal e as temperaturas das placas [16]. Com a furação proposta nas zonas inferior e superior da porta do forno, o ar entra a uma temperatura baixa pela furação inferior, no qual, em contacto com as placas quentes da

porta do forno, que formam algo análogo a um canal, eleva a sua temperatura. Este cenário providencia a diminuição da densidade do ar, fazendo assim com que ele suba, sendo a sua saída do canal interior da porta permitida através da furação superior.

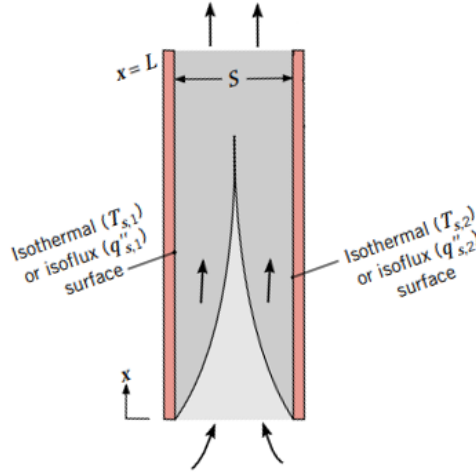


Figura 3.9: Escoamento num canal vertical, induzido por convecção natural. Adaptado de [16].

Para o caso de um canal vertical onde a placa mais quente se encontra a uma temperatura T_1 e a outra placa se encontra isolada adiabaticamente e entrando o ar no canal a uma temperatura T_∞ , o número de *Nusselt* médio pode ser calculado pela Equação 3.4, onde neste caso L será o comprimento do canal [16]. O caso da porta do forno pode ser aproximado a esta situação apenas caso a placa exterior do canal na porta, a placa mais fria, se encontrar à mesma temperatura do ar ambiente, não existindo portanto transferência de calor entre esta placa e o ar ambiente, encontrando-se numa situação análoga ao isolamento adiabático.

$$\bar{Nu}_S = \left[\frac{144}{(Ra_S \frac{S}{L})^2} + \frac{2,87}{(Ra_S \frac{S}{L})^{1/2}} \right]^{-1/2} \quad (3.4)$$

Ao contrário do número de *Rayleigh* definido para uma cavidade retangular, o novo numero de *Rayleigh*, Ra_S , é definido tendo em conta a temperatura do ar que entra no canal, através da Equação 3.5.

$$Ra_S = \frac{g\beta(T_1 - T_\infty)S^3}{\alpha\nu} \quad (3.5)$$

O número de *Nusselt* relativo ao caso de canais verticais pode ser relacionado ao coeficiente de transferência de calor, h , através da Equação 3.6.

$$\bar{Nu}_S = \frac{\bar{h}S}{k_f} \quad (3.6)$$

Após a obtenção de algumas temperaturas praticadas nas placas do forno e apresentadas mais à frente neste relatório, no capítulo 5.2, para o lado do fecho da porta

e através da média das temperaturas medidas, obtiveram-se valores para T_1 , T_2 e T_∞ iguais a 106°C , 45°C e 30°C , respetivamente. Pelas Equações 3.2 e 3.4 obtiveram-se valores do número de *Nusselt* para os dois casos, cavidade retangular e canal vertical. Os coeficientes de convecção natural foram posteriormente calculados através destes valores pelas Equações 3.3 e 3.6. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores de \bar{Nu} e \bar{h} calculados para os casos de cavidades e canais verticais.

Cavidade retangular vertical	
\bar{Nu}_L	2,8
\bar{h} [W/(m ² K)]	2,5
Canal vertical	
\bar{Nu}_S	6,2
\bar{h} [W/(m ² K)]	5,3

Os resultados obtidos por expressões empíricas demonstram que o coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser aumentado com a passagem de uma situação de uma cavidade retangular para um canal vertical. Desta forma, estes resultados demonstram que a furação proposta na porta pode efetivamente trazer resultados benéficos ao arrefecimento das luminárias LED, em que o seu dissipador de calor se encontra no interior do canal vertical. O fluxo de calor que se dissipa da luminária LED por convecção natural pode ser estipulado pela Expressão 3.7.

$$q'' = \bar{h}(T_L - T_\infty) \quad (3.7)$$

Onde q'' representa o fluxo de calor por convecção natural dissipado da luminária LED para o ar envolvente, no interior do canal, T_L é a temperatura no dissipador de calor da luminária aplicada e T_∞ é a temperatura do ar no interior do canal. O objetivo deste trabalho é o aumento do fluxo de calor de arrefecimento do LED, q'' , que se consegue sobretudo com o aumento do valor de \bar{h} . No caso da convecção natural, e como anteriormente calculado, estes valores são tipicamente baixos, já que o movimento do fluido (velocidade) não se origina por forças externas, como o uso de ventilação. Ainda assim, com a alteração de uma cavidade para um canal aumentou-se este valor em 115%, o que pressupõe o aumento do fluxo de arrefecimento e por consequência a diminuição das temperaturas na luminária LED.

3.2.2 Escudo de radiação

A colocação de uma placa de um material de baixa emissividade, ou seja, com elevada refletividade, entre a cavidade do forno e o vidro interior traduz-se na adição de uma resistência térmica associada ao fluxo de radiação térmica proveniente da câmara do forno. Este tipo de situação designa-se por escudo de radiação [16].

Considerando apenas a transferência de calor por radiação entre as paredes da câmara do forno e o vidro interno e considerando que as placas da câmara do forno constituem, no seu conjunto, apenas uma superfície com área A_c , emissividade ε_c e que se encontram

a uma temperatura T_c , quando o forno está em funcionamento, e ainda tendo em conta que a área, emissividade e temperatura do vidro interno do forno são dados por A_v , ε_v e T_v , respetivamente, a taxa líquida de transferência de calor entre a câmara do forno e o vidro interno, $q_{c,v}$, pode ser dada pela equação 3.8, usada para definir a taxa líquida de transferência de calor entre duas quaisquer superfícies difusas e cinzentas que formam um invólucro, trocando radiação apenas entre si [16].

$$q_{c,v} = \frac{\sigma (T_c^4 - T_v^4)}{\frac{(1-\varepsilon_c)}{\varepsilon_c A_c} + \frac{1}{A_v F_{v,c}} + \frac{(1-\varepsilon_v)}{\varepsilon_v A_v}} \quad (3.8)$$

Na Equação 3.8 o fator de forma do vidro para a câmara do forno, ou seja, o valor percentual da radiação emitida pelo vidro que chega à câmara do forno é representado por $F_{v,c}$ e terá valor igual a 1, já que toda a radiação emitida pelo vidro chegará ao conjunto de placas que formam a cavidade do forno.

Quando é colocada uma placa de área A_r , constituída por um material de emissividade no lado direcionado para a câmara do forno igual a $\varepsilon_{r,c}$ e emissividade no lado oposto, direcionado para o vidro, igual a $\varepsilon_{r,v}$, a taxa líquida de transferência de calor entre a câmara do forno e o vidro interno terá um valor diferente. Atendendo ao conceito de malha térmica aplicada à radiação térmica, é possível obter o valor de $q_{c,v}$ para quando se aplica um escudo de radiação. Este pode ser obtido pela Equação 3.9.

$$q_{c,v} = \frac{\sigma (T_c^4 - T_v^4)}{\frac{(1-\varepsilon_c)}{\varepsilon_c A_c} + \frac{1}{A_r F_{r,c}} + \frac{(1-\varepsilon_{r,c})}{\varepsilon_{r,c} A_r} + \frac{(1-\varepsilon_{r,v})}{\varepsilon_{r,v} A_r} + \frac{1}{A_v F_{v,r}} + \frac{(1-\varepsilon_v)}{\varepsilon_v A_v}} \quad (3.9)$$

O fator de forma do escudo de radiação para a câmara do forno, $F_{r,c}$, terá valor igual a 1, já que neste caso a radiação emitida pelo lado interno do escudo será totalmente captada pela cavidade do forno. Considerando o fator de forma entre a placa do escudo e o vidro também com valor 1, aproximação possível para o caso de duas placas paralelas de grandes dimensões [16], então, comparando as Equações 3.8 e 3.9, os termos associados à adição de uma resistência térmica proveniente do escudo de radiação são dados pela Expressão 3.10.

$$R_{RadiationShield} = \frac{1}{A_r} + \frac{(1 - \varepsilon_{r,c})}{\varepsilon_{r,c} A_r} + \frac{(1 - \varepsilon_{r,v})}{\varepsilon_{r,v} A_r} \quad (3.10)$$

Organizando a Equação 3.10, obtém-se uma expressão mais simplificada para a resistência térmica associada à adição de uma placa entre a câmara do forno e o vidro interno do mesmo (Equação 3.11).

$$R_{RadiationShield} = \frac{1}{A_r} \left(\frac{1}{\varepsilon_{r,c}} + \frac{1}{\varepsilon_{r,v}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

Verifica-se que uma diminuição nas emissividades desta placa irá aumentar o valor da resistência térmica adicional, diminuindo assim a troca líquida de calor por radiação entre as placas do forno e o vidro interior ($q_{c,v}$). Desta forma será possível reduzir as temperaturas na porta, já que esta seria aquecida com uma menor quantidade de calor.

O aço inoxidável, do qual o forno é majoritariamente constituído, é um material com uma baixa emissividade, o que poderia constituir um bom escudo de radiação.

É óbvio que o escudo de radiação não poderá ser aplicado na totalidade do vidro do forno, já que impossibilitaria a visualização do processo de cozedura no seu interior. É no entanto possível aplicar uma placa de aço inoxidável no lado da dobradiça da porta. Na Figura 3.10 está presente um modelo 3D criado de uma porta *Turboram 9T* com um escudo de radiação. Este componente não iria reduzir a iluminação no interior do forno, já que a sua aplicação iria cobrir apenas a zona lateral da porta.

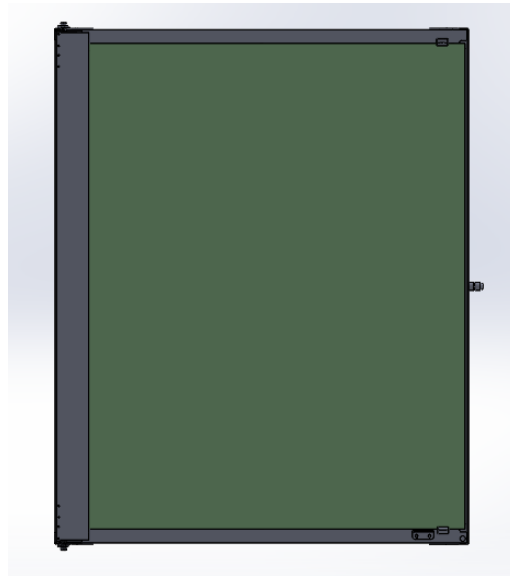


Figura 3.10: Vista de trás da porta de um *Turboram 9T*, com a aplicação de um escudo de radiação (à esquerda na figura).

3.2.3 Aplicação da luminária LED na zona inferior da porta

Uma outra possibilidade será a aplicação de uma luminária LED *BJB 77.116.1005.36* na zona inferior da porta, ao invés da colocação nas laterais. A diferença de temperaturas na porta é elevada, sendo que as temperaturas na zona inferior da mesma são bastante reduzidas. Assim, não se constitui um problema do ponto de vista térmico para a aplicação dos LEDs nesta região. De forma a garantir a estabilidade da luminária LED, pode ainda conjugar-se esta ideia à da furação interior e superior na porta, reduzindo assim ainda mais a temperatura na zona inferior na porta. A viabilidade desta aplicação irá depender apenas de questões dimensionais da luminária LED e se esta possui luminosidade suficiente para a iluminação da câmara dos fornos, nomeadamente nos casos de fornos de grandes dimensões, como o *Turboram 10T 80x60*, já que a iluminação na região mais superior da porta deverá satisfazer alguns requisitos mínimos. A aplicação de um refletor nesta zona irá necessitar ainda de mudanças no vidro externo, já que o refletor necessita ficar escondido quando se visualiza o forno de frente.

Esta solução foi verificada mais tarde, sendo que os resultados relativos a este ensaio serão discutidos no subcapítulo 6.5.

Capítulo 4

Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada para a experimentação realizada em torno da proposta de melhoria apresentada no subcapítulo 3.2.1. No subcapítulo 4.1 apresenta-se a primeira alteração a realizar na porta, ou seja, a aplicação das luminárias LED. A próxima etapa desta metodologia foi a aplicação da proposta de melhoria ou seja, a furação superior e inferior na porta, abordada no subcapítulo 4.2. No subcapítulo 4.3 apresentam-se os equipamentos de medição utilizados neste projeto e a preparação da porta do forno de modo a que seja possível realizar as medições é apresentada no subcapítulo 4.4. Por fim concretizaram-se os vários ensaios experimentais, onde a sua organização encontra-se referida no subcapítulo 4.5.

4.1 Aplicação das luminárias LED na porta

Antes de se realizarem quaisquer medições na porta foram primeiramente realizados os recortes no corpo da porta e nos refletores de forma a ser possível colocar as luminárias LED à face da porta, conforme o processo apresentado no capítulo 3.1 e ilustrado através de modelação 3D na Figura 3.5. A única diferença em relação ao modelo 3D é que foi utilizado como forno de ensaios um *Turboram 5T*, com uma altura da porta menor, tendo sido colocadas as luminárias LED sensivelmente a meio da porta, uma de cada lado. O resultado final desta aplicação esta apresentado na Figura 4.1, para o lado da dobradiça da porta e na Figura 4.2, para o lado do fecho da mesma.

É importante referir que, durante o processo de recorte da chapa para a aplicação, verificou-se uma impossibilidade na colocação da luminária LED no lado do fecho, visto que o dissipador de calor da mesma embate em dois parafusos que fixam uma peça do fecho da porta. Para os ensaios esta situação foi resolvida retirando os parafusos e cobrindo os dois furos com uma fita de alumínio, conforme a Figura 4.2, no entanto, numa situação real este método é impossível já que a falta dos parafusos promove a falta de fixação da peça ao corpo da porta. Esta situação pode ser resolvida tendo em conta três soluções possíveis, sendo estas:

1. **Aplicação de 2 luminárias LED BJB 77.116.1001 do lado do fecho**, já que são mais pequenas e ficariam uma em cima e outra em baixo do fecho. Esta solução traria problemas em termos de custos, já que, por forno, seria necessário o uso de 3 ou até mesmo 4 luminárias LED com estas dimensões. Para além disso, também a diferença de temperaturas na região mais em cima e mais em baixo da



Figura 4.1: Aplicação da luminária LED *BJB 77.116.1002.36* no lado da dobradiça da porta.



Figura 4.2: Aplicação da luminária LED *BJB 77.116.1002.36* no lado do fecho da porta.

porta, iria gerar maiores adversidades térmicas associadas aos LEDs colocados em cima do fecho, já que estariam expostos a maiores temperaturas e como tal, criaria uma não uniformidade no tempo de vida dos LEDs no forno. A iluminação no forno também poderia não ser uniforme com esta solução.

2. **Alteração na furação da peça do fecho.** O deslocamento da furação na peça do fecho levaria a um deslocamento nos parafusos de fixação, o que iria possibilitar a colocação da luminária LED.

3. **Não colocar iluminação no lado do fecho da porta.** Uma outra possível

solução seria o uso de apenas uma luminária LED *BJB 77.116.1005* no lado da dobradiça da porta, não sendo necessário aplicar qualquer tipo de iluminação do lado do fecho, já que esta possui um maior comprimento, maior número de LEDs e maior luminosidade. Esta é a solução que aparenta ser a mais benéfica, já que iria reduzir os custos de aquisição dos LEDs.

A solução 3. foi mais tarde verificada, de forma a perceber se a iluminação de apenas uma luminária é suficiente ou não. Os resultados deste teste são descritos mais pormenorizadamente no subcapítulo 6.5.

4.2 Aplicação da proposta de melhoria: Furação superior e inferior

A furação sugerida no subcapítulo 3.2.1 foi aplicada na porta do *Turboram* de 5 tabuleiros 60x40, em estudo. Nas Figuras 4.3 e 4.4 apresentam-se o resultado da mesma na zona superior e inferior, respetivamente.



Figura 4.3: Furação superior inicial, com 2x43 furos de diâmetro 7 mm.

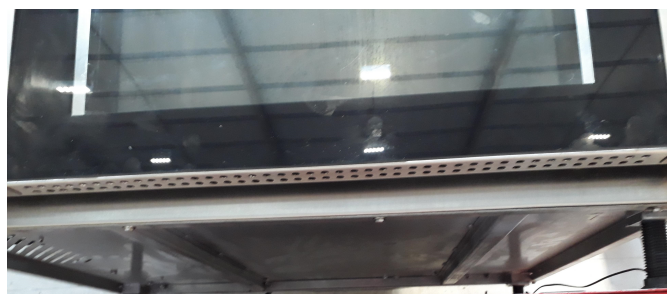


Figura 4.4: Furação inferior inicial, com 2x43 furos de diâmetro 7 mm.

Esta furação foi realizada de modo manual com uma broca especial para furação em aço inoxidável, realizando-se primariamente uma pré-furação com uma broca de diâmetro

4 mm, seguida da furação permanente com diâmetro 7 mm, alinhada em 2 linhas e 43 colunas. O aspeto estético é subjetivo, no entanto, quando se visualiza o forno de frente não se visualiza a furação, já que está num plano a 90° do mesmo, pelo que a questão do aspeto estético não deverá constituir um problema para a continuação dos ensaios e obtenção de uma possível solução a longo prazo.

4.3 Equipamento utilizado nas medições

4.3.1 Medição de temperaturas

A medição de temperaturas relevantes no estudo do forno ventilado *Turboram* realizou-se na empresa *Ramalhos S.A.* e o equipamento utilizado, apresentado na Figura 4.5, consiste em 3 sondas *Conatec MEC0309*, tipicamente utilizadas nos fornos da empresa para medir a temperatura no interior da câmara dos fornos. As sondas foram ligadas a um painel digital comum de um *Modulram*, para originar o *display* dos valores medidos. Assim foi possível a medição de até três temperaturas em simultâneo, o que facilitou a obtenção de certos resultados, assim como a poupança de tempo nas medições. Para a medição de temperaturas em superfícies foi necessário garantir o contacto da ponta da sonda com a superfície, fixando-as com fita de alumínio. Para a medição de temperaturas do ar o importante foi garantir que a sonda não se encontrava em contacto com outra superfície, de forma a obter resultados corretos.



Figura 4.5: Equipamento utilizado para realizar medições de temperaturas na *Ramalhos*.

4.3.2 Medição da velocidade do ar

A medição da velocidade do ar no interior da calha foi efetuada com a utilização de um tubo de *Pitot*, instrumento capaz de medir a velocidade de um escoamento, ligado a

um micromanómetro, modelo 8715 da TSI, disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e exibido na Figura 4.6.



Figura 4.6: Micromanómetro utilizado para a medição da velocidade do ar. Adaptado de [7].

O tubo de *Pitot* é um instrumento que ao ser colocado num escoamento permite a obtenção da pressão de estagnação (pressão total) e da pressão estática. A diferença entre ambas será a pressão dinâmica, proporcional à velocidade do escoamento. Este valor pode ser calculado conhecendo as duas pressões, através da Equação 4.1.

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \quad (4.1)$$

Onde v é a velocidade do ar em m/s, p_t é a pressão total, p_s é a pressão estática e ρ é a densidade do ar. O micromanómetro efetua este cálculo, no entanto, para se conhecer a densidade do ar é necessário, no *software* do micromanómetro, definir a temperatura do escoamento onde o tubo de *Pitot* se insere [7].

4.4 Preparação da porta para a colocação dos instrumentos de medição

De forma a ser possível colocar as sondas no interior das calhas laterais foram realizados 4 furos nas laterais da porta, dois de cada lado, para medir a temperatura do ar no interior da calha e para medir a temperatura diretamente na zona de trás da luminária LED, ou seja, em contacto com o dissipador de calor. Os dois furos do lado da dobradiça da porta são apresentados na Figura 4.7. O furo de cima, designado neste relatório por F1, encontra-se a 108 mm da face superior da porta e a sonda colocada neste tem por objetivo obter a temperatura do ar no interior da calha àquela cota. O outro furo encontra-se a 298 mm da face superior da porta e a sonda colocada neste encontra-se em contacto direto com o dissipador de calor, registando a temperatura da luminária LED, designada neste relatório como T_{SondaLED} . No lado do fecho da porta, um furo a 102 mm da face superior foi realizado e designado neste relatório por F2. Possui o mesmo objetivo que o furo F1 mas para a medição no lado oposto da porta. Outro furo, mais abaixo, a 258 mm da face superior tem por objetivo medir a temperatura no dissipador de calor da luminária LED do lado do fecho da porta.



Figura 4.7: Furos laterais no lado da dobradiça da porta, para colocação das sondas de medição de temperatura.

4.5 Organização dos ensaios experimentais a realizar

Para se aferirem resultados suficientemente comprovativos da viabilidade da proposta de melhoria abordada, foram conseguidos um conjunto de testes experimentais de medição de temperaturas e velocidade do ar.

A listagem abaixo apresenta os vários testes abordados, onde o procedimento, os respetivos resultados e a sua análise serão abordados nos próximos capítulos.

- Utilização de uma câmara termográfica para analisar o perfil de temperaturas na luminária LED em funcionamento;
- Medição de temperaturas nas calhas da porta sem a furação de modo a verificar o estado térmico atual da localização escolhida para a aplicação das luminárias LED;
- Primeiros testes realizados já com a furação proposta produzida para averiguar a viabilidade da proposta, assim como para medir algumas das temperaturas mais importantes para o estudo;
- Medição das temperaturas à saída da furação superior, com o forno ligado e com a primeira furação realizada, de modo a obter uma distribuição de temperaturas na furação superior;
- Um conjunto de testes em que é realizada uma abertura progressiva da furação superior de modo a obter as temperaturas para um determinado número de furos abertos. Estes testes foram adquiridos com a furação inferior aberta e a abertura gradual dos furos realizou-se em ambos os sentidos;

-
- Um outro teste onde se mediram as temperaturas dos LEDs gradualmente após se alterarem as condições de entrada de ar (furação inferior), mantendo sempre a furação superior aberta, de modo a avaliar a influência da furação inferior no arrefecimento das luminárias LED;
 - Aumento do diâmetro da furação e realização de alguns dos ensaios anteriores de modo a analisar a influência do diâmetro dos furos nas temperaturas dos LEDs;
 - Teste para averiguar se a proposta de melhoria aumenta o consumo elétrico do forno;
 - Utilização de equipamento de medição da velocidade do ar para obter alguns valores da mesma no interior da calha do lado da dobradiça da porta;
 - Testes com a aplicação das luminárias LED noutras localizações de modo a verificar se os requisitos térmicos e de iluminação são satisfeitos, assim como obter uma conclusão final sobre qual a melhor localização das luminárias LED nos vários fornos da gama *Turboram*.

Capítulo 5

Ensaaios Experimentais

Neste capítulo são apresentados todos os ensaios experimentais realizados no decorrer deste trabalho, incidentes no uso da iluminação LED no forno industrial ventilado, *Turboram*. O primeiro subcapítulo (5.1) trata o estudo realizado na Universidade de Aveiro com a utilização de uma câmera termográfica, com vista a caracterizar o perfil de temperaturas da luminária LED em estudo. O segundo subcapítulo (5.2) aborda um ensaio de medição de temperaturas na porta do forno *Turboram 5T*, estando esta ainda na sua situação atual, sem qualquer alteração aplicada. O terceiro subcapítulo (5.3) apresenta um conjunto de ensaios de medição de temperatura realizados após a furação sugerida no subcapítulo 3.2.1 e depois da aplicação de duas luminárias LED num forno *Turboram 5T* para ensaios, uma de cada lado da porta. O quarto subcapítulo (5.4) aborda um teste realizado com o intuito de verificar se a alteração proposta aumenta o consumo elétrico do forno ou não. O quinto subcapítulo (5.5) aborda o ensaio realizado na empresa com a utilização de um tubo de *Pitot*, ligado a um micromanómetro, com o intuito de registar a velocidade do ar na calha ascendente no interior da porta.

5.1 Caracterização da luminária LED *77.116.1002.36* com uso de câmera termográfica

Numa primeira etapa de experimentações, realizou-se um estudo termográfico incidente na luminária *77.116.1002.36* da BJB, com o uso da câmera termográfica *Flir t540*, disponível no Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade de Aveiro. O principal objetivo deste estudo foi caracterizar o perfil de temperaturas na luminária LED em estudo, estando esta a temperatura ambiente e em funcionamento ou após ter sido aquecida a uma determinada temperatura.

A primeira etapa deste processo foi obviamente a aprendizagem de conceitos de termografia, assim como o manuseamento deste aparelho. A medição correta de temperaturas com a câmera termográfica depende de um conjunto de parâmetros [12], sendo estes:

- **A emissividade do objeto a medir.** Este é o parâmetro mais importante e deve ser inserido com um valor correto. Objetos com uma baixa emissividade, tipicamente abaixo de 0,7, são difíceis de medir e alguns com emissividades inferiores a 0,2 são muitas vezes impossíveis de medir.
- **A temperatura aparente refletida.** Este parâmetro é usado para compensação,

devido à radiação proveniente da vizinhança refletida no objeto e capturada pela câmera. Este fator torna-se mais importante quanto menor for a emissividade do objeto, ou seja, quando maior for a sua refletividade.

- **A temperatura ambiente.** Esta é a temperatura do ar entre o objeto e a câmera.
- **A humidade relativa do ar entre o objeto e a câmera.**
- **A transmissividade do meio entre o objeto e a câmera.** Este meio pode ser uma janela de proteção, escudo protetor ou lente externa.

Para além destes parâmetros, outros fatores podem influenciar na aquisição de uma boa imagem termográfica, isto é, na medição de temperaturas corretas. São estes o foco da câmera, a faixa de temperaturas a medir, o ângulo e posição em que é adquirida a imagem e a escala de cores na imagem [12].

Enquanto que grande parte dos parâmetros não são muito relevantes e é possível o uso de valores recomendados, a emissividade e a temperatura aparente refletida são decisivos nesta análise, especialmente tendo em conta que o dissipador de calor desta luminária LED é de alumínio, material com baixa emissividade, quando não possui qualquer tratamento térmico. Foi então adaptado um método que permite determinar estes dois parâmetros com o uso da câmera termográfica, conforme se recomenda na referência [12].

A medição da temperatura aparente refletida foi realizada tendo em conta os seguintes passos:

1. Colocar uma folha de alumínio amassada em frente ao objeto, neste caso em frente ao dissipador de calor.
2. Definir a emissividade a 1,00 e a distância ao objeto igual a 0.
3. Medir a temperatura média numa região retangular da folha de alumínio amassada.
4. Definir esse valor médio no *software*, já que este é o equivalente à temperatura média refletida.

No caso em estudo o valor determinado foi igual a 21°C. Com a determinação deste parâmetro, a emissividade pode então ser adquirida, seguindo os seguintes passos:

1. Determinar em primeiro lugar a temperatura aparente refletida.
2. Colocar uma tira de fita isoladora preta numa zona do objeto.
3. Aquecer o objeto a uma temperatura algo superior à temperatura ambiente.
4. Tirar uma imagem termográfica.
5. Selecionar a emissividade igual a 0,96 (valor típico da emissividade da fita isoladora).
6. Medir a temperatura média da fita preta.
7. Medir a temperatura média fora da fita preta (no objeto).

8. Alterar a emissividade de forma a que a temperatura do objeto iguale a temperatura da fita preta.
9. A emissividade do objeto será aquela para a qual as duas temperaturas são semelhantes.

Este processo não se revelou efetivo para o caso do dissipador de calor em alumínio, já que, após aquecer a luminária LED numa estufa a 70°C por mais de 30 minutos, se determinou que na imagem termográfica a temperatura média medida pelo processo anterior do alumínio é maior que a da fita, o que leva à conclusão de que a emissividade deste alumínio é próxima de 1. Na Figura 5.1 mostra-se uma imagem termográfica deste processo, assim como a sua respetiva fotografia. Os valores medidos, na zona lateral da luminária LED, são razoavelmente aceitáveis, já que se aproximam dos 70°C . Após o aquecimento, a temperatura média na lateral da luminária LED encontra-se nos $66,4^{\circ}\text{C}$, com uma temperatura máxima na zona superior, com 68°C e uma temperatura mínima de $61,2^{\circ}\text{C}$. De forma a verificar a veracidade desta análise, foi realizado o mesmo teste mas com uma peça do fecho da porta de um *Turboram*, feita em aço inox e visivelmente com uma refletividade elevada (emissividade baixa). Esta peça foi aquecida a 90°C na mesma estufa por mais de uma hora. No final do processo foi medida uma emissividade próxima dos 0,15, o que está de acordo com a literatura [12]. Deste modo considerou-se uma emissividade de 0,99 para as restantes imagens termográficas, tiradas na situação em que a luminária LED se encontra desligada, na Figura 5.2 e quando a mesma se encontra envolvida em ar à temperatura ambiente e ligada por 15 minutos. Estas últimas imagens termográficas, assim como a fotografia correspondente, encontram-se apresentadas nas Figuras 5.3 e 5.4.

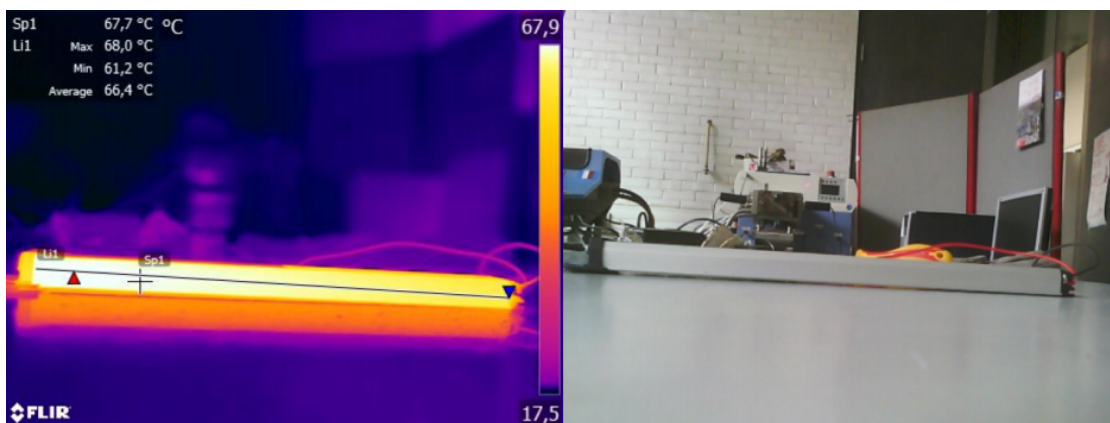


Figura 5.1: Imagem termográfica e respetiva fotografia da luminária LED após ser aquecida a 70°C .

A Figura 5.2 não mostra um gradiente térmico significativo, provando que, quando se encontra à temperatura ambiente, toda a zona de trás da luminária LED está em equilíbrio térmico com o ambiente, com uma temperatura média de $20,8^{\circ}\text{C}$. Já quando esta está ligada, a zona de trás, Figura 5.3, regista uma temperatura máxima de $35,7^{\circ}\text{C}$, na zona superior da luminária LED. A temperatura mínima, na zona inferior, é de $31,1^{\circ}\text{C}$. Já na zona lateral, Figura 5.4, a temperatura máxima foi de 35°C e a mínima de $31,9^{\circ}\text{C}$.

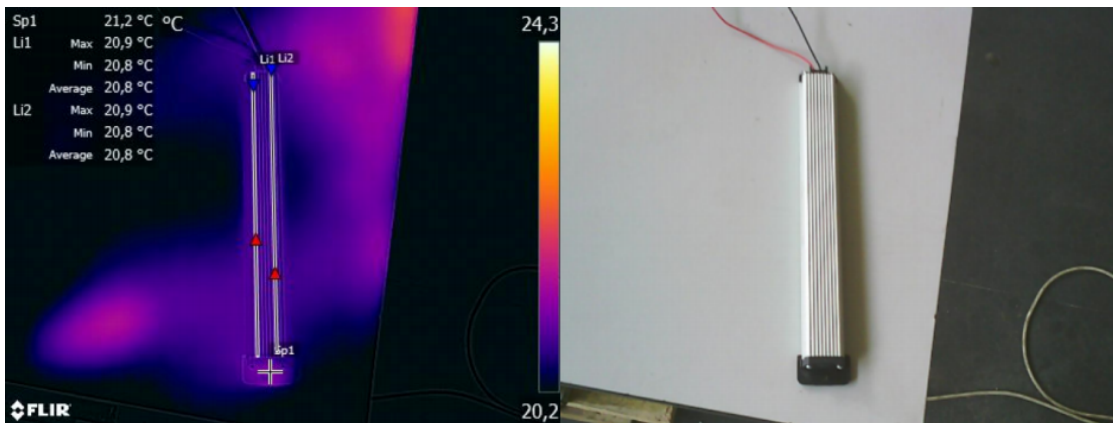


Figura 5.2: Imagem termográfica e fotografia da luminária LED desligada.

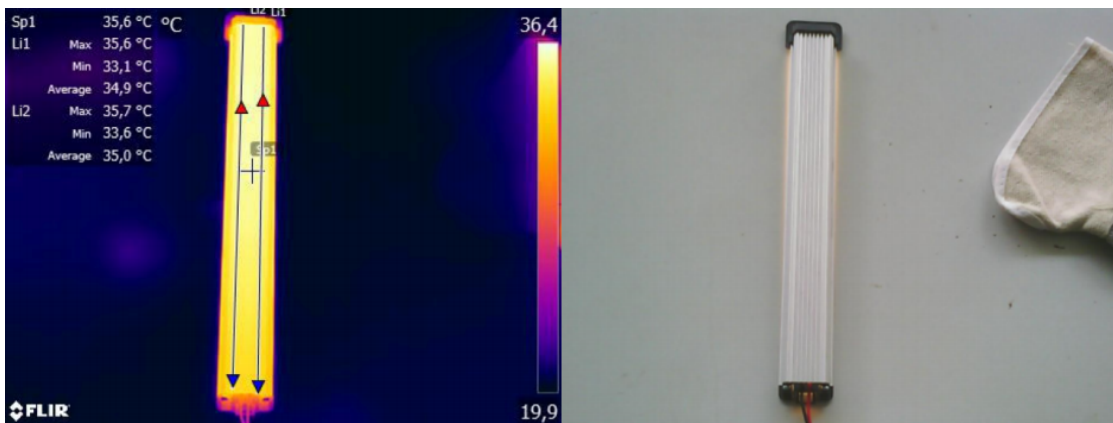


Figura 5.3: Imagem termográfica e fotografia da zona de trás da luminária LED ligada.

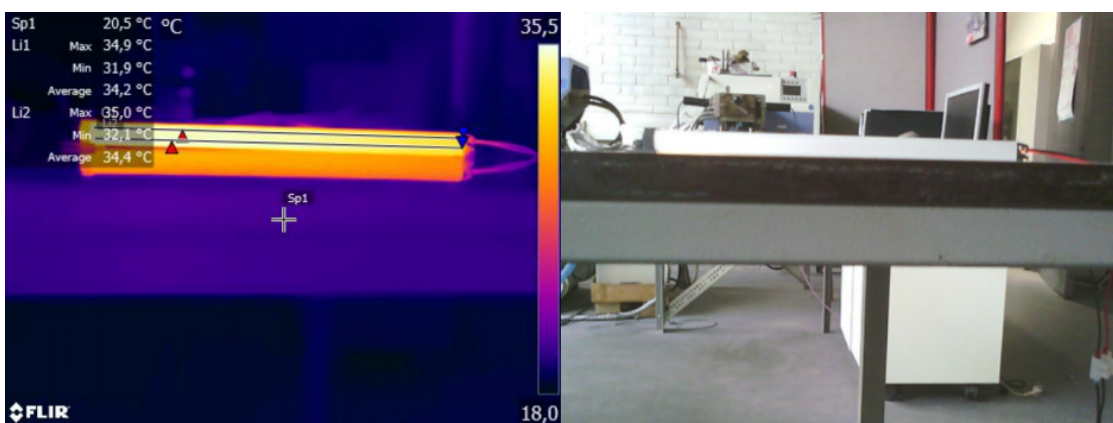


Figura 5.4: Imagem termográfica e fotografia da lateral da luminária LED quando ligada.

A zona frontal foi também estudada, no entanto, como é constituída por um vidro fosco e não por alumínio, a sua emissividade é desconhecida, pelo que os valores medidos, onde a emissividade estaria definida como 0,99, poderiam estar errados, tendo sido posteriormente descartados. Este estudo concluiu que o perfil de temperaturas não é uniforme e que as temperaturas, em todas as imagens termográficas estudadas, tanto na zona de trás como na lateral, são sempre superiores na zona de cima, diminuindo de uma forma aproximadamente linear até à zona inferior. A diferença de temperaturas máxima na luminária LED ligada por 15 minutos sem ter sido previamente aquecida foi de 4,6°C. A temperatura média, a uma temperatura ambiente de aproximadamente 20°C é próxima dos 35°C, provando assim que o calor gerado pelos LEDs provoca um aumento na temperatura de junção dos LEDs, que, embora esta seja desconhecida, pode ser prevista como próxima dos 35°C, considerando a boa condutibilidade térmica do dissipador de calor.

Numa situação de aplicação na porta do forno presumem-se temperaturas ambiente muito superiores aos 21°C, mesmo após a furação proposta. Por este motivo a temperatura média da zona de trás da luminária LED tenderá a ser superior aos 35°C medidos neste estudo. Ainda assim, este valor é importante, podendo ser usado como base para comparação, já que é o valor atingido a uma temperatura do ar em condições atmosféricas usuais.

5.2 Caracterização da porta do forno no seu estado atual

De forma a conhecer as temperaturas praticadas no meio envolvente onde as luminárias LED serão aplicadas, ainda sem alterações na porta, foram medidas as temperaturas nas placas que constituem a calha lateral, tanto na zona frontal, ou seja, a placa imediatamente à frente da porta do forno, como na zona de trás, ou seja, na placa traseira do corpo da porta, entre este e o vidro interno. As temperaturas foram medidas quando o forno se encontrava em funcionamento a 300°C após atingir o regime estacionário, ou seja, sem existirem alterações das temperaturas na porta ao longo do tempo. Na Figura 5.5 representa-se um esquema dos pontos de temperatura medidos, assim como a sua numeração, identificados numa vista de frente da porta de um *Turboram 5T*. Os pontos na zona de trás da calha, não sendo possível serem identificados na Figura 5.5, foram medidos sensivelmente com as mesmas cotas representadas.

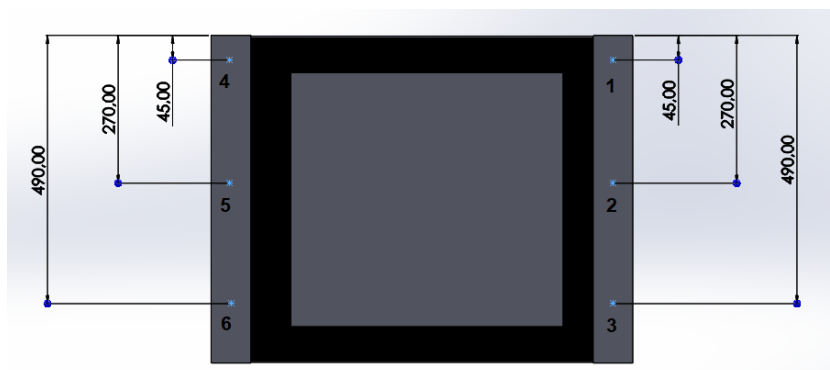


Figura 5.5: Pontos utilizados na medição de temperaturas de uma porta de um *Turboram 5T*.

Na Tabela 5.1 apresentam-se as temperaturas registadas, com a numeração adaptada na Figura 5.5. Os valores das temperaturas 4, 5 e 6 pertencem ao lado esquerdo da porta, onde é realizada a abertura ou fecho da porta, enquanto que as temperaturas 1, 2 e 3 pertencem ao lado direito, ou seja, o lado da dobradiça da porta. As temperaturas no lado de trás da calha foram distinguidas usando um apóstrofo.

Tabela 5.1: Temperaturas registadas nos vários pontos de medição, tanto na placa posterior como anterior.

	Lado do fecho		Lado da dobradiça	
Frente	T4	60°C	T1	59°C
	T5	44°C	T2	41°C
	T6	31°C	T3	28°C
Trás	T4'	150°C	T1'	115°C
	T5'	114°C	T2'	54°C
	T6'	53°C	T3'	34°C

Analisando a Tabela 5.1 verifica-se que as temperaturas na zona de trás, em ambas as calhas, do lado do fecho e do lado da dobradiça, são maiores que as da zona da frente. Este resultado é óbvio, já que a zona de trás está muito mais próxima da câmara do forno. Outra característica é o facto das temperaturas na zona superior da calha, pontos 1, 1', 4 e 4' serem muito superiores às temperaturas da zona inferior, mostrando que a porta do forno aquece bastante mais em cima do que em baixo. Algumas destas temperaturas, como é o caso da T4', T5' e T1' estão acima da temperatura crítica da luminária LED (100°C), mostrando que é efetivamente necessário criar alterações na porta, como é o caso da furação proposta. Por outro lado, é ainda possível verificar que o lado do fecho da porta aquece mais que o lado da dobradiça. Esta situação pode ser explicada, já que a porta não se encontra simétrica em relação à câmara do forno mas sim deslocada para a direita, como se representa na Figura 5.6, visto ainda existir a presença do painel do forno ao lado do sistema de abertura/fecho da porta. Desta forma, este mesmo lado da porta estará sujeito a um maior fluxo de calor proveniente do interior do forno em relação ao lado da dobradiça, onde o aquecimento provém essencialmente da condução do calor.



Figura 5.6: Assimetria da porta do *Turboram* em relação à câmara do forno.

5.3 Medição de temperaturas após a furação proposta na porta

5.3.1 Primeiros testes aos LEDs com o forno ligado

As três sondas utilizadas como instrumento de medição de temperaturas neste trabalho foram colocadas em três posições diferentes, sendo estas o furo inferior do lado da dobradiça, de forma a medir a T_{SondaLED} , o furo F1 e a posição T1' do estudo apresentado no subcapítulo 5.2, de forma a comparar valores antes e depois da furação. As sondas foram fixadas com o auxílio de fita de alumínio, conforma a Figura 5.7.



Figura 5.7: *Setup* para medição das temperaturas nos dois furos laterais da calha direita.

Os resultados foram retirados após 1 hora e meia de funcionamento do forno a 300°C, tendo sido registados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Temperaturas medidas pelas três sondas no lado da dobradiça da porta.

Furação aberta	
T_{SondaLED} [°C]	52
T_{F1} [°C]	54
$T_{1'}$ [°C]	101
Furação superior tapada por 10 mins	
T_{SondaLED} [°C]	90
T_{F1} [°C]	93

De forma a verificar a existência de alterações nas temperaturas no interior da calha após a furação, foi tapada a furação superior durante 10 minutos com fita de alumínio. Os resultados desta análise também se encontram na Tabela 5.2.

Prova-se que a furação tem um efeito positivo nas temperaturas praticadas no interior da calha, onde, com apenas 10 minutos de furação superior tapada existe um aumento de 38°C em relação à furação aberta. A temperatura de 52°C na zona de trás dos LEDs é bastante positiva, mostrando que é possível a aplicação da luminária LED no lado da dobradiça da porta. É de notar que, conforme provado no subcapítulo 5.1, as temperaturas no dissipador de calor não são uniformes, pelo que a temperatura registada pode não ter sido corretamente medida, ou pode ter sido medida numa região inferior da luminária LED, onde as temperaturas são menores. Por este motivo e também para se obter uma análise mais pormenorizada destas temperaturas, outros testes foram realizados, apresentados no subcapítulo 5.3.3. A temperatura $T_{1'}$ diminuiu 14°C quando comparada ao caso em que a porta não sofreu alterações.

Também do lado do fecho foram realizadas medições de temperatura, no entanto, devido à dificuldade na colocação das sondas nesta zona, mediu-se apenas, nesta fase do trabalho, a temperatura da sonda na zona frontal da luminária LED, em contacto com o vidro fosco. Uma outra sonda foi colocada no furo F2 para medir a temperatura ambiente do ar interior e a terceira sonda foi colocada na posição 4' do ensaio do subcapítulo 5.2. A Figura 5.8 mostra a colocação de uma sonda no furo F2, assim como a dificuldade existente nesta região, devido à proximidade da porta com o painel do forno, possibilitando apenas um espaço reduzido para a colocação das sondas. A Tabela 5.3 apresenta os resultados ao fim do forno estar ligado por 40 minutos a 300°C. Assim como no processo anterior, foi tapada por 10 minutos a furação superior de forma a poder ser possível verificar a viabilidade da proposta. Estes resultados também estão presentes na Tabela 5.3.

Mais uma vez constata-se que as temperaturas aumentam com o facto de se tapar a furação. A temperatura na zona frontal do LED é superior aos 100°C, valor da temperatura crítica dos LEDs em uso. No entanto, a placa LED encontra-se pressionada de forma a se situar em contacto com o dissipador de calor, pelo que esta temperatura medida deverá ser sempre superior à temperatura atual da junção dos LEDs, o que impossibilita a apreensão de conclusões acerca da efetividade da proposta. A temperatura do furo F2 é superior à temperatura registada na Tabela 5.2 para o furo F1, o que mostra



Figura 5.8: Pormenor da zona do fecho da porta, evidenciando a dificuldade presente para a medição de temperaturas nesta região.

Tabela 5.3: Temperaturas medidas pelas três sondas no lado do fecho da porta.

Furação aberta	
$T_{\text{SondaLEDFrontal}} [^{\circ}\text{C}]$	104
$T_{\text{F2}} [^{\circ}\text{C}]$	71
$T_{4'} [^{\circ}\text{C}]$	140
Furação superior tapada por 10 mins	
$T_{\text{SondaLEDFrontal}} [^{\circ}\text{C}]$	114
$T_{\text{F2}} [^{\circ}\text{C}]$	110
$T_{4'} [^{\circ}\text{C}]$	149

que o ar na calha do lado esquerdo encontra-se a uma temperatura superior à do ar na calha direita, para uma cota razoavelmente equivalente, tanto com a furação aberta como para o caso da furação superior fechada. A temperatura $T_{4'}$ manteve-se praticamente inalterada após a furação da porta.

Um terceiro teste foi realizado, usando duas sondas colocadas na zona frontal das luminárias LED, em contacto com o vidro fosco das mesmas, uma de cada lado. Ao fim de uma hora com o forno a 300°C e com a furação aberta registaram-se os valores da Tabela 5.4.

Em ambos os lados as temperaturas foram muito próximas e bastante superiores à $T_{\text{SondaLEDFrontal}}$ medida anteriormente, de 104°C , o que se justifica devido à não uniformidade de temperaturas ou até mesmo por eventuais erros de medição anteriores.

Tabela 5.4: Temperaturas medidas na zona frontal das luminárias LED.

Lado do fecho	
$T_{\text{SondaLEDFrontal}} [^{\circ}\text{C}]$	131
Lado da dobradiça	
$T_{\text{SondaLEDFrontal}} [^{\circ}\text{C}]$	130

Outras observações

Não só as temperaturas de funcionamento foram estudadas nestes primeiros testes. Nesta secção são apresentadas outras observações recolhidas após a aplicação dos LEDs na porta.

1. A luminosidade no interior do forno é igualmente importante e esta foi verificada após a colocação das luminárias LED na porta do forno. Na Figura 5.9 pode verificar-se a mesma na câmara do forno. A luminosidade, embora a olho nu aparente ser menor quando comparado às quatro lâmpadas de halogéneo, parece adequada, iluminando toda a câmara do forno de uma forma relativamente uniforme, excetuando-se duas riscas verticais na placa traseira do forno, originadas da reflexão da luz promovida pelos refletores. É ainda possível ver a luz branca mais acentuada nos próprios pontos LED, característica esta que é própria da sua utilização. A luminária *BJB 77.116.1005.36*, com comprimento maior, poderá ser integrada no forno de 5 tabuleiros. Isto iria disfarçar esta característica, já que a luz branca mais intensa estaria distribuída por toda a altura da porta e não só na região intermédia.

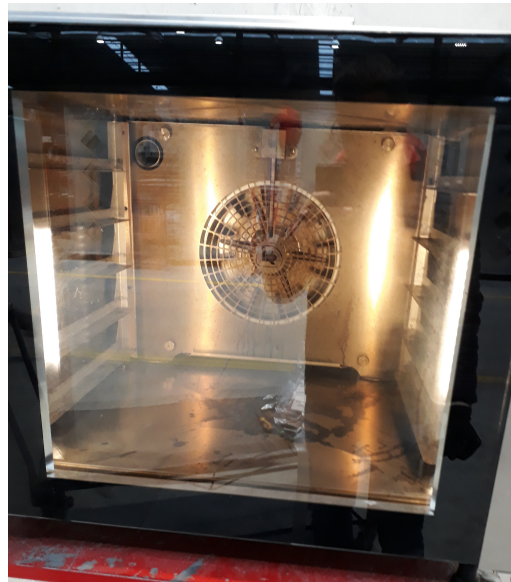


Figura 5.9: Câmara do forno de ensaios de 5 tabuleiros, com iluminação LED.

2. Foram utilizadas duas luminárias LED para apenas uma fonte de alimentação de 12VDC e 1A, montadas em paralelo. Por este motivo a amperagem aplicada a cada

uma é de 0,5A e a voltagem aplicada é relativamente menor que 12V, o que, a olho nu, não provocou qualquer diferença em termos de luminosidade.

3. Por forma a verificar o comportamento dos LEDs após a diminuição da sua temperatura foram realizados testes de arrefecimento rápido dos LEDs, onde, com a porta do forno aberta, se reduziu a temperatura deste. A temperatura da luminária LED do lado do fecho reduziu-se para 30°C ao fim de 25 minutos. Os LEDs mantiveram-se em funcionamento com uma luminosidade constante durante todos os processos de aquecimento/arrefecimento dos mesmos, mostrando mais uma vez a sua viabilidade na aplicação em estudo.
4. Os fios condutores das luminárias LED são isolados por PVC e têm uma área de secção de 0,35 mm². A temperatura máxima para este tipo de condutores é de 105°C [36]. Por este motivo torna-se aconselhado a que estes sejam atravessados pela região inferior da porta, onde as temperaturas são bastante reduzidas e onde não existem riscos para os fios condutores.
5. A variação da temperatura do espaço onde o forno se encontra inserido influencia as medições, devido à convecção existente entre o forno e o ar exterior. Desta forma as temperaturas registadas variam alguns graus dependendo do dia em que foram registadas.

5.3.2 Distribuição de temperaturas na furação superior

A furação superior possui 86 furos, todos com o mesmo diâmetro e espaçamento constante. No entanto, o ar que circula nas calhas laterais irá tender a escapar pelos furos mais próximos das laterais, existindo uma não uniformidade no caudal de escape de ar pelos vários furos. De modo a entender como é o comportamento a nível de temperaturas do ar, estas foram obtidas à saída de cada furo da furação superior. Esta medição foi realizada de acordo com a Figura 5.10, medindo-se três temperaturas diferentes de 7 em 7 minutos e colocando as sondas nos furos da primeira linha, resultando num total de 43 determinações. A nomenclatura adotada neste relatório foi de que, para uma determinada coluna número N, o valor da temperatura registada indica-se com a designação T_N. A distribuição de temperaturas foi elaborada sempre com ambas as furações abertas e foi apresentada de forma gráfica no subcapítulo 6.2, onde é elaborada com mais detalhe a sua análise.

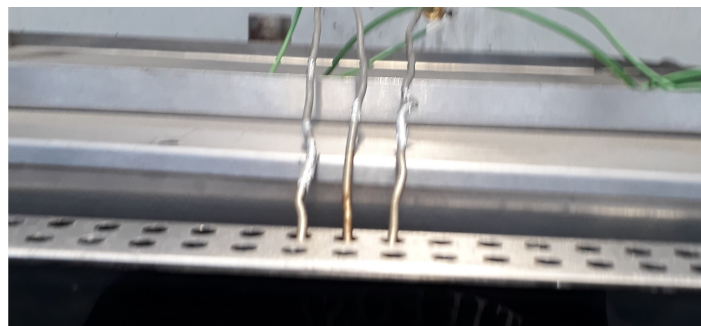


Figura 5.10: *Setup* para medição das temperaturas do ar à saída da furação superior.

5.3.3 Testes de comportamento térmico dos LEDs com e sem furação

De modo a obter resultados mais pormenorizados das temperaturas existentes no interior das calhas laterais, foram realizados ensaios, onde, com a furação inferior aberta e tapando a furação superior, esta última iria sendo destapada progressivamente, da esquerda para a direita ou vice-versa, de modo a verificar o efeito que a abertura de cada furo gera nas temperaturas a avaliar. Na Figura 5.11 encontra-se um exemplo onde a furação é aberta da direita para a esquerda, encontrando-se neste caso 16 furos abertos.

Um primeiro teste permitiu obter resultados para as temperaturas do lado da dobradiça do forno, sendo estas a T_{SondaLED} , a T_{F1} e a T_{43} , valor da temperatura medida na coluna número 43 da furação superior, após o forno atingir o regime estacionário, estando 1 hora em funcionamento a 300 °C. Os furos foram abertos progressivamente da direita para a esquerda e os valores foram registados de 5 em 5 minutos.



Figura 5.11: Exemplo de um dos estados da furação superior, onde foram abertos apenas 16 furos do lado da dobradiça.

Num segundo teste mediram-se as mesmas temperaturas, do lado da dobradiça, no entanto o sentido em que a fita de alumínio era removida foi o oposto, destapando-se os furos da esquerda para a direita. Os resultados também foram determinados após o regime estacionário do forno e registados de 5 em 5 minutos, tentando ao máximo reduzir erros de medição, já que as temperaturas lidas no painel deveriam estabilizar primeiramente. Na Figura 5.12 encontra-se um exemplo deste ensaio, onde no caso se encontram 16 furos abertos do lado do fecho da porta e apenas um do lado da dobradiça. Este furo encontra-se aberto de modo a ser possível medir a temperatura de saída do ar na última coluna, designada neste relatório por T_{43} .



Figura 5.12: Exemplo de um dos estados da furação superior, onde foram abertos apenas 16 furos do lado do fecho.

No caso da luminária LED do lado esquerdo, o difícil acesso levou a erros de medição na leitura da temperatura da sonda em contacto com a luminária LED, sendo provável que a mesma não estivesse em total contacto e como tal, mediu apenas a temperatura ambiente naquela região. Assim sendo, não se conseguiu obter um estudo equivalente para o lado esquerdo da porta. No entanto foi ainda possível obter valores para a temperatura

T_{F2} e T_1 , o que permitem ainda assim averiguar as consequências da abertura gradual, da esquerda para a direita, de furos na furação superior.

A análise e discussão dos resultados obtidos neste subcapítulo é elaborada no capítulo seguinte (subcapítulo 6.1).

5.3.4 Influência da furação inferior nas temperaturas dos LEDs

Os testes anteriores foram todos realizados com a furação inferior aberta, sendo alteradas apenas as condições de saída do ar, pela furação superior. Nesta secção pretende-se avaliar a influência da furação inferior na passagem de ar, de forma independente, onde a furação superior manteve-se sempre aberta. Designando a área da furação superior aberta por A_s e variando a área de entrada do ar (área inferior), designada por A_i , foram medidas as temperaturas T_{SondaLED} , T_{F1} e T_{43} , com a colocação das sondas de forma igual aos ensaios anteriores. Estas medições foram realizadas destapando a furação inferior de igual forma, de ambos os lados, como mostra o exemplo da Figura 5.13, onde nesse caso estão 2x15 furos abertos do lado esquerdo e 2x14 furos abertos do lado direito, o que dá um valor de $\frac{A_i}{A_s}$ próximo de $\frac{2}{3}$. Na mesma Figura, a azul está representada a fita de alumínio. Na Tabela 5.5 estão indicados os 6 ensaios realizados para diferentes valores de $\frac{A_i}{A_s}$.



Figura 5.13: Exemplo de um dos estados da furação inferior utilizada neste teste.

Tabela 5.5: Suma das configurações usadas no ensaio de influência da furação inferior.

Nº Furos Abertos	Nº Furos Abertos	$\frac{A_i}{A_s}$
Lado esquerdo	Lado direito	
2x22	2x21	1
2x15	2x14	0,67
2x11	2x10	0,5
2x6	2x5	0,25
2x3	2x2	0,125
2x0	2x0	0

Os resultados deste teste foram medidos de 15 em 15 minutos e encontram-se apresentados de forma gráfica no subcapítulo 6.3, onde os mesmos são analisados.

5.3.5 Influência do diâmetro da furação nas temperaturas dos LEDs

Para verificar se, com o aumento do diâmetro da furação, é possível diminuir ainda mais as temperaturas no dissipador de calor das luminárias LED, foi criada uma nova furação na mesma porta, alargando todos os furos da placa inferior da porta para um diâmetro igual a 10 mm e alargando apenas os furos intermédios da furação superior com uma broca de 10 mm, mantendo os restantes furos com o mesmo diâmetro anterior de 7 mm. Nas Figuras 5.14 e 5.15 mostra-se a nova furação. A criação da diferença entre a furação superior e inferior teve por intuito verificar se existe alguma vantagem em possuir maior área de entrada de ar comparada à área de saída. É de notar que a furação de diâmetro 10 mm torna-se algo exagerada, o que gera algumas distorções nas chapas da porta, podendo reduzir a sua resistência, assim como obter desvantagens no aspeto estético.

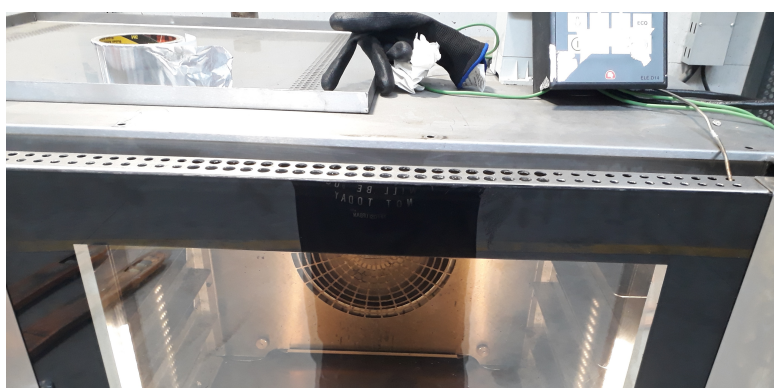


Figura 5.14: Nova furação superior com 44 furos com diâmetro de 7 mm e 42 furos com diâmetro de 10 mm.



Figura 5.15: Nova furação inferior com 86 furos com diâmetro de 10 mm.

Para esta nova furação foram novamente realizados os seguintes testes:

1. Um primeiro teste para se obterem os valores das temperaturas quando ambas as furações estão abertas, de modo a averiguar se efetivamente é possível obter uma diminuição das temperaturas com o aumento do diâmetro da furação.

2. Um teste para obter a distribuição de temperaturas na furação superior da porta quando ambas as furações estão abertas.
3. Um teste com a furação inferior aberta e com a alteração do estado de saída do ar, abrindo a furação superior da direita para a esquerda, destapando a fita de alumínio. Neste ensaio foram medidas as temperaturas T_{SondaLED} e T_{F1} do lado da dobradiça da porta.
4. Um último ensaio com a furação inferior tapada e com a alteração do estado de saída do ar, abrindo a furação superior da direita para a esquerda, destapando a fita de alumínio. Neste ensaio foram medidas as temperaturas T_{SondaLED} e T_{F1} do lado da dobradiça da porta.

Para o ponto 1. os resultados estão apontados na Tabela 5.6. Do lado da dobradiça da porta mediram-se as temperaturas com a nova furação após o forno se encontrar a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ao fim de 1 hora e 30 minutos. Do lado do fecho tentou-se também medir a temperatura ambiente no furo F2, a temperatura da sonda em contacto com a luminária LED e a temperatura ambiente próxima do dissipador de calor, $T_{\infty \text{ LED}}$.

Os resultados obtidos mostram que, do lado da dobradiça, não existiram alterações nas temperaturas com o aumento do diâmetro da furação. Do lado do fecho, verifica-se mais uma vez que se praticam temperaturas bastante mais altas. Comparando com os valores obtidos da T_{F2} para a furação base verifica-se ainda um aumento desta temperatura, mostrando o efeito negativo desta furação no lado do fecho da porta.

Tabela 5.6: Temperaturas principais após a 2^a furação efetuada.

Lado do fecho	
$T_{\text{SondaLED}} [^{\circ}\text{C}]$	75
$T_{F2} [^{\circ}\text{C}]$	77
$T_{\infty \text{ LED}} [^{\circ}\text{C}]$	57
Lado da dobradiça	
$T_{\text{SondaLED}} [^{\circ}\text{C}]$	52
$T_{F1} [^{\circ}\text{C}]$	49
$T_{43} [^{\circ}\text{C}]$	71

Para o ponto 2. os valores foram obtidos após o forno atingir o regime estacionário e medidos de 5 em 5 minutos. Os resultados encontram-se de forma gráfica no subcapítulo 6.2 e foram comparados aos da furação anterior.

Os resultados dos pontos 3. e 4. também pretendem averiguar as alterações nas temperaturas com a nova furação. Estes valores foram medidos de 7 em 7 minutos e, para ambos os casos, quer com a furação inferior aberta (ponto 3.) quer com a mesma tapada (ponto 4.), apresentam-se de forma gráfica na Figura 6.8 do subcapítulo 6.1.

5.4 Influência da furação proposta no consumo elétrico do forno

O calor gerado pelas resistências do forno permitem o aumento das temperaturas no interior do forno, no entanto, mesmo com um ótimo isolamento térmico, existem sempre perdas de calor, pelas placas do forno ou pela porta. Estas devem ser as menores possíveis, de forma a não aumentar o consumo elétrico do forno *Turboram*. As perdas pela porta do forno dependem sobretudo da resistência térmica total que a porta promove ao fluxo de calor dissipado. De forma a averiguar se esta resistência térmica é alterada, e conseqüentemente o consumo elétrico do forno, devido à furação proposta, foram realizados testes que permitem calcular o consumo elétrico antes e após da furação, num período de uma hora.

O *Turboram* possui uma alimentação trifásica, ou seja, possui três resistências, cada uma com uma potência elétrica de 3,1kW para a geração de calor. Desta forma, a potência das resistências é dada pela equação 5.1 e o consumo elétrico ao fim de uma hora de funcionamento pode ser calculado pela equação 5.2, onde $t_{\text{Resist.Ligadas}}$ é a soma dos tempos cronometrados em que as resistências estiveram ligadas.

$$Q_{\text{Resistências}} = 3 * Q_{\text{Resistência}} = 9,3kW \quad (5.1)$$

$$\text{Consumo} = Q_{\text{Resistências}} * t_{\text{Resist.Ligadas}} [kWh] \quad (5.2)$$

Para a segunda furação criada aberta, $t_{\text{Resist.Ligadas}}$ foi cronometrado e de seguida taparam-se ambas as furações, superior e inferior, de forma a simular o consumo da porta sem alterações. Os $t_{\text{Resist.Ligadas}}$ e respetivos consumos elétricos foram registados na Tabela 5.7. Os resultados mostram que o consumo com a furação aberta é o menor, embora por um valor não muito significativo. Considerando os erros de medição, pode-se concluir que não há qualquer alteração no consumo elétrico do forno após a alteração proposta, sendo portanto uma solução que não requer custos elétricos acrescentados para o cliente, trazendo mais uma vantagem na sua utilização futura.

Tabela 5.7: Consumo elétrico antes e após a furação proposta.

	Furação tapada	Furação aberta
$t_{\text{Resist.Ligadas}}$ [min]	11,57	11,47
$t_{\text{Resist.Ligadas}}$ [h]	0,193	0,191
Consumo [kWh]	1,793	1,778

5.5 Medição da velocidade de ar na calha interior da porta do forno

Um outro ensaio foi executado, onde foi medida a velocidade do ar ascendente no interior da calha do lado da dobradiça da porta, utilizando o equipamento anteriormente apresentado.

No teste realizado, o tubo de *Pitot* foi colocado através do furo F1, tentando com que este se encontrasse sensivelmente no meio da calha, de modo a se conseguir medir a velocidade máxima do escoamento de ar, assim como se teve o cuidado de verificar o paralelismo entre o tubo de *Pitot* e o escoamento, embora nem sempre possível de se obter, devido às condições existentes para o ensaio. A configuração usada está ilustrada na Figura 5.16 e a temperatura definida no micromanómetro foi igual à T_{F1} medida anteriormente para as mesmas condições do estado da furação inferior e superior. O micromanómetro foi configurado de forma a que, para cada medição, durante 1 minuto se obtivessem 6 registos. A velocidade do ar obtida é dada como a média das 6 amostras e designada neste relatório por $v_{méd}$. É importante referir que estes testes ocorreram após ser efetuada a 2ª furação, pelo que os valores de T_{F1} usados dizem respeito a este arranjo.

Foram realizados dois testes, um com a furação inferior tapada e outro com esta aberta e, em ambos os casos, foi alterado o número de furos abertos na zona superior, descobrindo esta furação no sentido da direita para a esquerda. Na Tabela 5.8 encontram-se os resultados obtidos para a furação inferior aberta e na Tabela 5.9 os resultados para a furação inferior tapada, assim como as respetivas temperaturas do furo F1 colocadas no *software* do micromanómetro.



Figura 5.16: Tubo de *Pitot* colocado no interior da calha do lado direito da porta do forno, por meio do furo F1.

Tabela 5.8: Alteração da velocidade do ar com a abertura progressiva da furação superior, mantendo a furação inferior aberta.

Nº de Furos	T_{F1} [°C]	$v_{méd}$ [m/s]
Abertos		
0	102	0,79
22	78	0,66
44	56	0,48
86	52	0,40

Tabela 5.9: Alteração da velocidade do ar com a abertura progressiva da furação superior e com a furação inferior tapada.

Nº de Furos	T_{F1} [°C]	$v_{méd}$ [m/s]
Abertos		
0	111	0,09
8	106	0,59
16	103	0,48
24	100	0,47
32	96	0,33
40	93	0,35
56	90	0,37
86	88	0,41

Capítulo 6

Análise e Discussão dos Resultados Experimentais

Neste capítulo será realizada a análise e discussão dos resultados obtidos através das experimentações realizadas e apresentadas no capítulo anterior. Com esta análise pormenorizada procura-se obter conclusões acerca da proposta de melhoria e dos seus benefícios em comparação à situação atual da porta do forno, assim como procurar uma possível otimização para a furação proposta. Também se pretende abordar e discutir o seguimento das alternativas à localização das luminárias LED, anteriormente referidas.

6.1 Análise do comportamento térmico dos LEDs com e sem furação

A Figura 6.1 ilustra um gráfico com a evolução da T_{SondaLED} (a azul para a furação base e a amarelo para a 2ª furação efetuada), da T_{F1} (a laranja para a furação base) e da T_{43} (a cinza para a furação base), com a abertura progressiva da furação superior, da direita para a esquerda, mantendo a furação inferior aberta.

Regra geral, o aumento do número de furos abertos gera uma diminuição progressiva em todas as temperaturas, ainda que, para um número reduzido de furos abertos, a temperatura da coluna número 43 da furação superior (furo localizado mais junto à dobradiça da porta), T_{43} , aumente, embora não muito significativamente. Para o caso da furação base, a T_{SondaLED} baixa de 94°C para 52°C, com a abertura total da furação superior, enquanto que para o caso da segunda furação a temperatura baixa dos 84°C para os 52°C. Deste modo, quando a furação superior está tapada, a alteração no diâmetro da furação inferior de 7 mm para 10 mm diminuiu a temperatura em 10°C. Observa-se que, ao fim dos 40 furos abertos do lado direito, correspondendo a 20 colunas de furos, a T_{SondaLED} mantém-se mais ou menos constante num valor próximo dos 52°C, mostrando que os restantes 46 furos do lado esquerdo (2x23) não geram influência nas temperaturas da luminária LED do lado da dobradiça (lado direito). Verifica-se ainda que a temperatura ambiente no furo F1, T_{F1} tende a obter um valor muito próximo da T_{SondaLED} , com o aumento do número de furos abertos. Embora com um número de amostras mais reduzido, conclui-se que a alteração da furação não obteve quaisquer melhorias na T_{SondaLED} , já que esta fixou-se no mesmo valor que no caso da furação base.

Assim, conclui-se que para o caso do arrefecimento de apenas uma luminária LED

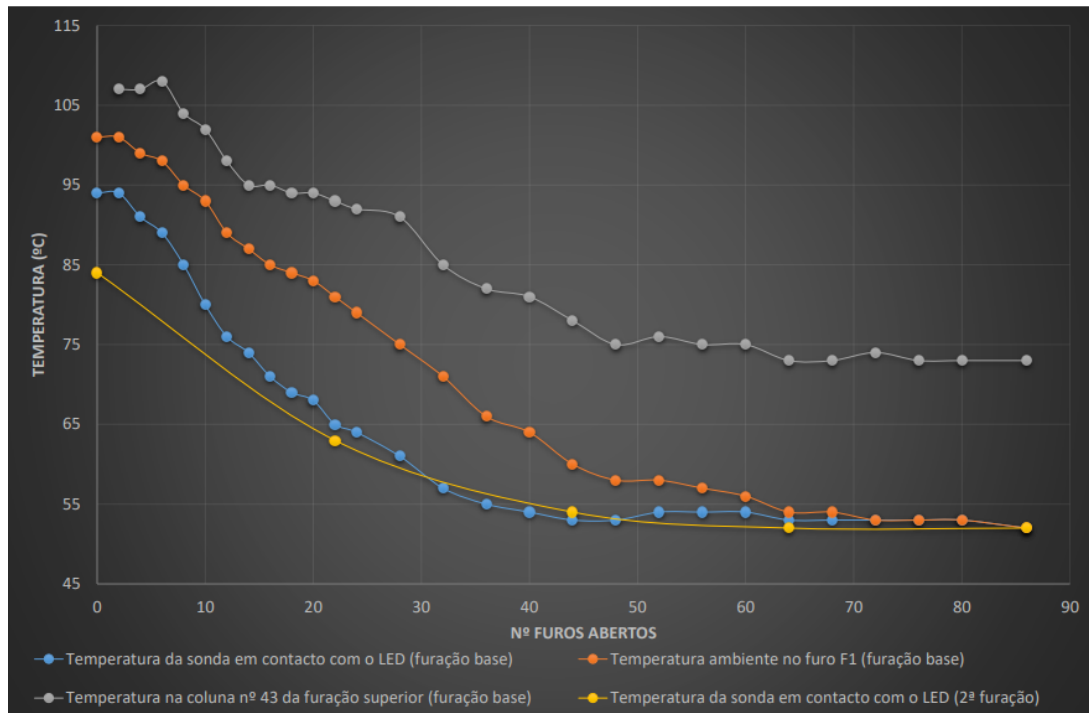


Figura 6.1: Variação das temperaturas do lado da dobradiça com a abertura da furação superior no sentido direita-esquerda.

BJB 77.116.1002.36 do lado da dobradiça da porta, apenas os 40 furos de diâmetro de 7 mm do mesmo lado da porta seriam necessários para obter a temperatura mínima de 52°C. Prevê-se ainda que o aumento do diâmetro da furação inferior e superior não diminua este valor, pelo que o diâmetro ótimo para a furação, ainda que não encontrado neste estudo, poderá encontrar-se num valor menor ou igual aos 7 mm.

Para o caso da abertura da furação superior no sentido da esquerda para a direita, os valores obtidos encontram-se no gráfico da Figura 6.2.

Os resultados mostram que o número de furos abertos na extremidade da esquerda influencia significativamente todos os valores de temperaturas na calha direita, quando a furação do lado direito está tapada. A temperatura T_{SondaLED} tende a estabilizar, ou seja, mantém-se constante a partir dos 64 furos abertos do lado esquerdo (2x32), próxima dos 51°C, significando que, para este ensaio, os 22 furos mais à direita na porta não se consideram significativos. Percebe-se que, a abertura de ainda mais furos só permite apenas a diminuição contínua das temperaturas do ar, T_{43} e T_{F1} , sendo que esta última tem uma diminuição quase linear. A tendência deste gráfico prevê que, com uma continuação do aumento do número de furos abertos, a temperatura do ar T_{F1} continuará a descer, abaixo dos 51°C, o que não acontecerá com a temperatura do dissipador de calor da luminária LED, que se antevê constante. Este facto pode explicar-se devido à geração de calor proveniente dos LEDs, mostrando que efetivamente devido sobretudo à temperatura ambiente e à velocidade do ar na calha lateral direita, não é possível diminuir a temperatura T_{SondaLED} abaixo dos 51°C. Um outro resultado é que, à semelhança do gráfico anterior, para um número baixo de furos abertos, a temperatura

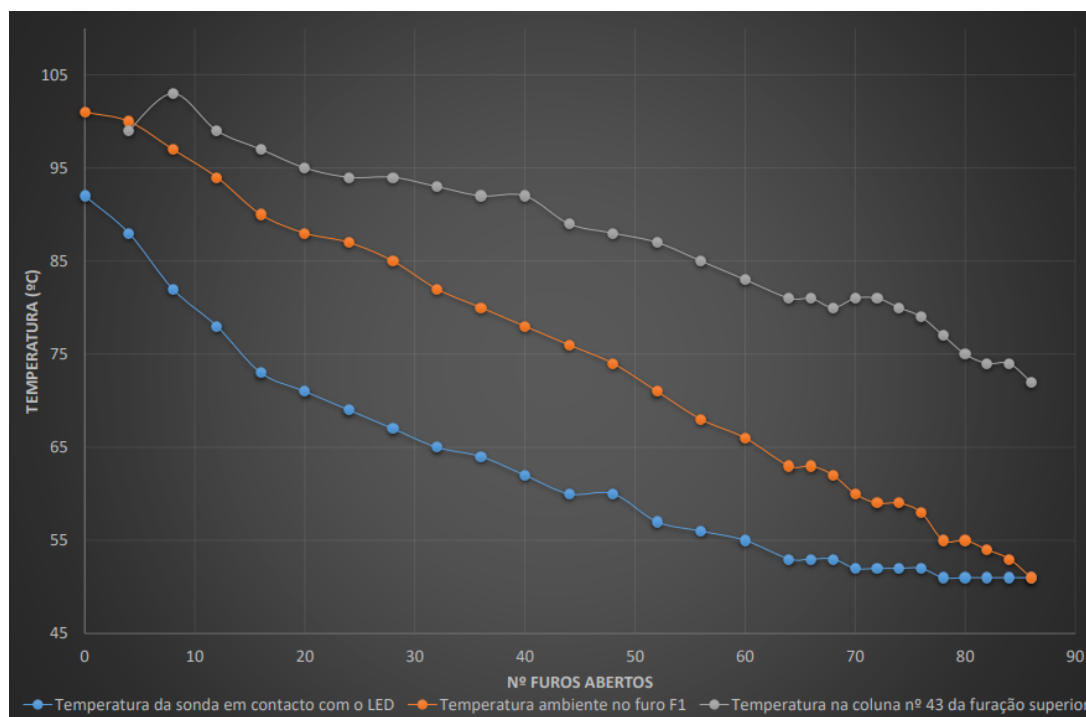


Figura 6.2: Variação das temperaturas do lado da dobradiça com a abertura da furação superior no sentido esquerda-direita.

T_{43} tende a aumentar.

No gráfico da Figura 6.3 são apresentadas as duas curvas da variação da T_{SondaLED} do lado da dobradiça, para os dois sentidos de abertura da furação superior. A temperatura da luminária LED do lado da dobradiça da porta baixa mais rapidamente abrindo um menor número de furos do lado direito do que do lado esquerdo. Este resultado é evidente já que o ar quente ascendente da calha direita tende a escapar pelos furos mais próximos, onde, no caso da furação do lado direito estar tapada (abertura no sentido esquerda-direita) não existe essa possibilidade. Este gráfico comprova ainda que, para o caso do arrefecimento da luminária LED do lado da dobradiça, 44 furos abertos do lado direito têm o mesmo efeito que 64 furos abertos do lado esquerdo, assim como possuem o mesmo efeito da furação superior com os 86 furos abertos. Seria possível então jogar com o número de furos a propor numa solução a longo prazo, de modo a que não se criassem outros desnecessários e irrelevantes.

O gráfico da Figura 6.4 diz respeito às temperaturas do lado do fecho. A abertura da furação superior é realizada da esquerda para a direita.

A tendência avaliada nos gráficos apresentados para as temperaturas do lado da dobradiça verifica-se também neste gráfico, no entanto, existe a curiosidade de que, para um baixo valor de número de furos abertos, a temperatura no interior da calha, T_{F2} é superior à temperatura à saída da furação superior, no furo da primeira coluna, T_1 . Verifica-se uma diminuição da temperatura T_{F2} de 127°C para 70°C , o que corresponde a uma diminuição de 57°C após a furação proposta. A temperatura da sonda em contacto com a luminária LED do lado do fecho não foi registada corretamente para a furação

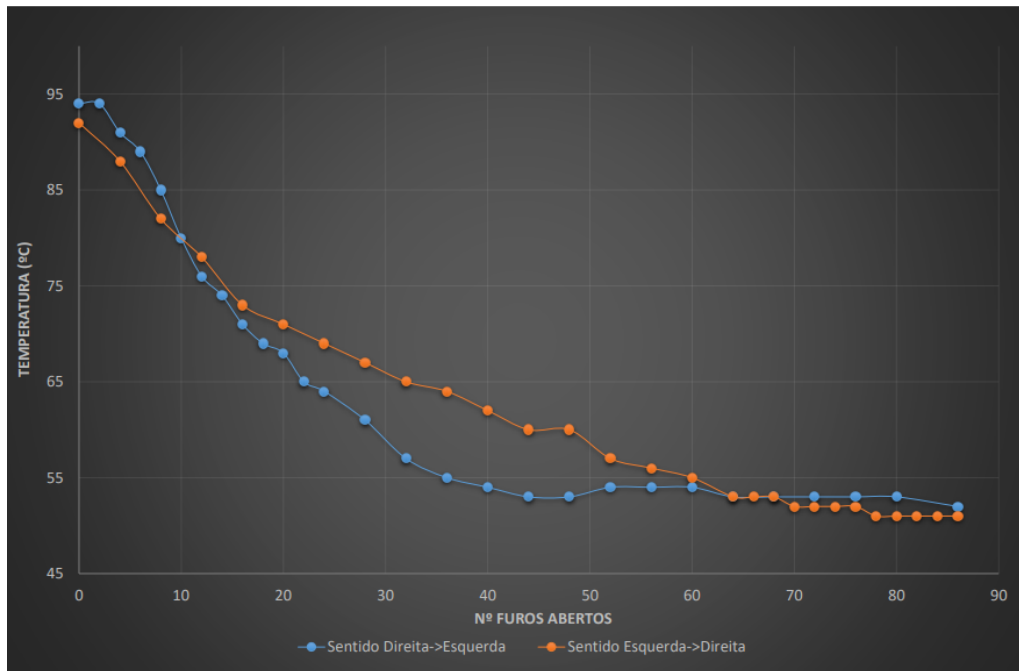


Figura 6.3: Influência do sentido de abertura da furação superior na T_{SondaLED} da luminária LED do lado da dobradiça.

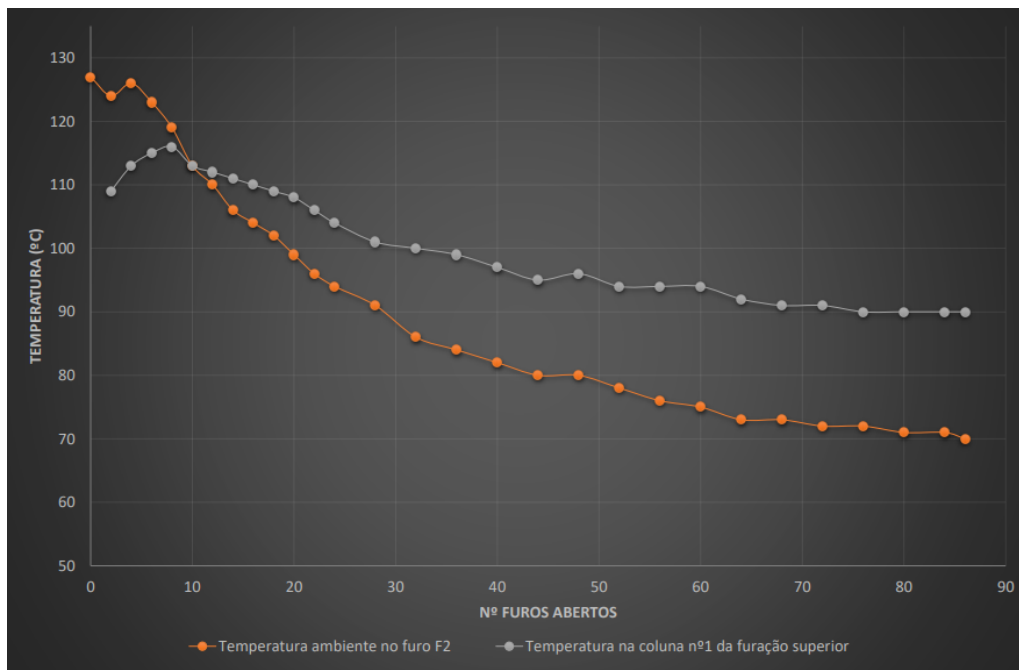


Figura 6.4: Variação das temperaturas do lado do fecho com a abertura da furação superior no sentido esquerda-direita.

base, no entanto, tendo em conta a T_{F2} mínima de 70°C e o valor registado na Tabela 5.6 para a 2ª furação realizada de $T_{\text{SondaLED}} = 75^{\circ}\text{C}$, presume-se que este valor seja próximo destes dados, ficando ainda assim a um valor inferior à temperatura crítica de 100°C .

6.2 Análise da distribuição de temperaturas na furação superior da porta

No gráfico da Figura 6.5 é apresentada a distribuição das temperaturas do ar na saída pela furação superior, com o forno em funcionamento após cada furação proposta efetuada. No eixo horizontal encontra-se o número da coluna a medir, sendo que este varia entre 1 e 43, contando do lado do fecho da porta (lado esquerdo) para o lado da dobradiça (lado direito). No eixo vertical encontra-se a temperatura registada para cada coluna, T_N .

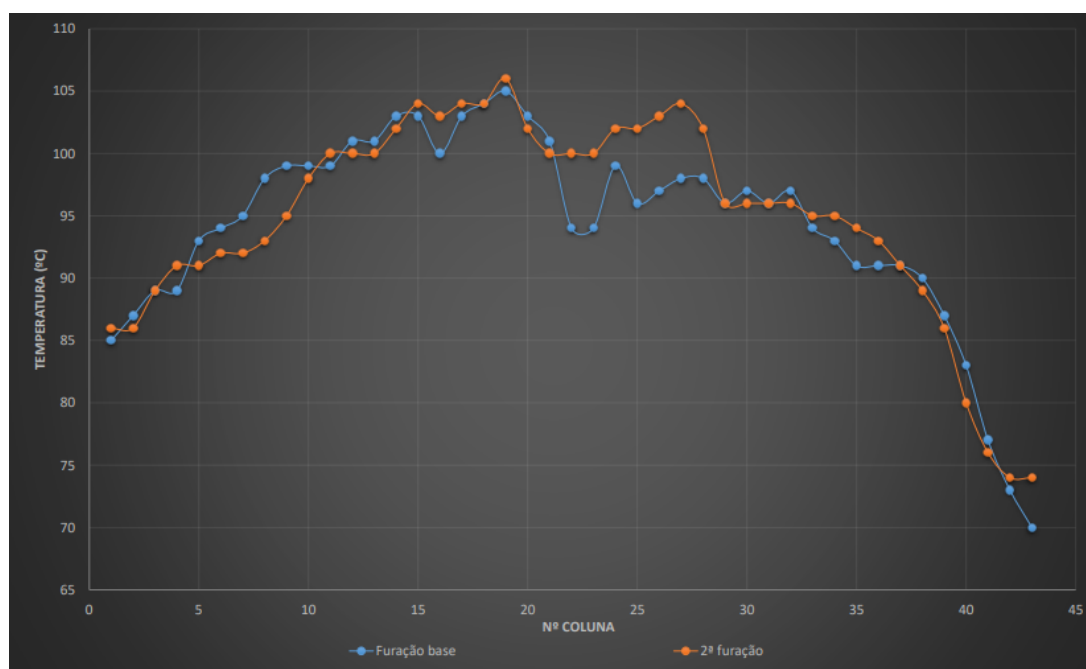


Figura 6.5: Distribuição de temperaturas na furação superior.

Para ambos os casos, verifica-se que as temperaturas de saída do ar na furação superior são bastante mais baixas no lado da dobradiça do que no lado do fecho, existindo um mínimo de temperaturas para T_{43} igual a 70°C , enquanto que do lado do fecho, T_1 toma o valor mínimo de 85°C . A distribuição é bastante semelhante para ambos os casos, existindo, da esquerda para a direita, um aumento nas temperaturas até à coluna nº 19, onde a temperatura é máxima e atinge um valor no caso da 2ª furação igual a 106°C , tornando-se, numa zona a meio da furação, inconstante, possuindo um comportamento não previsível, sendo que a diminuição acentuada até à coluna nº 43 só acontece, para ambas as furações, a partir da coluna 27. Verifica-se ainda que, com o aumento do diâmetro dos furos a meio da porta, existiu, como regra geral, um aumento nas temperaturas destes furos.

Esta análise permite confirmar a ausência de condições para a colocação de uma luminária LED na zona superior da porta do forno, já que nesta zona intermédia o ar envolvente estaria a temperaturas muito elevadas, por vezes superiores aos 100°C.

A zona intermédia da furação encontra-se afastada de ambas as calhas laterais, onde o ar ascende. Esta pode ser uma justificação para o facto de as temperaturas nesta zona serem superiores, já que o ar não procura a saída por esta furação, quer o seu diâmetro seja de 7 mm ou 10 mm.

6.3 Análise da influência da furação inferior nas temperaturas dos LEDs

Todos os resultados anteriores foram obtidos com a furação inferior aberta, o que impossibilita uma exata comparação com aquela que é a realidade atual onde não existe qualquer furação de arrefecimento na porta. No gráfico da Figura 6.6 representam-se os valores da temperatura em função da razão entre a área de entrada e a área de saída do ar, $\frac{A_i}{A_s}$. Foram obtidas as temperaturas T_{SondaLED} , T_{F1} e T_{43} para a situação em que, mantendo a furação superior aberta, iria sendo alterada a área de entrada do ar, A_i

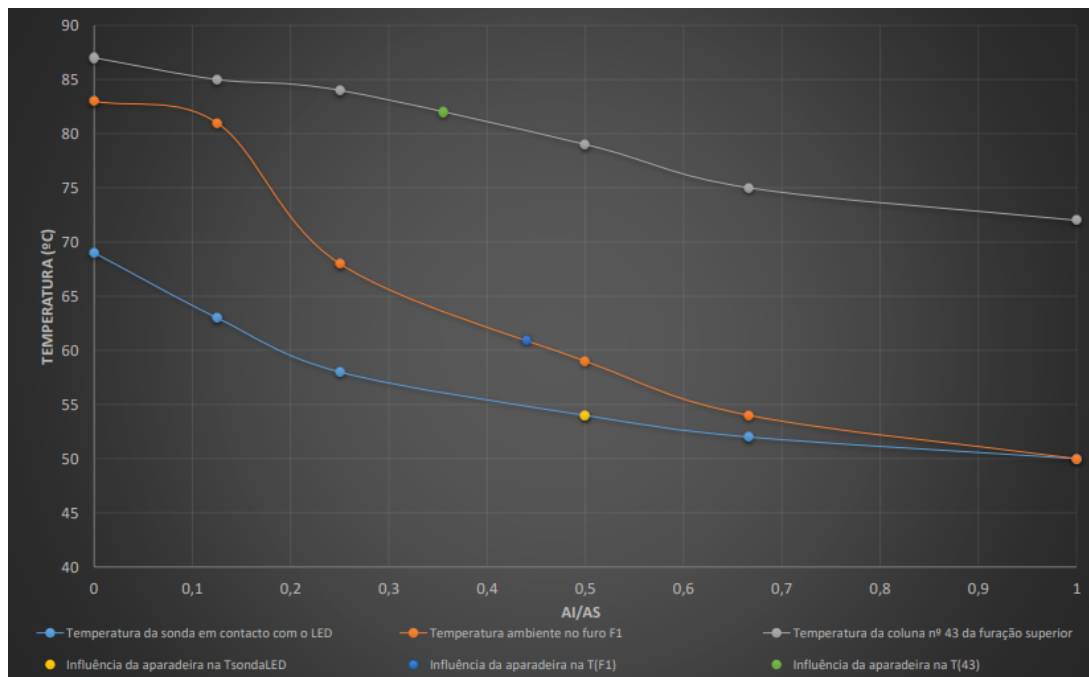


Figura 6.6: Influência da furação inferior e da aparadeira nas temperaturas do lado da dobradiça da porta.

A existência da furação inferior ($A_i/A_s=1$) diminui a temperatura da sonda em contacto com o LED para próximo dos 50°C, enquanto que, caso só fosse realizada a furação superior ($A_i/A_s=0$) esta temperatura estaria nos 69°C. Deste modo, a furação inferior é extremamente importante no arrefecimento dos LEDs e não pode ser descartada. Analisando o gráfico, nota-se que, uma pequena abertura na furação inferior ($A_i/A_s<0,4$)

diminui rapidamente a temperatura da luminária LED do lado da dobradiça da porta, sendo que a abertura do resto da furação permite apenas uma redução de 5°C nesta mesma temperatura.

O forno *Turboram* possui, por de baixo da porta, uma calha, cujo uso permite aparar resíduos que provêm do processo da cozedura, assim como água residual proveniente do banho do forno. Na Figura 6.7 encontra-se um forno *Turboram* com uma aparadeira localizada na zona abaixo da porta. Este componente restringe a entrada do ar pela furação inferior e é importante referir que, todos os ensaios experimentais foram realizados sem aparadeira, pelo que se torna importante aferir a sua influência nas temperaturas a medir. Desta forma foram mantidas as furações base abertas e colocada uma aparadeira no forno de ensaios, medindo novamente as 3 temperaturas em estudo. Estes valores estão também presentes no gráfico da Figura 6.6. Para o caso da T_{SondaLED} o uso da calha aparadeira aumenta a temperatura para os 54°C, o que equivale a manter metade da furação inferior tapada. O aumento de 4°C não é relevante, no entanto, é aconselhado, para manter o bom estado térmico das luminárias LED, que este componente se encontre na horizontal, com uma boa nivelção e também não muito próximo da furação inferior, de modo a que não restrinja ainda mais a entrada do ar.

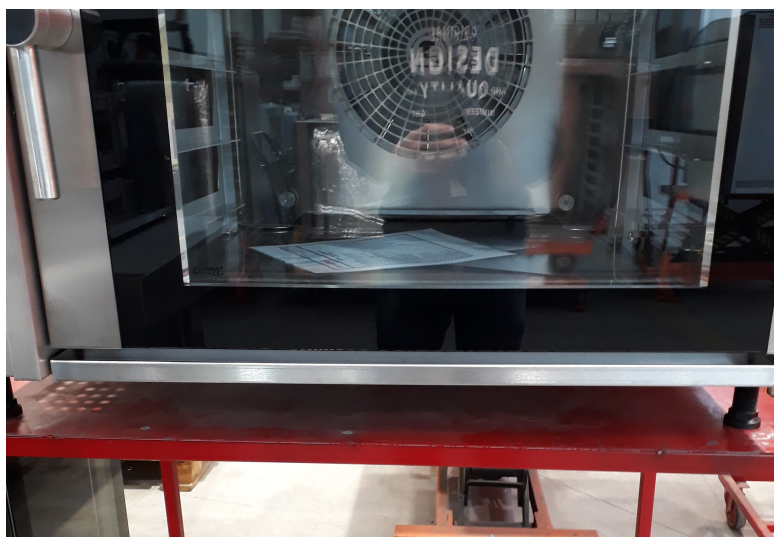


Figura 6.7: Forno *Turboram* com uma calha aparadeira por debaixo da porta.

Ainda com o gráfico da Figura 6.6 em mente, pela tendência da curva a azul, pensou-se que, um aumento da área da furação inferior em relação à área superior ($A_i/A_s > 1$) traria algum acréscimo na diminuição das temperaturas, embora, algo reduzido. Com este intuito de verificação e também tendo em conta que este aumento da área da furação inferior poderia compensar o uso da aparadeira, realizou-se a 2ª furação, já explicada anteriormente. De facto, os resultados para esta nova furação não mostraram qualquer diminuição da temperatura T_{SondaLED} .

Já com a 2ª furação terminada realizaram-se novamente os testes de medição das temperaturas do lado da dobradiça da porta, abrindo a furação superior no sentido da direita para a esquerda. A obtenção dos resultados para o caso em que a furação inferior se encontra aberta e para o caso em que a furação inferior se encontra fechada originaram

o gráfico da Figura 6.8, que procura registar a influência do estado da furação inferior neste tipo de análise, já que todos os resultados para a furação base foram conseguidos com a furação inferior sempre aberta.

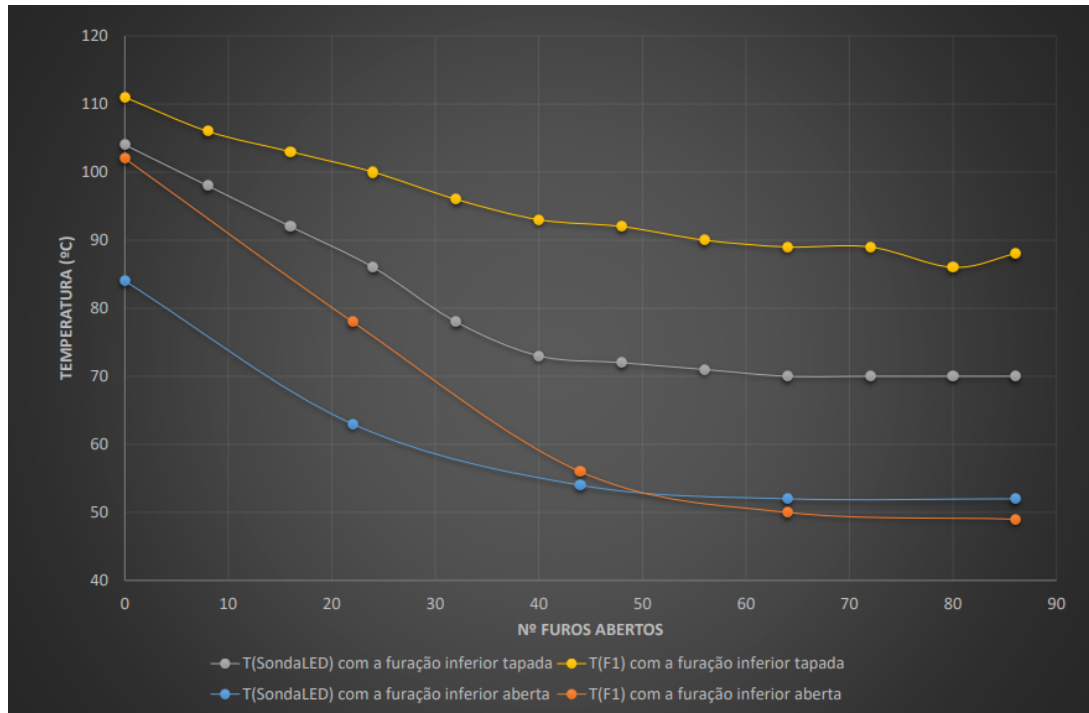


Figura 6.8: Variação das temperaturas com a alteração das condições de entrada e saída do ar, após a 2^a furação.

As curvas da T_{SondaLED} em função da variação do estado de saída do ar na calha (a cinza e a azul) possuem inclinações muito semelhantes, em que, para um certo número de furos abertos na furação superior, a diferença entre possuir a furação inferior aberta ou fechada resulta em aproximadamente 20°C de diferença na temperatura. Desta forma comprova-se mais uma vez a importância da furação inferior no arrefecimento das luminárias LED. Neste gráfico é ainda possível analisar o caso atual da porta onde as duas furações estão fechadas (curva cinza com 0 furos abertos), onde a temperatura registada é de 104°C. Considerando que o efeito da furação em estudo reduziu este valor para próximo dos 52°C (curva a azul com 86 furos abertos), existiu uma redução de 52°C com a furação proposta, para o caso da luminária LED do lado da dobradiça.

Já as temperaturas no furo F1 não possuem um comportamento semelhante. No caso da furação inferior aberta, esta temperatura diminui rapidamente com a abertura da furação superior e pode até obter valores inferiores à T_{SondaLED} , já que esta última mantém-se nos 52°C devido à geração de calor na luminária LED. Já para o caso em que a furação inferior está tapada, a T_{F1} não tende para um valor próximo da T_{SondaLED} , sendo que, passando de 80 para 86 furos abertos, houve até mesmo um aumento da mesma. Estes diferentes comportamentos podem ser explicados pela existência ou não de condições para ocorrer convecção natural na calha. Com a furação inferior tapada não existe entrada de ar frio, o que criará alterações no perfil de velocidades do ar no

interior da porta. Estas alterações poderão criar uma estagnação do ar na zona medida, gerando o aumento da sua temperatura e mantendo-a em valores elevados próximos dos 90°C.

6.4 Análise da velocidade do ar na calha interior do lado direito da porta

O ensaio realizado com um tubo de *Pitot* conectado a um micromanómetro permitiu a obtenção do gráfico da Figura 6.9, onde se encontra a variação da velocidade do ar medida no interior da calha do lado da dobradiça da porta com o tubo de *Pitot* inserido no furo F1 e com a abertura da furação superior da direita para a esquerda em duas situações distintas: com a furação inferior aberta (a azul) e com a furação inferior tapada (a laranja).

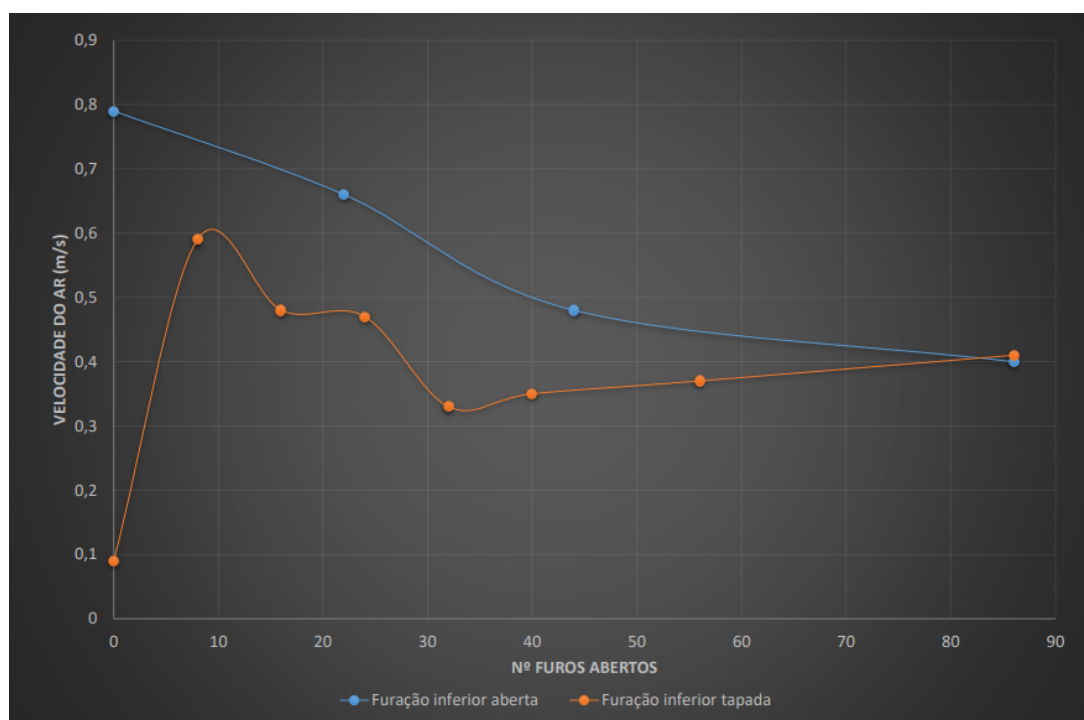


Figura 6.9: Variação da velocidade do ar no interior da calha do lado da dobradiça com a alteração das condições de entrada e saída de ar.

No caso da furação inferior aberta, a velocidade do ar registada tende a diminuir com o aumento do número de furos abertos, sendo que, para o caso em que ambas as furações, superior e inferior estão abertas, regista-se uma velocidade do ar de 0,4 m/s. Com um menor número de furos abertos do lado direito, a área de saída do ar é menor, o que pode justificar o aumento das velocidades do ar nesta situação. O resultado mais importante vem quando a furação inferior é tapada. Na curva a laranja, quando ambas as furações estão tapadas (situação atual da porta), a velocidade do ar é mínima e muito baixa, no valor de 0,09 m/s, no entanto, com uma simples abertura de 8 furos do lado direito da

furação superior (matriz 2x4 de furos) a velocidade do ar passa a ter um valor máximo de aproximadamente 0,6 m/s. Isto comprova que a abertura da furação gera efetivamente um aumento na velocidade ascendente do ar, comprovando a existência de transferência de calor por convecção natural no interior da calha lateral da porta. É de notar que os valores obtidos com este estudo dependem muito da temperatura inserida no *software* do micromanómetro e que, de facto, a temperatura na exata posição do tubo de *Pitot* poderá ser sensivelmente diferente da temperatura ambiente registada com a sonda no furo F1, T_{F1}. Por este motivo os resultados apresentados podem ser inconsistentes assim como poderão existir resultados não esperados e até mesmo divergentes da realidade praticada.

6.5 Análise de outras configurações e localizações possíveis para as luminárias LED

Após os ensaios para a aplicação de duas luminárias LED de dimensões intermédias no *Turboram 5T* estarem concluídos, tornou-se importante verificar a viabilidade da aplicação dos módulos LED noutras localizações na porta do forno, já que estas soluções permitem obter vantagens económicas. Assim, como referido no fim do subcapítulo 4.1 testou-se o uso de uma luminária LED de maiores dimensões (77.116.1005) no lado da dobradiça da porta e também, como proposta no subcapítulo 3.2.3, avaliou-se o uso de uma luminária LED *BJB 77.116.1005* na zona inferior da porta.

6.5.1 Módulo LED *BJB 77.116.1005* à temperatura ambiente

Antes de se colocar a luminária LED de maiores dimensões nas novas posições na porta mediram-se as temperaturas no dissipador de calor que se atingem quando esta está em funcionamento à temperatura ambiente, com o intuito de se comparar à luminária LED até então utilizada neste estudo, de menores dimensões, menor potência e menor luminosidade. Sendo assim, colocaram-se 3 sondas no dissipador de calor, conforme a Figura 6.10, ao longo do comprimento do módulo LED com o objetivo de confirmar a não uniformidade de temperaturas, já obtida anteriormente com o uso da câmara termográfica.

O ensaio realizou-se a uma temperatura ambiente de 31°C e os resultados, exibidos na Tabela 6.1 foram estabelecidos ao fim de 15 minutos de funcionamento.

Demonstra-se mais uma vez que as temperaturas não são uniformes ao longo do comprimento do dissipador de calor e que, a zona superior atinge sempre valores maiores. Comparando aos resultados obtidos para a luminária LED 77.116.1002, verifica-se que se atingem temperaturas superiores na situação do módulo maior, estando este valor portanto relacionado com a maior geração de calor existente, devido à maior potência elétrica requerida nesta última amostra. O valor máximo de 50°C obtido para o caso em que se encontra a temperatura ambiente leva a prever que, numa aplicação no interior do forno, mais propriamente na coluna do lado da dobradiça da porta, se obtenham temperaturas superiores aos 52°C atingidos no estudo anterior, o que pode comprometer o uso desta nova solução. Assim, é necessário confirmar as temperaturas atingidas na situação de ambiente extremo, ou seja, na localização pretendida no forno.



Figura 6.10: *Setup* para a medição de temperaturas no dissipador de calor da luminária *BJB 77.116.1005*.

Tabela 6.1: Temperaturas medidas na zona do dissipador de calor da luminária LED *BJB 77.116.1005.36*.

Luminária LED <i>BJB 77.116.1005.36</i>	
$T_{\text{Sonda Superior}} [^{\circ}\text{C}]$	50
$T_{\text{Sonda Meio}} [^{\circ}\text{C}]$	47
$T_{\text{Sonda Inferior}} [^{\circ}\text{C}]$	43

6.5.2 Viabilidade da aplicação da luminária LED *BJB 77.116.1005* no lado da dobradiça da porta

A nova luminária de maiores dimensões foi colocada no lado direito da porta, de forma idêntica à anterior, localizando-a aproximadamente ao meio da porta. De seguida foi testada a sua luminosidade no forno, verificando-se que esta não é adequada, já que não se encontra uniforme por toda a câmara, existindo muita sombra no lado esquerdo da câmara. Ainda assim, o fluxo de luminosidade da luminária LED (430 lm) não seria o problema, já que é um valor relativamente elevado. Deste modo a solução a verificar passaria pela alteração no ângulo da reflexão da luz, de modo a se obter uma maior uniformidade no interior do forno. O ângulo do refletor atual é próximo dos 135° e um possível melhoramento passa por aumentar este ângulo, de forma a que a luz chegue ao canto do lado esquerdo.

O ângulo de reflexão do refletor foi então alterado manualmente, obtendo-se os valores de 152° , 155° e 162° . Na Figura 6.11 encontra-se um exemplo em que o refletor foi alterado de modo a obter um ângulo de reflexão de 155° .



Figura 6.11: Aplicação da nova luminária no lado da dobradiça da porta, com um refletor cujo ângulo de reflexão é de 155° .

No caso do ângulo de 152° não se notou qualquer alteração na iluminação comparando ao caso do refletor atual. Para os restantes ângulos notou-se uma melhoria na iluminação do canto esquerdo da câmara do forno. A iluminação nos fornos é visível nas Figuras 6.12 e 6.13 para o caso dos ângulos do refletor de 162° e 155° , respetivamente.



Figura 6.12: Iluminação no forno após se alterar o ângulo de reflexão para 162° .



Figura 6.13: Iluminação no forno após se alterar o ângulo de reflexão para 155° .

Pelas Figuras anteriores verifica-se ainda que não existe uniformização da luminosidade no forno, já que, para ambos os casos, os feixes de luz concentram-se mais no lado direito do forno. Após estes testes, verificou-se que, devido à localização perpendicular do módulo LED, uma parte da luz que não é refletida pelo refletor, colocado imediatamente à frente do módulo, chega ao canto esquerdo da porta. Para que esta fração de luz seja novamente refletida para o interior da câmara, colocou-se um novo refletor no canto esquerdo, conforme o exemplo da Figura 6.14.



Figura 6.14: Refletor no lado do fecho da porta que permite a reflexão da fração de luz que chega a esta zona para o interior do forno.

Os resultados após este processo foram positivos, verificando-se duas riscas na placa de trás do forno, semelhante ao caso em que existiam duas luminárias, uma de cada lado. Na Figura 6.15 encontra-se o resultado final deste teste em que o refletor do lado direito possui um ângulo de 155° e o refletor do lado esquerdo possui um ângulo de 135° , quer para o forno vazio, quer para o forno com tabuleiros.

Embora apropriada, a luminosidade no tabuleiro superior não é tão elevada como nos restantes, já que a luminária encontra-se a meio da porta e os feixes de luz não atingem aquela zona. Uma solução para este assunto seria a aplicação de uma luminária com um comprimento ainda superior ao da *77.116.1005*, que cobriria todo o lado da dobradiça da porta com pontos LED. A possibilidade de efetivar esta alternativa é no entanto desconhecida, já que o seu fabrico seria personalizado tendo em conta esta necessidade do forno *Turboram 5T* da *Ramalhos*.

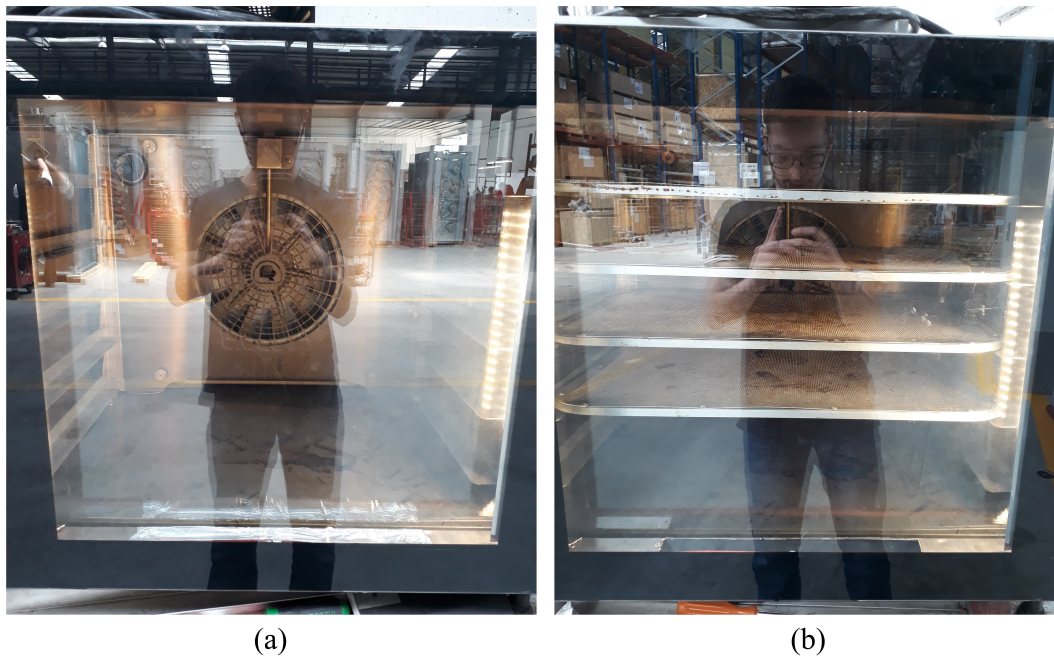


Figura 6.15: Iluminação no forno após a aplicação final da luminária de maior comprimento e de dois refletores. (a) Forno sem tabuleiros. (b) Forno com tabuleiros.

Como visto no subcapítulo 6.5.1 este novo módulo LED gera mais calor e como tal atinge maiores temperaturas. Embora a iluminação desta solução tenha sido aprovada e comprovada como viável é necessário verificar se também é viável do ponto de vista térmico. Desta forma foram criados dois novos furos para a colocação de duas sondas no interior da calha, estando um a 233 mm da superfície superior da porta e outro a 260 mm da mesma superfície. No primeiro furo colocou-se uma sonda em contacto com o ar com o intuito de se medir a temperatura do ar no interior da calha da dobradiça, próximo da zona crítica da luminária LED, onde as temperaturas são máximas. Esta grandeza foi designada por $T_{\infty \text{ LED}}$. A outra sonda foi colocada no furo mais inferior e manteve-se em contacto com a superfície do dissipador de calor, na zona de temperatura máxima do mesmo, medindo assim o valor de T_{SondaLED} . Este ensaio foi realizado com

a 2ª furação aberta e com o forno a 300°C e os resultados foram obtidos ao fim de 45 minutos e registados na Tabela 6.2. De seguida tapou-se a furação inferior e superior e obtiveram-se os valores das temperaturas ao fim de 12 minutos. A temperatura do ambiente onde o forno se encontrava foi registada como 30°C.

Tabela 6.2: Temperaturas após a aplicação de uma luminária LED *BJB 77.116.1005.36* no lado da dobradiça da porta.

Furação aberta	
$T_{\text{SondaLED}} [^{\circ}\text{C}]$	77
$T_{\infty \text{ LED}} [^{\circ}\text{C}]$	50
Furação tapada	
$T_{\text{SondaLED}} [^{\circ}\text{C}]$	111
$T_{\infty \text{ LED}} [^{\circ}\text{C}]$	95

A temperatura para o caso desta luminária aumentou para um valor de 77°C. Ainda assim este valor encontra-se abaixo dos 100°C e portanto encontra-se dentro dos limites para o bom funcionamento dos LEDs, embora com um menor tempo de vida. Já para uma aplicação onde não existe a furação na porta e portanto esta encontra-se na sua situação atual, a temperatura foi registada como 111°C, acima do valor limite e portanto não recomendado.

Esta solução prova-se viável e apresenta vantagens económicas, já que para o caso do *Turboram 5T 60x40* só seria necessário um módulo por forno. Também a questão de falta de espaço no lado do fecho do forno é resolvida. Comparando ao caso em que se utilizam duas luminárias de médio comprimento, é uma melhor opção para uma aplicação a longo prazo nos fornos *Turboram*.

6.5.3 Viabilidade da aplicação da luminária LED *BJB 77.116.1005* na zona inferior da porta

Uma outra localização possível para as luminárias LED seria na zona inferior da porta, já que não existem problemas de temperaturas devido aos baixos valores existentes nesta região, como provado nos capítulos anteriores.

Esta nova configuração foi testada, para averiguar se a iluminação no forno é suficiente ou não. Foi aplicada uma luminária de maiores dimensões na zona inferior da porta do forno de ensaios, cujo resultado é apresentado na Figura 6.16.

Após se ligar os LEDs à corrente observou-se que a luminosidade no forno parece adequada, embora se encontre um problema, já que o vidro interior do forno reflete a luz para os olhos do observador, não sendo por este motivo uma boa abordagem para a sua localização. Quando são colocados os tabuleiros no forno, conforme representado na Figura 6.17, verificou-se que nem todos os tabuleiros se encontram iluminados, estando os 4º e 5º tabuleiros completamente sem iluminação.

Para ser possível iluminar estes tabuleiros superiores seriam necessárias outras abordagens como a aplicação de outra luminária LED, na zona superior, ou a alteração do ângulo do refletor em conjunto com a aplicação de um novo refletor na parte superior da porta. Esta primeira alternativa não é recomendada, tendo em conta as elevadas temperaturas na zona superior da porta, assim como os gastos associados à utilização de



Figura 6.16: Aplicação real da luminária LED na zona inferior da porta.

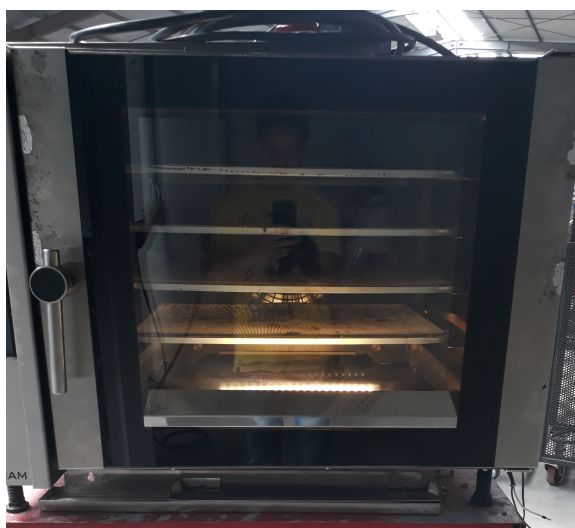


Figura 6.17: Iluminação no forno com tabuleiros após se aplicar uma luminária LED na zona inferior da porta.

mais uma luminária LED. A alteração dos ângulos dos refletores não foi testada, já que o facto de a luz ser refletida no vidro e se tornar um incómodo para o utilizador neste tipo de aplicação torna-se decisivo para a eliminação desta localização dos LEDs como preferível.

Parte III

Modulram

Capítulo 7

Soluções Propostas

Neste capítulo serão apresentadas as propostas de melhoria de arrefecimento da luminária LED a aplicar no caso da gama *Modulram*, explicando o seu conceito e funcionamento. No subcapítulo 7.1 é abordada a sugestão que requer as menores alterações no forno, já que a aplicação da luminária é semelhante ao caso atual no forno e o arrefecimento dá-se por convecção natural na zona traseira da luminária LED. O subcapítulo 7.2 aborda um sistema em tudo semelhante ao caso anterior, mas onde o arrefecimento se dá por convecção forçada, com o auxílio de um ventilador. No subcapítulo 7.3 aborda-se a terceira sugestão de arrefecimento, com a utilização da tecnologia do tubo de calor para o arrefecimento dos LEDs. A última sugestão (subcapítulo 7.4) é o uso de um fluxo de água no interior de um tubo de forma a promover o arrefecimento da luminária LED.

7.1 Arrefecimento da luminária LED por convecção natural

A primeira alternativa de arrefecimento a estudar é aquela mais simples de implementar e também mais barata, porém a que se pressupõe menos eficaz. Neste caso a luminária LED seria incorporada numa cavidade no lado direito do forno, semelhante ao caso atual da aplicação de uma lâmpada de halogéneo. Devido às elevadas temperaturas nesta região do forno, a distância dos LEDs à câmara do forno, designada por x , pode ser um parâmetro importante, já que se antevê que uma maior distância à câmara pode reduzir as temperaturas na luminária LED. No entanto, um maior valor de x também poderá levar a uma menor luminosidade no interior do forno, pelo que este parâmetro deve ser estudado de forma a garantir um ponto ótimo entre o aspeto térmico e o de iluminação.

A lateral direita do forno *Modulram* é constituída pela placa interior, pertencente à câmara do forno, seguida de uma camada de isolamento e uma placa intermédia. Nesta última é aplicado o quadro elétrico do forno, conforme ilustrado na Figura 7.1. É ainda possível observar a zona exterior da estrutura que forma a cavidade da lâmpada de halogéneo utilizada atualmente. Por fim, não montada na Figura 7.1, existe a placa exterior da lateral do forno que permite esconder todos estes componentes.

O estudo proposto é esquematizado na Figura 7.2, em que uma nova cavidade entre a placa da câmara do forno e a placa intermédia é sugerida. Nesta nova solução a luminária LED encontrar-se-ia à face com a placa intermédia numa primeira abordagem ao problema, mas existindo a possibilidade de se alterar a distância à câmara do forno, x , conforme ilustrado na vista de corte da Figura 7.3. A cavidade é formada por placas

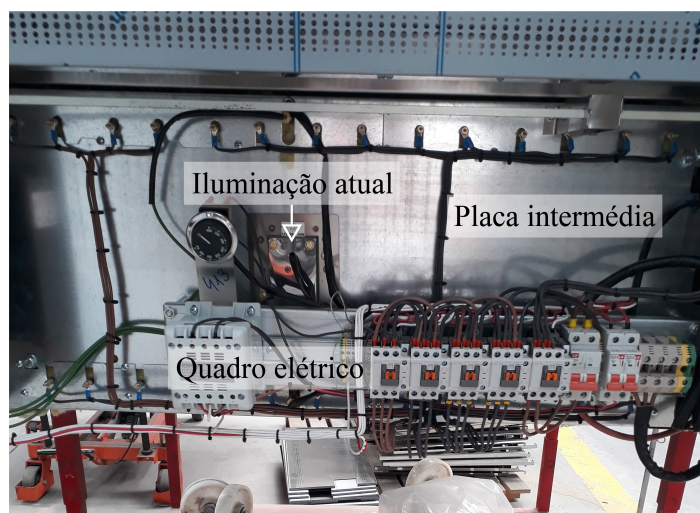


Figura 7.1: Placa intermédia da lateral direita de uma câmara *Modulram* atual, com os componentes elétricos montados.

refletoras, a amarelo nas Figuras 7.2 e 7.3, em todas as 4 faces, com ângulos θ que podem ser alterados por forma a verificar a alteração da iluminação no interior do forno. No contacto com a câmara existe um vidro (a azul) de espessura igual a 5 mm, semelhante ao utilizado atualmente, que cria uma resistência térmica, permitindo atenuar as temperaturas no interior da cavidade.

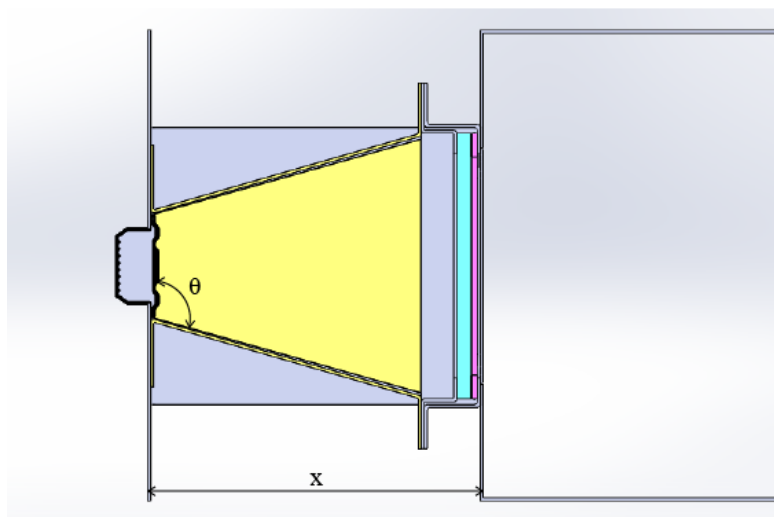


Figura 7.2: Esquema da nova cavidade na lateral direita, onde a distância da luminária LED à câmara é máxima.

Outros parâmetros importantes neste estudo são o número de luminárias LED a utilizar nas câmaras da gama *Modulram*, o tamanho da luminária e a sua potência, onde poderão existir diferenças significativas entre o uso da *BJB 77.116.1005* e da *BJB*

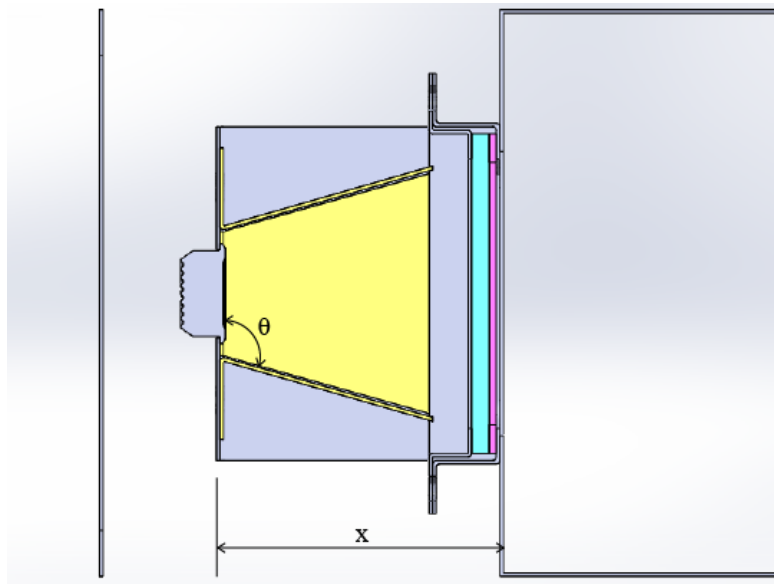


Figura 7.3: Esquema da nova cavidade na lateral direita, onde a luminária LED se encontra numa distância intermédia em relação à câmara do forno.

77.116.1002 e o número de vidros de proteção, assim como a espessura da calha de ar entre ambos.

A cavidade formada pelos refletores é coberta pelo isolamento térmico do forno, o que impede a dissipação do calor por esta região, forçando o mesmo a ser dissipado pela região mais afastada da câmara do forno, onde se encontra o dissipador de calor da luminária LED. Na ausência de meios que provocam o fluxo de ar que promove o arrefecimento necessário, o dissipador de calor encontra-se arrefecido unicamente por convecção natural. Semelhante ao caso de estudo anterior, o *Turboram*, uma diminuição na temperatura ambiente próxima do dissipador de calor irá reduzir também a temperatura da luminária LED. Neste caso esta temperatura ambiente será a da zona do quadro elétrico, onde se encontra ainda o painel do forno. Neste espaço existe portanto geração de calor por efeito de *Joule*. É um espaço confinado, mas com um volume muito superior ao da cavidade existente na porta do forno *Turboram*. A taxa de arrefecimento desta zona por convecção natural poderá ser aumentada através de furações nas placas exteriores, de modo a criar uma movimentação do ar, semelhante à proposta no forno *Turboram*.

Devido sobretudo ao facto do forno ser modular e das suas câmaras serem colocadas sobre uma estrutura de apoio ou sobre uma estufa, a furação na placa inferior da zona do quadro elétrico torna-se impossibilitada, devido ao isolamento da estufa. No caso atual existem apenas furações na placa exterior do lado direito, conforme a Figura 7.4, e um furo com um diâmetro de 10 cm na placa superior, próximo do painel do forno, apresentado na Figura 7.5. Uma forma de aumentar o arrefecimento da luminária LED nesta situação será a furação da placa superior nesta região, fazendo com que o ar quente presente na zona do quadro elétrico escape. Poderá assim ser necessária a presença de mais dispositivos iguais ao apresentado na Figura 7.5 ao longo da profundidade do forno.



Figura 7.4: Furação atual na lateral direita do forno *Modulram*.



Figura 7.5: Abertura na placa superior com filtro, para arrefecimento da lateral direita do forno *Modulram*.

7.2 Arrefecimento a ar da luminária LED por convecção forçada

Uma nova abordagem para o arrefecimento da luminária LED presente na cavidade lateral direita do forno é o uso de ventilação na região do quadro elétrico.

Na convecção forçada, o movimento relativo entre um fluido e uma superfície é mantido por meios externos, como o caso de um ventilador [16]. Na situação do forno *Modulram* a aplicação de um ventilador de extração de ar, que permita a remoção do ar quente do interior da região onde se encontra o quadro elétrico, possibilita a entrada de ar frio. Esta renovação de ar, associada ao perfil de velocidades de ar elevado, quando

comparado ao caso da convecção natural, são fenómenos interessantes, já que se consegue não só o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, \bar{h} , como também a diminuição da temperatura ambiente na região do quadro elétrico, T_∞ , conseguindo assim uma taxa de arrefecimento da luminária LED bastante superior.

Idêntico ao caso da convecção natural, onde o coeficiente de transferência de calor depende do número adimensional de *Rayleigh*, na convecção forçada o valor que permite identificar o tipo de escoamento existente e no qual o valor de \bar{h} está dependente é o número de *Reynolds*. Este valor é calculado pela Equação 7.1, onde v é a velocidade do fluido em condições fora da camada limite, ρ é a densidade do fluido, L é o comprimento característico, que depende da geometria da superfície a arrefecer e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

$$Re_L = \frac{v\rho L}{\mu} \quad (7.1)$$

O número de *Reynolds* mede a razão entre as forças de inércia e forças viscosas no fluido. Se este valor for baixo as forças de inércia são pouco relevantes relativamente às forças viscosas. As perturbações no fluido são neste caso dissipadas e o fluxo permanece laminar. Já quando o número de *Reynolds* apresenta valores elevados, as forças de inércia podem ser suficientemente elevadas para provocar uma transição para um regime de turbulência, onde existem distúrbios no fluxo do fluido [16].

Para placas planas, cilindros e esferas alguns estudos foram realizados e expressões obtidas por métodos empíricos para um valor do número de *Nusselt* médio têm tipicamente a forma da Equação 7.2. Com o conhecimento dos coeficientes C , m e n , que dependem das condições e geometria da superfície em estudo, o número de *Nusselt* e consequentemente o coeficiente de transferência de calor podem ser determinados, com a atenção de que as propriedades do fluido devem ser determinadas à temperatura de filme, dada pela média aritmética entre a temperatura da superfície e a temperatura ambiente [16].

$$Nu_L = CRe^m Pr^n \quad (7.2)$$

Na Tabela 7.1 encontram-se valores típicos do coeficiente de transferência de calor para vários tipos de arrefecimento. O arrefecimento forçado a ar traria, baseado na mesma Tabela, um aumento significativo neste valor. Esta solução para além desta enorme vantagem tem também desvantagens. Nem sempre é possível o uso de ventilação e em certos tipos de aplicação pode tornar-se mesmo desfavorável. O uso de um ventilador traduz-se num maior consumo energético, num aumento do ruído e em dificuldades de manutenção. O consumo de um ventilador aplicado no forno em estudo não seria muito elevado quando comparado por exemplo às resistências de aquecimento do forno, assim como o ruído também poderia não constituir um obstáculo. É sobretudo pelas dificuldades de manutenção que o uso de um ou mais ventiladores no forno *Modulram* deve ser evitado o máximo possível. Ao fim de um determinado tempo, devido ao processo de cozedura, acumula-se no ventilador o pó da farinha existente no ar, levando ao seu mau funcionamento, até ficar preso. Por este motivo a manutenção do ventilador deverá ser feita com regularidade e a sua localização deverá permitir que esta manutenção seja realizável de forma fácil e rápida.

Tabela 7.1: Valores típicos de coeficientes de transferência de calor por convecção [16].

Processo	h [$W/(m^2 K)$]
Gases	
Convecção Natural	2 - 25
Convecção Forçada	25 - 250
Líquidos	
Convecção Forçada	100 - 20.000

7.3 Arrefecimento da luminária LED utilizando um tubo de calor

Conforme registado pelo estudo realizado por G. Sosoi, et al [13], apresentado no sub-capítulo 2.1.1, o uso de um tubo de calor pode efetivamente reduzir a temperatura de junção dos LEDs, sendo esta redução tanto maior quanto maior a velocidade do ar e menor a temperatura na região do condensador do tubo de calor. No forno em estudo a aplicação do tubo de calor seria possível, no entanto traria uma necessidade na alteração de vários componentes do forno. O lado do evaporador do tubo de calor seria colocado em contacto com a luminária LED e o lado do condensador deveria situar-se numa região com boas condições para arrefecimento. Esta necessidade poderia ser obtida pela combinação desta tecnologia com o uso de um ventilador e/ou de um sistema alhetado, no entanto, isso retirava todas as vantagens do uso do tubo de calor como um método passivo simples de arrefecimento de LEDs. A orientação do tubo de calor poderia ser horizontal ou vertical, sendo que, na primeira situação, a região do condensador seria na traseira do forno e, na segunda situação, no topo do forno. Esta solução de arrefecimento torna-se pouco viável para uma aplicação no forno *Modulram*.

7.4 Arrefecimento da luminária LED com circulação de água

Conforme mostra a Tabela 7.1, a utilização de líquidos, como a água, para o arrefecimento necessário traria vantagens enormes, já que o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção é muito mais elevado que nas restantes situações. Neste sistema de arrefecimento a água iria circular no interior de um tubo que passe próximo da luminária LED. O calor que chega à placa LED seria transferido por condução pelas paredes do tubo e, de seguida, por convecção forçada interna para a água, aquecendo-a. O fluxo do fluido iria transportar o calor para fora da região onde se encontram os LEDs e teria que ser dissipado numa outra região, onde poderiam existir alhetas na tubagem para tal ocorrer. A circulação interna teria que ser obtida através de bombagem de água. Embora do ponto de vista de transferência de calor esta solução seja ótima para o problema de transferência de calor em causa, não é uma solução viável para a aplicação num forno industrial, já que esta tubagem de água iria situar-se num local próximo de componentes elétricos e qualquer rutura na tubagem traria consequências catastróficas. Como outra desvantagem existe o facto de necessitar de todo um sistema de transporte de água extra, o que leva a mais custos de implementação e manutenção. Por todos estes motivos esta solução foi descartada como hipótese a estudar neste desenvolvimento.

Capítulo 8

Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada para a experimentação realizada no forno *Modulram* de forma a promover a substituição da lâmpada de halogéneo por iluminação LED, da mesma forma que a esquematização realizada no subcapítulo 7.1. Também se pretende aludir à abordagem ao problema de arrefecimento em questão, explicando os passos seguintes deste desenvolvimento. No subcapítulo 8.1 apresenta-se a fase de desenho e projeto das peças que formam a nova cavidade, assim como a aplicação das mesmas. O subcapítulo 8.2 apresenta a instrumentação do forno para a medição de temperaturas. Por fim concretizaram-se os vários ensaios experimentais, onde a sua organização encontra-se referida no subcapítulo 8.3.

8.1 Projeto e aplicação da nova cavidade lateral para iluminação LED

A necessidade de aplicação das luminárias LED da *BJB*, levou à alteração nas dimensões da cavidade lateral de iluminação, já que o comprimento destas luminárias excede bastante as dimensões da cavidade atual para uma lâmpada de halogéneo. Isto obrigou à produção de uma nova câmara *Modulram* para ensaios, com alterações na lateral direita. O novo forno de ensaios possui duas câmaras *Modulram Classic* normal, de 2 tabuleiros 45x75, sendo que só a câmara superior foi usada para testes. Esta é equipada com 14 resistências de potência igual a 360 W cada.

Tendo presente o esquema da Figura 7.2, para as primeiras medições de temperatura, pensou-se no caso onde esta seria a menor possível, ou seja, quando a distância da luminária LED à câmara do forno, x , é a maior possível. A nova cavidade de iluminação foi projetada para a utilização da luminária LED *77.116.1002* (com 230 mm de comprimento), já que, caso esta cavidade tivesse maiores dimensões, o volume de isolamento na lateral direita do forno iria ser menor e, por consequência, o consumo elétrico do forno poderia aumentar. Por outro lado, como visto no estudo anterior, estas luminárias tendem a atingir temperaturas menores que a luminária de 312 mm de comprimento, com o custo de uma menor luminosidade. Este fator é decisivo, já que o arrefecimento dos LEDs no forno *Modulram* por convecção natural se prevê bastante mais dificultado que o caso de estudo anterior.

O *design* da nova cavidade foi efetuado por modelação 3D, com o uso do *software SolidWorks 2019*. Tendo em conta os fatores abordados acima, foi desenhada uma nova

cavidade, constituída por um conjunto de elementos, listados abaixo.

- **Chapa onde é aplicada a luminária LED**, mantida a uma distância da câmara do forno de $x=128$ mm;
- **Dois refletores longitudinais**, ambos com um ângulo de reflexão de $\theta=106^\circ$;
- **Dois refletores laterais**, ambos com um ângulo de reflexão de 107° ;
- **Vidro de 5 mm de espessura**, com 330 mm de comprimento e 90 mm de altura;
- **2 juntas com 2 mm de espessura**, colocadas uma de cada lado do vidro, para proteção do mesmo;
- **Fixador externo do vidro**. Esta peça será soldada à placa lateral direita da câmara do forno e o vidro e as juntas são colocados no seu interior;
- **Fixador interno do vidro**, que permite pressionar o vidro e as juntas no interior do fixador externo, de forma a que o vidro não possua forma de movimentação.

A montagem da chapa com a luminária LED e os refletores é apresentada na Figura 8.1, onde os 4 refletores são aparafusados à chapa e estão representados a amarelo. Este conjunto é então fixo ao fixador interno, que por sua vez se monta no interior do fixador externo. Na Figura 8.2 encontra-se o resultado final da modelação 3D da cavidade de iluminação a aplicar na câmara do forno. A azul encontra-se representado o vidro. O conjunto de refletores nos 4 lados da luminária têm por intuito promover uma melhor iluminação na câmara do forno, mesmo mantendo a luminária bastante afastada. Já os dois fixadores foram baseados no sistema atualmente empregue nos *Modulram* e a sua função é unicamente fixar o vidro.

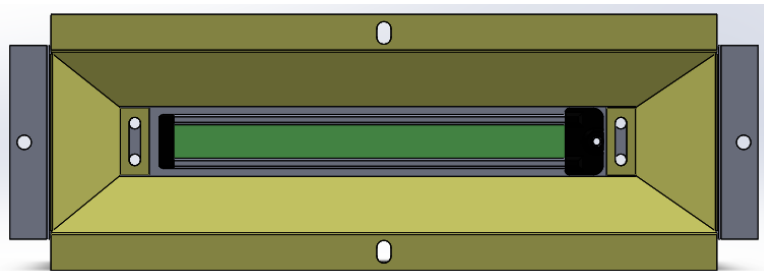


Figura 8.1: Montagem da chapa com a luminária LED e os refletores.

Os desenhos técnicos das peças necessárias produzir foram realizados também no *SolidWorks 2019*, com recurso aos módulos *Sheet Metal*, onde se criaram as peças em chapa planificada, e *Solid Works Drawing*, onde se realizaram os respetivos desenhos com as cotas necessárias. As peças foram posteriormente produzidas com recurso a corte laser e quinagem das chapas. De seguida foram montados todos os componentes e aplicada também a luminária LED. Na Figura 8.3 encontra-se a cavidade montada, sem o fixador externo, vidro e juntas.

De modo a que seja possível introduzir estes novos componentes, as chapas laterais do *Modulram* de ensaios também foram alteradas. Na placa interior, que forma a câmara

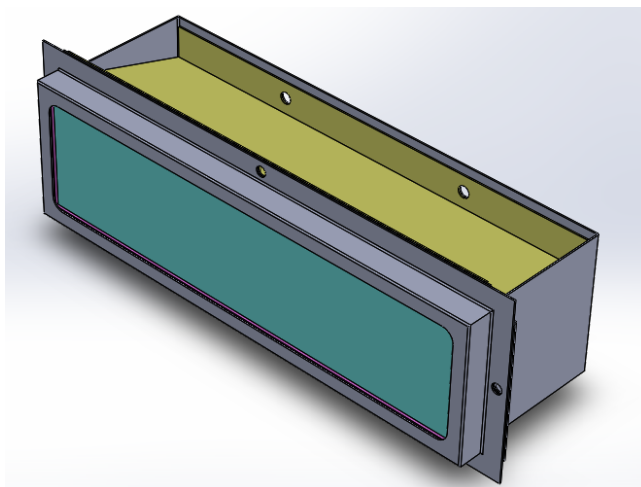


Figura 8.2: Modelação 3D da nova cavidade de iluminação.



Figura 8.3: Componentes do novo sistema de iluminação montados.

do forno foi realizado um corte retangular centrado com 320 mm de largura e 80 mm de altura. Já na placa intermédia as dimensões foram de 368 mm de largura e 128 mm de altura. O isolamento presente no meio destas duas placas também foi cortado de forma a facilitar esta aplicação. A Figura 8.4 mostra as novas chapas do lado direito do forno, com o fixador externo já soldado na lateral.

A montagem foi finalmente concluída com a aplicação dos componentes apresentados na Figura 8.3 na lateral do forno. Para reduzir as perdas de calor pela lateral do forno, a cavidade de iluminação foi coberta com lã de rocha nos lados, em cima e em baixo, conforme a Figura 8.5.

O *design* do novo sistema de iluminação teve apenas em conta questões relevantes para o estudo pretendido. É no entanto importante identificar que, conforme projetada e seguidamente montada, a nova cavidade não possui uma forma simples de manutenção. Nesta situação, para ser possível uma substituição da luminária LED, é necessário remover todo o isolamento colocado à volta da cavidade de iluminação (Figura 8.5) e de seguida remover a chapa onde está aplicado o módulo LED. Para uma solução a longo prazo seria necessário desenvolver um sistema mais prático para a manutenção, já que a luminária LED deverá sair pela parte de trás da chapa.



Figura 8.4: Placas laterais direitas alteradas de forma a colocar a nova cavidade de iluminação.

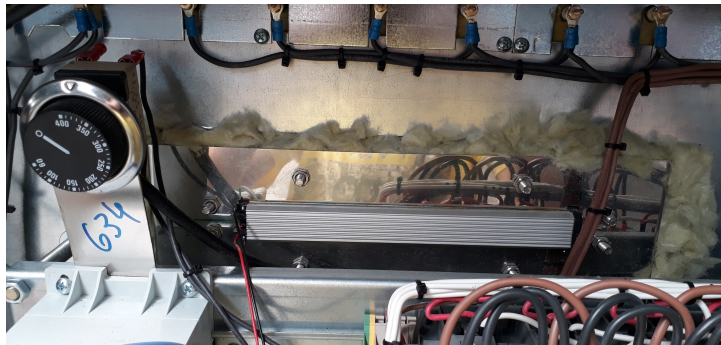


Figura 8.5: Zona traseira da cavidade de iluminação, totalmente isolada nos lados.

8.2 Preparação do forno para a colocação das sondas de medição

Para ser possível medir as temperaturas necessárias ao estudo do comportamento da luminária LED e da cavidade de iluminação quando sujeitos a diferentes situações, procurou-se uma boa localização para as sondas de medição de temperatura. O equipamento usado neste estudo foi o mesmo do estudo anterior no *Turboram*, ou seja, 3 sondas conectadas a um painel comum de um forno *Modulram*. Foram realizados 3 furos na cobertura do forno, de forma a passar as sondas pelos mesmos até à região do quadro elétrico. Em todos os ensaios abordados no *Modulram* interessou a medição de apenas 3 temperaturas. A primeira sonda foi mantida em contacto com a luminária LED no seu ponto crítico (onde a temperatura é máxima), dado pelo fabricante, que permitiu medir a temperatura designada neste relatório por T_{LED} . A segunda sonda foi mantida em contacto com o ar próximo da luminária LED, medindo a temperatura ambiente no zona do QE, designada neste relatório por $T_{Ambiente}$. Por fim, a terceira sonda colocou-se em contacto com a chapa na qual a luminária LED está aplicada, de forma a comparar este valor com a temperatura da luminária LED. Neste relatório esta temperatura é intitulada de T_{Chapa} .

Na Figura 8.6 apresentam-se as sondas nas suas posições de medição. Estas foram fixas em várias regiões de modo a garantir um melhor contacto com as superfícies, reduzindo erros de medição.



Figura 8.6: Posicionamento das sondas para a realização dos ensaios no forno *Modulram*.

8.3 Organização dos ensaios experimentais a realizar

Após a aplicação do novo sistema de iluminação LED, foram realizados ensaios com várias configurações de alterações no forno, quer com arrefecimento por convecção natural, quer com arrefecimento por convecção forçada a ar. Deste modo obtiveram-se vários casos com diferentes resultados de medição de temperatura. O objetivo deste procedimento é encontrar o caso em que a temperatura na luminária LED, T_{LED} , é a menor possível.

A listagem abaixo apresenta os vários testes abordados, onde o procedimento, os respetivos resultados e a sua análise serão abordados nos próximos capítulos.

- Caracterização da situação logo após a montagem dos componentes da cavidade de iluminação conforme apresentada anteriormente.
- Medição das temperaturas após remover o isolamento colocado à volta da cavidade de iluminação (Figura 8.5).
- Avaliação da influência da chapa lateral exterior direita nas temperaturas a registar. Neste estudo foram comparadas várias chapas exteriores com características diferentes, assim como a situação onde não existem quaisquer chapas externas no lado direito.
- Avaliação da influência nas temperaturas com a existência de um rasgo no topo da cobertura do forno, com um filtro, semelhante ao apresentado na Figura 7.5. Desta forma, para além do já existente próximo do painel do forno, foi criado um novo,

ao centro do forno, na direção da profundidade, situando-se por cima da luminária LED.

- Avaliação da influência nas temperaturas a medir com a existência de dois rasgos com filtro na traseira do forno de ensaios (1 por câmara). Neste estudo pretende-se avaliar se existem vantagens de ter uma saída de ar na traseira do forno em relação à situação anteriormente descrita, onde a saída do ar se dava pelo topo da cobertura.
- Análise das diferenças existentes nas temperaturas após a aplicação de uma cavidade de iluminação com vidro duplo e com um espaçamento de ar entre os vidros.
- Uso de um ventilador para o arrefecimento de toda a zona do quadro elétrico. Neste estudo procurou-se verificar as vantagens do uso da convecção forçada relativamente à convecção natural, escolher a melhor localização do ventilador para um melhor arrefecimento e ainda comparar o arrefecimento da luminária LED existente numa situação de extração de ar quente com a situação da entrada de ar frio, com o ventilador localizado na traseira do forno.

Capítulo 9

Ensaaios Experimentais

Neste capítulo são apresentados todos os ensaios experimentais realizados no decorrer deste trabalho, incidentes no uso da iluminação LED no forno industrial modular, *Modulram*. Os estudos foram divididos em duas partes, sendo elas o arrefecimento por convecção natural (subcapítulo 9.1) e o arrefecimento por convecção forçada a ar (subcapítulo 9.2). Na primeira parte procurou-se diminuir as temperaturas praticadas por várias ideias, sem uso de qualquer componente extra consumidor de energia. Na segunda parte utilizou-se um ventilador para o arrefecimento e procurou-se encontrar a melhor posição do mesmo para se obterem melhores resultados.

9.1 Testes de arrefecimento por convecção natural

9.1.1 Medição de temperaturas após aplicação da nova cavidade de iluminação

Após o procedimento descrito no capítulo anterior estar concluído mediram-se as temperaturas registadas pelas sondas na luminária LED, na chapa onde esta é aplicada e do ar dentro da zona do quadro elétrico. O ensaio realizou-se tendo como início o forno a uma temperatura ambiente e dando o *set* ao forno de 280°C, deixando este aquecer e posteriormente manter esta temperatura. Foram registadas as 3 temperaturas das sondas e a temperatura do forno ao longo do tempo, num período de 8 horas. A luminária LED encontrou-se ligada durante todo este período. O valor da temperatura do forno escolhido (280°C) é tipicamente usado no caso do *Modulram Classic* com resistências de potência baixa, como é o caso da câmara para ensaios. Pretendeu-se assim avaliar, com vários ensaios, uma possível solução de iluminação LED para este tipo de câmaras, não buscando imediatamente uma solução para câmaras de pastéis de nata, onde as temperaturas vão até aos 350°C.

Concluiu-se após vários ensaios que, independentemente do dia de medição, o forno atinge o *set* proposto após 1 hora e meia de funcionamento. Este é um aspeto importante, já que é próximo deste instante que as temperaturas registadas na luminária LED também tendem a encontrar um valor invariável, como poderá ser visualizado graficamente no próximo capítulo.

Para efeitos de nomenclatura neste relatório o estudo tendo em conta a aplicação da nova cavidade, sem qualquer outra alteração ao forno é descrito como Caso 1. Após as 8 horas de funcionamento registou-se uma temperatura máxima da T_{LED} igual a 113°C, da

T_{Ambiente} igual a 51°C e da T_{Chapa} igual a 122°C . Estes valores são bastante elevados e o Caso 1 torna-se impraticável. Assim, são necessárias alterações de arrefecimento, como seria expectável.

Outras observações

Nesta secção são apresentadas outras observações recolhidas durante o ensaio do Caso 1.

1. A iluminação no forno após a aplicação da nova cavidade de iluminação a uma distância da câmara do forno de $x=128\text{ mm}$ e com refletores com ângulo $\theta=106^{\circ}$ foi testada. Na Figura 9.1 encontra-se uma comparação entre a câmara sem iluminação e a câmara com iluminação ligada. Verificou-se que mesmo com a luminária LED bastante afastada da câmara do forno a iluminação no mesmo é satisfatória, embora algo menor à da lâmpada de halogéneo. Por este motivo não foi necessário diminuir o valor de x , nem alterar o valor dos ângulos de reflexão.

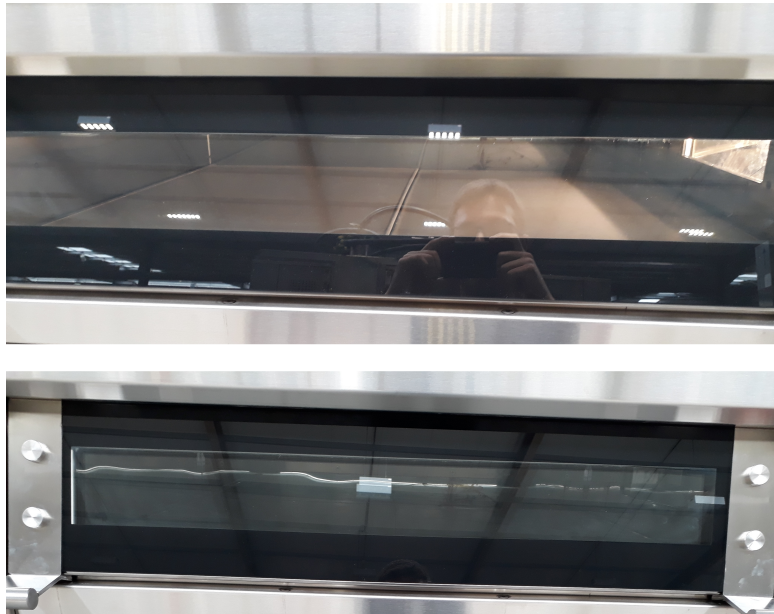


Figura 9.1: Comparação da iluminação na câmara de ensaios. Com a luminária ligada (em cima) e desligada (em baixo).

2. A fonte de iluminação utilizada foi a mesma usada para o ensaio no *Turboram*, com 12V DC e 1A . Esta amperagem é superior àquela recomendada para a luminária *77.116.1002*, o que significa que numa solução a longo prazo a corrente aplicada deverá ser inferior e como tal também as temperaturas atingidas poderão diminuir.

9.1.2 Influência do isolamento aplicado nas laterais da cavidade

De forma a melhorar os resultados anteriores, no Caso 2 removeu-se o isolamento colocado manualmente à volta da cavidade de iluminação, deixando o sistema conforme a Figura 9.2. Com a remoção do isolamento pressupõe-se que a taxa de arrefecimento aumente, já

que o fluxo de calor proveniente do interior do forno passa a ser dissipado por convecção natural pelas laterais da chapa, que se encontra agora exposta ao ar envolvente.



Figura 9.2: Sistema de iluminação com luminária LED sem isolamento aplicado nas laterais.

Foram registadas novamente as mesmas temperaturas ao longo do tempo, durante o mesmo período de 8 horas. A temperatura do forno no Caso 2 também se estabilizou por volta de 1 hora e meia de aquecimento. Como o tempo em que as resistências estão ligadas é muito semelhante ao do caso anterior, presume-se que a remoção do isolamento não altere significativamente o consumo elétrico do forno. As temperaturas máximas registadas para o Caso 2 foram de 106°C para a T_{LED} , 49°C para a T_{Ambiente} e 119°C para a T_{Chapa} . As temperaturas diminuíram bastante comparando com o caso anterior, provando aquilo que inicialmente se antecipava. Uma comparação mais pormenorizada entre os Casos 1 e 2 é realizada no subcapítulo 10.1.

9.1.3 Influência da chapa lateral externa do forno no arrefecimento da luminária LED

Como a falta de isolamento próximo do sistema de iluminação acabou por melhorar o comportamento térmico da luminária LED, os ensaios posteriores mantiveram esta alteração, procurando-se outro tipo de modificação no forno. Um destes seria, conforme descrito no subcapítulo 7.1, a substituição da placa lateral exterior do *Modulram* comum por outra com características diferentes, como a área de entrada de ar na região do quadro elétrico.

No Caso 3 foi experimentada a situação sem placas laterais exteriores no lado direito, para as 2 câmaras, de modo a entender se é realmente possível reduzir significativamente as temperaturas apenas com esta alteração. No Caso 4 são utilizadas chapas laterais conforme a Figura 9.3. Comparando à chapa normal (Figura 7.4), esta apresenta 4 conjuntos de furos, ou seja 4 vezes maior área de entrada de ar frio, e é normalmente

usada em câmaras para pastéis de nata. É designada na empresa como chapa extra-perfurada.

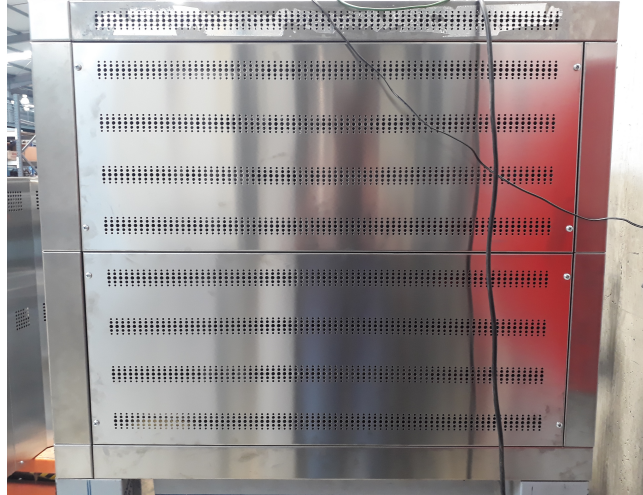


Figura 9.3: Lateral direita do forno *Modulram* com chapas extra-perfuradas.

Projetou-se e desenhou-se uma nova chapa lateral com o intuito de aumentar ainda mais a área de entrada de ar. Primeiramente fez-se um levantamento sobre as ferramentas existentes na fábrica para a produção de uma chapa onde não se fizesse uso de furos circulares mas em vez disso rasgos retangulares, conforme a Figura 9.4. Teve-se o cuidado de garantir que estes rasgos não eram demasiado largos, pois isso daria a possibilidade de passagem de certos objetos para o interior ou até mesmo poderia representar um perigo para a segurança do utilizador. Deste modo o Caso 5 utiliza esta nova chapa com 110 rasgos, colocados na vertical, com 110 mm de altura e 5 mm de largura.



Figura 9.4: Lateral direita do forno *Modulram* com chapas de rasgos retangulares.

Para estes 3 novos casos repetiram-se as medições de forma idêntica aos ensaios anteriores. Após 8 horas de funcionamento as temperaturas máximas obtidas estão apresentadas na Tabela 9.1.

Tabela 9.1: Temperaturas máximas atingidas nos Casos 3, 4 e 5.

Caso	T_{LED} [°C]	$T_{Ambiente}$ [°C]	T_{Chapa} [°C]
3	87	36	105
4	98	41	113
5	94	37	108

O Caso 3 apresenta valores bastante satisfatórios, porém é uma situação impossível na prática, já que é obrigatória a presença de chapas laterais no forno, por forma de segurança no seu manuseamento. O Caso 5 revelou melhores resultados que o Caso 4. Isto pode dever-se ao facto da chapa com rasgos retangulares possuir mais do dobro da área de entrada de ar que a chapa extra-perfurada. O Caso 3 pode anunciar um limite mínimo de temperaturas com a alteração da chapa lateral.

Uma comparação da evolução da temperatura da luminária LED e da temperatura do ar ao longo do tempo de funcionamento do forno entre os Casos 2, 3, 4 e 5 é realizada no subcapítulo 10.2.

9.1.4 Influência da abertura para renovação de ar no arrefecimento da luminária LED

Uma outra possível alteração no forno é a aplicação de mais furos de 10 cm, como o apresentado na Figura 7.5, noutras localizações no forno. Nos Casos 6 e 7 realizou-se um recorte manual na cobertura do forno, por cima da luminária LED e de seguida aplicado um filtro, conforme a Figura 9.5. Desta forma o forno passaria a ter 2 destes dispositivos no seu topo. O Caso 6 utiliza a chapa lateral de rasgos retangulares enquanto que no Caso 7 foi usada a chapa extra-perfurada. O objetivo de estudo destes dois casos é verificar se existe alguma vantagem na conjugação entre as diferentes chapas laterais e a furação no topo da cobertura. O ar frio entra na furação lateral e ao aquecer junto à região quente sobe e poderá escapar pelos furos da Figura 9.5. Semelhante ao estudado no *Turboram* este efeito de canal vertical presume um melhor arrefecimento por convecção natural.



Figura 9.5: Aberturas na cobertura do forno para saída de ar quente.

As temperaturas máximas após 8 horas de funcionamento do forno encontram-se registadas na Tabela 9.2.

Tabela 9.2: Temperaturas máximas atingidas nos Casos 6 e 7.

Caso	T_{LED} [°C]	$T_{Ambiente}$ [°C]	T_{Chapa} [°C]
6	94	38	109
7	95	40	110

Os resultados mostram que as temperaturas não se alteraram relativamente ao caso anterior com melhores resultados (Caso 5), fixando-se no caso da temperatura da luminária LED por volta dos 94/95 °C. Isto significa que, ao contrário do que se presumia, a adição deste escape adicional de ar quente e consequentemente de calor pela zona superior do forno não é capaz de reduzir as temperaturas praticadas quando se utilizam chapas de rasgos retangulares. Já no caso das chapas extra-perfuradas (Caso 7) a temperatura diminui alguns graus com esta nova adição.

Ainda procurando reduzir por convecção natural os valores registados, aplicaram-se na traseira do forno duas aberturas semelhantes, uma por câmara, de acordo com a Figura 9.6, constituindo o Caso 8. Nesta situação mantiveram-se as aberturas no topo do forno e a chapa lateral usada foi a de rasgos retangulares, por se verificar ser a mais eficaz.



Figura 9.6: Aberturas na traseira do forno *Modulram*.

Esta solução não criou quaisquer efeitos positivos, já que a temperatura máxima da luminária LED foi de 95°C, a $T_{Ambiente}$ foi de 38°C e a T_{Chapa} foi de 109°C.

9.1.5 Influência do uso de vidro duplo no arrefecimento da luminária LED

A última situação testada com arrefecimento por convecção natural foi a alteração do uso de um vidro simples para um vidro duplo. Conforme ilustrado numa vista lateral, na Figura 9.7, o novo sistema utiliza dois vidros de 5 mm de espessura cada, separados por 10 mm. O vidro duplo tem várias aplicações e caracteriza-se por funcionar como um isolamento térmico. A caixa de ar entre os vidros pode ser aberta ou fechada. No caso de estudo, esta separação foi conseguida com juntas semelhantes às utilizadas anteriormente, o que resulta numa zona de ar no meio dos dois vidros fechada. Pelas vantagens que tipicamente o vidro duplo fornece, previu-se que este poderia ser um bom método para a diminuição do fluxo de calor proveniente do forno e que entra em contacto com a luminária LED.



Figura 9.7: Vista lateral do vidro duplo aplicado.

Esta nova cavidade de iluminação constitui o Caso 9 e após aplicado o vidro duplo repetiram-se as medições anteriores. A T_{LED} máxima registada foi de $95^{\circ}C$, a $T_{Ambiente}$ máxima foi de $38^{\circ}C$ e a T_{Chapa} máxima foi de $104^{\circ}C$. Os resultados não estão de acordo com o que se esperava, já que não existiu nenhum aumento no isolamento térmico e as temperaturas ao fim de um período de funcionamento do forno de 8 horas acabaram por ser muito idênticas ao caso do vidro simples. Uma análise mais detalhada da evolução de temperaturas com o tempo nas situações de vidro simples e vidro duplo é realizada no subcapítulo 10.4.

9.2 Testes de arrefecimento por convecção forçada

9.2.1 Características do ventilador usado

Como os vários testes de arrefecimento de convecção natural levaram a uma fixação na temperatura mínima da luminária LED nos $94^{\circ}C$, procurou-se o arrefecimento por convecção forçada, criando o movimento relativo entre o ar e o dissipador de calor da

luminária LED com o uso de um ventilador. O modelo usado foi um *Sunon DP200A 2123XST.GN*. Como características deste modelo listam-se as seguintes.

- É um ventilador axial, o que significa que o fluxo de ar originado tem movimento segundo a direção do eixo de rotação do ventilador [29].
- As dimensões da caixa do ventilador são de 120 mm de comprimento por 120 mm de largura e uma altura de 38 mm [29].
- Funciona com corrente alternada de 0,14 A [29].
- O consumo elétrico do ventilador é de 22 W [29].
- A velocidade de rotação máxima é de 2700 rotações por minuto [29].
- Possui um diâmetro de 115,5 mm [29].
- O ventilador gera um caudal volumétrico de ar de aproximadamente 44,84 l/s [29]. Este valor corresponde a uma velocidade do ar de aproximadamente 4,28 m/s.

Os ensaios de convecção forçada ocorreram durante o mesmo período de 8 horas e em todos eles os ventiladores usados permaneceram sempre ligados. Este é um caso que, ao ser praticado gera grandes consumos de energia. Sendo esta uma das desvantagens do uso de convecção forçada para o arrefecimento, numa situação prática mais eficaz, o consumo elétrico do conjunto luminária LED e ventilador deverá ser o mais baixo possível, de forma a ser comparável ao consumo de uma lâmpada de halogéneo, já que é este o principal motivo pela substituição necessária da fonte de iluminação. No catálogo do fabricante existem soluções de ventiladores com potências menores [29]. Esta diminuição do consumo está obviamente relacionada com a diminuição da rotação do ventilador, o que origina menor caudal de ar movido e possivelmente um aumento das temperaturas nos LEDs. De facto, seria interessante estudar qual o ventilador mais adequado para o *Modulram* variando as dimensões do mesmo e o seu consumo energético e verificando o impacto na T_{LED} . O tempo de funcionamento do ventilador deveria ser também objeto de estudo.

9.2.2 Uso de ventilação no topo do forno *Modulram*

No Caso 10 foi aplicado o ventilador descrito anteriormente na cobertura do forno, posicionado-o de tal forma a que contribuísse para a extração do ar quente no interior da zona do quadro elétrico do forno. Esta aplicação está representada na Figura 9.8. O ventilador foi colocado por cima da luminária LED para potencializar o arrefecimento desta, do mesmo modo que na abertura criada anteriormente. Como os componentes de ambas as abordagens possuem as mesmas dimensões, a substituição do filtro pelo ventilador foi facilitada. No Caso 10 as aberturas criadas na traseira do forno foram tapadas e a entrada do ar frio foi apenas possível através da chapa lateral externa, onde neste caso a utilizada foi a de rasgos retangulares. Por todas as vantagens da ventilação, este *setup* presumiu-se como bastante eficaz. O ar frio que entra na região do quadro elétrico é aspirado pelo ventilador e extraído de modo a que não fique retido ar quente no interior desta região. Como é a placa intermédia que se encontra a altas temperaturas, o ventilador deve ser aplicado o mais encostado a esta possível, de forma a aumentar

a quantidade de ar quente extraído. No ensaio realizado tal não foi possível devido às sondas de medição de temperatura, conforme visualizado na Figura 9.8.

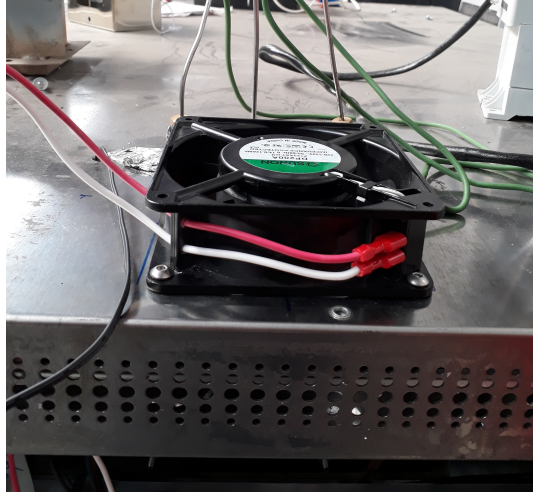


Figura 9.8: Ventilador aplicado no topo do forno, criando extração de ar quente.

No fim das 8 horas de funcionamento a temperatura máxima T_{LED} foi $82^{\circ}C$, a $T_{Ambiente}$ máxima foi $34^{\circ}C$ e a T_{Chapa} máxima foi $98^{\circ}C$. Os resultados foram positivos tal como esperado já que as 3 temperaturas estudadas diminuíram, mesmo comparando ao melhor caso para a convecção natural, comprovando que naquela região o ar quente é eficazmente extraído e substituído por ar frio. Uma comparação mais detalhada entre a convecção natural e a convecção forçada no topo da cobertura do forno é realizada no subcapítulo 10.5.

9.2.3 Uso de ventilação na zona de trás do forno *Modulram*

Como referido anteriormente, o uso da ventilação deve ser mais aprofundado, já que para diferentes localizações do ventilador podem ser originados perfis de velocidade no interior da região em estudo completamente diferentes, o que irá determinar um melhor ou pior arrefecimento da luminária LED. Assim, tendo em conta o horizonte temporal ainda existente para a realização do estágio, estudou-se o impacto do uso da ventilação na zona de trás do forno. Na Figura 9.9 mostra-se esta montagem. Uma das desvantagens da aplicação do ventilador no topo do forno é que o fluxo de ar existe apenas numa zona próxima do ventilador e o efeito da convecção forçada não se sente nas regiões mais inferiores. Desta forma, num forno *Modulram* com várias câmaras, as situadas numa região inferior não teriam as suas luminárias LED arrefecidas da mesma forma que a câmara superior. Para que todas as câmaras possam ser suficientemente arrefecidas deverá existir um ventilador por câmara, tal como na Figura 9.9.

Para este novo posicionamento dos ventiladores foram realizados 3 casos de estudo, sendo esses os listados abaixo.

- **Caso 11.** Dois ventiladores a extrair o ar quente. Neste caso pretende-se, à semelhança da aplicação no topo do forno, criar uma movimentação do ar do espaço interior para o exterior.



Figura 9.9: Ventiladores aplicados na traseira do forno, um por câmara.

- **Caso 12.** Dois ventiladores a permitir a entrada de ar frio. Neste caso a movimentação do ar seria do exterior para o interior, forçando o ar quente a ser extraído pela zona superior.
- **Caso 13.** Entrada de ar frio pelo ventilador da câmara inferior e saída de ar quente pelo ventilador da câmara superior. Pretende-se assim averiguar se a direção do fluxo de ar alternada entre ventiladores gera correntes de ar no interior do espaço que promovem o arrefecimento da luminária LED.

É de notar que tal como no caso anterior todos os ensaios tiveram os ventiladores em funcionamento constante. A chapa exterior usada foi a de rasgos retangulares e no topo da cobertura do forno foram mantidas duas aberturas com filtro, semelhante ao Caso 6 com convecção natural. Os resultados das temperaturas máximas para os 3 casos estão presentes na Tabela 9.3.

Tabela 9.3: Temperaturas máximas atingidas nos Casos 11, 12 e 13.

Caso	T_{LED} [°C]	$T_{Ambiente}$ [°C]	T_{Chapa} [°C]
11	87	31	93
12	64	35	74
13	85	36	95

O arrefecimento é evidentemente positivo em todos os casos, no entanto o Caso 12 destaca-se dos restantes, onde se conseguem temperaturas muito mais baixas, inesperadamente. A evolução da temperatura T_{LED} com o tempo para todos os casos que usam ventilação é analisada no subcapítulo 10.6.

Capítulo 10

Análise e Discussão dos Resultados Experimentais

Neste capítulo será realizada a análise e discussão dos resultados obtidos através das experimentações realizadas e apresentadas no capítulo anterior. Com esta análise pormenorizada procura-se obter conclusões acerca das várias propostas de melhoria e dos seus benefícios em comparação ao caso inicial, o Caso 1. Também uma comparação entre a convecção natural e forçada é realizada, procurando sobretudo encontrar conclusões tendo por base os resultados experimentais.

10.1 Análise da influência do isolamento aplicado nas laterais da cavidade

Os Casos 1 e 2 são comparados na Figura 10.1 onde se representa a evolução das temperaturas registadas ao longo do tempo de funcionamento do forno, desde o instante em que este foi ligado, começando a uma temperatura ambiente. Durante a primeira hora de funcionamento a temperatura da luminária LED e a temperatura da chapa onde esta é inserida evoluem de forma muito idêntica para ambos os casos. Isto não acontece no caso da temperatura ambiente devido sobretudo ao facto das medições terem sido realizadas em dois dias distintos e portanto com condições atmosféricas diferentes. O forno atinge o seu *set point* de 280°C a sensivelmente 1 hora e meia de aquecimento e por volta desse instante já é possível observar uma pequena discrepância nas temperaturas para os dois casos. Esta diferença de valores aumenta gradualmente ao longo do tempo, tornando-se mais ou menos constante após as 4 horas de funcionamento. Por volta deste valor a T_{LED} mantém-se estável, havendo um aumento de apenas 3°C das 4 até às 8 horas. A remoção do isolamento próximo da cavidade de iluminação teve um impacto bastante maior nas T_{LED} e T_{Chapa} do que propriamente na $T_{Ambiente}$, que ao fim das 8 horas de funcionamento se fixou próxima dos 50°C para os dois casos. Isto pode explicar-se devido ao facto do espaço interior ter um volume elevado, o que faz com que, mesmo com uma baixa renovação de ar, o tempo necessário a aquecer a massa de ar existente seja elevado, independentemente do facto do fluxo de calor que chega à região ser também elevado.

A longo prazo a T_{Chapa} é sempre superior à T_{LED} , para os dois casos. A chapa encontra-se bastante mais exposta ao fluxo proveniente da câmara do forno do que o dissipador de calor, já que este possui o próprio vidro da luminária e ainda as pequenas

alhetas. Este aspeto pode ser o motivo para que exista esta diferença de temperaturas. Como conclusão, a remoção do isolamento permitiu uma descida enorme nas temperaturas da cavidade de iluminação em geral. A T_{LED} máxima baixou dos 113°C para os 106°C nas mesmas condições. Embora não tenha sido avaliado no presente estudo, a remoção de mais quantidade de isolamento à volta do sistema poderia ser avaliada, procurando saber de que forma as temperaturas dependem desta variável.

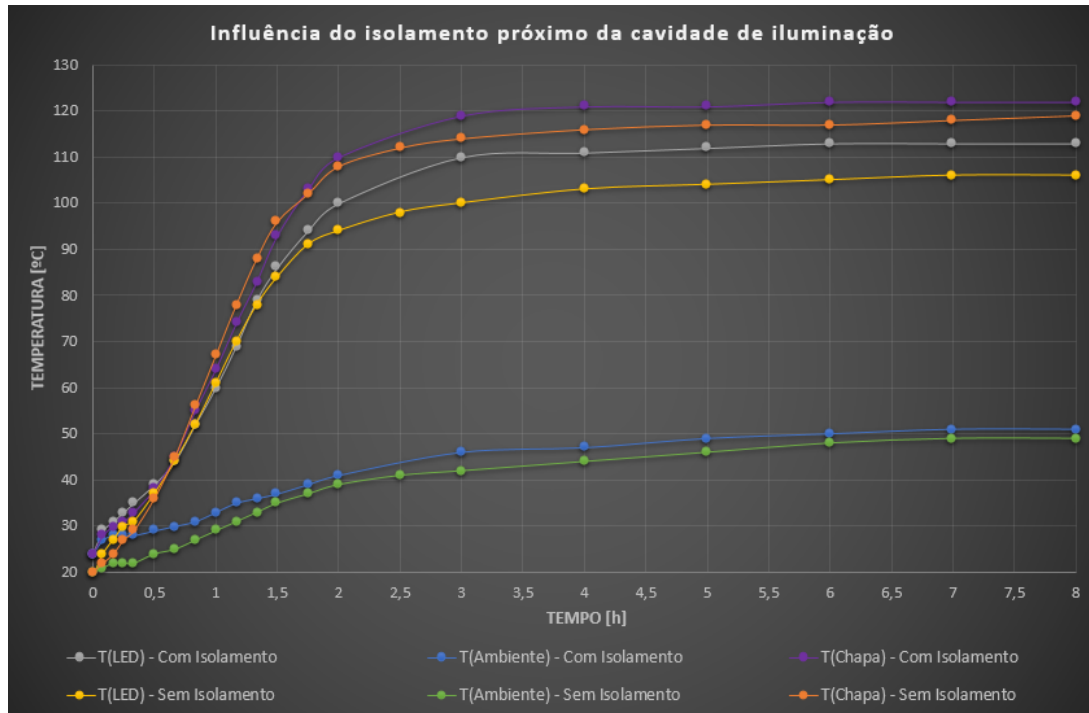


Figura 10.1: Evolução das temperaturas em estudo com o tempo de funcionamento do forno, para os Casos 1 e 2.

10.2 Análise da influência da chapa exterior do forno *Modulram*

No gráfico da Figura 10.2 encontra-se a variação da T_{LED} com o tempo de funcionamento do forno, para as várias chapas laterais exteriores estudadas. As duas chapas já utilizadas pela empresa, ou seja, a chapa normal (Caso 2) e a chapa extra-perfurada (Caso 4) geram comportamentos diferentes na T_{LED} . Enquanto que na primeira a temperatura sobe rapidamente nas primeiras 2 horas e depois continua a subir de uma forma mais lenta, com a chapa extra-perfurada a temperatura tende a parar de aumentar ao final de 4 horas, mantendo-se praticamente estável. Alterando a chapa do Caso 2 para o Caso 4, houve uma diminuição da temperatura máxima de 106°C para 98°C, o que representa um impacto enorme, tendo em conta que com esta alteração a temperatura fica abaixo do limite máximo segundo o fabricante.

Pelo facto de o caso sem chapa lateral (Caso 3) demonstrar temperaturas muito mais

baixas que as restantes foi desenhada uma nova chapa lateral com rasgos retangulares (Caso 5). O comportamento da T_{LED} com esta nova chapa é muito semelhante ao da chapa extra-perfurada, mas tende a fixar-se num valor mais baixo, na ordem de 4°C a menos. Esta nova chapa confirmou-se portanto eficaz e o principal motivo para o mesmo poderá ser o facto de possuir muito mais área de furação que as anteriores, o que ajuda na renovação do ar mesmo por convecção natural, reduzindo a temperatura do ar naquela região.

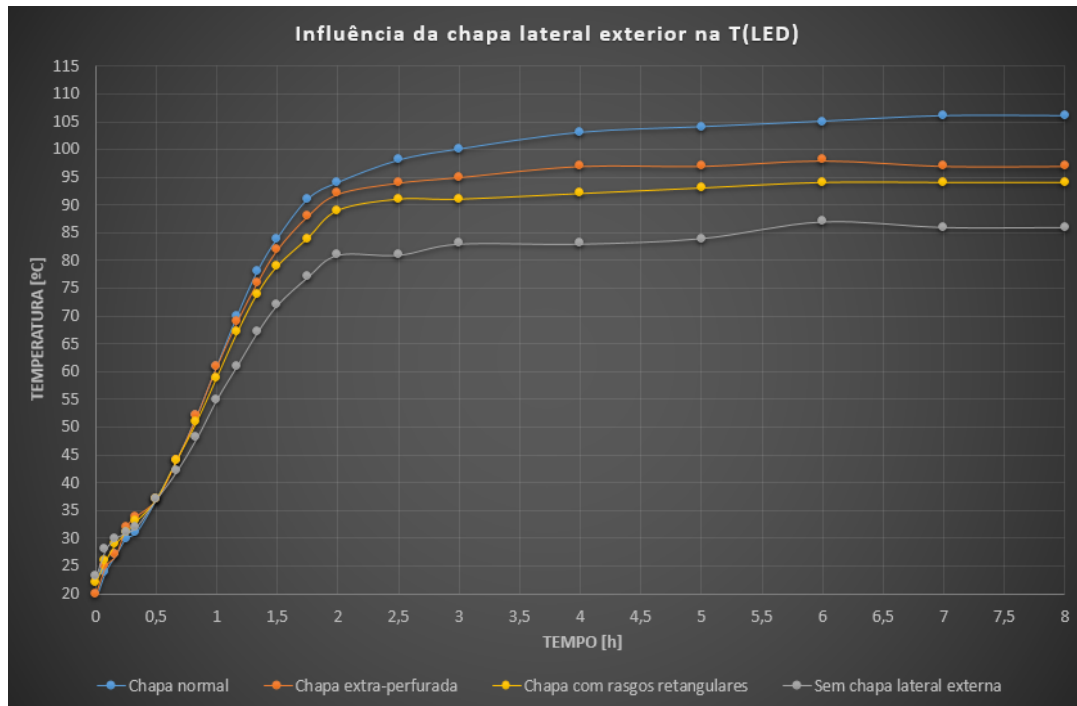


Figura 10.2: Comparação da evolução da T_{LED} com o uso de várias chapas exteriores.

De modo a verificar a relação entre a área de furação com a temperatura ambiente na região do quadro elétrico, $T_{Ambiente}$ e a temperatura da luminária LED, T_{LED} , no gráfico da Figura 10.3 encontra-se a evolução da $T_{Ambiente}$ para as várias chapas laterais usadas. A chapa extra-perfurada aumenta a área da furação em 4 vezes em relação à chapa normal. É possível verificar que o impacto na temperatura ambiente após esta alteração é enorme, com uma redução a longo prazo de 8°C . Ao contrário dos restantes casos, e à semelhança do que acontece na T_{LED} , no uso da chapa normal a temperatura ambiente tende a subir gradualmente e a praticamente não estabilizar. Isto deve-se ao facto de o ar quente ficar retido no interior já que não há renovação de ar, criando uma situação de cavidade retangular.

Para o caso da chapa de rasgos retangulares a temperatura ambiente é ainda inferior à conseguida no Caso 4. Possui uma área de furação sensivelmente 2,3 vezes maior que a chapa extra-perfurada e ao fim de 8 horas a temperatura máxima fixou-se nos 37°C , ou seja, 4°C abaixo do Caso 4. No entanto, verifica-se que este valor máximo é muito próximo daquele que se obteria sem chapa lateral externa (Caso 3), apenas com 1°C de diferença ao fim de 8 horas. Desta forma a remoção da chapa de rasgos retangulares

permite uma boa diminuição da T_{LED} mas mantém a temperatura ambiente. A criação de uma chapa lateral com uma área aberta ainda superior à da chapa criada neste projeto será uma solução a testar em trabalhos futuros, no entanto pressupõe-se, tendo em conta estes resultados, que não terá qualquer impacto na temperatura ambiente na região em estudo.

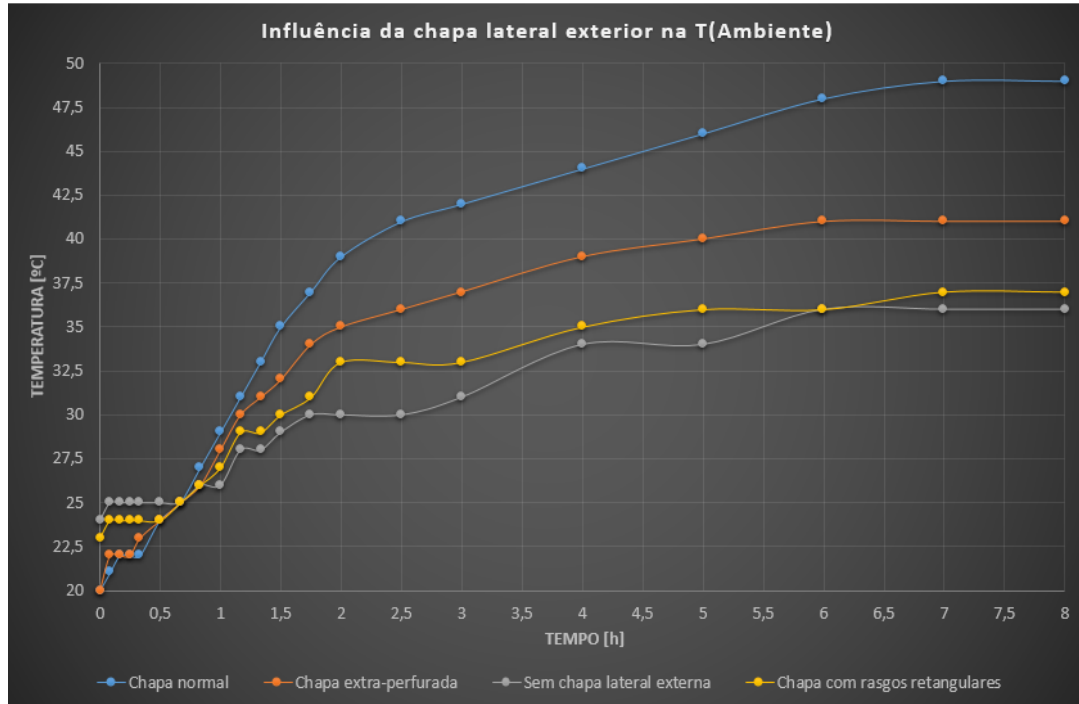


Figura 10.3: Comparação da evolução da $T_{Ambiente}$ com o uso de várias chapas exteriores.

10.3 Análise da influência da abertura no topo da cobertura do forno *Modulram*

Por efeito das forças gravitacionais e devido à diminuição da densidade do ar quando este aquece, o mesmo tende a subir. Tendo por base este fenómeno criou-se a nova abertura na cobertura do forno, tentando permitir ao ar que se escapasse mais facilmente. No gráfico da Figura 10.4 está presente uma comparação da evolução de temperaturas entre a situação sem abertura no topo e utilizando a chapa lateral de rasgos retangulares (Caso 5) e a situação com abertura extra no topo (Caso 6). Em qualquer uma das 3 temperaturas registadas não se encontra qualquer diferença significativa ao longo do tempo, demonstrando que ao contrário do que se pensava, não há qualquer efeito nesta nova adição.

A combinação desta solução com a nova chapa lateral não permite a diminuição da temperatura do ar no interior. Isto permite concluir que o ar quente numa situação sem abertura extra no topo já possui área suficiente de escape. O ar nesta situação (Caso 5) poderá escapar pelos furos circulares na cobertura do forno (Figura 9.4), pela abertura

no topo já existente para o painel do forno ou pela própria chapa lateral. O estudo permitiu concluir que não existem vantagens quando se aumenta a furação no topo do forno, quando se usa a nova chapa lateral.

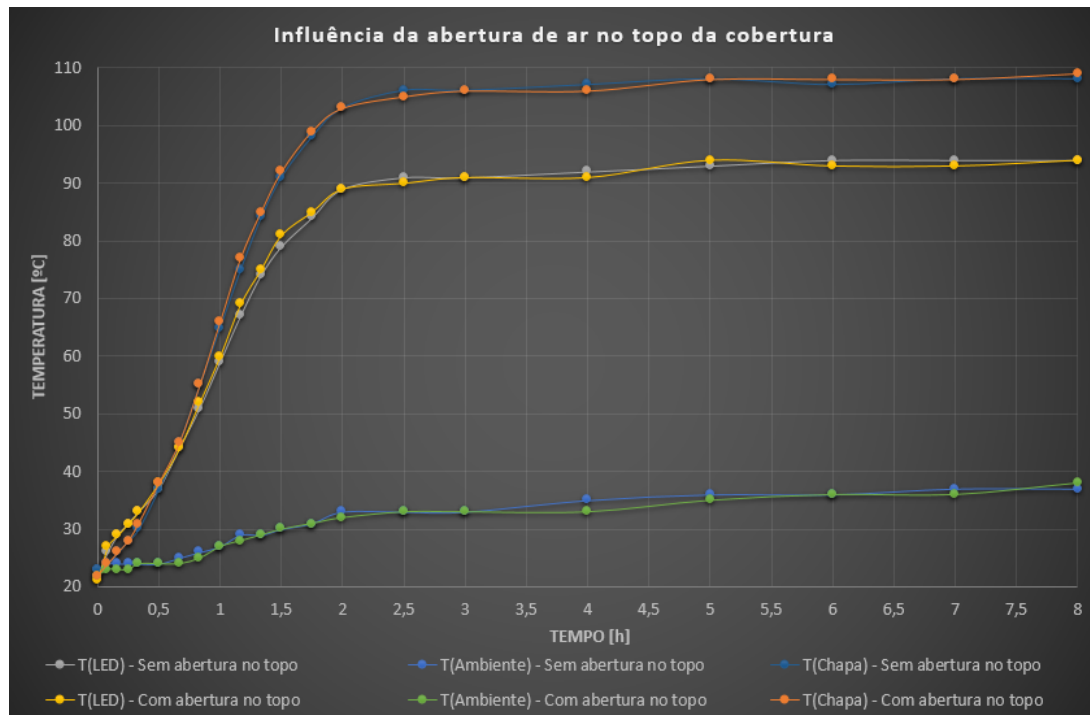


Figura 10.4: Evolução das temperaturas em estudo com o tempo de funcionamento do forno, para os Casos 5 e 6.

No entanto, mesmo após os efeitos neutros no estudo anterior, procurou-se saber se existiam vantagens na combinação do uso da abertura adicional com a chapa extra-perfurada. Na Figura 10.5 encontra-se um gráfico que faz a comparação desta combinação (Caso 7) com a utilização do forno sem a nova abertura (Caso 4). Ao longo do tempo é possível verificar uma ligeira diminuição de todas as temperaturas registadas, com a existência da abertura extra. No caso da T_{LED} a temperatura desce sensivelmente 2°C , o que, embora seja uma pequena diminuição, nota-se que esta diferença existe sempre ao longo do tempo, a partir das 2 horas de funcionamento, valor este no qual a temperatura da luminária tende a estabilizar.

O aspeto curioso desta aplicação é de que efetivamente tem efeitos positivos quando é usada a chapa extra-perfurada, ao contrário do que se referiu para a chapa desenhada e projetada neste trabalho. Assim, uma possível continuação deste estudo passaria por alterar por completo as furações na cobertura do forno, mas mantendo a chapa extra-perfurada. Como exemplo, as aberturas no topo da cobertura poderiam ser em maior número, mas com menor diâmetro, aumentando a área aberta nesta zona. A T_{LED} desceu para os 95°C , o que se encontra muito próxima do valor mínimo registado nos casos anteriores, de 94°C . Isto mostra que, tanto alterando a furação na chapa lateral como a furação no topo da cobertura, o resultado do arrefecimento por convecção natural tende para o mesmo valor, o que sugere que uma descida do mesmo seja bastante complexa

sem o uso de qualquer dispositivo auxiliar.

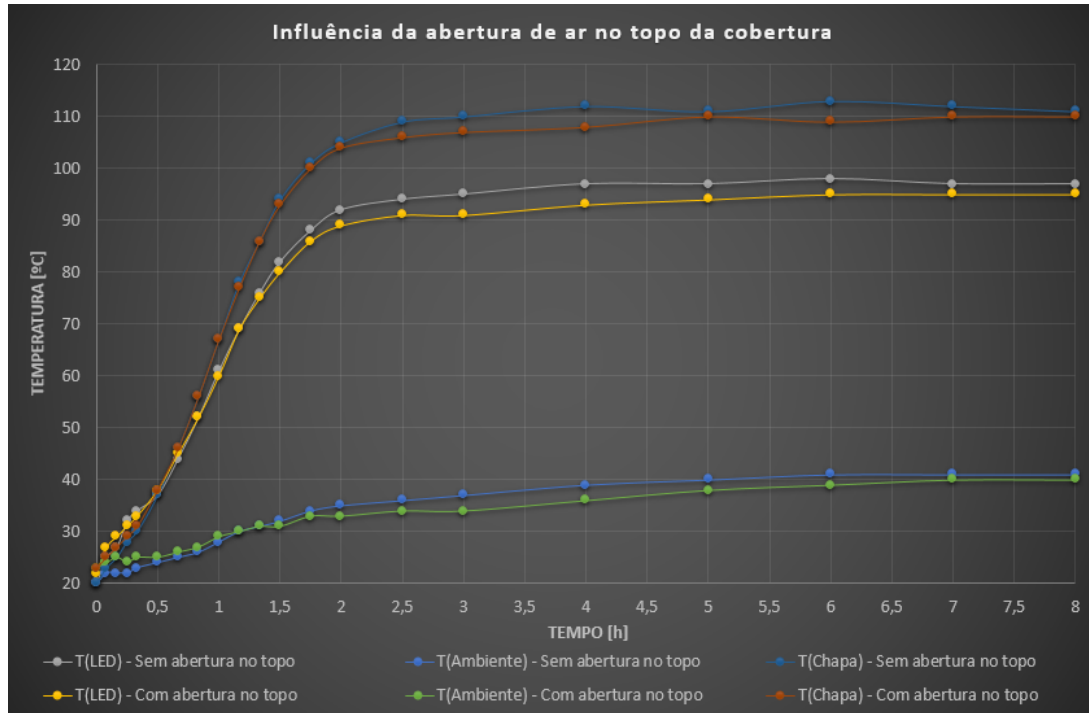


Figura 10.5: Evolução das temperaturas em estudo com o tempo de funcionamento do forno, para os Casos 4 e 7.

10.4 Comparação entre a utilização de vidro simples e vidro duplo

Como a alteração nas furações existentes na região que se pretende arrefecer não teve os efeitos pretendidos, tentou-se fazer uma alteração diferente, não no espaço onde o ar quente se encontra, mas sim na própria cavidade de iluminação. O vidro é um material com baixa condutibilidade térmica, ou seja, torna-se um bom isolador térmico. Por esta razão o uso de dois vidros colocados à frente da cavidade de iluminação foi motivo de estudo para verificar se efetivamente seria possível uma diminuição nas temperaturas. No gráfico da Figura 10.6 encontra-se uma comparação entre o uso de um vidro simples e o de um vidro duplo, ao longo do tempo de funcionamento do forno.

Analisando a T_{LED} , verifica-se que, embora nas primeiras duas horas e meia existam resultados positivos, já que a temperatura com o uso do vidro duplo é até $5^{\circ}C$ mais baixa nesses instantes, a longo prazo a solução com vidro duplo leva sensivelmente ao mesmo valor de $94^{\circ}C$, tendo mesmo sido registada um pouco acima da aplicação com vidro simples.

A temperatura ambiente registada a partir da primeira hora e meia de funcionamento é maior no caso do vidro duplo, embora no final das 8 horas a diferença seja muito baixa, de apenas $1^{\circ}C$.

A diminuição das temperaturas após a aplicação do vidro duplo é efetivamente visível para o caso da temperatura da chapa que constitui a cavidade de iluminação. Ao longo do tempo esta temperatura manteve-se sempre mais baixa em relação ao vidro simples.

É de referir que todos estes valores registados podem estar sujeitos a alguns desvios, já que para a substituição do vidro simples para o vidro duplo foi necessário remover as sondas dos seus locais originais e de seguida coloca-las novamente numa posição próxima da inicial. Uma explicação para que as temperaturas não se tenham alterado, em especial a T_{LED} pode dar-se pela pouca influência da transferência de calor por condução nos vidros. De facto, o fenómeno de transferência de calor predominante é a radiação de calor que provém da câmara do forno.

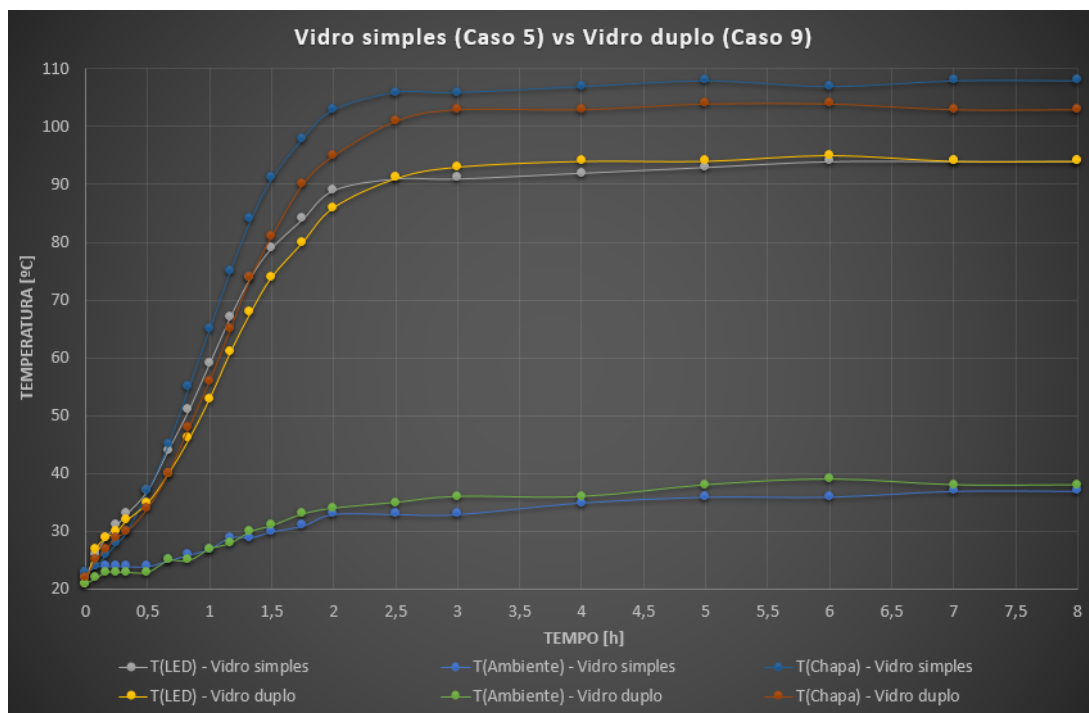


Figura 10.6: Comparação da evolução das temperaturas entre os casos 5 e 9.

10.5 Análise da influência do uso do ventilador no topo da cobertura do forno

No gráfico da Figura 10.7 está presente uma comparação da evolução das temperaturas com o tempo entre o caso sem ventilação na cobertura (Caso 6) e o caso com ventilação nesta zona (Caso 10). No Caso 10 o ventilador manteve-se em funcionamento durante toda a duração do teste e esta característica levou a uma diminuição imensa nas temperaturas praticadas.

Comparando a T_{LED} , a diferença entre os dois casos é visível logo nos primeiros instantes de aquecimento do forno, já que o calor gerado pelas resistências e que é transferido para o ar naquela região é imediatamente removido pelo ventilador. Esta diferença de

temperaturas continua a aumentar até por volta das 2 horas, onde a partir desse instante permanece relativamente constante. Como valores máximos atingidos, no caso da ventilação forçada a temperatura máxima fixou-se nos 82°C, o que equivale a 12°C de diferença em relação ao Caso 6. A T_{Chapa} teve uma evolução semelhante, e a diferença entre temperaturas máximas dos dois casos foi de 11°C. Já a T_{Ambiente} tem um aumento ao longo do tempo gradual na convecção natural, enquanto que com o ventilador esta permanece relativamente constante entre as 6 e as 8 horas. Assim pressupõe-se que com mais tempo de funcionamento a ventilação constante permite estabilizar as temperaturas do ar.

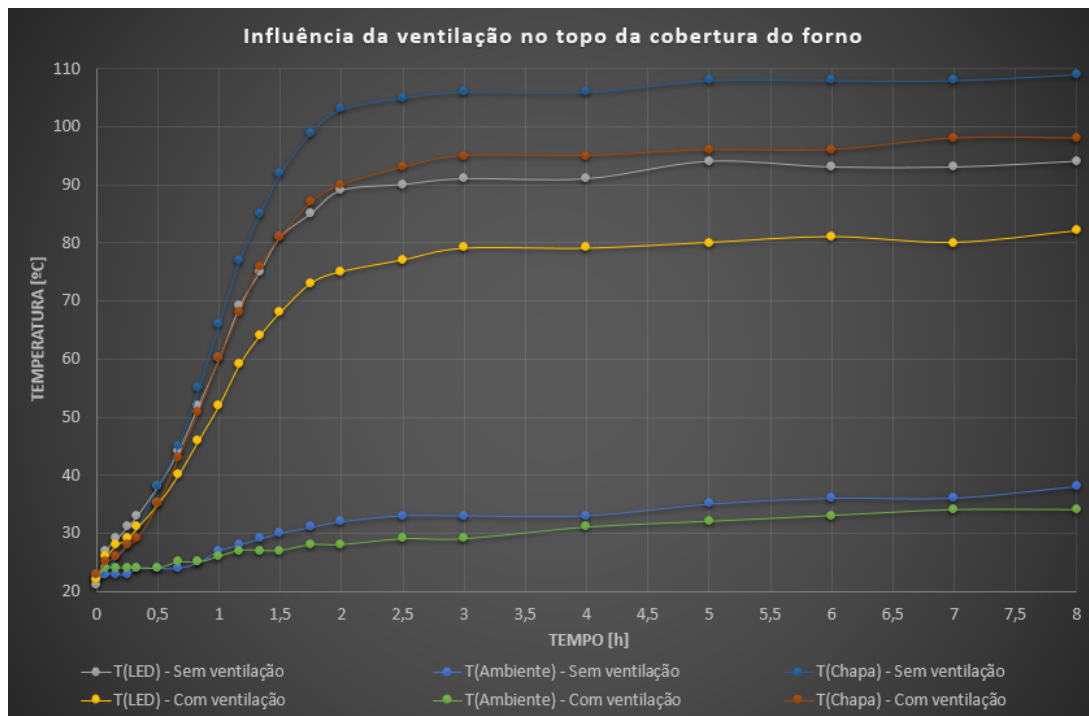


Figura 10.7: Evolução das temperaturas em estudo com o tempo de funcionamento do forno, para os Casos 6 e 10.

O gráfico prova que o uso da ventilação é uma solução termicamente eficaz, qualquer que seja o tempo de funcionamento do forno. Para diminuir o consumo excessivo do ventilador, o seu tempo em uso deve ser controlado. Com o ventilador desligado, as temperaturas irão aumentar com o tempo, até ao máximo definido pelas curvas da convecção natural no gráfico. Ligando o ventilador as temperaturas irão baixar novamente. No entanto, o tempo necessário a que se atinjam valores semelhantes aos da curva de convecção forçada no gráfico é desconhecido. A determinação do tempo necessário à diminuição das temperaturas para um valor razoável poderá ser objeto de estudo no futuro.

Os valores de arrefecimento através de convecção natural levaram a um valor mais baixo do máximo de 100°C para o forno aquecido a 280°C. Para câmaras de pastéis de natas ou outras que necessitam de temperaturas mais altas, este estudo ajuda a concluir que a ventilação seria a opção mais benéfica para o arrefecimento dos LEDs. É no entanto importante não esquecer a desvantagem principal desta solução, que é o seu problema

de manutenção relativo ao ambiente a que está sujeito, onde existe pó da farinha que se acumula no ventilador e leva ao seu mau funcionamento. É portanto necessário uma série de ajustes para tornar esta solução possível a longo prazo.

10.6 Escolha da melhor posição para aplicação de ventiladores na traseira do forno

Como referido anteriormente, a aplicação do ventilador na cobertura terá efeitos positivos na câmara superior, mas num forno *Modulram* com várias câmaras este efeito irá perder-se nas câmaras inferiores. Por este motivo experimentou-se uma nova localização no forno. Tendo em conta o valor da temperatura máxima T_{LED} para o Caso 10, 82°C , no gráfico da Figura 10.8 encontra-se a evolução da temperatura da luminária LED para os casos onde se colocaram 2 ventiladores na traseira do forno (Casos 11, 12 e 13).

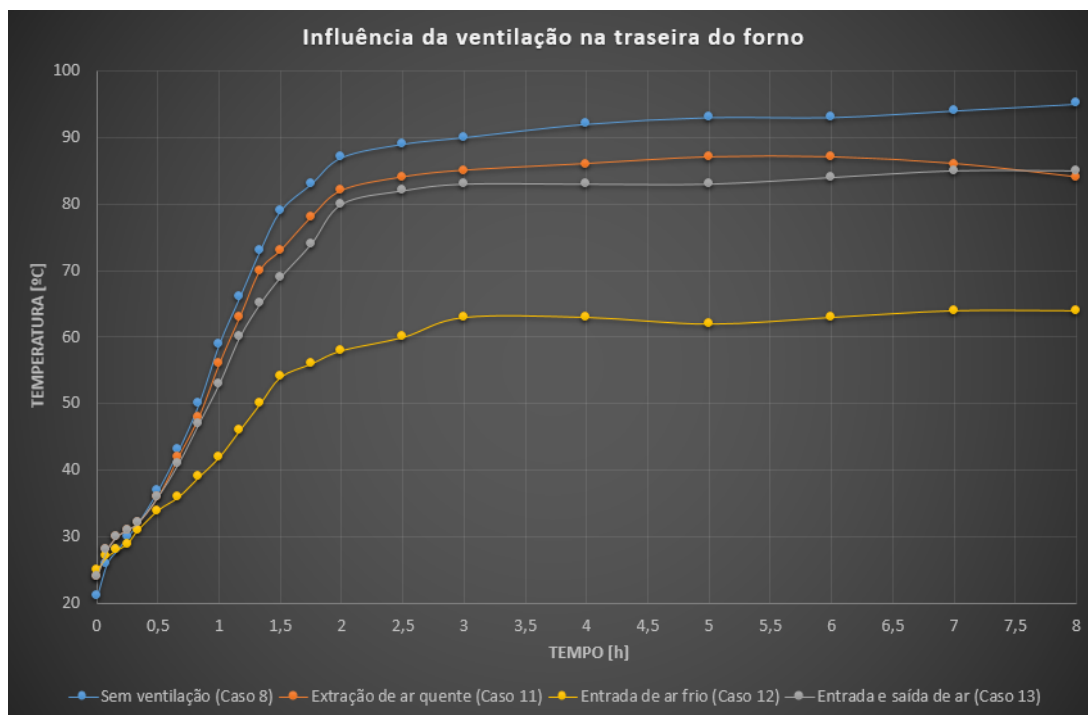


Figura 10.8: Evolução da temperatura da luminária LED com o tempo, para várias configurações com os ventiladores na traseira do forno.

O Caso 11 foi aquele que mostrou piores resultados de todos os estudos com convecção forçada. A temperatura máxima foi de 87°C nas 5 horas de funcionamento. Comparando com o Caso 10, prova-se que uma extração de ar quente por recurso a ventilação é mais vantajosa com o ar a sair pelo topo, o que se justifica tendo em conta a própria subida do ar quente e portanto uma direção no fluxo de ar extraído paralela à direção das forças gravitacionais ajuda no arrefecimento.

O Caso 13 originou uma temperatura máxima de 85°C nas 8 horas de funcionamento. Comparando ao Caso 11 praticamente não teve uma melhoria relevante, o que indica

que, mesmo com o ventilador inferior a colocar ar frio no interior da cavidade, o efeito predominante na região próxima da luminária LED é ainda o de extração de ar quente pelo ventilador da câmara superior. Comparando ao Caso 10 continua a ser mais desvantajoso para a câmara superior, o que não deverá ser verdade para a câmara inferior do *Modulram*.

Ao passo que todos os outros testes com ventilação levaram a temperaturas na mesma gama de valores, entre 82-87°C, o Caso 12 levou a valores muito mais baixos que estes. Desde os primeiros minutos de aquecimento do forno até às 8 horas de funcionamento, a curva deste caso teve valores sempre muito inferiores e estabilizou por volta das mesmas horas dos casos anteriores.

A melhor localização do ventilador tendo em conta este estudo passa a ser na traseira do forno, com ambos os dispositivos a forçar a entrada de ar na região pretendida. A continuação do estudo de arrefecimento por recurso a ventilação passaria pelo adaptação de dispositivos de segurança, filtragem e limitação de tempo de funcionamento do ventilador.

Parte IV

Considerações Finais

Capítulo 11

Protótipos finais

Este capítulo tem por objetivo a apresentação e apreciação final dos resultados da análise realizada neste trabalho, fazendo uma comparação entre a situação atual das gamas de fornos *Turboram* e *Modulram* e os protótipos finais, com as devidas alterações a realizar, segundo o desenvolvimento efetuado neste estágio.

11.1 Protótipo *Turboram 5T* com iluminação LED

Após o estudo da integração de iluminação LED no forno *Turboram 5T* estar concluído, foram criados desenhos para a produção de um protótipo final com a nova tecnologia de iluminação. As versões finais destes desenhos estão disponíveis no Apêndice A deste documento. Na lista abaixo são referidas as peças a alterar bem como informação acerca dos seus processos de fabrico.

- **Corpo da porta *Turboram 5T***

Na Figura 11.1 estão assinaladas as diferenças da nova chapa da porta do forno em relação à atual.

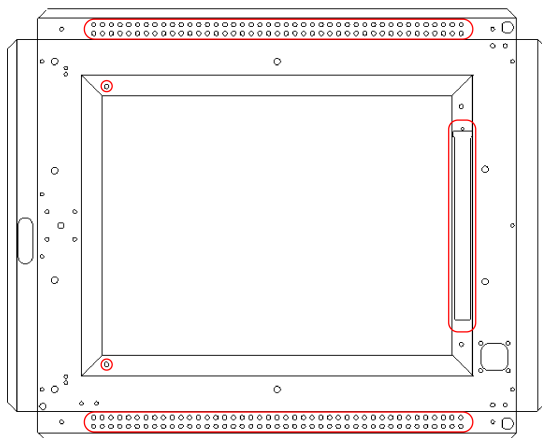


Figura 11.1: Alterações na chapa da porta, assinaladas a vermelho.

Neste componente é criada a furação tanto superior como inferior, que se mostrou neste estudo ser extremamente eficaz no arrefecimento dos LEDs. A disposição escolhida desta furação foi de 2x43 furos de diâmetro 7 mm, devido ao estudo provar que um aumento no diâmetro da furação não leva a uma diminuição significativa nas temperaturas da luminária LED. Do lado esquerdo da Figura 11.1 estão assinalados outros dois furos, que servem para a fixação do refletor do lado do fecho da porta. Já no lado direito encontra-se assinalado o recorte na chapa para a colocação da luminária LED que se mostrou a mais benéfica, a nível económico e com uma maior facilidade de aplicação, a *BJB 77.116.1005*. É importante realçar que conforme visível na Figura 11.1 (ou mais distinguível no Apêndice A.1) este recorte fica muito junto da zona de quinagem da chapa, devido à espessura da porta ser pouco superior à espessura necessária para colocação da luminária LED. Embora seja possível a produção deste componente com as dimensões do desenho no Apêndice A.1, o tempo de produção irá aumentar. O processo de quinagem da chapa irá necessitar de uma mudança de ferramenta, já que na zona do recorte para a luminária LED é necessária uma quinagem com uma ferramenta mais adequada. Este processo extra irá, numa produção em série, demorar certa de 1 minuto por peça a mais do que o procedimento de quinagem normal. Esta peça deve ser realizada com corte a laser, o que, devido ao elevado número de furos, irá aumentar também o tempo de produção.

- **Refletores para a iluminação**

No estado atual da porta os refletores esquerdo e direito são exatamente iguais. Segundo o estudo abordado, a melhor opção para a iluminação passa pelo uso de dois refletores diferentes, pois é apenas aplicada a fonte de iluminação no lado da dobradiça do forno. Assim, os dois refletores são os últimos componentes alterados e os seus desenhos de produção encontram-se nos Apêndices A.2 e A.3.

O refletor de iluminação do lado direito tem uma fixação à porta igual ao refletor atual, apenas contém um ângulo de reflexão diferente, de 155° e o corte para a luminária LED. Já o refletor de iluminação do lado esquerdo é muito diferente do atual, com a fixação à porta a dar-se pelas patilhas inferior e superior. Ambas as peças são realizadas com recurso a corte laser, à semelhança da situação atual. O tempo de produção pressupõe-se relativamente idêntico, com a única desvantagem de efetivamente passar a existir 2 componentes diferentes.

- **Controlo da corrente aplicada aos LEDs - *LED Driver***

Como última alteração ao caso atual encontra-se a necessidade de aplicação de um *LED Driver* como componente adicional ao quadro elétrico do *Turboram*. A corrente máxima aplicável à luminária LED *BJB 77.116.1005* segundo o fabricante é de 1050 mA. O estudo realizou-se com uma corrente aplicada de 1 A e após a finalização deste foram testados *LED Drivers* que permitem uma regularização da corrente aplicada inferior. Testou-se a aplicação de 0,5 A e de 0,75 A. Para o primeiro caso a iluminação foi inferior, embora suficiente. Já para o segundo caso a iluminação foi muito semelhante à dos ensaios. É importante referir que uma menor corrente aplicada significa também uma diminuição das temperaturas. A aplicação de 0,75 A de corrente é uma boa opção a longo prazo, já que se encontra dentro dos limites de amperagem e permite uma boa iluminação no forno. O *LED*

peças sofreram ligeiras alterações relativamente às versões utilizadas nos ensaios realizados. O diâmetro dos furos destas peças para a aplicação de parafusos foi diminuído de forma a reduzir as folgas existentes na montagem dos vários componentes. Para além disso as dimensões internas do fixador externo foram reduzidas para não existir tanta folga ao colocar o vidro no seu interior e a largura deste mesmo componente foi aumentada, para facilitar a sua fixação por soldadura à chapa da câmara do forno. Todas estas peças são produzidas por corte laser seguido da quinagem necessária.

Outras alterações a estas peças poderiam ser realizadas, como por exemplo a combinação da chapa onde é aplicada a luminária LED e os refletores numa peça única, podendo, assim, reduzir o tempo de corte de chapa e anular o tempo de montagem destas peças. Também se conseguiria reduzir o material utilizado. Outra alteração seria no âmbito de adquirir um sistema que permitisse uma substituição mais rápida da luminária LED, para ajudar na manutenção do forno.

- **Placa lateral exterior com rasgos retangulares**

O desenho final deste componente encontra-se no Apêndice B.8. Os rasgos retangulares são criados numa puncionadora. O tempo de produção desta chapa é portanto bastante mais baixo que aquele que seria caso a produção desta chapa fosse com recurso a corte por laser. É no entanto desconhecida a diferença entre os tempos de produção e consequentemente os custos associados entre esta chapa e a extra-perfurada. Esta avaliação deve ser posteriormente realizada de forma a existir uma escolha consciente.

- **Controlo da corrente aplicada aos LEDs - *LED Driver***

Semelhante ao caso do *Turboram* é necessário o controlo da amperagem fornecida à luminária LED. Este estudo mostrou que a luminária LED de dimensões médias da BJB, a *BJB 77.116.1002*, é suficiente para a iluminação nesta gama de fornos e que trás vantagens térmicas, visto gerar menos calor. Para estas luminárias a amperagem máxima é de 750 mA. O *LED Driver* aconselhado para esta aplicação é em tudo igual ao apresentado na Figura 11.2, mas com uma amperagem de trabalho de 0,5 A, fazendo com que os LEDs não se encontrem permanentemente com uma corrente aplicada elevada, aumentando o seu tempo de vida útil e diminuindo o consumo energético.

O Caso 7 também é uma possível escolha para o protótipo final. Nesta situação, a placa lateral externa escolhida acaba por ser a já existente chapa extra-perfurada e a única alteração a realizar é a abertura extra no topo da cobertura. A temperatura máxima registada é muito próxima da do Caso 5. Assim o caso a ser escolhido é aquele que obviamente gera menores custos à empresa.

Para os fornos *Modulram* que necessitam de atingir temperaturas superiores, o estudo conclui que o arrefecimento por ventilação é uma boa solução. Assim, o Caso 11 é o recomendado, onde, relativamente à situação atual, este necessita, para além das novas placas e da nova cavidade de iluminação, de uma abertura extra no topo da cobertura, para que o ar quente seja eficientemente extraído, de uma abertura na zona de trás de cada câmara constituinte do *Modulram*, de um ventilador por câmara, da chapa lateral exterior com rasgos retangulares e de uma estrutura de filtragem e segurança para o ventilador, bem como um sistema de temporização para este dispositivo.

Capítulo 12

Conclusões adquiridas

Neste estágio foram realizados avanços significativos na análise de arrefecimento de LEDs com aplicação em condições extremas, numa área onde atualmente existe pouco trabalho realizado. Para além desse aspeto, este estudo de inovação de cariz tecnológico abordou dois dos fornos industriais mais comercializados pela empresa *Ramalhos S.A.*, permitindo uma constante evolução nos produtos assim como a afirmação da empresa face à concorrência a nível mundial.

Utilizaram-se técnicas de arrefecimento de baixo custo de aplicação, permitindo a obtenção de valores de temperatura abaixo do limite crítico. Procurou-se sobretudo, caso possível, minimizar as temperaturas e os custos, levando à conclusão de que é possível e viável a substituição das lâmpadas de halogéneo por iluminação LED nestas condições.

Mais pormenorizadamente, foi realizado um estudo comparativo entre várias fontes de iluminação LED de forma a obter uma escolha acertada. Comparando parâmetros como o fluxo luminoso, a temperatura crítica e a eficiência luminosa, escolheu-se a gama *BJB 77.116*, especial para aplicações na porta de fornos. Procurou-se obter mais conhecimentos sobre os dois fornos e sobre a melhor localização possível para a aplicação da iluminação LED, procedendo-se à inventariação de possíveis alternativas de soluções de arrefecimento. No caso do *Turboram* conclui-se que a melhor localização para aplicação dos LEDs é na porta, do ponto de vista térmico. Já no caso do *Modulram* conclui-se que a melhor localização e também praticamente a única possível devido ao espaço existente e a questões térmicas é na lateral onde se encontra o quadro elétrico do forno, existindo aí uma cavidade para a aplicação do sistema de iluminação.

Vários ensaios experimentais foram efetuados para a obtenção de resultados que permitissem confirmar as hipóteses sugeridas pelas soluções de arrefecimento. Por fim, obtiveram-se desenhos para produção de protótipos de fornos num estado final após o estudo experimental.

12.1 Conclusões do estudo no forno *Turboram*

No caso do *Turboram* a solução da furação da porta de forma a criar um canal ascendente de ar no interior desta revelou-se extremamente efetiva. Com a aplicação de uma luminária *77.116.1002* no lado da dobradiça da porta e com a furação criada, existiu uma diminuição de 52°C na temperatura registada na luminária LED, comparando ao caso atual sem qualquer furação. A temperatura registada baixou de 104°C para 52°C.

Para este estudo podem-se listar as seguintes conclusões:

- A geração de calor pelos LEDs leva a uma temperatura máxima de 36°C para a luminária *BJB 77.116.1002* e de 50°C para a *BJB 77.116.1005*, com o ar em condições normais. Estes valores aumentam significativamente após a aplicação destas luminárias na lateral da porta do *Turboram 5T*, com o forno em funcionamento.
- A distribuição de temperaturas na porta do forno não é uniforme, existindo diferenças enormes entre a zona superior e a inferior, assim como diferenças entre o canal do lado do fecho e o do lado da dobradiça.
- A furação proposta não cria um aumento no consumo elétrico do forno, trazendo mais uma vantagem na sua utilização futura.
- A abertura progressiva dos furos na furação superior leva a uma diminuição progressiva na temperatura da luminária LED até esta se manter constante. No caso da luminária aplicada no lado da dobradiça, o valor limite corresponde a 44 furos abertos do lado direito ou 64 furos abertos do lado esquerdo, mostrando que a partir destes valores não existe a continuação na redução da temperatura.
- A furação inferior é também importante já que permite a entrada de ar no canal. Tendo a furação superior totalmente aberta, a abertura da furação inferior diminui a temperatura em 19°C. Não é, no entanto, absolutamente necessária a sua abertura completa, já que a diferença entre 86 furos abertos e 43 furos abertos é de apenas 4°C na T_{SondaLED} .
- Nem sempre o aumento do diâmetro dos furos é benéfico. Conclui-se que para as duas furações realizadas os resultados foram idênticos no lado da dobradiça com todos os furos abertos. Já no lado do fecho as temperaturas aumentaram com o aumento do diâmetro dos furos.
- A abertura das furações aumentou efetivamente a velocidade do ar no interior das calhas, mostrando o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção.
- Para o *Turboram 5T*, embora as experimentações tenham sido realizadas com duas luminárias de cada lado, comprova-se que do ponto de vista funcional e económico a melhor solução é a aplicação de apenas uma luminária *BJB 77.116.1005* do lado da dobradiça da porta. As temperaturas no dissipador de calor aumentam, onde a T_{SondaLED} registada foi de 77°C. Este valor é ainda assim bastante mais baixo que o máximo de 100°C.
- Para o *Turboram 9T 60x40* não existiu um estudo focado nestas dimensões, no entanto, com base nas conclusões retiradas neste projeto, a melhor configuração para a aplicação de iluminação LED neste tipo de fornos seria uma luminária LED *BJB 77.116.1002* de cada lado da porta, colocando a luminária do lado do fecho na zona inferior e a luminária do lado da dobradiça na zona superior.
- No caso do *Turboram 10T 80x60* existe espaço suficiente para a aplicação de 2 luminárias *BJB 77.116.1005*, uma de cada lado, com a mesma configuração pressuposta para o *Turboram* de 9 tabuleiros. Também a aplicação das luminárias com menor comprimento seria uma alternativa.

12.2 Conclusões do estudo no forno *Modulram*

No caso do *Modulram* foi projetada e desenhada uma nova cavidade de iluminação para a aplicação da luminária LED *BJB 77.116.1002*. De seguida várias experimentações foram estudadas em busca de uma possível aplicação viável da iluminação LED em câmaras normais do *Modulram*, onde a temperatura máxima estudada foi de 280°C. Desde a aplicação do novo sistema de iluminação até se obter o melhor valor de arrefecimento por convecção natural, conseguiu-se diminuir as temperaturas em 19°C, dos 113°C para os 94°C. Para o estudo em questão listam-se abaixo as seguintes conclusões:

- A distância da luminária LED à câmara de $x=128$ mm leva a uma luminosidade adequada, não sendo necessário diminuir este valor.
- Os ângulos dos refletores longitudinais inicialmente usados de 106° também foram adequados, não sendo portanto necessárias alterações nestes componentes.
- Um sistema de iluminação não isolado permite a redução das temperaturas dos 113°C para os 106°C.
- O aumento da área da furação na chapa lateral externa diminui não só a T_{LED} como a $T_{Ambiente}$. A temperatura da luminária foi reduzida em 12°C com esta alteração.
- A adição de uma abertura extra na cobertura do forno permite a redução das temperaturas apenas quando se usa a chapa extra-perfurada.
- Após um longo tempo de funcionamento do forno o uso do vidro duplo não causa a diminuição da T_{LED} , não gerando alterações relevantes comparando ao caso do vidro simples.
- Para o caso de câmaras *Modulram* onde são necessárias temperaturas maiores que 280°C, o estudo prevê que o uso da ventilação é uma solução termicamente eficaz.
- A melhor localização para aplicar um ventilador é na traseira do forno, colocando um destes dispositivos por câmara e permitindo a entrada de ar frio para o interior da região do quadro elétrico. Neste caso a T_{LED} foi reduzida dos 94°C para os 64°C.

12.3 Trabalhos futuros

Como continuação do estudo realizado durante este estágio, são listadas abaixo algumas sugestões de trabalhos futuros:

Na *Ramalhos*

- Implementação da iluminação LED em todas as gamas dos fornos da *Ramalhos*, substituindo assim o tipo de iluminação utilizado atualmente por outro com uma eficiência energética muito superior.
- Utilização de um *LED Driver* inteligente, capaz de atenuar a corrente aplicada aos LEDs, de forma a reduzir a sua luminosidade e temperatura, aumentando o tempo de vida útil dos LEDs.

No *Turboram*

- Aperfeiçoar o estudo realizado na furação a aplicar, pretendendo deste modo encontrar o diâmetro dos furos ótimo. Podem ainda ser estudadas alternativas com outras geometrias, como rasgos retangulares ou vários furos circulares mas com vários diâmetros diferentes.
- Generalização do estudo a toda a gama *Turboram*, verificando se as conclusões retidas neste estudo são extensíveis aos fornos de maiores dimensões.
- Possíveis ajustes na espessura da porta do forno, de modo a facilitar o processo de quinagem da porta na zona onde se aplica a luminária LED.

No *Modulram*

- Aumentar ligeiramente o valor de x , sendo possivelmente necessário alterar o estado atual dos apoios da chapa do quadro elétrico do forno.
- Utilização de outro tipo de configurações de luminárias, como por exemplo usar dois sistemas de iluminação com as luminárias mais pequenas, as *BJB 77.116.1001*.
- Analisar de que forma a remoção de mais quantidade de isolamento térmico próximo da cavidade de iluminação está relacionada com as temperaturas.
- Projetar uma chapa lateral com uma maior área aberta, na tentativa de diminuir a T_{LED} .
- Mantendo o uso da chapa extra-perfurada, seria interessante estudar o efeito de outros tipos de furação na cobertura do forno.
- Aplicar um vidro duplo com um maior espaçamento entre os vidros e com este aberto.
- Aplicar um vidro especial, capaz de bloquear a radiação proveniente do forno nos comprimentos de onde onde a radiação emitida por um corpo negro é máxima.
- Continuar estudo da aplicação de ventiladores no *Modulram*, focando sobretudo num sistema capaz de filtrar as partículas indesejáveis, num sistema de proteção, na redução do consumo do ventilador e no controlo On/Off deste dispositivo.
- Arrefecimento por convecção forçada utilizando um ventilador centrífugo, onde não existe acumulação de resíduos, já que as pás não se encontram no interior de uma caixa.

Bibliografia

- [1] BJB///OEM-Line HOT. LED luminaires for ovens, microwaves and steam cookers. **5585964**
- [2] Core Electronics. All About LEDs. 2017. Consultado em 14/04/2019. Disponível em: <https://core-electronics.com.au/tutorials/all-about-leds.html>
- [3] D.H. Park, D.B. Lee, E.R. Seo, Y.J. Park. A parametric study on heat dissipation from a LED-lamp. *Applied Thermal Engineering* **108**:1261-126, 2016.
- [4] distform-mychef. mychef evolution Catalogue.
- [5] D. Jang, S-H. Yu, K-S. Lee. Multidisciplinary optimization of a pin-fin radial heat sink for LED lighting applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **55**:515-521, 2012.
- [6] DownLights. Which Beam Angle? . 2019. Consultado em 10/04/2019. Disponível em: <https://www.downlights.co.uk/faq-which-beam-angle.html>
- [7] DP-CALC Micromanometer Model 8715 and AccuBalance Modular Air Balancing Tool Model 8380. Operation and service manual. 2014. P/N **6005723**.
- [8] E.-C. Cho, et al. Graphene-based thermoplastic composites and their application for LED thermal management. *Carbon* **102**:66-73, 2016.
- [9] Edison Tech Center. LEDs and OLEDs. 2013. Consultado em 16/04/2019. Disponível em: <http://edisontechcenter.org/LED.html>
- [10] Edison Tech Center. The Halogen Lamp. 2013. Consultado em 16/04/2019. Disponível em: <http://edisontechcenter.org/halogen.html>
- [11] FINES. HTB/FIN BAKE Convection ovens. Consultado em 06/05/2019. Disponível em: <https://www.fines.si/ovens/htb-fin-bake-convection-ovens/>
- [12] Flir. User's manual FLIR T5xx series. 2017. **T810253**
- [13] G. Sosoi, et al. Heat pipe cooler for high power LED's cooling in harsh conditions. *Procedia Manufacturing* **32**:513-519, 2019.
- [14] Hao J, Rui-Qiang Y, Ke H-Liang, Sun Q, Jing L. Analysis of the reliability of LED lamps during accelerated thermal aging test by online method. *Optik* **178**:1045-1050, 2019.

- [15] H. Yilmazer, B. Pflaum. *Intelligent Over Temperature Protection for LED Lighting Applications*. Infineon Technologies AG, 2013.
- [16] Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6^a ed. s.l.: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [17] Indiamart. Thermoelectric Cooling. Consultado em 28/06/2019. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/thermoelectric-cooling-16335767355.html>
- [18] J. Alexandersen, O. Sigmund, K.E. Meyer, B.S. Lazarovac. Design of passive coolers for light-emitting diode lamps using topology optimisation. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **122**:138-149, 2018.
- [19] Jornal de Notícias. Lâmpadas de halogéneo começam a ser descontinuadas. 2016. Consultado em 12/04/2019. Disponível em: <https://www.jn.pt/nacional/interior/lampadas-de-halogeneo-comecam-a-ser-descontinuadas-5366768.html>
- [20] Lumicrest, Lighting Solutions. Colour Temperature. Consultado em 10/04/2019. Disponível em: <https://lumicrest.com/colour-temperature/>
- [21] Marlow. How Do Thermoelectric Coolers (TEC) Work?. Consultado em 28/06/2019. Disponível em: <https://www.marlow.com/how-do-thermoelectric-coolers-tecs-work>
- [22] N. Mirante. *Análise e melhoria de sistemas de arrefecimento de lâmpadas de LED*. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2013.
- [23] OSRAM Digital Systems. Consultado em 12/04/2019. Disponível em: <https://www.osram.com/cb/>
- [24] plentino. Philips Mini LED Driver Xitanium 750mA 8-20V 15W 230V TE SC. Consultado em 12/07/2019. Disponível em: <https://www.plentino.de/fortimo-led/treiber/xitanium/philips-xitanium-mini-treiber-15w-0-75a-20v-te-sc-230v-dimmbar-ohne-zugentlastung/a-1045942/>
- [25] Q ATS. Advanced Thermal Solutions, Inc.. High-Performance Heat Pipes. Consultado em 28/06/2019. Disponível em: <https://www.qats.com/Products/Heat-Pipes>
- [26] Ramalhos. 2012. Consultado em 06/05/2019. Disponível em: <http://www.ramalhos.com/pt/>
- [27] Ramalhos. Modulram Catalogue. **DC2.014.190**.
- [28] Ramalhos. Turboram Catalogue. **DC2.012.190**.
- [29] Sunon. Sunonwealth Electric Machine Industry Co., Ltd. 2010. Consultado em 06/08/2019. Disponível em: <http://www.sunon.com/index2/pro.php?c1=2>
- [30] Techopedia. Luminous Flux. 2019. Consultado em 10/04/2019. Disponível em: <https://www.techopedia.com/definition/16724/luminous-flux>
- [31] Unox. BAKERLUX SHOP.PRO LED. 2019. Consultado em 06/05/2019. Disponível em: https://www.unox.com/en_pt/lines/bakerlux_shoppro_led-10.html

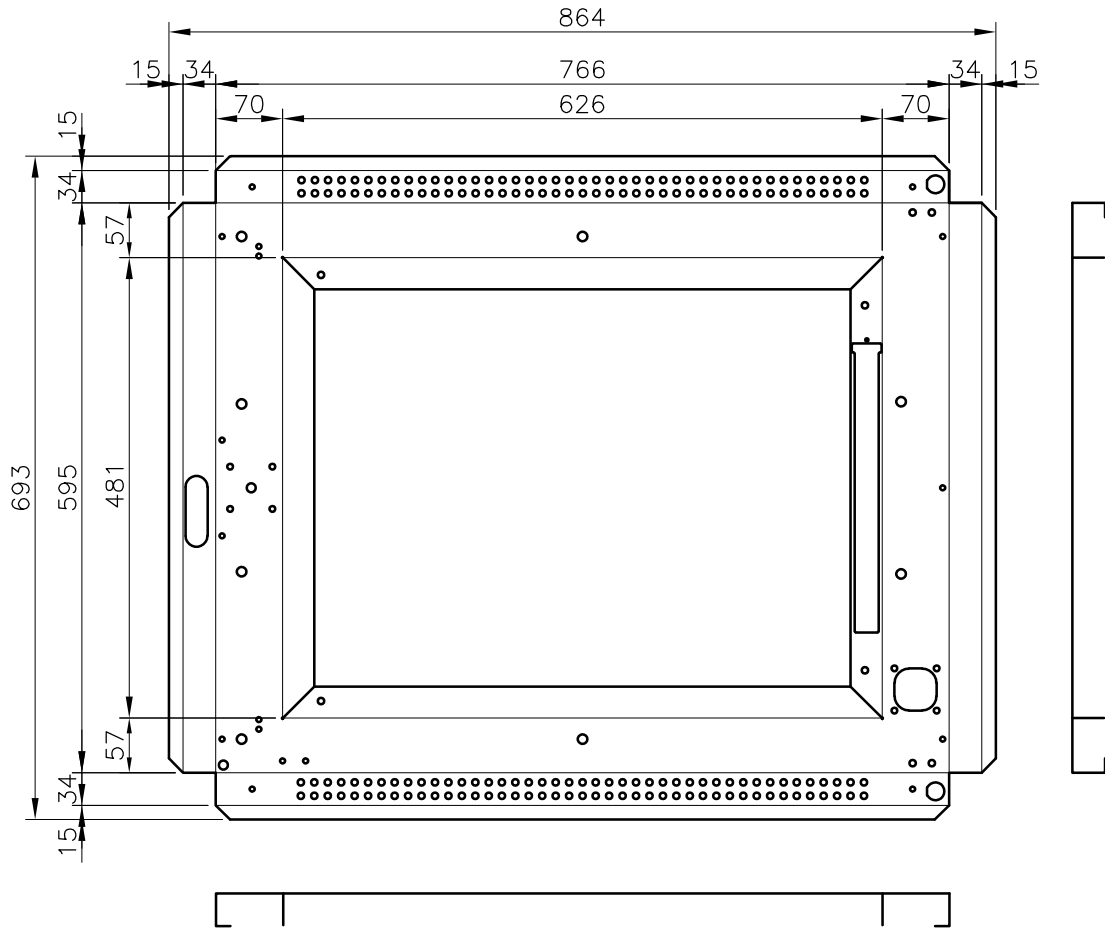
-
- [32] Unox. BAKERTOP MIND.MapsTM PLUS. 2019. Consultado em 06/05/2019. Disponível em: https://www.unox.com/en_pt/lines/bakertop_mindmaps_plus-5.html
- [33] Unox. CHEFTOP MIND MAPS PLUS Catalogue. **LI1389A0**.
- [34] V.A.F. Costa, A.M.G. Lopes. Improved Radial Heat Sink For Led Lamp Cooling. *Applied Thermal Engineering* **70**:131-138, 2014.
- [35] Vossloh Schwabe, Lighting Solutions. VS Lighting Solutions for Household Appliances Catalog. Consultado em 18/04/2019. Disponível em: <https://www.vossloh-schwabe.com/en/home/>
- [36] VS Lighting Solutions. VS Lighting Solutions for Professional Appliances Catalogue. 2017.
- [37] X. Lin, et al. Experimental study and Taguchi analysis on LED cooling by thermoelectric cooler integrated with microchannel heat sink. *Applied Energy* **242**:232-238, 2019.

Apêndice A

Desenhos técnicos do protótipo final *Turboram*

- Apêndice A.1. Corpo da porta *Turboram* 5 tabuleiros.
- Apêndice A.2. Refletor da iluminação direito - Forno *Turboram* 5 tabuleiros.
- Apêndice A.3. Refletor da iluminação esquerdo - Forno *Turboram* 5 tabuleiros.

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. INOX (304) 1mm	DIMENSÕES (mm) 864 x 693	QUANTIDADE 1	PESO (kg) 4.79	OBSERVAÇÕES
-------------------------------------	-----------------------------	-----------------	-------------------	-------------

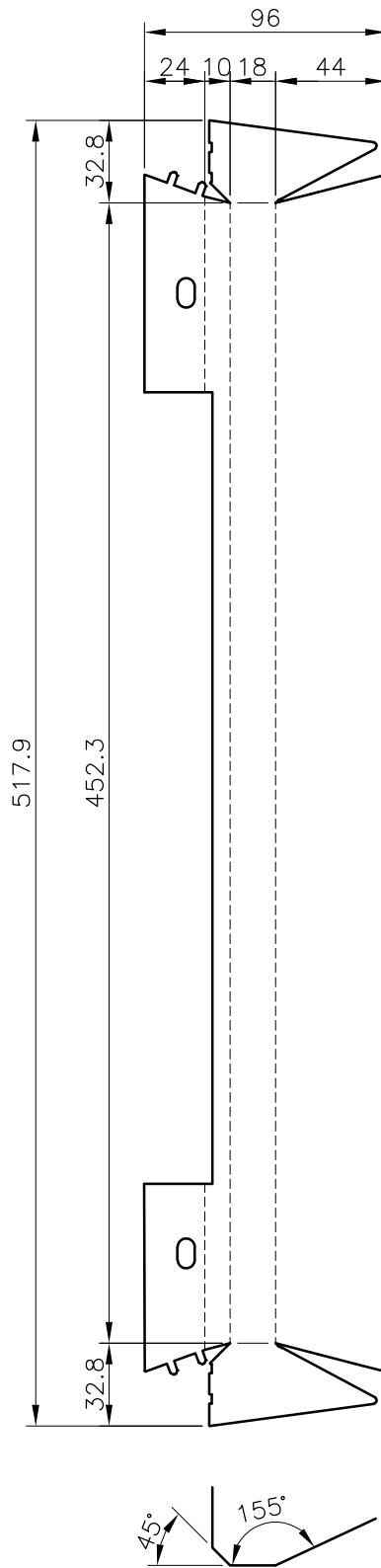
	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	30.06.2006	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	23.07.2019	PAULO BATISTA
APROVOU		

COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO PORTA DO TURBORAM 5 TABULEIROS
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO CORPO DA PORTA TURBORAM 5 TABULEIROS



ESCALA (S) 1:8	PROCESSO TÉCNICO TBS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº E DATA	Nº DESENHO TBS0067-A-05-PROT-00
-------------------	-------------------------	------------	-----------------------	------------------------------------

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. INOX (304) BRILH.1mm	DIMENSÕES (mm) 517.85 x 96	QUANTIDADE 1	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
--	--------------------------------------	------------------------	-----------	-------------

	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	06.07.2006	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	23.07.2019	PAULO BATISTA
APROVOU		

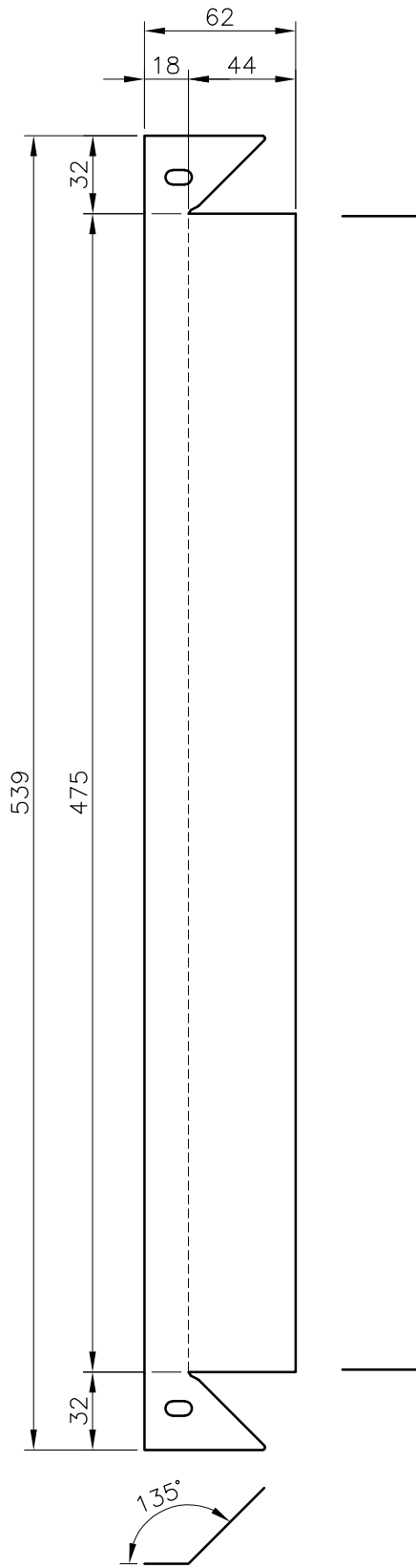
COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO PORTA DO TURBORAM 5 TABULEIROS
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO REFLETOR DA ILUMINAÇÃO DIREITO-5 TABULEIROS



FB1.001.190

ESCALA (S) 1 : 3	PROCESSO TÉCNICO TBS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº e DATA 1 09.08.2019	Nº DESENHO TBS0073-A-01-PROT-01-DIR
----------------------------	--------------------------------	------------	---	---

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. INOX (304) BRILH.1mm	DIMENSÕES (mm) 539 x 62	QUANTIDADE 1	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
---	----------------------------	-----------------	-----------	-------------

	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	06.07.2006	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	23.07.2019	PAULO BATISTA
APROVOU		

COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO PORTA DO TURBORAM 5 TABULEIROS
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO REFLETOR DA ILUMINAÇÃO ESQUERDO - 5 TABULEIROS



FBI.001.190

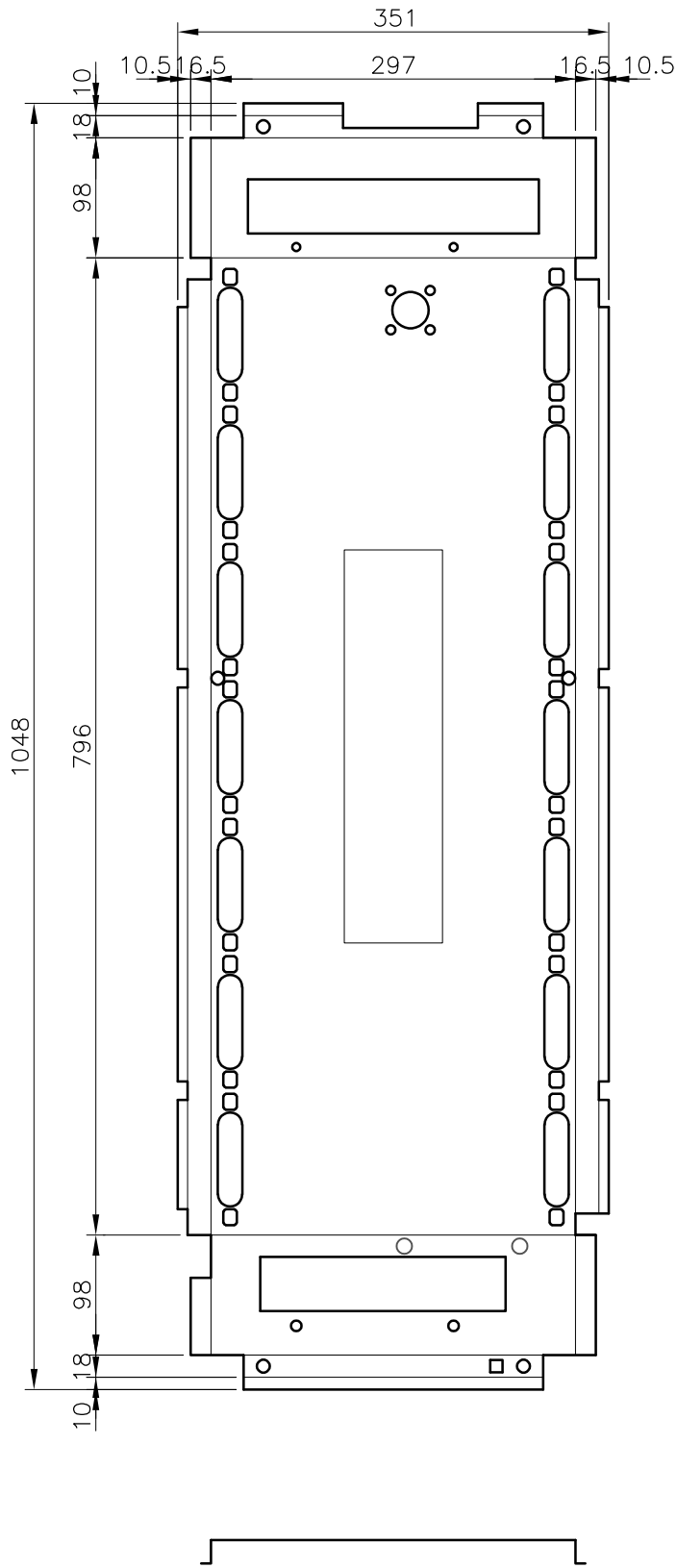
ESCALA (S) 1 : 3	PROCESSO TÉCNICO TBS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº E DATA 1 09.08.2019	Nº DESENHO TBS0073-A-01-PROT-01-ESQ
---------------------	-------------------------	------------	---	--

Apêndice B

Desenhos técnicos do protótipo final *Modulram*

- **Apêndice B.1.** Placa lateral direita da câmara do *Modulram* 2 tabuleiros de caixote normal e resistências tubulares.
- **Apêndice B.2.** Placa intermédia da lateral direita do *Modulram* 2 tabuleiros de caixote normal e resistências tubulares.
- **Apêndice B.3.** Fixador externo do vidro do novo sistema de iluminação.
- **Apêndice B.4.** Fixador interno do vidro do novo sistema de iluminação.
- **Apêndice B.5.** Chapa para a aplicação da luminária LED.
- **Apêndice B.6.** Refletor do novo sistema de iluminação LED.
- **Apêndice B.7.** Refletor lateral do novo sistema de iluminação LED.
- **Apêndice B.8.** Placa lateral direita exterior, com rasgos retangulares, usada nos ensaios experimentais.

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. ZINCADA 1,5mm	DIMENSÕES (mm) 1048 x 351	QUANTIDADE 1	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
------------------------------------	------------------------------	-----------------	-----------	-------------

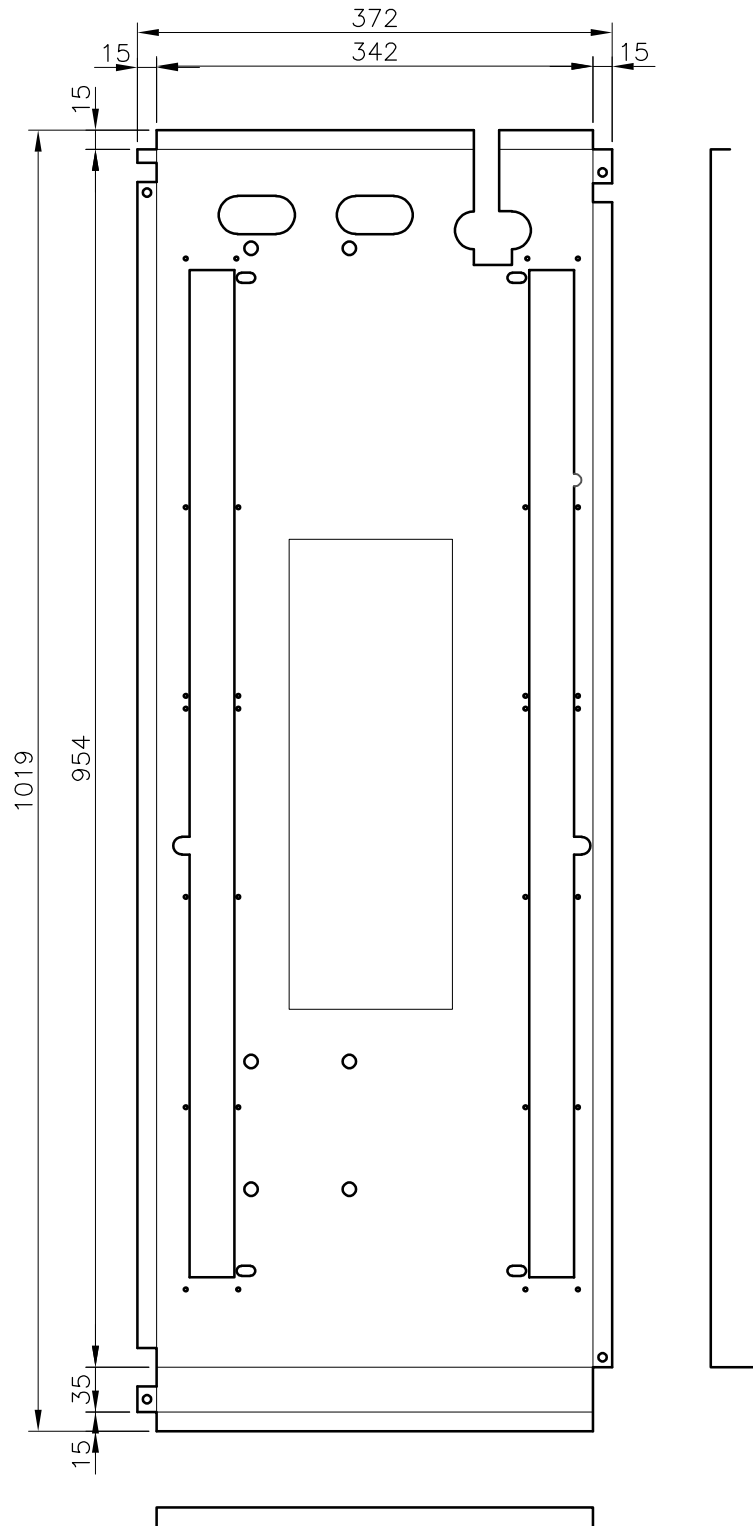
	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	25.06.2019	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	25.06.2019	DANIELA ABRANTES
APROVOU	25.06.2019	

COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO CAIXOTE NORMAL 2 TAB
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO LAT. DIR. CAIXOTE NORMAL 2 TAB RESISTÊNCIAS TUBULARES



ESCALA (S) 1 : 6	PROCESSO TÉCNICO TCS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº E DATA	Nº DESENHO P-TTS0006-A-05-PROT-00
---------------------	-------------------------	------------	-----------------------	--------------------------------------

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. ZINCADA 1,2MM	DIMENSÕES (mm) 1019 x 372	QUANTIDADE	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
------------------------------------	------------------------------	------------	-----------	-------------

	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	25.06.2019	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	25.06.2019	DANIELA ABRANTES
APROVOU	25.06.2019	

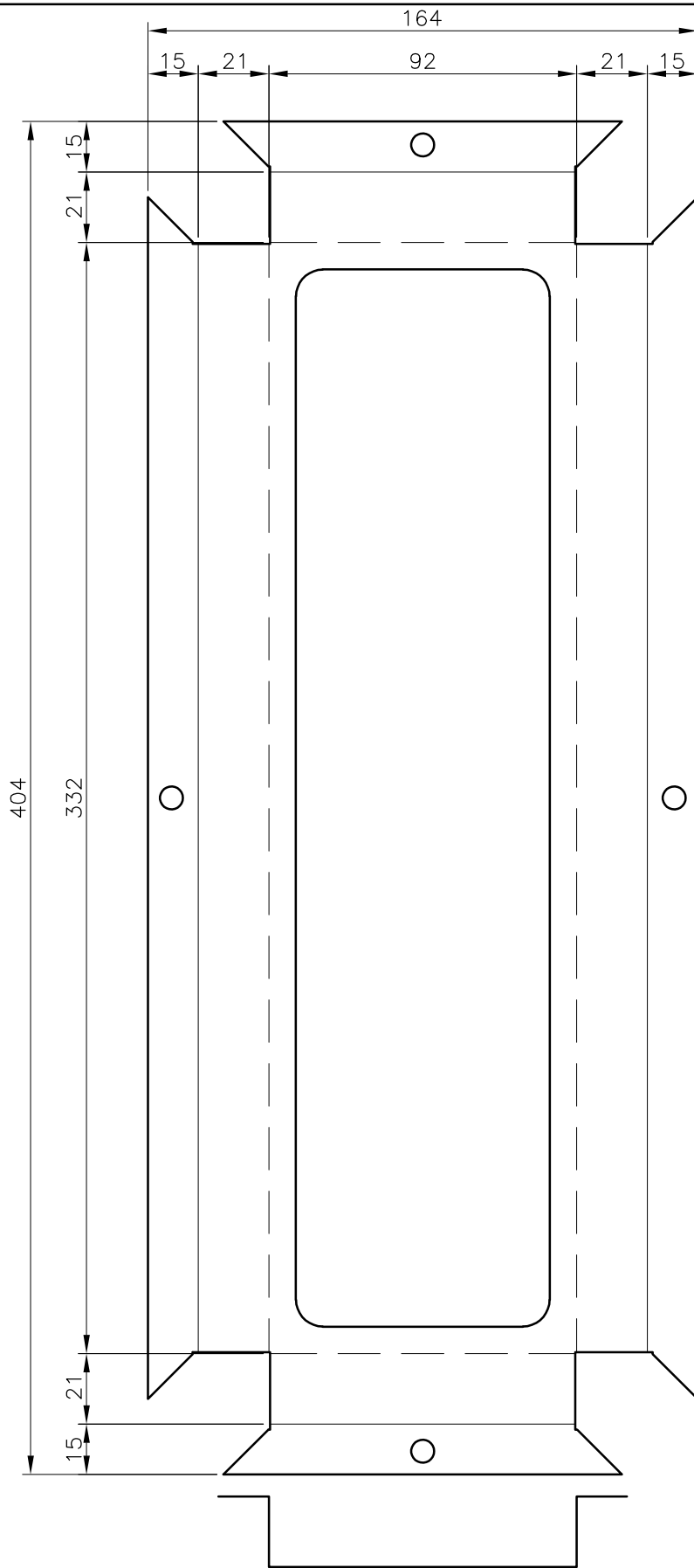
COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO PAINEL FIXAÇÃO RESISTENCIAS NORMAL
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO PAINEL FIX. RESISTENCIAS NORMAL NOVO MODELO TUB.



ESCALA (S) 1 : 6	PROCESSO TÉCNICO TCS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº e DATA	Nº DESENHO P-TTS0022-A-06-PROT-00
---------------------	-------------------------	------------	--------------------	--------------------------------------

FBI.001.190

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. INOX BRILH. 1MM	DIMENSÕES (mm) 164 x 404	QUANTIDADE	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
--------------------------------------	-----------------------------	------------	-----------	-------------

	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	13.08.2019	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	13.08.2019	PAULO BATISTA
APROVOU		

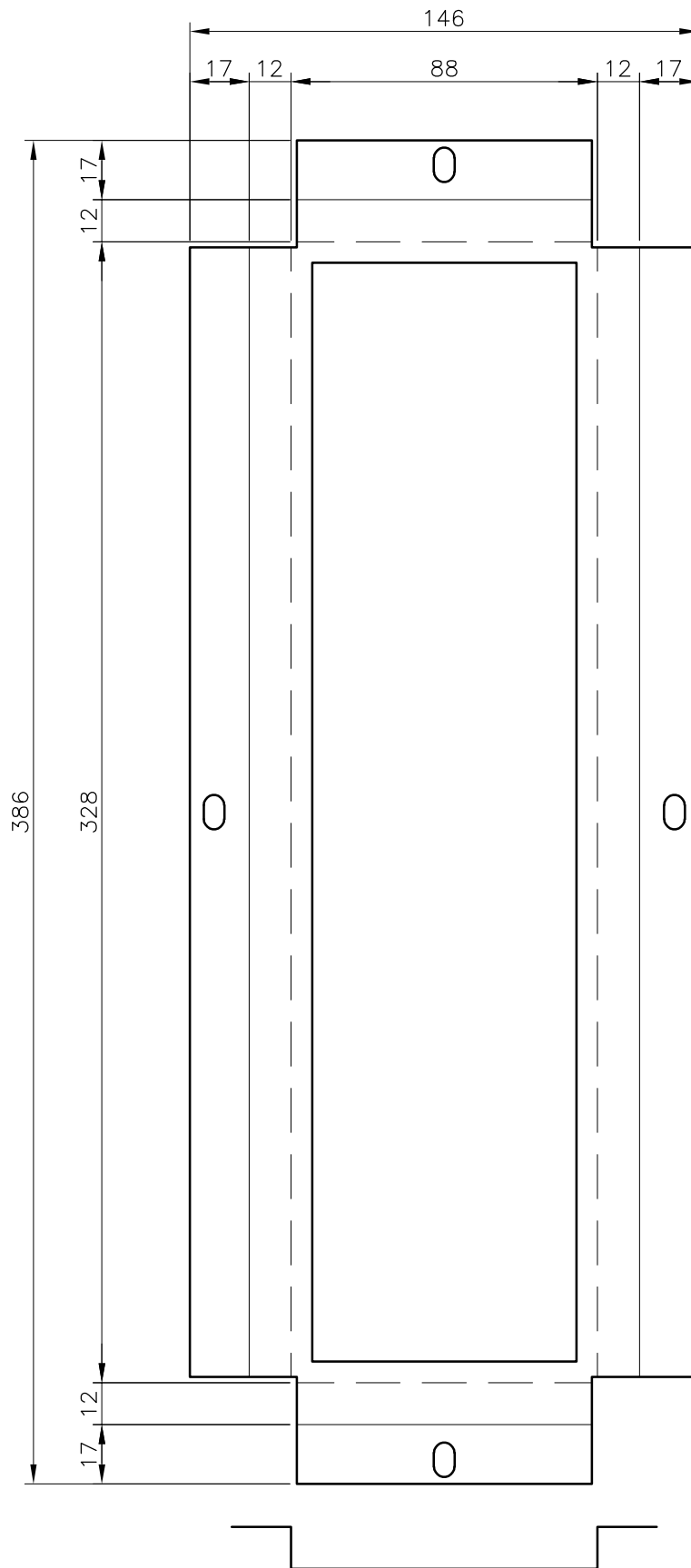
COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO FIXADOR EXTERNO ILUMINAÇÃO
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO FIXADOR EXTERNO ILUMINAÇÃO



ESCALA (S) 1 : 2	PROCESSO TÉCNICO TCS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº E DATA	Nº DESENHO P-TCS0380-A-00
---------------------	-------------------------	------------	--------------------	------------------------------

FBI.001.190

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. INOX BRILH. 1MM	DIMENSÕES (mm) 146 x 386	QUANTIDADE	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
--------------------------------------	-----------------------------	------------	-----------	-------------

	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	13.08.2019	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	13.08.2019	PAULO BATISTA
APROVOU		

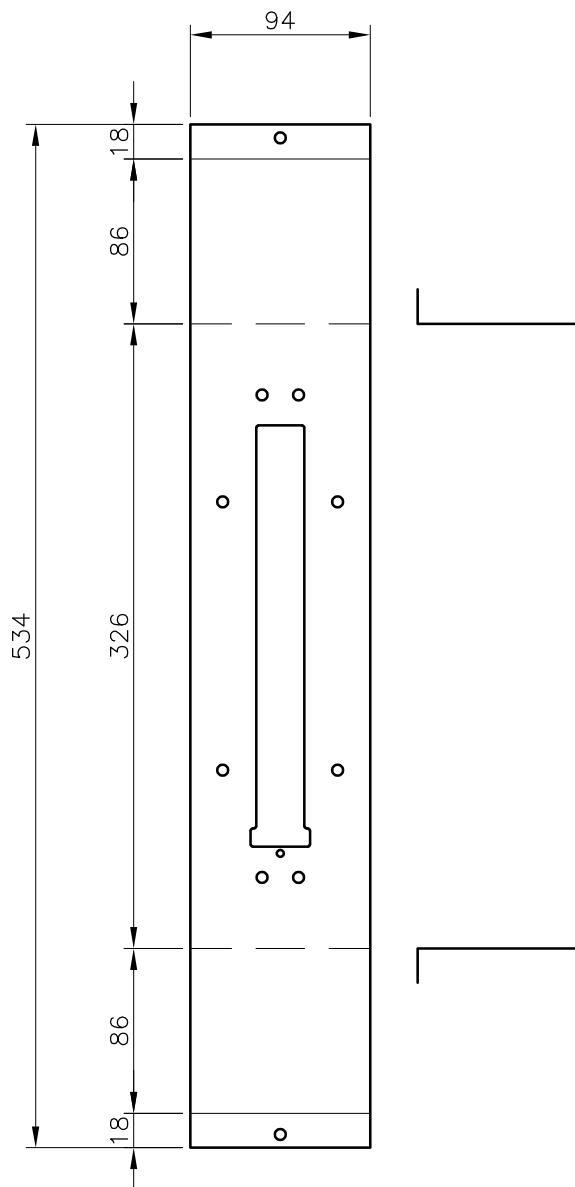
COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO FIXADOR INTERNO ILUMINAÇÃO
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO FIXADOR INTERNO ILUMINAÇÃO



FBI.001.190

ESCALA (S) 1 : 2	PROCESSO TÉCNICO TCS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº E DATA	Nº DESENHO P-TCS0381-A-00
---------------------	-------------------------	------------	-----------------------	------------------------------

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. INOX BRILH. 1MM	DIMENSÕES (mm) 94 x 534	QUANTIDADE	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
---	-----------------------------------	------------	-----------	-------------

	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	13.08.2019	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	13.08.2019	PAULO BATISTA
APROVOU		

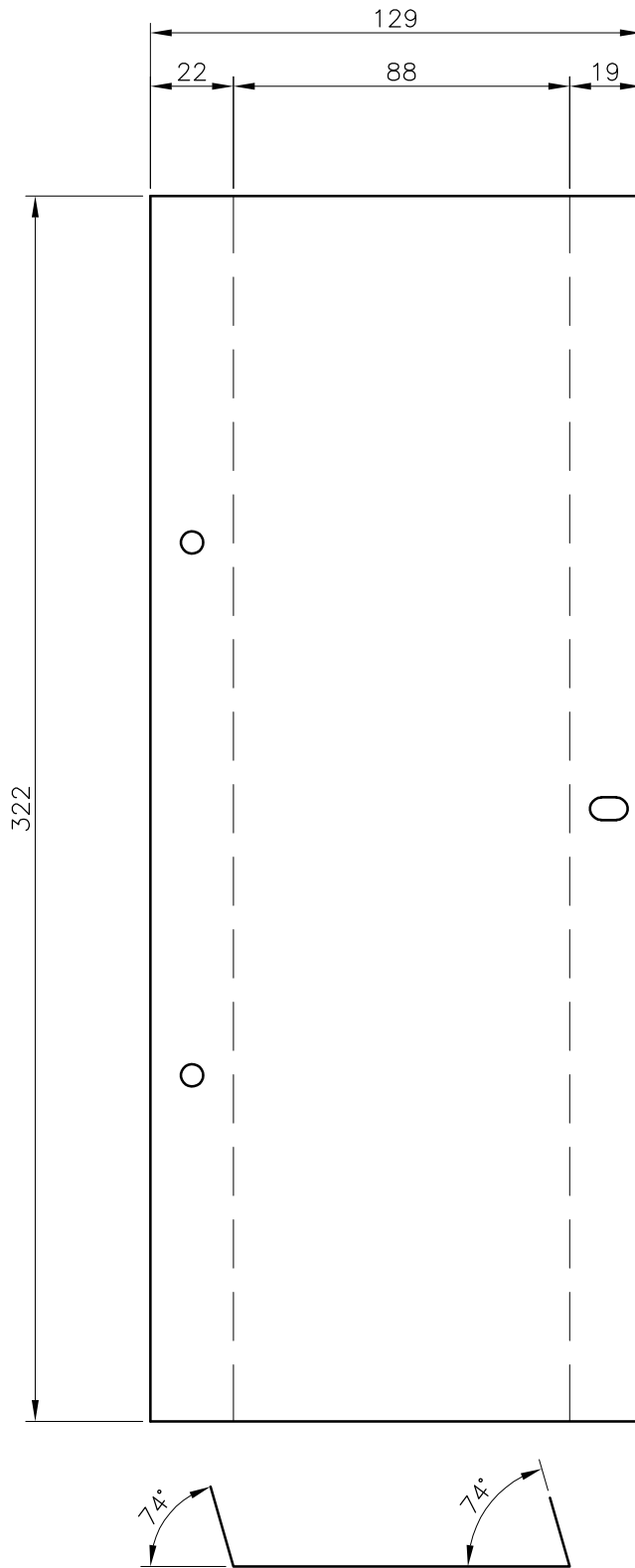
COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO CHAPA LED
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO CHAPA LED



FB1.001.190

ESCALA (S) 1 : 4	PROCESSO TÉCNICO TCS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº E DATA	Nº DESENHO P-TCS0382-A-00
----------------------------	--------------------------------	------------	--------------------	-------------------------------------

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. INOX BRILH. 1MM	DIMENSÕES (mm) 129 x 322	QUANTIDADE	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
--------------------------------------	-----------------------------	------------	-----------	-------------

	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	13.08.2019	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	13.08.2019	PAULO BATISTA
APROVOU		

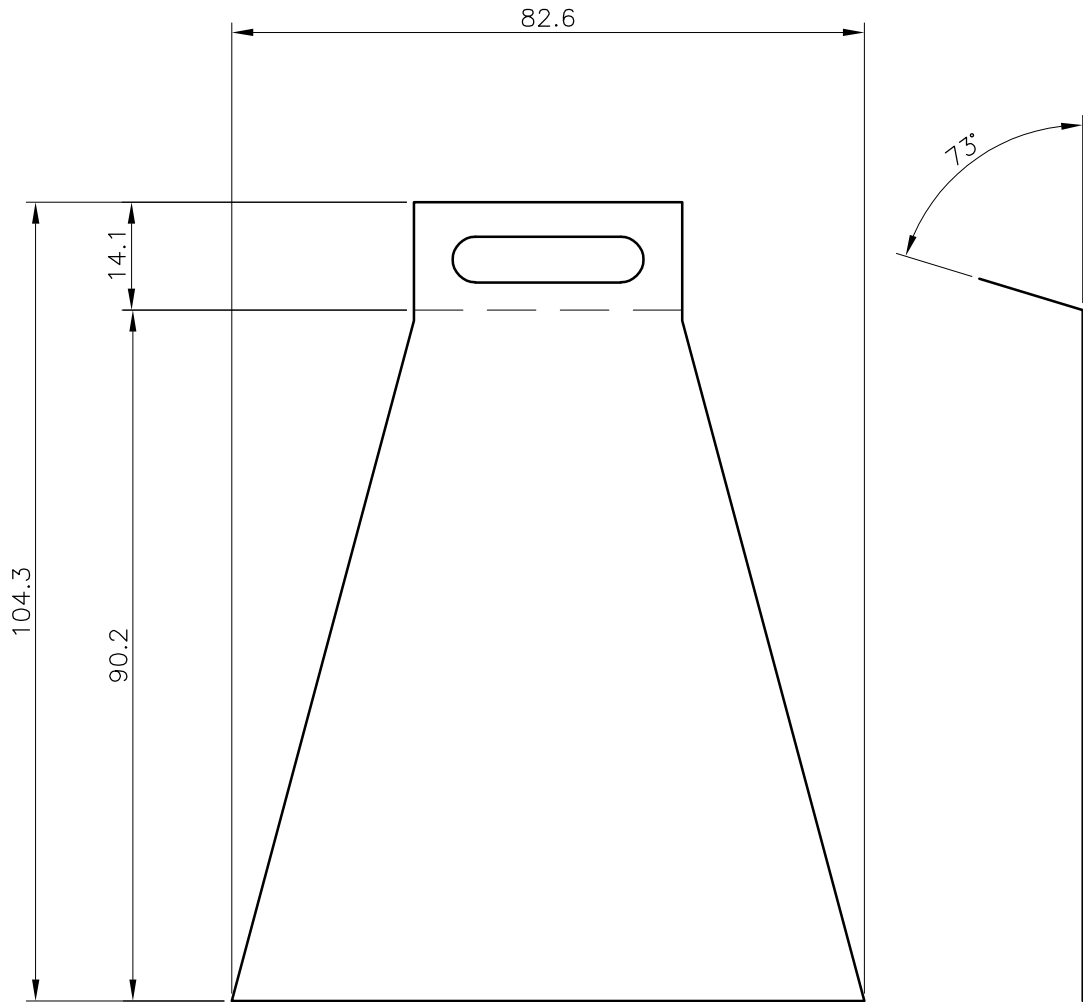
COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO REFLETOR LED
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO REFLETOR LED



ESCALA (S) 1 : 2	PROCESSO TÉCNICO TCS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº E DATA	Nº DESENHO P-TCS0383-A-00
---------------------	-------------------------	------------	--------------------	------------------------------

FBI.001.190

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. INOX BRILH. 1MM	DIMENSÕES (mm) 82.6 x 104.3	QUANTIDADE	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
--------------------------------------	--------------------------------	------------	-----------	-------------

	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	13.08.2019	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	13.08.2019	PAULO BATISTA
APROVOU		

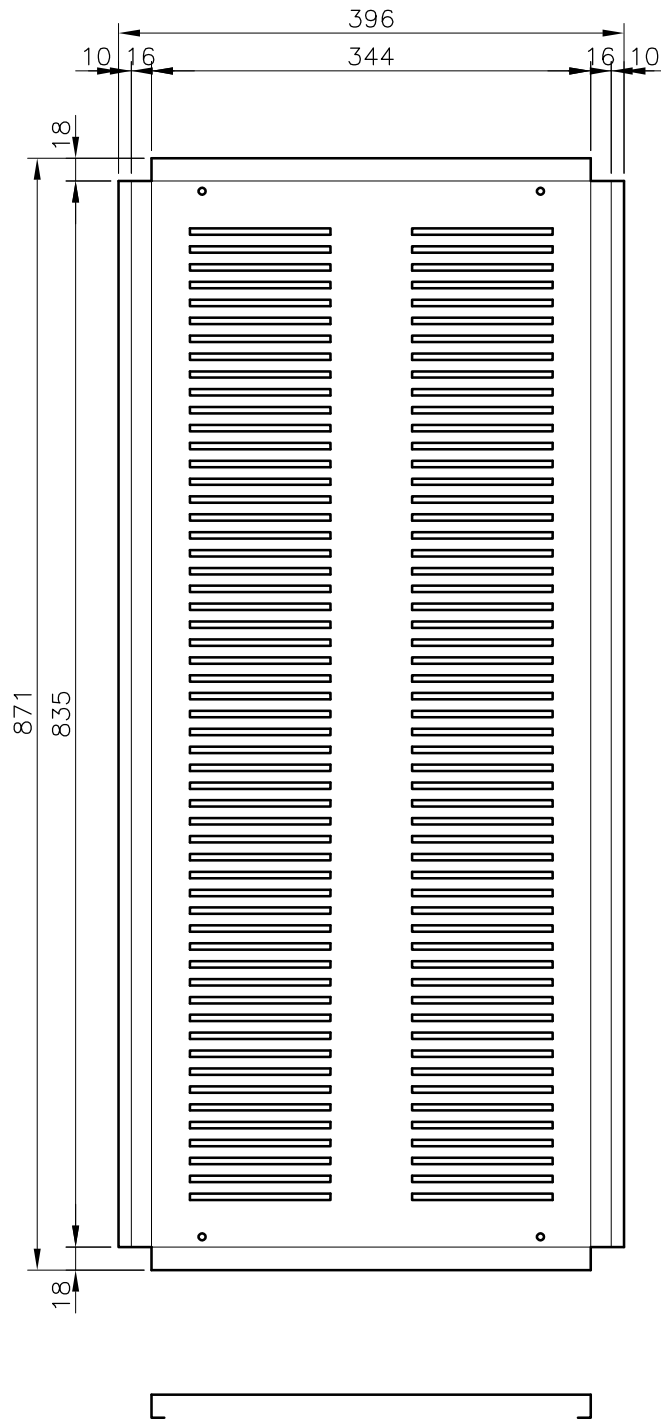
COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO REFLETOR LATERAL LED
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO REFLETOR LATERAL LED



ESCALA (S) 1 : 2	PROCESSO TÉCNICO TCS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº E DATA	Nº DESENHO P-TCS0384-A-00
---------------------	-------------------------	------------	-----------------------	------------------------------

FBI001190

Este desenho é propriedade da RAMALHOS, S.A. - É proibido copiar, razar ou deixar em poder de terceiros sem a permissão do gabinete técnico desta empresa.



MATÉRIA PRIMA CH. INOX (430) 1,2MM	DIMENSÕES (mm) 871 x 396	QUANTIDADE	PESO (kg)	OBSERVAÇÕES
---------------------------------------	-----------------------------	------------	-----------	-------------

	DATA	NOME/RÚBRICA
PROJETOU	02.09.2008	JOSÉ ANTÓNIO
DESENHOU	13.08.2019	PAULO BATISTA
APROVOU		

COMPONENTE/CLIENTE DESTE DESENHO CHAPAS RODEAR NORMAIS
DESIGNAÇÃO / DESCRIÇÃO CHAPAS RODEAR LATERAL DIREITA



ESCALA (S) 1 : 6	PROCESSO TÉCNICO TCS	REFERÊNCIA	REVISÕES Nº E DATA	Nº DESENHO TCS0041-A-00-PROT-00
---------------------	-------------------------	------------	-----------------------	------------------------------------

FBI.001.190