

A meus pais.

Vazia e calma e livre de si
É a natureza das coisas.
Nenhum ser individual
Na realidade existe.

Não há princípio,
Nem meio.
Tudo é ilusão,
Como numa visão ou num sonho.

Todos os seres do mundo
Estão para além do mundo das palavras.
A sua natureza última, pura e verdadeira,
É como a infinidade do espaço.

Buda, Prajnaparamita

Agradecimentos

A realização desta tese não seria possível sem o valioso contributo e suporte proporcionado por diversas pessoas e instituições. Aqui refiro aqueles cujo contributo foi mais importante para o desenvolvimento deste trabalho, expressando abaixo o meu agradecimento.

Ao Professor Doutor João Pedro Mendonça da Silva, meu orientador, pelo apoio na orientação da pesquisa, na procura de soluções, na estruturação do documento e pela constante discussão e interesse. Pela nossa convivência enquanto professor e aluno durante os últimos anos, expresso também agradecimento pessoal pelo seu interesse aos que se interessam, pela dedicação aos que se dedicam, tão importante para mim, pela forma como me ajudou a fazer e a ser melhor.

Ao Professor Doutor Ferrie Wander Joseph van Hattum, meu co-orientador, pela forma entusiástica com que sente as coisas e que faz encorajar, pela disponibilidade na partilha de saber, pela motivação, pelo interesse, pela procura de novos desafios, pelo sentido crítico e pragmático, que me estimulou fazendo-me procurar ser melhor, lançando-me bases para que fosse em busca de novas soluções.

Ao Professor Doutor Pedro Alexandre Moreira Lobarinhas, pelo crucial apoio que me deu no desenvolvimento da modelação computacional, que não tendo qualquer obrigação institucional no desenvolvimento deste trabalho, sempre mostrou total disponibilidade e amabilidade para discutir e apontar soluções para os problemas que foram surgindo.

Aos Engenheiros Luís Oliveira e Nuno Vieira pela amizade e bom ambiente proporcionado ao longo da realização deste trabalho, pela completa disponibilidade para discussão de problemas e interesse na procura de soluções.

Ao PIEP, instituição na qual foi desenvolvido o trabalho, oferecendo-me condições privilegiadas, junto de pessoas com elevadas competências e dispostas a partilhar o seu conhecimento.

Ao Ricardo Sá pela amizade, que a realização deste trabalho permitiu que acontecesse. Por todos os momentos vividos, pelo bom ambiente sempre proporcionado e pelo interesse que sempre demonstrou, tão natural como a sua amizade, para que os amigos fizessem melhor.

Ao Edgar Lobo, alguém que me ensinou muito do que é a amizade e foi também companheiro de viagem acadêmica, um agradecimento especial, não só pela amizade, mas sobretudo por todos os anos partilhados em conjunto, que começaram fora da Faculdade, que contribuíram decisivamente para o êxito no percurso académico e valorização pessoal.

Por último, mas não menos importante,

Aos meus pais, por ao longo da minha vida em todos os momentos sempre me apoiarem incondicionalmente, fazendo sempre tudo ao seu alcance, mas sobretudo ensinando-me a ser empenhado no trabalho.

À Maria, um agradecimento muito especial, pela paciência, pelo apoio total e sobretudo pelo amor incondicional que, durante estes anos, sempre me transmitiu, ensinando-me a apreciar cada momento vivido.

Aos meus irmãos, Pedro e Filipa, por sempre me apoiarem, por *terem sempre estado lá* quando precisei.

Resumo

A aplicação de materiais compósitos tem vindo a crescer rapidamente em diversas indústrias, com especial impacto na indústria aeronáutica, onde elevados rácios resistência/peso mecânica são essenciais. A procura por processos mais eficientes conduziu à implementação de técnicas automatizadas, tais como enrolamento filamentar e deposição automatizada de fibra, perfeitamente estabelecidas no processamento de estruturas em compósito de matriz termoendurecível.

Contudo, a maior resistência ao impacto e ao dano dos compósitos de matriz termoplástica relativamente aos termoendurecíveis tem motivado a sua utilização em produtos com apertados requisitos de tolerância ao dano. No entanto, processos de produção pouco eficientes para compósitos de matriz termoplástica limitam a sua aplicação, sendo o ciclo de aquecimento um dos pontos críticos no processamento de compósitos termoplásticos.

No presente trabalho pretende-se desenvolver um sistema de aquecimento por radiação infravermelha passível de ser adaptado a um equipamento de cariz industrial. Para tal, elaborou-se um modelo capaz de prever a evolução da temperatura da fita pré-impregnada ao longo do processo de aquecimento. O modelo computacional desenvolvido é unidimensional e transiente, considerando como principais parâmetros a velocidade da fita e a distância entre as lâmpadas de infravermelho e a superfície da fita. A equação da energia foi discretizada pela técnica dos volumes finitos e implementada em linguagem de programação Fortran.

Para futura validação do modelo computacional foi projectada uma bancada experimental dotada de um sistema de aquecimento por infravermelhos e de um mandril de enrolamento. Os resultados do modelo computacional mostram que o sistema de aquecimento por radiação infravermelha concebido é susceptível de implementação no processamento de compósitos de matriz termoplástica.

Abstract

The application of composite materials has been growing quickly in several industries, with special impact in aeronautic industry, where high strength/weight ratios are essentials. The need to implement more efficient processes leads to the implementation of automated techniques, such as filament winding and automated tape disposal. The application of these techniques in the production of composites structures with thermoplastic matrix is perfectly established.

Nevertheless, the better damage and impact resistance of thermoplastics with respect to thermosetting has motivated their application in products with high damage-tolerance requirements. However the lack of efficient production processes for thermoplastic matrix composites has conditioned their application, being the heating cycle a critical factor in the thermoplastic composites processing.

The present work aims to develop a heating system by infrared radiation that can be adapted to an industrial equipment of composite structures production. To that goal, had been elaborated an computational model capable of predicting the temperature evolution on the prepreg tape over the heating stage. The computational model developed is one-dimensional and transient, considering as main parameters the tape speed and the distance between the infrared lamps and the prepreg tape surface. The equation of energy was discretized by the finite-volume technique and implemented in Fortran programming language.

To future validation of the computational model was projected an experimental set-up that is equipped with heating system by infrared lamps and a winding. The results of the computational model shows that the infrared heating system designed could be implemented in thermoplastic composite matrix processing.

Índice

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
ÍNDICE	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.2 OBJECTIVOS	4
2 MATERIAIS COMPÓSITOS E TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO DE FIBRA	5
2.1 COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA	6
2.2 PRÉ-IMPREGNADOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA	11
2.2.1 <i>Fibras de Reforço</i>	12
2.2.2 <i>Matrizes Termoplásticas</i>	14
2.3 TÉCNICAS DE COLOCAÇÃO DE FIBRAS.....	15
2.3.1 <i>Enrolamento Filamentar</i>	16
2.3.2 <i>Automated Tape Laying (ATL) e Automated Fiber Placement (AFP)</i>	17
2.3.3 <i>Enrolamento e Deposição de Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica</i>	20
2.3.4 <i>Custos do Enrolamento Filamentar de Termoendurecíveis / Termoplásticos</i>	22
2.4 SISTEMAS DE AQUECIMENTO IMPLEMENTADOS	23
2.5 CONSOLIDAÇÃO LOCAL DE PRÉ-IMPREGNADOS	27
3 SISTEMA DE AQUECIMENTO E FORMULAÇÃO NUMÉRICA	29
3.1 NATUREZA DOS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIAS DE CALOR ENVOLVIDOS	30

3.1.1	<i>Transferência de Calor por Radiação</i>	30
3.1.2	<i>Transferência de Calor por Convecção</i>	38
3.1.3	<i>Transferência de Calor por Condução</i>	40
3.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO	40
3.2.1	<i>Lâmpadas de Halogéneo</i>	41
3.3	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E TERMO-ÓPTICAS DA FITA PRÉ-IMPREGNADA	45
3.3.1	<i>Condutividade Térmica</i>	46
3.3.2	<i>Calor Específico</i>	48
3.3.3	<i>Propriedades Ópticas</i>	49
3.4	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO	51
4	MODELO COMPUTACIONAL	55
4.1	MODELAÇÃO DE FENÓMENOS TÉRMICOS EM APLICAÇÕES DE ENROLAMENTO FILAMENTAR E DE DEPOSIÇÃO DE FIBRA.....	56
4.2	MODELO MATEMÁTICO.....	59
4.2.1	<i>Equação da Energia</i>	60
4.2.2	<i>Condições de Fronteira</i>	60
4.3	MÉTODO DE DISCRETIZAÇÃO	63
4.3.1	<i>Método dos Volumes Finitos</i>	64
4.3.2	<i>Discretização do Termo Difusivo a 1D</i>	66
4.3.3	<i>Coefficiente Difusivo nas Faces dos Volumes de Controlo</i>	67
4.3.4	<i>Condução em Estado Transiente 1D</i>	69
4.3.5	<i>Condições de Fronteira</i>	73
4.4	SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES ALGÉBRICAS.....	78
4.4.1	<i>Método para Resolução de Sistemas Lineares Tridiagonais</i>	79
4.5	ALGORITMO DE SOLUÇÃO	81
5	RESULTADOS DO MODELO COMPUTACIONAL E PROJECTO DE INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	83
5.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	86
5.1.1	<i>Configuração de Uma Lâmpada em Cada Face da Fita</i>	86
5.1.2	<i>Configuração de Duas Lâmpadas em Cada Face da Fita - Distâncias Curtas</i>	89

5.1.3	<i>Configuração de Duas Lâmpadas em Cada Face da Fita – Distâncias Longas.....</i>	91
5.2	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	93
5.2.1	<i>Estudo da Variação do Fluxo de Radiação na Largura da Fita uma Lâmpada – Distâncias Curtas.....</i>	94
5.2.2	<i>Estudo da Variação do Fluxo de Radiação na Largura da Fita com Duas Lâmpadas – Distâncias Curtas.....</i>	97
5.2.3	<i>Estudo da Variação do Fluxo de Radiação na Largura da Fita com Duas Lâmpadas – Distâncias Longas.....</i>	100
5.2.4	<i>Influência da Distância no Fluxo de Radiação Incidente.....</i>	103
5.3	PROJECTO DE UMA BANCADA DE AQUECIMENTO EXPERIMENTAL.....	105
6	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	111
6.1	CONCLUSÕES.....	112
6.2	TRABALHO FUTURO.....	114
	BIBLIOGRAFIA.....	115
	ANEXO A - CÓDIGO IMPLEMENTADO.....	121
	ANEXO B – MANUAL DO PROGRAMA DESENVOLVIDO.....	129
	APÊNDICE A - CARACTERÍSTICAS DA LÂMPADA.....	137

Índice de Figuras

FIGURA 1.1 - PRODUÇÃO DE PAINÉIS DA FUSELAGEM DO AIRBUS A350 XWB [6]	2
FIGURA 2.1 – RELAÇÃO ENTRE DA TAXA DE PRODUÇÃO, DESEMPENHO E CUSTO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS UTILIZADOS EM DIFERENTES INDÚSTRIAS [24]	7
FIGURA 2.2 - CICLO DE PROCESSAMENTO TÍPICO DE: (A) TERMOENDURECÍVEIS E (B) TERMOPLÁSTICOS ([24])	8
FIGURA 2.3 - PROPRIEDADES DE ALGUNS TERMOPLÁSTICOS E TERMOENDURECÍVEIS (ADAPTADO DE [21])	9
FIGURA 2.4 - PORCENTAGEM DO VOLUME DE UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE FIBRA NA INDÚSTRIA DOS COMPÓSITOS EM 2006 (ADAPTADO DE [46])	12
FIGURA 2.5 - PROCESSO DE ENROLAMENTO FILAMENTAR	16
FIGURA 2.6 - SISTEMA ATL, APLICAÇÃO DE FIBRA SOBRE UM MOLDE PLANO [61]	18
FIGURA 2.7 – SISTEMA AFP, COM APLICAÇÃO DE FIBRA COM VARIAÇÕES LOCALIZADAS DE ORIENTAÇÃO [61]	19
FIGURA 2.8 - ESQUEMA DE UMA CABEÇA DE DEPOSIÇÃO COMUM AOS SISTEMAS ATL E AFP (ADAPTADO DE [61])	20
FIGURA 3.1 - NATUREZA DOS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	30
FIGURA 3.2 - TROCA DE RADIAÇÃO ENTRE UM SÓLIDO E A SUA VIZINHANÇA (ADAPTADO DE [82])	31
FIGURA 3.3 - ESPECTRO DE RADIAÇÃO ELECTROMAGNÉTICA.....	31
FIGURA 3.4 – RADIAÇÃO ESPECTRAL DE UM CORPO NEGRO – LEI DE PLANCK [83]	34
FIGURA 3.5 – POSIÇÕES RELATIVAS DA SUPERFÍCIE EMISSORA DE RADIAÇÃO (A_1) E A SUPERFÍCIE RECEPTORA (A_2).....	35
FIGURA 3.6 - EXEMPLO DE UMA SUPERFÍCIE COMPOSTA POR VÁRIAS ÁREAS (ADAPTADO DE [82]).....	36
FIGURA 3.7 - VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NA DETERMINAÇÃO DO FACTOR DE FORMA [84]	37
FIGURA 3.8 - EVOLUÇÃO DO GRADIENTE TÉRMICO NUM CORPO AO LONGO DO TEMPO	40
FIGURA 3.9 - EMISSIVIDADE ESPECTRAL DO TUNGSTÊNIO (ADAPTADO DE [88])	44
FIGURA 3.10 - EMISSIVIDADE, ABSORTIVIDADE E TRANSMITÂNCIA DO QUARTZO [90].....	45
FIGURA 3.11 - DIMENSÕES DE LARGURA E ESPESSURA DA FITA	46
FIGURA 3.12 - VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO PP EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	47
FIGURA 3.13 - VARIAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO DO PP EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA ([75])	48
FIGURA 3.14 - VARIAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO DA FIBRA DE VIDRO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [95]	49
FIGURA 3.15 - ABSORÇÃO, REFLEXÃO E TRANSMISSÃO EM MEIO SEMITRANSARENTE.....	49
FIGURA 3.16 – ESQUEMA DE DIFERENTES TIPOS DE REFLEXÃO DA RADIAÇÃO INCIDENTE [ADAPTADO DE [82]].....	50
FIGURA 3.17 - CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DA FITA EM ESTUDO PP/FV	51
FIGURA 3.18- RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA FORNECIDA E VELOCIDADE DA FITA	53
FIGURA 3.19 - ESQUEMA DO SISTEMA DE AQUECIMENTO COM 2 LÂMPADAS	53
FIGURA 3.20 - ESQUEMA DO SISTEMA DE AQUECIMENTO COM 4 LÂMPADAS	54
FIGURA 4.1 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE RADIAÇÃO INCIDENTE NA FITA AO LONGO DO COMPRIMENTO DA LÂMPADA	61

FIGURA 4.2 – EXEMPLO DOS DIVERSOS ELEMENTOS DE ÁREA AO LONGO DA LARGURA DA FITA E POSIÇÃO RELATIVA DAS LÂMPADAS NAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES	62
FIGURA 4.3 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE	63
FIGURA 4.4 - ESQUEMA DA MALHA UNIDIMENSIONAL (ADAPTADO DE PATANKAR [106])	66
FIGURA 4.5 – REPRESENTAÇÃO DE UM VOLUME DE CONTROLO 1D (ADAPTADO DE [85])	70
FIGURA 4.6 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO PARA OS TRÊS ESQUEMAS	72
FIGURA 4.7 - ESQUEMA DE UMA MALHA 1D NA REGIÃO DA FRONTEIRA OESTE, W (ADAPTADO DE	74
FIGURA 5.1 - DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NA SUPERFÍCIE DA FITA E NO MEIO DA FITA, PARA UM CASO COM 2 LÂMPADAS A 1 CM DA SUPERFÍCIE DA FITA E VELOCIDADE DE 8 M/MIN	86
FIGURA 5.2 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA FITA PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS COM 1 LÂMPADA EM CADA FACE E VELOCIDADE DE 3 M/MIN.....	87
FIGURA 5.3 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA FITA PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS COM 1 LÂMPADA EM CADA FACE E VELOCIDADE DE 4 M/MIN.....	88
FIGURA 5.4 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA FITA PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS COM 2 LÂMPADAS EM CADA FACE E VELOCIDADE DE 8 M/MIN.....	89
FIGURA 5.5 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA FITA PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS COM 2 LÂMPADAS EM CADA FACE E VELOCIDADE DE 9 M/MIN A DISTÂNCIAS CURTAS	90
FIGURA 5.6 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA FITA PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS COM 2 LÂMPADAS EM CADA FACE E VELOCIDADE DE 3 M/MIN A DISTÂNCIAS LONGAS	91
FIGURA 5.7 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA FITA PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS COM 2 LÂMPADAS EM CADA FACE E VELOCIDADE DE 4 M/MIN A DISTÂNCIAS LONGAS	92
FIGURA 5.8 - PERFIL DA POTÊNCIA INCIDENTE AO LONGO DA LARGURA DA FITA E DA POTÊNCIA MÉDIA, EMITIDA POR 1 LÂMPADA – – DISTÂNCIAS CURTAS	94
FIGURA 5.9 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE RADIAÇÃO INCIDENTE NA PROJECCÃO DE UMA LÂMPADA SOBRE A SUPERFÍCIE DA FITA À DISTÂNCIA DE 0,75 CM – CALCULADA ANALITICAMENTE	95
FIGURA 5.10 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE RADIAÇÃO INCIDENTE NA PROJECCÃO DE UMA LÂMPADA SOBRE A SUPERFÍCIE DA FITA À DISTÂNCIA DE 0,75 CM – USADA NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	96
FIGURA 5.11 - PERFIL DA POTÊNCIA INCIDENTE AO LONGO DA LARGURA DA FITA E DA POTÊNCIA MÉDIA, EMITIDA POR 2 LÂMPADAS – DISTÂNCIAS CURTAS	97
FIGURA 5.12 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE RADIAÇÃO INCIDENTE NA PROJECCÃO DE DUAS LÂMPADAS SOBRE A SUPERFÍCIE DA FITA À DISTÂNCIA DE 0,75 CM – CALCULADA ANALITICAMENTE	98
FIGURA 5.13 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE RADIAÇÃO INCIDENTE NA PROJECCÃO DE DUAS LÂMPADAS SOBRE A SUPERFÍCIE DA FITA À DISTÂNCIA DE 0,75 CM – USADA NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	99
FIGURA 5.14 - PERFIL DA POTÊNCIA INCIDENTE AO LONGO DA LARGURA DA FITA E DA POTÊNCIA MÉDIA, EMITIDA POR 2 LÂMPADAS – DISTÂNCIAS LONGAS	100
FIGURA 5.15 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE RADIAÇÃO INCIDENTE NA PROJECCÃO DE DUAS LÂMPADAS SOBRE A SUPERFÍCIE DA FITA À DISTÂNCIA DE 2 CM – CALCULADA ANALITICAMENTE	101

FIGURA 5.16 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE RADIAÇÃO INCIDENTE NA PROJEÇÃO DE DUAS LÂMPADAS SOBRE A SUPERFÍCIE DA FITA À DISTÂNCIA DE 2 CM – USADA NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	102
FIGURA 5.17 - VARIAÇÃO DA POTÊNCIA MÉDIA INCIDENTE NA FITA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE AS LÂMPADAS E A FITA	103
FIGURA 5.18 - SISTEMA DE SUPORTE DAS LÂMPADAS	106
FIGURA 5.19 - ESTRUTURA DE SUPORTE	107
FIGURA 5.20 - DISTÂNCIA MÁXIMA ENTRE LÂMPADAS	107
FIGURA 5.21 - BANCADA EXPERIMENTAL	108
FIGURA AN 0.1 – IMAGEM DO FICHEIRO <i>HEATER_PROPERTIES.DAT</i> ABERTO EM BLOCO DE NOTAS	130
FIGURA AN. 0.2 - IMAGEM DO FICHEIRO <i>/INPUT/AIR_PROPERTIES.DAT</i> ABERTO EM BLOCO DE NOTAS.....	131
FIGURA AN. 0.3 - IMAGEM DO FICHEIRO <i>/INPUT/TEMPERATURE_DEPENDENCE_PROPERTIES.DAT</i> ABERTO EM BLOCO DE NOTAS	131
FIGURA AN.0.4 - IMAGEM DO FICHEIRO <i>/INPUT/FIBER_TEMPERATURE_DEPENDENCE_PROPERTIES.DAT</i> ABERTO EM BLOCO DE NOTAS	132
FIGURA AN. 0.5 - IMAGEM DO FICHEIRO <i>/INPUT/PP_TEMPERATURE_DEPENDENCE_PROPERTIES.DAT</i> ABERTO EM BLOCO DE NOTAS	133
FIGURA AN. 0.6 - IMAGEM DO FICHEIRO <i>/INPUT/PROCESS_PARAMETERS.DAT</i> ABERTO EM BLOCO DE NOTAS	133
FIGURA AN. 0.7 - IMAGEM DO FICHEIRO <i>/INPUT/TAPE_PROPERTIES.DAT</i> ABERTO EM BLOCO DE NOTAS	134
FIGURA AN 0.8 - IMAGEM DO FICHEIRO <i>OUTPUT.TXT</i>	135
FIGURA AN 0.9 - IMAGEM DO FICHEIRO <i>SURFACE_TEMPERATURE.TXT</i>	136
FIGURA Ap.0.10 - ESQUEMA DA LÂMPADA UTILIZADA.....	138

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 – DIFERENCIAÇÃO ENTRE TERMOPLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS [44]	14
TABELA 2.2 - TEMPERATURAS CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS TERMOPLÁSTICOS (ADAPTADO DE [21, 53, 54])	15
TABELA 2.3 - CUSTOS RELEVANTES DO ENROLAMENTO FILAMENTAR DE TERMOENDURECÍVEIS E TERMOPLÁSTICOS ([15])	22
TABELA 2.4 - COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE AQUECIMENTO (ADAPTADO DE FUNCK E NEITZEL [69])	25
TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DA LÂMPADA UTILIZADA NO ESTUDO	41
TABELA 3.2 - DIMENSÕES DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DA LÂMPADA EM TUNGSTÊNIO.....	42
TABELA 3.3 - CARACTERÍSTICAS DA FITA.....	46
TABELA 3.4 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DA FIBRA DE VIDRO E [93].....	48
TABELA 4.1 – PARÂMETROS DE ALGUMAS MODELAÇÕES DE FENÓMENOS TÉRMICOS EM APLICAÇÕES DE ENROLAMENTO FILAMENTAR E DE DEPOSIÇÃO DE FIBRA.....	58
TABELA 5.1 – ESQUEMA DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS.....	84
TABELA 5.2 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO COMPUTACIONAL CONSIDERADOS NAS SIMULAÇÕES EFECTUADAS	85
TABELA AP.0.1 – DIMENSÕES PRINCIPAIS	138
TABELA AP.0.2 – DADOS TÉCNICOS	138

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo apresenta a motivação para o estudo realizado, descrevendo-se os principais objectivos deste trabalho.

1.1 Formulação do Problema

A aplicação de materiais compósitos de elevado desempenho tem sido crescente face às novas necessidades de mercados exigentes com destaque para a produção de reservatórios de alta pressão [1] a indústria aeroespacial [2], o sector automóvel [3] e o transporte ferroviário [4], apresentando vantagens na redução do peso dos veículos, conseqüente redução de consumo de combustível e de emissões poluentes, promovendo a eficiência energética e reduzindo as emissões de CO₂ [5]. Neste sentido, os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas, em forma de fita ou de banda, são cada vez mais utilizados recorrendo às técnicas de enrolamento filamentar e de deposição automatizada de fibras, Figura 1.1. A utilização destas técnicas para aplicação de compósitos de matriz termoendurecível está perfeitamente estabelecida.



Figura 1.1 - Produção de painéis da fuselagem do Airbus A350 XWB [6]

No entanto, a utilização de termoendurecíveis apresenta algumas desvantagens, tais como, escorregamento das fibras, limitações na orientação das fibras e elevados tempos de processamento devido à necessidade de uma fase de cura. Estas limitações são evitadas com a utilização de pré-impregnados de matriz termoplástica cujo interesse na sua aplicação tem aumentado devido a maior resistência ao impacto, maior resistência à fadiga, tecnologia de processamento limpa e facilidade de reciclagem. Além disto, outra das vantagens da utilização de compósitos de matriz termoplástica reside na maior relação custo/eficiência do processo, no

qual a fita é aquecida até à temperatura de fusão e depositada sobre a camada de substrato [7, 8].

A utilização de matrizes termoplásticas nos compósitos de fibras contínuas é relativamente recente tendo vindo a crescer em número de aplicações. No entanto, apesar das enunciadas vantagens na utilização de compósitos de matriz termoplástica em detrimento de termoendurecíveis e dos recentes desenvolvimentos, como métodos mais adequados de produção de pré-impregnados [9-12] e do desenvolvimento de novas técnicas de transformação, o elevado custo e a falta de processos de transformação eficientes para compósitos de matriz termoplástica são apontados como condicionantes à sua aplicação em componentes de elevado volume de produção [13], tornando a falta de processos de manufactura capazes de responder a altas taxas de produção um dos maiores motivos para a não utilização massiva de compósitos na substituição de componentes metálicos [14]. Desta forma, o sucesso da implementação no mercado de compósitos de matriz termoplástica encontra-se bastante dependente do desenvolvimento de equipamentos ou adaptação dos equipamentos actualmente utilizados em produção de compósitos de matriz termoendurecível, adaptados às exigências dos termoplásticos [15].

O ciclo de aquecimento no processamento de compósitos de matriz termoplástica é apontado como o parâmetro crítico no fabrico de estruturas em compósitos de matriz termoplástica [16]. Desta forma, os sistemas de aquecimento têm sido alvo de diversos estudos, sendo desenvolvidos diversos modelos com objectivo de prever a temperatura no compósito ao longo do tempo de processamento. O processo de aquecimento não é facilmente controlável com a tecnologia de aquecimento actualmente existente, resultando em muitos casos em baixa eficiência do processo [17].

Os sistemas de aquecimento por laser oferecem elevada eficiência e rápidos tempos de resposta. No entanto são extremamente caros e o seu peso e tamanho implicam restrições à sua utilização. O aquecimento por tocha de gás é o método mais utilizado, apresentando grande flexibilidade, no entanto apresenta baixa eficiência energética e elevados tempos de resposta. Problemas semelhantes são encontrados nos sistemas de aquecimento por ar quente. O aquecimento por infravermelhos apresenta elevada eficiência energética, facilidade de implementação e tamanho reduzido. Em alguns casos são combinados diferentes sistemas de

aquecimento, por exemplo, com pré-aquecimento por radiação infravermelha e aquecimento final por tocha de gás.

Dada a importância do sistema de aquecimento no ciclo de produção de estruturas em compósito de matriz termoplástica através das técnicas de enrolamento filamentar e deposição automática de fibra, torna-se importante que as tecnologias de aquecimento implementadas apresentem elevada controlabilidade e boa relação custo/eficiência. Estas condições são realçadas pelo facto da qualidade final das estruturas produzidas em compósito apresentar elevada dependência dos parâmetros de processamento, sobretudo ao nível do ciclo de aquecimento e da velocidade de processamento [18, 19]. Neste sentido, a implementação de sistemas de aquecimento eficientes, de fácil aquisição, montagem e elevada controlabilidade são fundamentais para a ubiquidade das técnicas de produção de estruturas em pré-impregnados de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas.

1.2 Objectivos

O foco deste trabalho é o desenvolvimento e o planeamento e concepção de um dispositivo de aquecimento, com base na relação entre custos de aquisição, de operação, desempenho, controlabilidade, facilidade de acesso e manutenibilidade de diferentes tecnologias.

São estabelecidos como principais objectivos:

- Selecção da tecnologia a implementar com base nos critérios acima referidos.
- Modelação computacional 1D do aquecimento de uma fita em compósito de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas.
- Projecto de um sistema de aquecimento experimental.

Capítulo 2

Materiais Compósitos e Técnicas de Deposição de Fibra

No presente capítulo são abordados os materiais compósitos, perspectivando-se que a tendência de crescimento da aplicação destes materiais em diversas indústrias, motivada pelo elevado rácio rigidez/peso, está necessariamente dependente da relação custo/benefício, sobretudo do ponto de vista dos processos de manufactura de estruturas em compósito.

2.1 Compósito de Matriz Polimérica

Um compósito é um material formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais constituintes, distinguíveis entre si, que diferem na forma e na composição [20, 21]. Devido à grande variedade de materiais que podem ser considerados compósitos a sua definição não é unânime. No entanto, pode restringir-se a definição de compósito aos materiais que sejam constituídos por pelo menos duas fases que se caracterizam por apresentarem propriedades mecânicas diferentes. A fase que se caracteriza por apresentar maior dureza, rigidez e resistência mecânica designa-se por reforço, com a outra fase a designar-se por matriz, que normalmente apresenta menores propriedades mecânicas, tendo as funções de agregar e transmitir as cargas à fase de reforço [21, 22].

A ampla utilização destes materiais em engenharia deve-se ao facto da combinação de dois ou mais materiais diferentes poder resultar na obtenção de um material compósito cujas propriedades são superiores, em alguns aspectos, às propriedades dos seus componentes [21].

Os compósitos podem classificar-se como reforçados com fibras descontínuas caso as suas propriedades sejam influenciadas pelo comprimento das fibras de reforço. Quando o comprimento das fibras de reforço é muito superior às dimensões da sua secção transversal, e o seu comprimento é tal que o aumento deste não provoca alterações nas propriedades do compósito, o material pode designar-se como compósito reforçado com fibras contínuas [21].

As matrizes podem ser de natureza polimérica, mineral ou metálica. No caso das matrizes poliméricas podem distinguir-se entre termoplásticas e termoendurecíveis [22]. Os termoendurecíveis não fundem e tem como característica baixas viscosidades antes da polimerização, enquanto os termoplásticos podem ser fundidos, reprocessados e apresentam viscosidades mais elevadas relativamente aos termoendurecíveis [23], sendo fundamental perceber a influência do tipo de matriz tem nas propriedades do compósito, na sua processabilidade e no custo [21].

A Figura 2.1 evidencia esquematicamente as principais características dos compósitos utilizados em três diferentes sectores. Na indústria automóvel a taxa de produção é alta, obtendo-se peças

de baixo custo. No entanto, ao nível da indústria aeroespacial o objectivo é obter peças com elevado desempenho associadas a redução de peso e a melhorias estruturais.

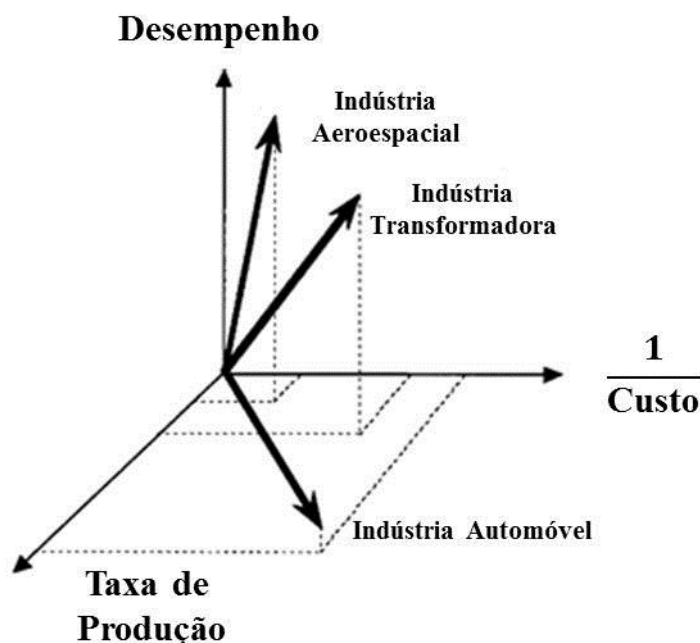


Figura 2.1 – Relação entre a taxa de produção, desempenho e custo dos materiais compósitos utilizados em diferentes indústrias [24]

Historicamente os compósitos de matriz termoplástica apresentavam menores propriedades mecânicas relativamente aos compósitos de matriz termoendurecível devido à falta de processos de impregnação capazes, resultando em fraca adesão fibra/matriz, onde idealmente cada fibra deve estar circundada pela matriz sem quaisquer vazios, condicionando a utilização de compósitos de matriz termoplástica em aplicações estruturais [25, 26], devendo-se as dificuldades de impregnação à elevada viscosidade dos termoplásticos, condicionando a impregnação das fibras de reforço na matriz [21],

No entanto, apesar das dificuldades na aplicação de compósitos de matriz termoplástica, estes estão associados a um ciclo de processamento menor que o de termoendurecíveis [21, 27]. Na Figura 2.2 (a) e Figura 2.2 (b) mostra-se a relação entre temperatura e tempo de ciclo no ciclo de processamento de compósitos de matriz termoendurecível e termoplástica. O ciclo de processamento de compósitos baseados em termoendurecíveis é constituído cinética de cura e evolução da viscosidade associada, cinética de impregnação, gestão das reacções exotérmicas, e

finalmente aquecimento e arrefecimento, Figura 2.2 (a). O ciclo de processamento dos compósitos de matriz termoplástica, Figura 2.2 (b), é determinado pela fusão do polímero, impregnação e solidificação. A fase de consolidação do compósito envolve: (i) remoção de vazios, (ii) contacto íntimo e união entre as camadas, e (iii) solidificação.

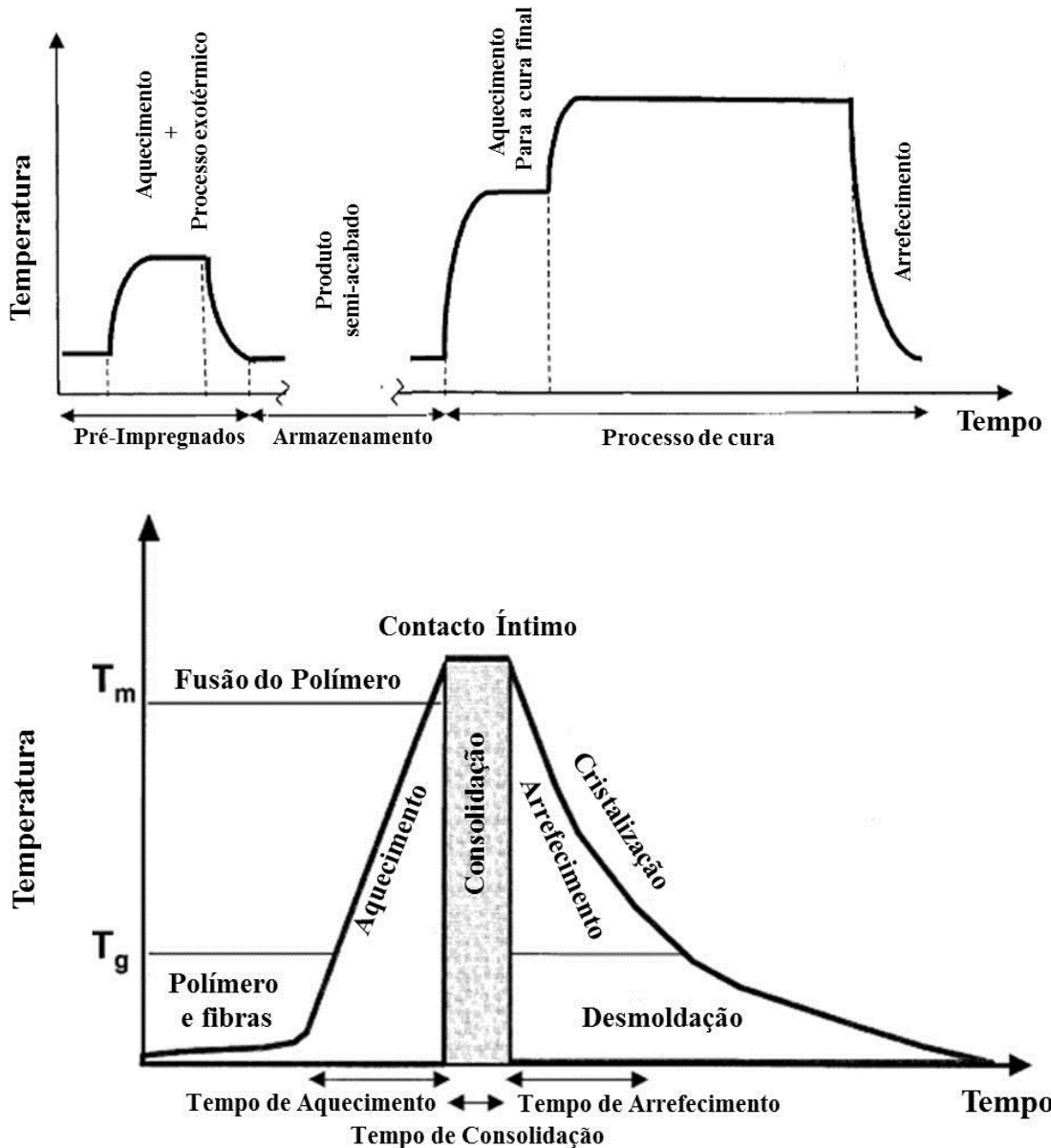


Figura 2.2 - Ciclo de processamento típico de: (a) termoendurecíveis e (b) termoplásticos ([24])

O desenvolvimento de novos produtos com apertados requisitos de tolerância ao dano [28] tem motivado o desenvolvimento de novos métodos de produção e transformação de compósitos de

matriz termoplástica devido à sua maior resistência ao impacto e ao dano relativamente aos termoendurecíveis [21]. A obtenção de estruturas com melhores rácios rigidez/peso e resistência/peso, com menores custos de produção, e com a possibilidade de obtenção de geometrias mais complexas associadas às recentes exigências ao nível da legislação ambiental, favorecem a utilização de termoplásticos em detrimento do uso de termoendurecíveis [25, 27, 29, 30]. Na Tabela 2.3 compara-se a resistência à tracção de dois termoplásticos usados comercialmente com dois termoendurecíveis correntes, observando-se que os termoplásticos apresentam maior resistência à tracção.

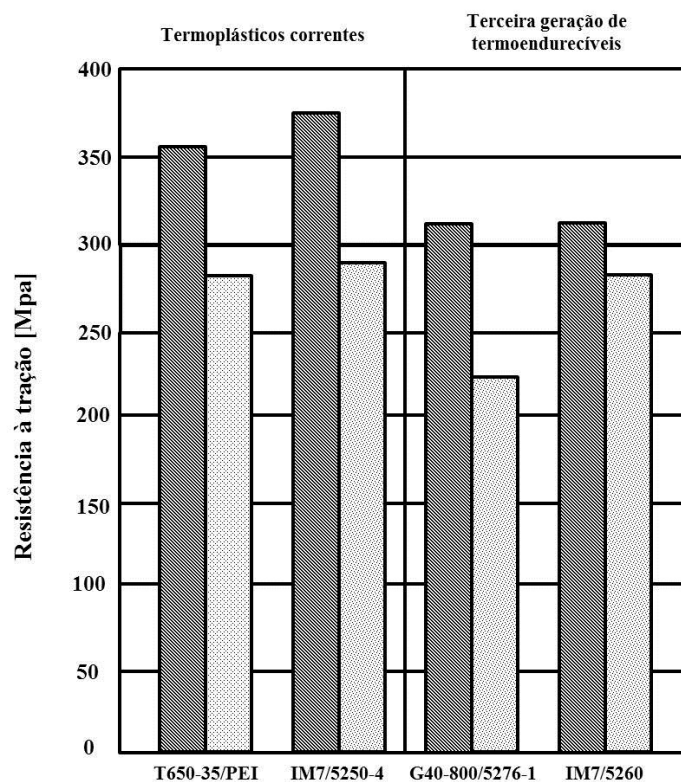


Figura 2.3 - Propriedades de alguns termoplásticos e termoendurecíveis (adaptado de [21])

O aumento da qualidade e a redução do custo de pré-impregnados de matriz termoplástica potenciou o desenvolvimento de tecnologias de transformação mais eficientes para produção de estruturas em compósito, sendo superados alguns obstáculos que o fabrico de pré-impregnados de matriz termoplástica apresentava relativamente aos seus congéneres de matriz termoendurecível, devido à maior complexidade do seu ciclo de transformação [15]. Paralelamente têm sido desenvolvidos sistemas que permitem soldar compósitos de matriz

termoplástica, o que permite a união de diferentes peças, fabricadas por processos diferentes e abre perspectivas no âmbito da reparação de estruturas [31].

Devido a estes factores, a procura de compósitos pela indústria tem vindo a aumentar, sendo esperado que até 2014, nos Estados Unidos, a procura de compósitos de matriz termoplástica seja superior à procura de termoendurecíveis, com um crescimento anual de 2,9%, com especial destaque para a procura de compósitos com matriz em polipropileno (PP), que crescerá acima da média [13, 32]. Também na Europa o crescimento é esperado, com 60% das empresas da indústria dos compósitos a expectarem amplo aumento da procura [33]. No entanto, a tradicional posição competitiva da Europa na indústria dos compósitos tem vindo a enfraquecer, devido ao surgimento de produtores concorrentes em países emergentes dotados de mão-de-obra de custo inferior e em muitos casos com apoios governamentais para investimento em tecnologia. Não obstante, em função do potencial de crescimento da indústria dos compósitos, existe a oportunidade de promover a competitividade à escala nacional e global dos países europeus, focando-se em algumas áreas específicas, das quais se destaca a melhoria dos processos de manufactura, do ponto de vista da redução de custos e aumento das cadências de produção [34]. Desta forma, a evolução da indústria dos compósitos está directamente dependente do desenvolvimento de uma nova geração de técnicas que reduzam drasticamente os custos de produção, possibilitem a produção de elevados volumes e o processamento de geometrias complexas [14, 26].

Reforçando a necessidade do crescimento da indústria dos materiais compósitos, directivas da União Europeia recomendam que, até 2015, 90% dos componentes de um automóvel sejam recicláveis, afigurando-se como possível solução a utilização de componentes em termoplástico reforçado, com forte crescimento dos GMT's (Glass Mat reinforced Thermoplastic) [35], e dos termoplásticos reforçados com fibras longas, LFRT's, (Long Fibre Reinforced Thermoplastic) [13, 36]. A procura de LFRT's relativamente aos SFRT's (Short Fibre Reinforced Thermoplastic) tem sido maior, devido ao seu processamento menos propício a empenamentos, à maior estabilidade dimensional e às suas melhores propriedades mecânicas [37]. A utilização de termoplástico reforçado com fibras contínuas CFRT (Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic) é relativamente recente, introduzindo a produção de novos produtos em compósito como reservatórios de pressão e aplicações aeroespaciais [38, 39].

2.2 Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica

Os pré-impregnados de matriz termoplástica podem classificar-se em função do comprimento das fibras de reforço, podendo designar-se como pré-impregnados de fibras curtas (SFRT's), de fibras longas (LFRT's) e fibras contínuas (CFRT's).

Os SFRT's são muito atractivos devido à sua fácil produção, baixo custo e às superiores propriedades mecânicas relativamente aos termoplásticos não reforçados [40]. Os componentes em SFRT podem ser processados a partir de injetoras padrão, sem necessidade de qualquer adaptação. Estes factores tornam apelativo o uso de termoplásticos reforçados com fibras curtas em diversas indústrias devido ao baixo custo de processamento [41], com alguns autores a apontarem estes factores como motivos para potencial implementação dos SFRT's na indústria automóvel, com potencial para substituição dos LFRT's [42].

Os LFRT's são obtidos a partir de *granulado* ou *pellets*, pré-impregnados em termoplástico, normalmente obtidos por extrusão, em extrusoras de parafuso único, evitando danificar as fibras de reforço, cujo comprimento varia entre 5 e 50 mm. A sua utilização tem vindo a crescer na substituição de componentes em metal e de SFRT's [43]. A definição de uma fibra como longa não é linear, dependendo frequentemente do processo de transformação associado, podendo variar de 2 mm até 50 mm [44]. Na última década têm sido desenvolvidas técnicas de obtenção de LFRT's sem necessidade de produto semi-acabado, obtendo-se o produto final directamente dos seus constituintes, reduzindo os custos de processamento [44, 45].

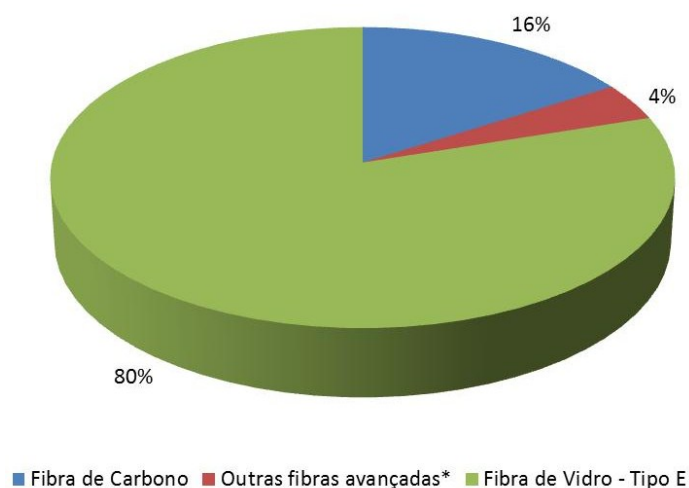
Os pré-impregnados reforçados com fibras contínuas tem vindo a aumentarem a sua quota de mercado. A produção de fibras contínuas completamente impregnadas é vista como impulsionadora da indústria dos compósitos, nomeadamente na indústria aeroespacial. Em 1990 a relação entre a utilização de pré impregnados reforçados com fibras contínuas e outro tipo de pré-impregnados estimava-se em 15% e 85%, respectivamente. No entanto, a partir de 2008 esta relação evoluiu para 55% de utilização de pré-impregnados reforçados com fibras contínuas relativamente a outros tipos [46].

O processo de pultrusão é um dos mais utilizados na obtenção de pré-impregnados de termoplástico reforçado com fibras contínuas [47]. Os perfis pultrudidos de termoplástico têm a capacidade de voltarem a ser termoformados, [48, 49]. Um dos maiores problemas na obtenção

de CFRT's através de pultrusão é garantir a impregnação das fibras devido à elevada viscosidade dos termoplásticos [50].

2.2.1 Fibras de Reforço

Geralmente as fibras de reforço apresentam elevada influência na resistência à tração e rigidez nos compósitos reforçados com fibras unidireccionais. No entanto, existem outros aspectos que dependem das propriedades da matriz, como temperatura máxima de utilização e resistência ao corte. As fibras de vidro, aramida e carbono são as mais comuns enquanto reforço de compósitos de matriz polimérica, sendo mais utilizada comercialmente a fibra de vidro tipo E [51]. Na Figura 2.4 mostra-se a percentagem do volume de utilização dos diferentes tipos de fibra na indústria dos materiais compósitos.



*Inclui fibras de aramida, boro, vidro dos tipos R/S/T, de HMPE e de quartzo

Figura 2.4 - Percentagem do volume de utilização de diferentes tipos de fibra na indústria dos compósitos em 2006 (adaptado de [46])

A aplicação de fibras de vidro no reforço de matrizes plásticas permite a obtenção de compósitos com elevada relação resistência/peso, boa estabilidade dimensional, elevada resistência ao calor, a baixas temperaturas, à humidade e à corrosão, sendo um material de baixo custo, de fácil processamento e com excelente adesão fibra/matriz. A fibra de vidro é obtida através da fusão de sílica com outros minerais, essencialmente óxidos. A massa fundida é arrefecida rapidamente, para evitar a cristalização formando-se posteriormente as fibras. Os tipos de fibra

de vidro mais utilizados na produção de compósitos de matriz plástica são o vidro E (eléctrico) e o vidro S (elevada resistência mecânica), sendo o vidro E o mais utilizado em aplicações de fibras contínuas. Apesar do vidro S apresentar maior resistência à tração é mais caro e destina-se sobretudo a aplicações militares e aeronáuticas [20, 21].

A utilização de fibras de carbono como reforço permite excelente relação resistência/peso, superior à alcançada com a utilização de fibra de vidro, no entanto o seu custo é muito superior. Além disto, as fibras de carbono apresentam elevada resistência a elevadas temperaturas. Estas características potenciaram durante a última década a sua aplicação com especial destaque no sector da indústria aeroespacial civil, com tendência de alargamento a outros sectores, como, energias renováveis, reservatórios de alta pressão e estruturas *off-shore* [46].

As fibras de aramida são fibras poliméricas que apresentam elevada resistência à tração e ao impacto. Estas propriedades tornam-nas atractivas para a aplicação em coletes à prova de bala, capacetes e outros objectos exigentes do ponto de vista de resistência ao impacto. Por outro lado, apresentam baixa resistência à compressão e à radiação UV além de fraca aderência entre as fibras e a matriz, o que limita a sua aplicação [21].

Recentemente tem surgido vários projectos para utilização de fibras naturais no reforço de plástico, procurando reduzir a dependência de fibras dependentes de processos altamente energéticos, devido aos crescentes preços das fontes energéticas. Além disso o preço das fibras naturais tem-se mantido estável, tendo-se obtido recentemente fibras com qualidade mais consistente [52].

Quanto à forma, as fibras podem classificar-se como curtas, longas contínuas ou aplicadas sob a forma de tecido. As fibras curtas apresentam comprimentos de poucos centímetros ou milímetros e são geralmente aplicadas em compósitos processados em moldação por injeção. As fibras longas, geralmente cortadas durante o processamento, podem ser aplicadas simplesmente embebidas numa matriz, ou tecidas entre si e posteriormente embebidas numa matriz.

Quanto à direcção do reforço, ou seja, em função da disposição das fibras na matriz, o material compósito pode ser classificado como unidireccional, se as fibras estão dispostas numa única direcção, por exemplo em fitas de material compósito, bidireccional, em que as fibras podem ser

tecidas ou não, mas estão dispostas em duas direcções e tridimensional, em que as fibras são tecidas, com as fibras orientadas em diversas direcções (>2).

Na Tabela 2.1 os compósitos são classificados de acordo com o comprimento e orientação das fibras.

Tabela 2.1 – Diferenciação entre termoplásticos reforçados com fibras [44]

	Termoplástico reforçado com fibras curtas		Termoplástico reforçado com fibras longas			Termoplástico reforçado com fibras contínuas
	<1 mm	1 – 5 mm	5 – 25 mm	5 – 50 mm	>10 mm	
Comprimento da fibra [mm]	<1 mm	1 – 5 mm	5 – 25 mm	5 – 50 mm	>10 mm	Comprimento da peça
Produto semi-acabado / processo directo	Granulado de fibras curtas	Pellets de LFT-G	Pellets de LFT-G	Produto semi-acabado, LFT-D	Material reforçado LFT-GMT	Laminado
Processo tecnológico	Moldação por injeção		Moldação por compressão			Termoformação
Orientação da fibra na peça	3D		—			1D ou 2 D
Efeito anisotrópico	Elevado		Médio	Médio	Baixo	Volitivo

2.2.2 Matrizes Termoplásticas

Os termoplásticos mais utilizados como matriz de compósitos são o polipropileno (PP), a poliamida (PA), o poliéster termoplástico (PET) e o policarbonato (PC), pois apresentam interessante relação propriedades mecânicas/custo.

No processo de selecção da matriz de um pré-impregnado são fundamentais as propriedades térmicas do termoplástico, devido à influência que elas apresentam na processabilidade do pré-impregnado e no desempenho do componente final. Na Tabela 2.2 são apresentadas algumas temperaturas características de alguns dos termoplásticos mais utilizados como matriz.

Tabela 2.2 - Temperaturas características de alguns termoplásticos (adaptado de [21, 53, 54])

Polímero	Temperatura de transição vítrea	Temperatura de fusão	Temperatura de processamento
Polipropileno (PP)	-4 °C	170 °C	191 a 224 °C
Poliamida (PA)	50 °C	225 °C	240 a 274 °C
Poliéster termoplástico (PET)	70°C	265 °C	90 a 295 °C
Polycarbonato (PC)	150 °C	310 °C	227 a 343 °C

Em aplicações avançadas, nomeadamente na indústria aeroespacial com requisitos de resistência a elevadas temperaturas são aplicados poli-eter-eter-cetona (PEEK), poli-eter-imida (PEI) e o polifenileno sulfito (PPS) é utilizado em aplicações com necessidade de resistência a elevadas temperaturas. Apesar do PEEK apresentar excelentes propriedades, a sua aplicação progrediu lentamente [21, 22].

A operação de impregnação das fibras de reforço na matriz é de elevada complexidade devido à elevada viscosidade dos termoplásticos. Para resolver este problema existem quatro grandes estratégias. Duas delas envolvem aquecimento combinado com processos mecânicos, e as restantes duas implicam o fornecimento do termoplástico em pequenas partículas que permitam a sua impregnação nas fibras de reforço antes de ser fundido [21].

Com o desenvolvimento de novos métodos de impregnação o PP tem sido cada vez mais utilizado como matriz em pré-impregnados reforçados com fibras contínuas. É um termoplástico muito utilizado comercialmente, estando presente em electrodomésticos, embalagens, utensílios de laboratório e embalagens. De entre as suas propriedades destacam-se a boa resistência química, à humidade e ao calor e a estabilidade dimensional, podendo ser sintetizado a partir de matérias-primas petroquímicas baratas.

2.3 Técnicas de Colocação de Fibras

Nas técnicas de fabrico de componentes em material compósito, pré-impregnados de matriz termoplástica são posicionados de acordo com a orientação das fibras desejada e consolidados

de forma precisa, controlada e automática sobre a superfície de um molde. Destacam-se o enrolamento filamentar e a colocação de bandas de reforço sobre uma pré-forma, ambas com consolidação *in-situ* (não necessitam de fase de cura posterior em autoclave). Desde do final da década de 1940 que se realizam pesquisas para desenvolver e aplicar sistemas de enrolamento filamentar no projecto estrutural de reservatórios de pressão. Com o decorrer do tempo, aumentou o grau de automação e foram efectuadas melhorias nos equipamentos de enrolamento filamentar, surgindo como evolução da técnica de enrolamento filamentar as técnicas de *Automated Tape Laying* (ATL) e de *Automated Fiber Placement* (AFP). Estas técnicas são as mais utilizadas na produção de laminados em compósito a partir de pré-impregnados unidireccionais [55].

2.3.1 Enrolamento Filamentar

O enrolamento filamentar é uma das técnicas mais utilizadas no fabrico de estruturas em compósito de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas, no qual as fibras impregnadas na matriz são dispostas sobre um mandril animado de movimento rotacional de acordo com ângulos pré-determinados tendo evidenciado amplo crescimento ao longo da última década [21, 46, 56]. Na Figura 2.5 mostra-se que o enrolamento filamentar processa-se através da sincronização da velocidade linear do distribuidor de fita com a velocidade de rotação do mandril, controlando o ângulo de enrolamento da fita [21].

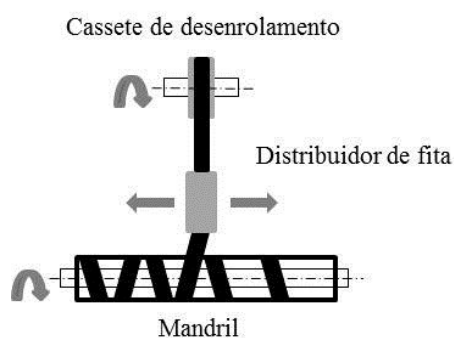


Figura 2.5 - Processo de enrolamento filamentar

As primeiras máquinas de enrolamento filamentar dispunham de dois eixos (um eixo rotacional e um eixo de translação), permitindo apenas enrolamento helicoidal. Com a evolução tecnológica, o controlo das máquinas que anteriormente era efectuado através da utilização de correias,

engrenagens e cames, passou a ser efectuado por servomotores controlados por computador, atingindo-se um maior grau de automatização possibilitando o enrolamento de padrões mais complexos, promovendo o aumento de produtividade do processo [57].

O ângulo de enrolamento pode variar desde de valores muito baixos, provocando enrolamento quase longitudinal, até ângulos de enrolamento próximos de 90°, enrolamento circunferencial, permitindo assim beneficiar do comportamento anisotrópico dos materiais compósitos, gerando trajectórias de enrolamento que proporcionem o desempenho mecânico desejado, envolvendo a combinação de enrolamento circular e helicoidal. Desta forma, durante o enrolamento existem variações da orientação da trajectória da fita, de complexidade variável, o que implica variações da velocidade de enrolamento, não podendo estes factores alterar a qualidade do produto final [58]. Quando o número de camadas pretendido é aplicado, o mandril pode ser retirado [59, 60]. No caso do fabrico de reservatórios de pressão por enrolamento filamentar o mandril necessário ao processo é integrado no produto final como camada interna [39].

O sucesso da implementação da técnica de enrolamento filamentar para produção em massa de estruturas em termoplástico reforçado com fibras contínuas depende das melhorias que venham a ser introduzidas para o processamento da matriz termoplástica no sentido do aumento da produtividade, tornando a tecnologia competitiva em mercados com grandes volumes de produção, devido à sua capacidade de serem consolidados em linha, oferecendo a possibilidade de serem processados a velocidades mais elevadas [26].

2.3.2 *Automated Tape Laying (ATL) e Automated Fiber Placement (AFP)*

As fibras de carbono tornaram-se comercialmente disponíveis a partir de 1966, motivando o aumento de produtividade e de fiabilidade através da automatização dos processos de deposição de pré-impregnados, com os primeiros sistemas de ATL a surgirem no início da década de 1970. Os primeiros equipamentos de ATL são desenvolvidos como equipamento central na produção de modelos de aviões, apresentando velocidades de deposição de fita na entre 10 e 20 m/min. Na década de 1980, com vista à difusão da utilização dos equipamentos de ATL, estes tornaram-se mais genéricos, possibilitando velocidades de deposição de fita mais elevadas, no entanto a maioria dos equipamentos apenas era capaz de produzir placas planas, sendo

introduzidos progressivamente equipamentos capazes de efectuar deposição de fibra em superfícies curvilíneas. Em 1986 é introduzida por Meier, citado por Lukaszewicz *et al.* [61], uma nova geração de equipamentos de ATL, formando a base dos actuais equipamentos comerciais. De entre as características destes equipamentos destacam-se o controlo da força de consolidação directamente na cabeça o sistema de manutenção da posição da cabeça normal à superfície, em superfícies curvilíneas.

O processo ATL é considerado altamente produtivo na deposição de camadas de pré-impregnados, apresentado largo espectro de aplicação com particular destaque em aplicações aeronáuticas e no campo das energias renováveis. Apresenta como vantagens a capacidade de promover elevadas taxas de deposição de fita, elevadas propriedades mecânicas dos componentes obtidos, capacidade de produzir peças de grandes dimensões e possibilidade de programação simplificada *offline*. Como desvantagens destacam-se o elevado investimento inicial, limitações de complexidade geométrica dos componentes a obter e os elevados desperdícios de material, quando comprado com outras técnicas. No entanto, recentemente, apesar das limitações de complexidade geométrica do ATL, o processo tem-se tornado mais interessante devido à capacidade de produção de elevadas taxas de laminados planos, que depois são termoformados na geometria desejada [61], Figura 2.6.

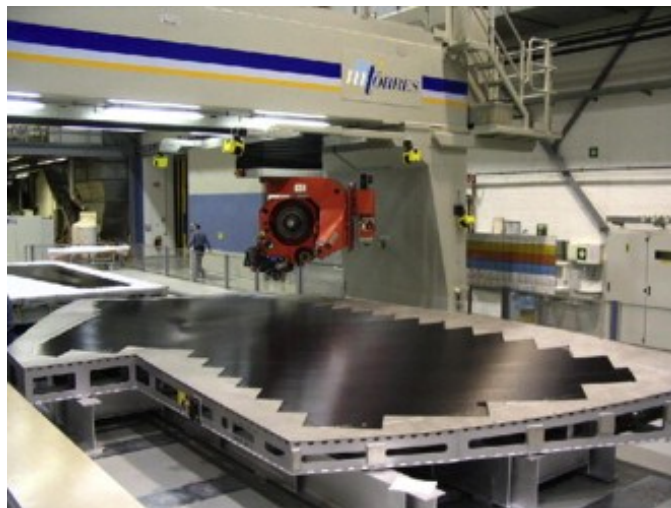


Figura 2.6 - Sistema ATL, aplicação de fibra sobre um molde plano [61]

Os sistemas AFP foram comercialmente introduzidos no final da década de 1980, sendo descrito como a combinação entre técnicas de ATL e de enrolamento filamentar, conjugando a

capacidade de deposição diferencial do enrolamento filamentar e de compactação do ATL. Na fase de desenvolvimento inicial, Bullock, citado por Lukaszewicz *et al.* [61] desenvolveu um equipamento de AFP capaz de depositar camadas de fita com velocidade de 7 m/min, semelhante às velocidades atingidas pelos equipamentos ATL. O desenvolvimento das técnicas de AFP neste período coincidiu com o advento dos compósitos termoplásticos para aplicações estruturais aeronáuticas, tendo sido dedicados esforços significativos ao desenvolvimento de equipamentos de AFP dedicados à deposição de compósitos de matriz termoplástica.

A partir do ano 2000 os sistemas AFP desenvolveram-se do ponto de vista da acessibilidade, confiança e produtividade, estando amplamente implementados nas indústrias militar e aeroespacial, no entanto, apesar das melhorias referidas a instalação de sistemas AFP mantinha-se muito dispendiosa comparativamente a outros métodos de produção, e a programação *offline* continuava com dificuldades de optimização. Apesar destas dificuldades, a capacidade de produzir peças com variações localizadas da orientação da fibra fazem da AFP uma tecnologia líder para futuros desenvolvimentos na área das estruturas inteligentes [61], Figura 2.7.



Figura 2.7 – Sistema AFP, com aplicação de fibra com variações localizadas de orientação [61]

Apesar das diferenças de forma da matéria-prima, a operação de deposição de fita é semelhante nos equipamentos de ATL e AFP. As bandas de pré-impregnado são distribuídas e direccionadas a partir da cabeça de deposição, Figura 2.8.

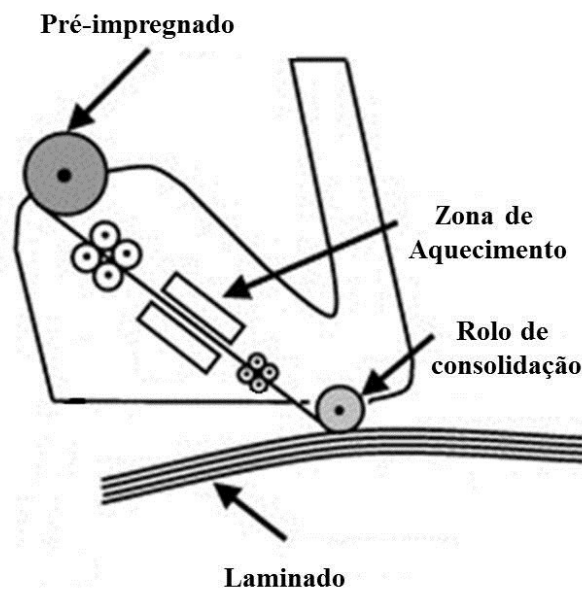


Figura 2.8 - Esquema de uma cabeça de deposição comum aos sistemas ATL e AFP (adaptado de [61])

Em equipamentos ATL geralmente é possível utilizar robots industriais devido ao reduzido peso da cabeça de deposição. Já nos equipamentos AFP normalmente são utilizados pórticos, devido às maiores acelerações e velocidades implícitas. Comparativamente aos ATL, os equipamentos AFP apresentam velocidades e acelerações mais elevadas, factor que permite o aumento de produtividade no fabrico de peças complexas, no entanto, uma vez que os equipamentos de AFP são dedicados à produção de componentes mais complexos, apesar de apresentarem maiores velocidades e acelerações a sua produtividade é menor relativamente aos ATL. A ubiquidade das técnicas ATL e AFP está dependente do aumento da produtividade através da optimização do *software* de controlo, alterações à configuração dos equipamentos e optimização das condições de processamento, nomeadamente as condições de velocidade, pressão e temperatura [61].

2.3.3 Enrolamento e Deposição de Pré-impregnados de Matriz

Termoplástica

Na produção de estruturas em compósito pré-impregnados em termoplástico é necessário aquecer localmente o pré-impregnado, fundindo-o, e utilizar sistemas de consolidação das camadas enroladas ou depositadas. Assim, a deposição de pré-impregnados de matriz

termoplástica pode efectuar-se em equipamentos semelhantes aos utilizados em enrolamento com matrizes termoendurecíveis, adaptados com sistemas de aquecimento e consolidação [62].

Outra forma de fundir a matriz do pré-impregnado é a colocação do mandril no interior de uma câmara com temperatura acima da temperatura de fusão do termoplástico, evitando assim o aquecimento localizado [63]. No entanto, o atravancamento do interior da câmara aquecida limita o tamanho do mandril, reduzindo a variabilidade de estruturas que podem ser produzidas.

Para fazer face aos elevados custos do processo de pré-impregnação das fibras, existem algumas tentativas de combinar o processo de impregnação e de enrolamento filamental num único equipamento, apresentando a vantagem de redução de custos de produção. No entanto, as velocidades de enrolamento atingidas com o processo combinado são inferiores às velocidades de enrolamento de pré-impregnados [58], limitando a produtividade desta tecnologia.

O enrolamento de compósitos de matriz termoplástica apresenta vantagens económicas relativamente ao enrolamento de compósitos termoendurecíveis caso as velocidades de enrolamento sejam semelhantes em ambas as situações, sem prejuízo da qualidade do laminado e quando os custos energia são semelhantes em ambos os tipos de enrolamento [64]. Também ao nível da consolidação de compósitos de matriz termoplástica apresentam-se diversas vantagens relativamente à consolidação dos compósitos de matriz termoendurecível, normalmente em autoclave.

No processo enrolamento filamental, a tensão de enrolamento acumula-se o que pode conduzir à cedência da fibra nas camadas interiores. Além disso, pode ocorrer o movimento das fibras devido à diminuição da tensão durante a fase de cura em autoclave. No enrolamento com consolidação local, os processos de fusão, consolidação e solidificação ocorrem numa região confinada em torno do ponto de contacto, fazendo com que o enrolamento se processe sobre um substrato já solidificado, diminuindo a probabilidade de cedência das fibras devido à tensão de enrolamento acumulada. A ausência de tensões acumuladas nas fibras e a capacidade de atingir elevadas taxas de arrefecimento possibilitam a produção de estruturas em compósito libertas de tensões residuais, permitindo a obtenção de componentes com melhores propriedades mecânicas e maior estabilidade dimensional [18].

2.3.4 Custos do Enrolamento Filamentar de Termoendurecíveis / Termoplásticos

O enrolamento filamentar de pré-impregnados apresenta diversas vantagens relativamente ao enrolamento filamentar molhado, das quais se destacam: controlo preciso da quantidade de resina ou termoplástico, colocação de fibra sem escorregamento, elevadas taxas de deposição de fibra, limpeza do processo, sendo também um processo menos agressivo em termos ambientais. Desta forma, o enrolamento de pré-impregnados possibilita a obtenção de produtos finais com melhor qualidade, o que frequentemente justifica a diferença de custo entre os processos [65].

Na Tabela 2.3 são comparados os custos mais relevantes em enrolamento filamentar com matrizes termoendurecíveis e termoplásticas, na produção do mesmo componente estrutural, fabricado em série.

**Tabela 2.3 - Custos relevantes do enrolamento filamentar de termoendurecíveis e termoplásticos
([15])**

Custo relevante por componente fabricado	Enrolamento filamentar com termoendurecíveis		Enrolamento filamentar com termoplásticos	
Matéria-prima*	Fibra + resina	1	Pré-impregnado	1,6
Solventes	Acetona	0,04	-	
Remoção de desperdícios		0,015		0,001
Mão-de-obra	1 técnico 1 assistente	0,43	1 técnico ¼ de assistente	0,19
Outros	Overhead, teste, acabamentos...	1,45	Overhead, teste, acabamentos...	1,45
Tempos de fabrico por componente	Preparação e limpeza**	1	-	0,62
Total		3,935		3,861

*Custos para a mesma fibra e matrizes com propriedades semelhantes

** Não inclui o tempo necessário pós cura de resina termoendurecível

O custo total de enrolamento filamentar com matrizes termoplásticas é mais competitivo relativamente à utilização de matrizes termoendurecíveis. Na análise da tabela percebe-se que o custo das matérias-primas em termoplásticos reforçados é cerca de 60% superior aos termoendurecíveis reforçados. O custo dos tempos de fabrico por componente é cerca de 38% mais baixo quando utilizadas matrizes termoendurecíveis. Este facto mostra que o processamento de termoplásticos reforçados é já mais barato que o processamento de termoendurecíveis. É no entanto importante salientar que a janela de processamento em compósitos termoplásticos é geralmente pequena [66] implicando que os sistemas de sejam projectados adequadamente de modo a permitir que os termoplásticos possam competir com as tecnologias convencionais associadas ao processamento de termoendurecíveis.

2.4 Sistemas de Aquecimento Implementados

O aquecimento de fita pré-impregnada foi introduzido no início da década de 1990 para superar as dificuldades existentes na deposição de laminados complexos e permitir maior controlo da aderência entre camadas. Na bibliografia não é claro quando começaram a ser utilizados os sistemas de aquecimento em termoendurecíveis, no entanto em 1991 foi patenteado um sistema por radiação infravermelha na deposição de compósito de matriz termoplástica [61], posteriormente Benda e Stump citados por Lukaszewicz *et al.* [61] desenvolveram um sistema de aquecimento com pistola de ar-quente, atingindo velocidades de deposição de 13 m/min e em 1988, Grove, citado por Lukaszewicz *et al.* [61] propôs o primeiro sistema de aquecimento por laser para fitas de matriz termoplástica

As primeiras investigações ao desenvolvimento de novos equipamentos visaram determinar as condições adequadas ao processamento de termoplásticos, nomeadamente pressão de consolidação, temperatura e velocidade [61]. Nestas investigações concluiu-se que a qualidade dos laminados, avaliada pelo grau de fusão entre camadas e pela quantidade de vazios, era determinantemente afectada pela velocidade de deposição da fita. Um trabalho desenvolvido por Bourban *et al.* [24] refere como principal factor limitativo na deposição de compósitos de matriz termoplástica a quantidade de tempo requerida para aquecer o material acima do seu ponto de fusão, limitando assim as velocidades máximas de processamento de fita termoplástica, sendo reportadas velocidades de 3,8 m/min, com aquecimento por radiação infravermelha [67]

resultando em taxas de produção inferiores às atingidas com matrizes termoendurecíveis. As condições de processamento foram aprofundadas por Pitchumani *et al.* [68] para obtenção de menores percentagens de vazios e maximização da velocidade e contacto entre camadas, utilizando aquecimento por tocha.

Em 1995, Funck e Neitzel [69] apresentaram um sistema de aquecimento para dispositivos de enrolamento filamantar que combinava pré-aquecimento em forno e utilização de laser na zona de contacto entre superfícies, permitindo atingir elevadas velocidades de enrolamento de 90 m/min e 120 m/min. No mesmo ano Romagna *et al.* [64] compararam um sistema de aquecimento por ar quente com um sistema de aquecimento por infravermelhos, estudando também a influência da utilização de sistemas de pré-aquecimento no enrolamento filamantar de compósitos de matriz termoplástica, concluindo que o aquecimento por infravermelhos se revela mais eficaz e que a utilização de pré-aquecimento aumenta a eficiência do sistema. Também em 1995, um sistema com pré-aquecimento por ar quente e aquecimento final por infravermelhos foi desenvolvido por Hauptert e Friedrich [70] atingindo velocidades de enrolamento entre 6 m/min até 30 m/min, verificando-se a diminuição das propriedades mecânicas do enrolado com o aumento da velocidade de enrolamento, devido à menor eficácia do aquecimento, provocando diminuição da qualidade da consolidação.

Em 1998 Rosselli *et al.* [71] desenvolveu um sistema de aquecimento a laser para um dispositivo de enrolamento filamantar auxiliado com o rolo de consolidação aquecido, atingindo velocidades de enrolamento de 1,2 m/min e 2,4 m/min com potências de laser de 55 W e 80 W respectivamente. Num trabalho desenvolvido por Pistor *et al.* [72] é demonstrado um sistema de aquecimento por laser adaptável a fitas de diferentes larguras, no entanto a velocidade atingida, 0,9 m/min, permitindo taxas de processamento muito baixas.

Recentemente Calawa e Nancarrow [73] desenvolveram um sistema de aquecimento da camada de substrato por radiação infravermelha, adaptado a um sistema de AFP, capaz de atingir velocidades de 50 m/min, no entanto, na aplicação desenvolvida o incremento de temperatura na fita era de apenas 12 °C, alcançado uma taxa de aquecimento de aproximadamente 100 °C/s.

Em 2010 Quadrini *et al.* [74] desenvolveram um sistema experimental de enrolamento filamentar com aquecimento por laser diodo, com potência instalada de 50 W, obtendo velocidades de consolidação de 0,06 m/min. São velocidades de processamento relativamente baixas, devido às baixas potência e força de consolidação aplicadas. Os resultados mostram que a utilização de laser diodo no aquecimento de compósitos de matriz termoplástica é promissor, devido à elevada eficiência desta tecnologia.

Na Tabela 2.4 diferentes sistemas de aquecimento são comparados relativamente à tecnologia de aquecimento por infravermelhos. São comparados quanto ao custo de aquecimento, velocidades de operação, tipo de transferência de calor associado, e a capacidade de resposta a variações na velocidade e temperatura de operação.

Tabela 2.4 - Comparação de diferentes métodos de aquecimento (adaptado de Funck e Neitzel [69])

Tecnologia de aquecimento	Custos		Condições de Processamento				
	Aquisição	Funcionamento	Velocidade de enrolamento [m. min ⁻¹]	Implementação do aumento da largura da fita	Transferência de calor	Tempo de resposta	Padrão de enrolamento
Lasers	45	Nd-YAG: 20 CO ₂ : 12	60-140	Difícil	Absorção local, num ponto	Muito rápido	Crítica
Infravermelho	1	1	2,5-27	Difícil	Absorção local, em linha	Rápido	Crítica
Chama directa	Baixo controlo: 0,7 Alto controlo: 6	20	30-60	Fácil	Convecção forçada, numa região	Lento	Ilimitado
Ar quente	0,6	Nitrogénio: 20 Ar: 1,5	0,6-18	Fácil	Convecção forçada, numa região	Lento	Ilimitado

Pela análise da tabela anterior, pode concluir-se que os sistemas de ar quente são mais baratos, apresentam grande versatilidade de utilização, podendo ser aplicados a padrões de enrolamento complexos e facilmente adaptados a diferentes larguras de fita, no entanto as velocidades de operação são relativamente baixas, sendo uma das desvantagens da utilização de sistemas convectivos a menor controlabilidade do processo de aquecimento [75]. Outro factor a

considerar é o elevado custo dos sistemas que funcionam com nitrogénio, pois apesar de permitirem elevadas temperaturas de operação [76], o seu custo de operação é cerca de 1300% maior relativamente ao ar aquecido.

Os sistemas de chama directa são relativamente baratos na aquisição, apresentam fácil alteração da largura de fita a processar, possibilidade de enrolamento de padrões complexos e elevadas velocidades de processamento, no entanto, o custo de operação é semelhante ao do nitrogénio no sistema de ar quente, apresentando também elevado tempo de resposta na alteração das condições de processamento. Além disso, é também necessário providenciar sistemas de exaustão dos gases resultantes da combustão.

Os sistemas laser são os mais caros, representando para a maioria das aplicações um investimento incomportável. Revelam-se menos adaptáveis na alteração às condições e configurações de processamento, necessitando de mão-de-obra especializada para a sua operação e programação. No entanto permitem velocidades de enrolamento muito elevadas, com custos de operação semelhantes aos do nitrogénio no sistema de ar quente e da chama directa e elevada controlabilidade do processo, tornando este método atractivo para aplicações de elevada responsabilidade, nomeadamente na área da aeronáutica.

Recentemente têm sido desenvolvidos sistemas de aquecimento de infravermelho para o processamento de termoplásticos reforçados para diversas aplicações [77] sendo indicado por Sweeney *et al.* [78] como o mais eficiente para aquecimento de compósitos de matriz termoplástica devido à disponibilidade de calor imediato – sem necessidade de pré-aquecimento. Estes sistemas são de baixo custo de aquisição e de funcionamento, não necessitando de mão-de-obra especializada na sua operação. Apresenta algumas limitações ao nível da variabilidade da complexidade do enrolamento, que provoca variações da velocidade da fita, e da alteração da largura de fita a aquecer devido à alteração das relações geométricas entre o sistema de aquecimento e a fita. Uma das vantagens destes sistemas é o reduzido tempo de resposta na alteração das condições de processamento permitindo o seu ajuste em função da velocidade [73].

2.5 Consolidação Local de Pré-Impregnados

A consolidação é um subprocesso do enrolamento filamentar que ocorre durante o processamento de termoplásticos, sendo necessária para a transformação das várias camadas de pré-impregnado em um laminado sólido. Durante a consolidação ocorrem em simultâneo ou consecutivamente diversos fenómenos, como o contacto íntimo entre camadas adjacentes, adesão entre camadas, movimentação da fibra e difusão molecular. Estes fenómenos apresentam interacções complexas e são influenciados por três parâmetros: tempo, pressão e temperatura. Depois da fase de aquecimento a viscosidade do termoplástico é relativamente baixa. A sua consolidação pode ser obtida por duas formas: Aplicação de pressão localmente, através de um rolo compressor, garantindo-se que a pressão aplicada é constante ou através do aproveitamento da tensão desenvolvida na fita pelo sistema de tensionamento, [79].

A aplicação de calor e de pressão causa deformação viscosa nos pontos de contacto, aumentando o grau de contacto íntimo e provocando aderência entre as superfícies, devido ao deslocamento das cadeias moleculares do polímero, onde segmentos de macromoléculas se difundem através da interface de contacto. Para uma boa adesão entre as superfícies, a temperatura na interface deve estar acima da temperatura de fusão, provocando fluidez da matriz, formando uma superfície lisa e uma estrutura sem vazios [66].

Dai e Ye [80] avaliaram a influência da velocidade de enrolamento na consolidação de pré-impregnados de matriz termoplástica, com aquecimento por pistola de ar quente e a consolidação rolo compressor. Estabelecem-se relações entre a velocidade de enrolamento e a temperatura de processamento, definindo a janela de processamento, mostrando os resultados que elevadas velocidades diminuem a qualidade da consolidação devido à diminuição do tempo de contacto com o rolo compressor e ao menor tempo de exposição à fonte quente.

A consolidação incompleta pode resultar na obtenção de estruturas com elevado teor de vazios, diminuindo a resistência ao corte. Outros fenómenos que podem resultar de consolidação inapropriada são empenamento e elevada concentração de tensões residuais [81]. Um dos fenómenos mais comuns ocorre durante o processo de enrolamento, em que as camadas de pré-impregnado são comprimidas provocando a desimpregnação do termoplástico fundido, gerando vazios.

Capítulo 3

Sistema de Aquecimento e Formulação Numérica

Para se proceder à implementação da solução numérica é fundamental que o domínio de estudo esteja completamente definido, com correcta definição dos fenómenos físicos envolvidos, das propriedades dos materiais envolvidos e correcta definição das condições de fronteira. Neste capítulo pretende-se estabelecer uma base robusta para a modelação deste problema.

3.1 Natureza dos Processos de Transferências de Calor Envolvidos

O aquecimento de fita pré-impregnada envolve três formas de transferência de calor de diferente natureza. Existem trocas de calor por radiação predominantes na fase de aquecimento por lâmpadas de infravermelho e transferência de calor convectiva devidas à diferença entre as temperaturas da superfície da fita e do meio ambiente. Devido ao gradiente térmico da fita gerado pelas formas de transferência de calor acima referidas existe transferência de calor por condução ao longo do interior da fita. Durante o aquecimento da fita, estes três tipos de processos de transferência de calor ocorrem conectados e de forma transiente, Figura 3.1.

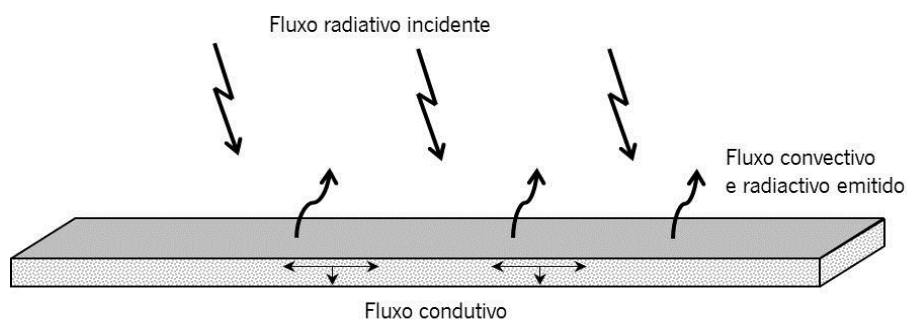


Figura 3.1 - Natureza dos processos de transferência de calor

3.1.1 Transferência de Calor por Radiação

Radiação térmica é a energia emitida pela matéria devido à sua temperatura, sendo emitida por todos os corpos, em qualquer estado da matéria. Esta energia é transportada através de ondas electromagnéticas, não necessitando da existência de um meio de propagação, sendo designada como um fenómeno volumétrico, isto é, a radiação é emitida a partir da superfície de um corpo com volume finito de matéria é representada pelo integral da emissão local no volume envolvente, Figura 3.2.

Considerando um sólido inicialmente à temperatura T_s e a sua vizinhança à temperatura T_{viz} , na presença de vácuo e com $T_s > T_{viz}$, a transferência de calor do sólido para a vizinhança até atingir o estado de equilíbrio é consequência directa da emissão de radiação térmica a partir da superfície do sólido [82].



Figura 3.2 - Troca de radiação entre um sólido e a sua vizinhança (adaptado de [82])

Na Figura 3.3 é representado o espectro eletromagnético, onde se destacam as ondas com comprimento de onda (λ) compreendido entre 0,1 e 100 μm , abrangendo parte do espectro ultravioleta, espectro visível e ainda o espectro infravermelho. Esta radiação é considerada térmica, sendo apropriada para transferência de calor [82].

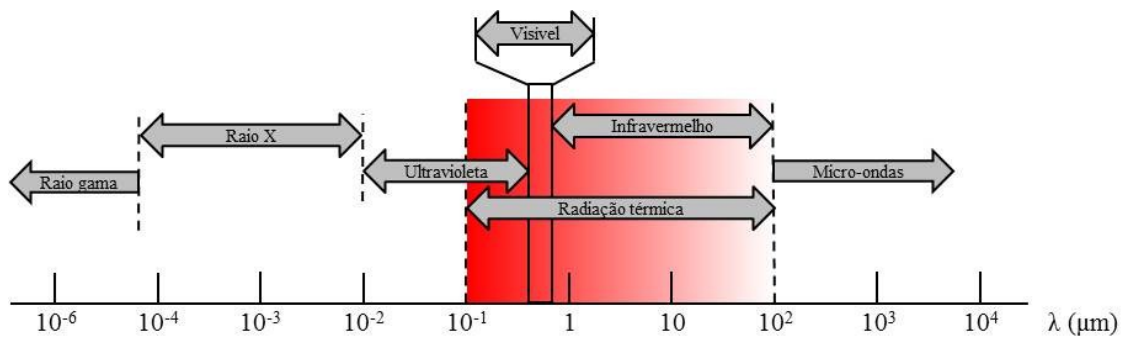


Figura 3.3 - Espectro de radiação eletromagnética

A radiação emitida por uma superfície propaga-se em todas as direcções possíveis, podendo a radiação incidente ser proveniente de diferentes direcções. A forma como uma superfície reage a uma radiação incidente está relacionada com a direcção da radiação incidente.

O conceito de poder emissivo quantifica a energia emitida por unidade de área de superfície. O poder emissivo espectral E_λ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$) é definido como a taxa de radiação emitida em todas as direcções a partir da superfície por unidade de comprimento de onda $d\lambda$ e por unidade de área da superfície, podendo expressar-se pela equação (3.1),

$$E_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.1)$$

na qual E_{λ} é baseado no fluxo de radiação emitido a partir da superfície, enquanto $I_{\lambda,e}$ é relacionado com a área projectada do fluxo de radiação.

Desta forma, define-se o poder emissivo total hemisférico E (W / m^2) como a taxa de radiação emitida por unidade de área em todos os comprimentos de onda e direcções possíveis (3.2).

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (3.2)$$

A distribuição da direcção das emissões de radiação a partir da superfície pode variar de acordo com a natureza desta. Assim, quando se tratam de superfícies difusas, ou seja, nas quais a intensidade de radiação emitida é independente da direcção, $I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = I_{\lambda,e}(\lambda)$. Substituindo $I_{\lambda,e}$ na equação (3.1) e integrando, obtém-se:

$$E_{\lambda}(\lambda) = \pi I_{\lambda,e}(\lambda) \quad (3.3)$$

Quando são descritas características radiativas de superfícies reais, é útil introduzir o conceito de *corpo negro*, que se caracteriza como uma superfície ideal com as seguintes propriedades:

- Um *corpo negro* absorve toda a radiação incidente, independentemente do comprimento de onda e direcção.
- Para determinada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia que um *corpo negro*.
- Apesar da radiação emitida por um *corpo negro* ser função do comprimento de onda e da temperatura, é independente da direcção, ou seja, o *corpo negro* é um emissor difusivo.

A distribuição espectral da emissão de um *corpo negro* foi determinada por Planck, podendo representar-se pela equação (3.4).

$$I_{\lambda,b} = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{e^{k_B\lambda T} - 1} \quad (3.4)$$

Onde h representa a constante de Planck, $6,6255 \times 10^{-32}$ J. s, k_B representa a constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J. K⁻¹, c representa a velocidade de deslocamento da luz no vazio

e T representa a temperatura absoluta do *corpo negro*. Como um *corpo negro* é considerado um emissor difusivo, rege-se pela equação (3.3), representando-se o seu poder emissivo espectral pela equação (3.5).

$$E_{\lambda,b}(\lambda) = \pi I_{\lambda,b} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (3.5)$$

Onde $C_1 = 2\pi hc^2 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ e $C_2 = (hc/k) = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.

Ao substituir a distribuição de Planck, equação (3.5), na equação (3.2), o poder emissivo total de um *corpo negro*, E_b , pode expressar-se como,

$$E_b = \int_0^\infty \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (3.6)$$

Integrando, obtém-se,

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3.7)$$

onde a constante de *Stefan-Boltzmann*, que depende de C_1 e de C_2 , tem o valor numérico de,

$$\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$$

Esta simplificação, denominada lei de *Stefan-Boltzmann*, permitindo o cálculo da quantidade de energia emitida em todas as direcções e comprimentos de onda de um *corpo negro* a partir da sua temperatura.

Uma das características importantes da emissão de um *corpo negro*, Figura 3.4, é a evolução da radiação emitida por um *corpo negro* em função do comprimento de onda para diversas temperaturas, lei de *Wien*.

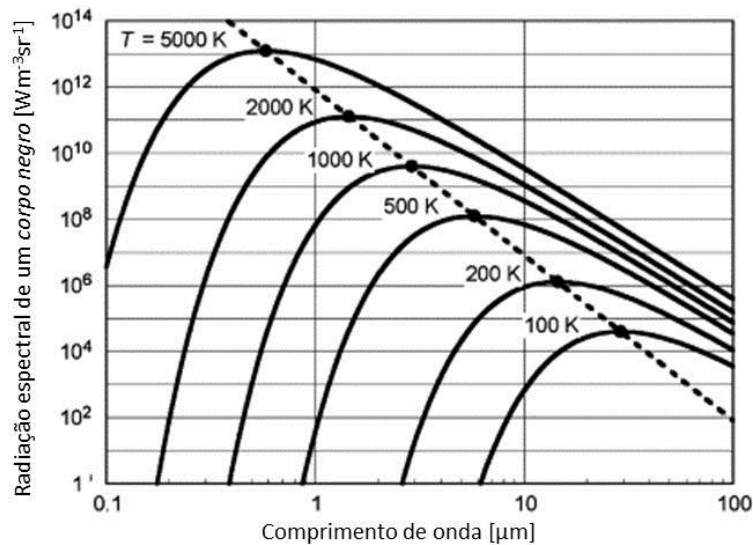


Figura 3.4 – Radiação espectral de um corpo negro – Lei de Planck [83]

Tendo introduzido a noção de *corpo negro* como superfície com comportamento ideal, é importante introduzir o comportamento de superfícies *reais*, que apresentam características como emissividade, absorvidade, reflectividade e transmissividade. A emissividade define-se como a razão entre a radiação emitida por uma superfície real e a radiação emitida por um *corpo negro* à mesma temperatura. A emissividade de uma superfície pode assumir diferentes valores em função do comprimento de onda e da direcção, apresentando valores $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Quanto às superfícies receptoras, na generalidade das situações o fluxo incidente pode ser decomposto em três partes, Figura 3.15:

- Radiação reflectiva, cujo factor de reflexão é ρ_λ , compreendido entre 0 e 1,
- Radiação absorvida, cujo factor de reflexão é α_λ , compreendido entre 0 e 1,
- Radiação transmitida, caracterizada por um fluxo de transmissão τ_λ .

A transferência de calor por radiação apresenta enorme dependência da geometria e orientação das superfícies, assim como das suas propriedades radiativas e temperaturas. Desta forma, é fundamental introduzir o conceito de factor de forma, que representa a fracção de energia emitida por uma superfície i que incide numa superfície j . Para desenvolver a expressão geral para F_{ij} , consideram-se arbitrariamente duas superfícies A_i e A_j , Figura 3.5.

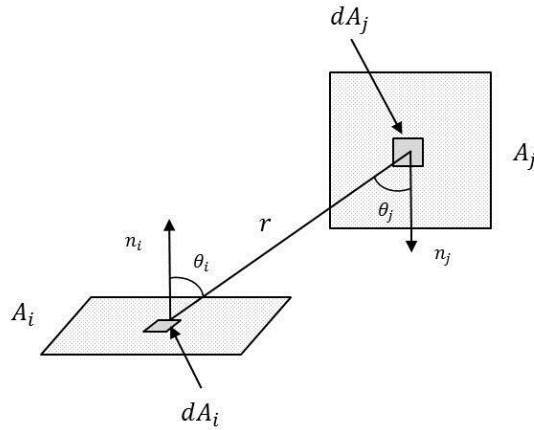


Figura 3.5 – Posições relativas da superfície emissora de radiação (A_i) e a superfície receptora (A_j)

As áreas elementares dA_i e dA_j são conectadas por uma linha r , com a qual formam os ângulos θ_i e θ_j , respectivamente com as rectas normais. A expressão geral do factor de forma entre duas superfícies arbitrárias pode representar-se pela equação (3.8), podendo ser utilizada para determinar o factor de forma em superfícies difusas [82].

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{(\cos \theta_i \times \cos \theta_j)}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (3.8)$$

Um dos aspectos relevantes do factor de forma é determinado pela resolução do integral da equação (3.8), obtêm-se,

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.9)$$

A equação (3.9) define o princípio da reciprocidade do factor de forma, importante na determinação de um factor de forma a partir de outro que seja conhecido.

Considerando que a radiação emitida da superfície i e incidente na superfície j , que está dividida em n elementos, pode afirmar-se que

$$F_{i(j)} = \sum_{k=1}^n F_{ik} \quad (3.10)$$

em que (j) equivale a $(1, 2, \dots, k, \dots, n)$. Desta forma, a expressão (3.10) define que a radiação que atinge uma superfície composta por vários elementos é o somatório da radiação que atinge cada um dos elementos. Do mesmo modo que a expressão anterior é aplicada a

superfícies receptoras, aplicando o princípio da reciprocidade, ela pode ser aplicada em superfícies emissoras divididas em áreas elementares. Multiplicando a equação (3.10) por A_i e aplicando o princípio da reciprocidade, equação (3.9), obtêm-se,

$$A_i F_{(j)i} = \sum_{k=1}^n A_k F_{ki} \quad (3.11)$$

A equação (3.11) pode ser aplicada em casos cuja superfície é composta por várias partes, Figura 3.6 [82].

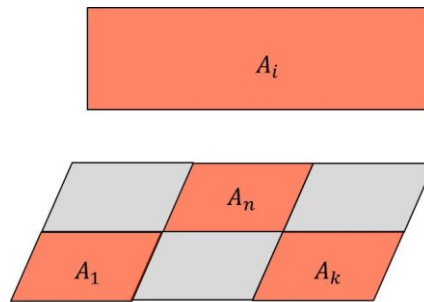


Figura 3.6 - Exemplo de uma superfície composta por várias áreas (adaptado de [82])

Leuenberger e Person [84] compilaram vários factores de forma para modelações cilíndricas, sendo o caso em estudo descrito pela equação (3.12), que permite calcular a densidade de potência emitida por um cilindro que incide num elemento diferencial plano.

$$F_{d1-2} = P \frac{s}{B} - \frac{S}{2B\pi} \left\{ \cos \left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right) - Y \frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)} \right) - \sqrt{C} \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 4C}} \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)} \right) + H \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{B}} \right) \right\} \quad (3.12)$$

com,

$$A = X^2 + Y^2; B = S^2 + X^2; C = (H - Y)^2 \quad (3.13)$$

$$S = \frac{s}{r}; X = \frac{x}{r}; Y = \frac{y}{r}; H = \frac{h}{r}$$

Sendo descrito pela Figura 3.7.

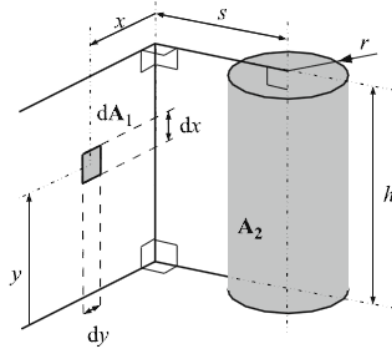


Figura 3.7 - Variáveis envolvidas na determinação do factor de forma [84]

A equação (3.14) governa a transferência de calor por radiação.

$$q_{rad} = \varepsilon \alpha \sigma F_{ij} (T_{rad}^4 - T_s^4) \quad (3.14)$$

em que, ε é a emissividade da fonte, α a absorvidade da superfície da fita, σ representa a constante de Stefan Boltzman, F_{ij} é o factor de forma entre a lâmpada e a superfície, T_r é a temperatura da fonte radiativa e T_s é a temperatura da superfície receptora.

No entanto, existem muitos casos para os quais não é conveniente a aplicação da equação (3.14), devido às dificuldades em lidar com os termos de quarto grau. Incropera *et al.* [82] e Ketkar [85] afirmam ser mais conveniente expressar o fluxo de calor radiativo da seguinte forma:

$$q_{rad} = h_{rad} (T_{rad} - T_s) \quad (3.15)$$

em que h_{rad} representa o coeficiente de transmissão de calor por radiação, sendo

$$h_{rad} = \varepsilon \alpha \sigma F_{ij} (T_{rad} + T_s) (T_{rad}^2 + T_s^2) \quad (3.16)$$

onde h_{rad} é o coeficiente de transferência de calor de radiação, podendo expressar-se o fluxo de calor por radiação através da equação (3.15). Assim, o fluxo de calor por radiação é expresso de forma semelhante ao fluxo de calor por convecção, sendo linearizado tornando o fluxo de calor proporcional à diferença entre temperaturas, equação (3.15), e não entre a diferença de temperaturas à quarta potência, equação (3.14).

3.1.2 Transferência de Calor por Convecção

A diferença de temperatura entre a fita e o ar envolvente origina o fenómeno de transferência de calor convectivo. Este fenómeno ocorre na vizinhança da superfície da fita, numa área restrita designada por camada limite. O ar em movimento transporta calor, podendo o seu movimento ser gerado por gradientes térmicos – convecção natural – ou através de um sistema de ventilação – convecção forçada. O escoamento aproxima-se de uma placa à velocidade U_∞ , sendo que ao atingir a placa, a camada de fluido adjacente à superfície da placa assume velocidade nula, gerando-se um perfil de velocidades e um gradiente de temperatura nas camadas adjacentes.

No presente estudo, o objectivo é estimar o calor perdido através da superfície da fita, animada de movimento linear, através da determinação dos coeficientes de transferência de calor entre a superfície da fita e o ar ambiente, sendo verificável que a taxa de transferência de calor é maior com o aumento da velocidade do fluido.

O fluxo de calor local convectivo pode ser expresso pela equação (3.17).

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3.17)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção local, T_s é a temperatura da superfície, e T_∞ é a temperatura do ar. Devido à possibilidade das condições de escoamento se alterarem de ponto para ponto ao longo da superfície, o fluxo de calor convectivo total, q pode ser obtido integrando o fluxo de calor local em ordem à totalidade da superfície, equação (3.18).

$$q = \int_{A_s} q'' dA_s \quad (3.18)$$

Definindo \bar{h} como coeficiente de transferência de calor por convecção médio para a totalidade da superfície, o fluxo total de transferência de calor por convecção pode ser descrito como, equação (3.19),

$$q = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty) \quad (3.19)$$

Um dos primeiros passos para o tratamento de qualquer problema de convecção é determinar se o escoamento na camada limite é do tipo laminar ou turbulento. Existem grandes diferenças entre ambos os tipos de escoamento. No escoamento laminar, o movimento do fluido é

altamente ordenado, sendo praticamente possível observar a direcção das linhas traçadas por cada partícula em movimento. Em contraste, o escoamento turbulento é altamente irregular e caracterizado por variações de velocidade. Para calcular o tipo de escoamento, frequentemente assume-se que existe uma zona de transição, localizada no ponto x_c , determinado pelo número de *Reynolds*,

$$Re_x = \frac{U_\infty x}{\nu} \quad (3.20)$$

onde, x [m] é o comprimento característico da geometria, U_∞ [m/s] é a velocidade na fronteira livre e ν [m²/s] representa a viscosidade cinemática. Designa-se como número de *Reynolds* crítico, o número a partir do qual se inicia a transição de escoamento laminar para turbulento sobre uma placa plana e varia entre 10^5 até 3×10^6 , dependendo da rugosidade da superfície e do nível de turbulência, sendo o seu valor para o caso de uma placa plana de 5×10^5 .

O coeficiente de transferência de calor convectivo varia ao longo da superfície, em função do gradiente térmico existente em cada ponto, determinando a transferência de calor entre o fluido e a superfície sólida. A espessura relativa das camadas limite térmica e de velocidade é representada pelo número de *Prandtl*, Pr , um parâmetro adimensional, que representa a relação entre a difusividade térmica e a viscosidade cinemática e se define como:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.21)$$

Onde α [m²/s] é a difusividade térmica e ν [m²/s] representa a viscosidade cinemática.

Um dos problemas no tratamento de problemas escoamento de um fluido sobre uma placa plana é a determinação do coeficiente de transferência de calor convectivo, h . Este coeficiente pode determinar-se através do número de *Nusselt*, que representa a adimensionalização do coeficiente de transferência de calor por convecção, podendo expressar-se o número de *Nusselt* médio em função dos números de *Reynolds*, Re , e de *Prandtl*, Pr .

$$Nu = \frac{hL}{k} = C Re_L^m Pr^n \quad (3.22)$$

em que C , m e n são constantes e L representa o comprimento da placa na direcção do escoamento [82].

3.1.3 Transferência de Calor por Condução

A transferência de calor por condução é relativa ao transporte de energia num meio devido a um gradiente térmico, ocorrendo na direcção da temperatura mais alta para a mais baixa, Figura 3.8, podendo descrever-se o fluxo de calor pela equação (3.23),

$$\frac{Q}{A} \propto \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.23)$$

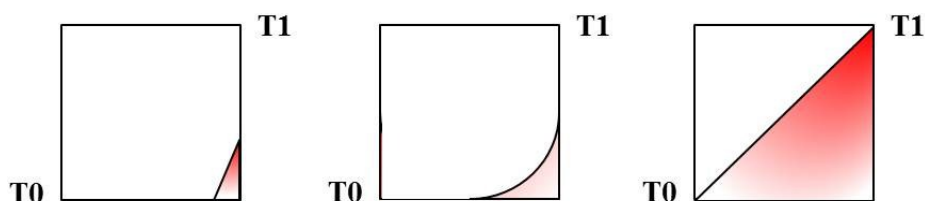


Figura 3.8 - Evolução do gradiente térmico num corpo ao longo do tempo

com $\Delta T = T_1 - T_0$ e a constante de proporcionalidade da equação (3.23) a representar a condutividade térmica do material, k , obtendo-se a equação (3.24) conhecida como *Lei de Fourier*.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.24)$$

Em que q é a taxa de transferência de calor, k representa a condutividade térmica, e dT/dx representa o gradiente térmico [82].

3.2 Descrição do Sistema de Aquecimento

A reacção de aquecimento de um por radiação material depende fortemente da fonte radiativa. A radiação de onda curta apresenta elevado coeficiente de penetração, devendo os seus parâmetros estar afinados de acordo com o material a aquecer. No caso de aquecimento por onda média e onda longa são menos sensíveis ao material a aquecer, podendo ser utilizados universalmente. A utilização de lâmpadas de infravermelhos apresenta diversas vantagens abaixo enunciadas [86].

- Reduzido tempo de resposta, atingindo a potência máxima após <1s de ligada;

- Possibilidade de regulação da potência emitida por lâmpadas de 0% a 100% através de um potenciômetro;
- A radiação das lâmpadas pode ser focalizada para determinada área com recurso a reflectores;
- As lâmpadas de infravermelhos apresentam-se como sendo uma fonte de calor muito compacta.

Quanto à configuração do sistema de aquecimento, este pode ser unifacial ou bifacial, podendo em cada face existir mais que uma lâmpada. Relativamente ao número de faces aquecidas Maier e Calafut [75] consideram que para espessuras de fita inferiores a 1 mm é aceitável a utilização de sistemas de aquecimento unifacial. Também num estudo realizado por Sweeney *et al.* [78] conclui-se que no aquecimento unifacial de compósito com espessura até 3 mm os gradientes de temperatura formados ao longo da espessura são desprezáveis, no entanto o mesmo estudo refere que são atingidas maiores velocidades de processamento com aquecimento bifacial, reduzindo o ciclo de processamento.

Desta forma, o aquecimento da fita em estudo, espessura de 0,44 mm, (as propriedades da fita são descritas na secção 3.3) não apresentaria problemas de geração de gradientes térmicos elevados ao longo da espessura. No entanto, a implementação de um sistema de aquecimento bifacial é justificável devido a proporcionar ciclos de aquecimento mais curtos.

3.2.1 Lâmpadas de Halogéneo

No estudo são utilizadas lâmpadas de infravermelho, onda média, disponibilizadas pela empresa SROQUE – Máquinas e Tecnologia Laser S.A., referência ELAMP.64221227. Estas lâmpadas foram seleccionadas devido à facilidade de aquisição com vista ao projecto e implementação futura de uma bancada experimental. Na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2 são apresentadas algumas das características das lâmpadas. No Apêndice A, as propriedades das lâmpadas são abordadas em maior detalhe.

Tabela 3.1 – Características da lâmpada utilizada no estudo

Temperatura do filamento	1500 K
--------------------------	--------

Potência	1200 W
Voltagem	220 V

Tabela 3.2 - Dimensões dos elementos constituintes da lâmpada em tungstênio

Elemento	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
Filamento de tungstênio	470	2 (cilindro equivalente)
Involucro em quartzo	505	10,5

As lâmpadas de halógeno podem decompor-se em quatro partes:

- Filamento de tungstênio enrolado segundo um padrão, cuja função é transformar a potência eléctrica em calor dissipado através do meio envolvente. A temperatura do sobe filamento em função da potência eléctrica aplicada aos seus terminais, tornando-se assim numa fonte de radiação;
- Invólucro em quartzo com função de isolar termicamente e fisicamente o filamento de tungstênio e de prevenir a sua oxidação. O quartzo não absorve radiação no espectro infravermelho;
- Árgon, contido no invólucro em quartzo que limita a evaporação do tungstênio a elevadas temperaturas;
- Halogéneo, que misturado em pequenas quantidades com o árgon, promove a formação de um depósito nas partes mais quentes do filamento a partir da sublimação do tungstênio.

As lâmpadas de infravermelhos deitam radiação constante, sendo classificadas de acordo com o comprimento de onda que emitem a maior parte da radiação. Este pode ser determinado pela temperatura superficial da bobine e de acordo com a lei deslocamento de Wien. Quanto maior a temperatura superficial, maior proporção de comprimento de onda curto é emitido. Os comprimentos de onda podem distinguir-se entre [86]:

- Onda curta, com comprimentos de onda compreendidos entre 0,78 e 1,4 μm ;
- Onda média, com comprimentos de onda compreendidos entre 1,4 e 3 μm ;
- Onda longa, com comprimentos de onda compreendidos entre 3 e 1000 μm .

A diminuição da potência eléctrica conduz à diminuição da temperatura do filamento, deslocando o espectro de emissão para comprimentos de onda superiores. Este fenómeno pode desempenhar um importante papel no aquecimento por radiação infravermelha, em função do espectro de absorção do material a aquecer [87].

De acordo com a lei de Planck, pode determinar-se a radiação espectral em função da temperatura de um *corpo negro*. Isto permite obter uma aproximação do espectro de emissão das lâmpadas, pois a temperatura do filamento está directamente relacionada com os comprimentos de onda que emite. Assim, de acordo com a Figura 3.4, observa-se que a distribuição da radiação espectral de um corpo negro à temperatura da lâmpada, 1500 K, se encontra definida entre curvas da radiação espectral para 2000 K e 1000 K. A emissão espectral de um corpo negro a 1500 K abrange com reduzida intensidade parte do espectro visível, sendo maior a intensidade nas zonas de onda curta e média do espectro infravermelho e diminuindo à medida que penetra na zona de ondas de radiação infravermelha longínqua.

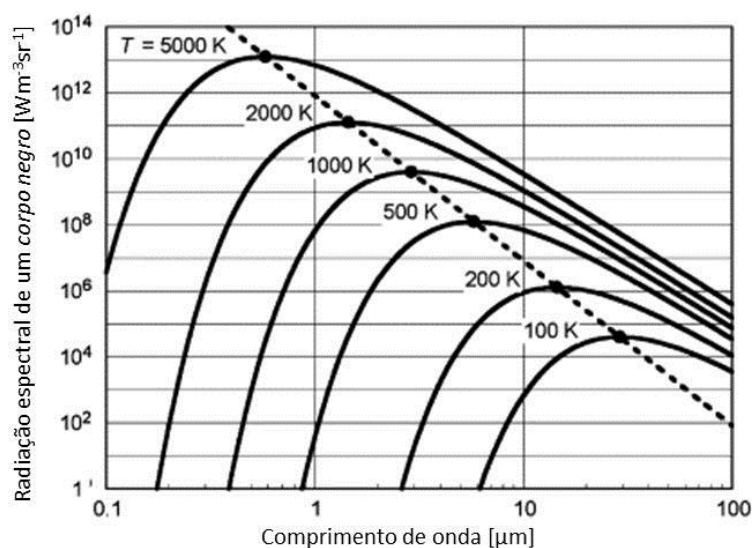


Figura 3.4 – Radiação espectral de um corpo negro – Lei de Planck [83]

No entanto, um objecto real não se comporta como um *corpo negro*. A radiação emitida por um objecto real é uma fracção da radiação emitida por um corpo negro. A emissividade de um material determina a fracção de energia emitida por um objecto real relativamente a um *corpo negro*. No trabalho desenvolvido por Forsythe e Worthing [88] é estabelecida a emissividade

espectral do tungstênio em função da temperatura. Na Figura 3.9 mostra-se a emissividade para a temperatura de 1300 K, aproximada à temperatura do filamento da lâmpada em estudo.

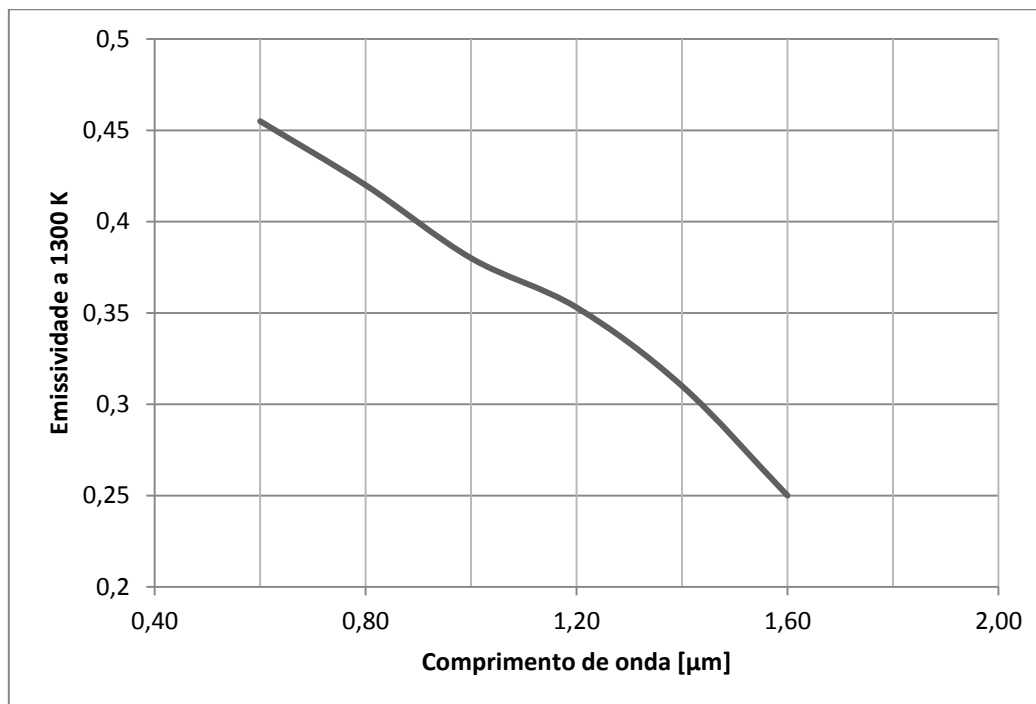


Figura 3.9 - Emissividade espectral do tungstênio (adaptado de [88])

Pettersson e Stenström [89] consideram que a espiral de tungstênio de uma lâmpada de infravermelhos é tão densa que pode ser aproximada a um cilindro. Desta forma, a fonte radiativa, filamento de tungstênio enrolando segundo um padrão complexo é tratada como cilindro equivalente de 2 mm de diâmetro.

Na Figura 3.10 são caracterizados os espectros de emissão, absorção e transmissão do quartzo, verificando-se que a transmitância entre 0,3 e 3 μm está compreendida entre 0,93 e 0,95. Assim, quando o filamento interno emite radiação infravermelha esta é transmitida através do quartzo de forma praticamente instantânea, possibilitando tempos de resposta muito baixos.

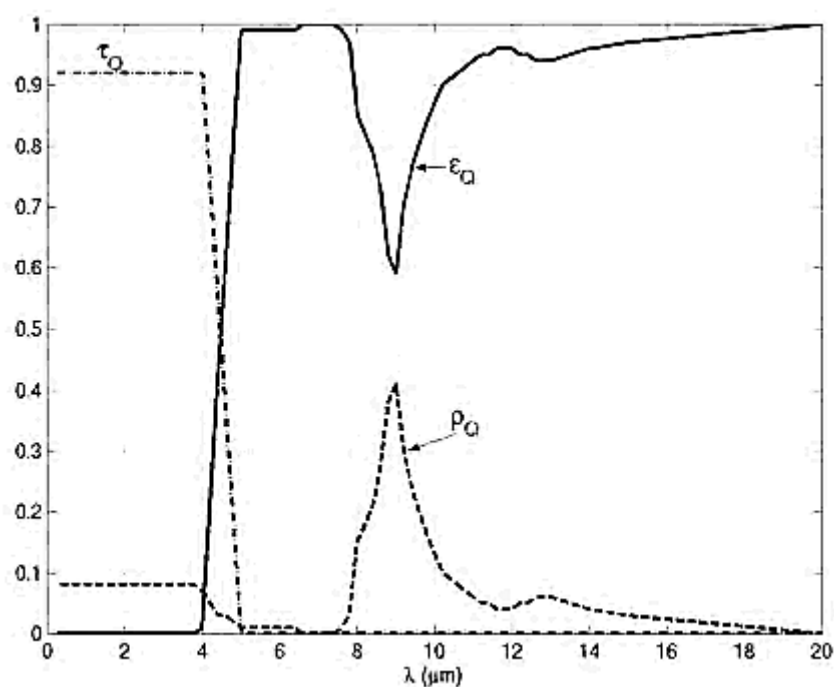


Figura 3.10 - Emissividade, absorptividade e transmitância do quartzo [90]

À semelhança dos aquecedores tubulares, os aquecedores em quartzo emitem radiação em 360° em torno do filamento emissor, sendo utilizada cerca de 50% dessa radiação para aquecimento de uma superfície abaixo do aquecedor. A aplicação de reflectores para recapturar e redireccionar a radiação torna os aquecedores em quartzo mais eficientes [91], mostrando-se no trabalho desenvolvido por Turner *et al.* [92] que a utilização de reflectores parabólicos em lâmpadas de infravermelho aumenta a eficiência do processo em cerca de 50%. No trabalho desenvolvido por S. Monteix citado por Champin [90] sobre a utilização de reflectores em alumínio, o aumento da eficiência do processo varia entre 68 a 80%.

3.3 Propriedades Termofísicas e Termo-ópticas da Fita Pré-Impregnada

Para modelar a etapa de aquecimento é fundamental que sejam conhecidas as propriedades termofísicas e termo-ópticas. Na etapa de aquecimento a temperatura da fita irá subir desde da temperatura ambiente até à temperatura desejada, acima da transição vítrea. A evolução da temperatura durante esta fase é um processo relativamente rápido, tornando-se por isso fundamental conhecer a variação das propriedades termofísicas em função da temperatura.

A fita pré-impregnada em estudo é desenvolvida no PIEP, sendo constituída por matriz termoplástica em polipropileno e reforçada com fibras contínuas de vidro do tipo E, PP/FV.

Na Tabela 3.3 apresentam-se as massas volúmicas e fracções volumétricas. As fracções volúmicas são calculadas a partir das fracções mássicas da fita em estudo.

Tabela 3.3 - Características da fita

Fracção volúmica do PP	65,4%
Fracção volúmica de fibra de vidro	34,6%
Massa volúmica do PP	900 kg/m^3
Massa de fibra de vidro por km de fita	9600 g/km

As dimensões de largura e espessura da fita são as apresentadas na Figura 3.11.

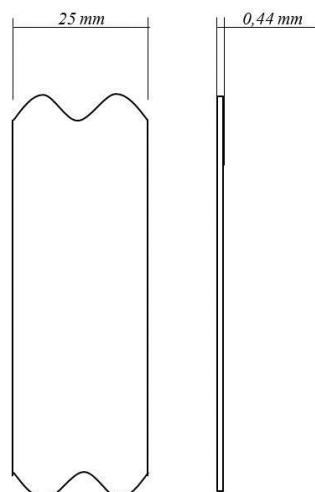


Figura 3.11 - Dimensões de largura e espessura da fita

3.3.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica de um compósito de matriz polimérica é dependente das propriedades da matriz, das fibras de reforço. Em casos cujas fibras de reforço apresentam condutividade térmica homogénea, k_f , embebidas numa matriz termoplástica de condutividade térmica k_m , considerando as fracções volúmicas de fibra e da matriz, a condutividade térmica do compósito, no sentido transversal à disposição das fibras pode ser determinada pela equação (3.25),

$$k_c = \frac{1}{\frac{X_{vm}}{k_m} + \frac{X_{vf}}{k_f}} \quad (3.25)$$

onde k_c representa a condutividade térmica do compósito, k_m e k_f representam, respectivamente, a condutividade térmica da matriz termoplástica e da fibra de vidro. X_{vm} e X_{vf} representam respectivamente a fracção volúmica da matriz e a fracção volúmica da fibra [16, 93, 94]. A equação (3.25) calcula o valor inferior da condutividade térmica na direcção transversal á direcção das fibras. Também existem outros modelos para determinação do limite superior da condutividade térmica transversal em compósitos [93], no entanto a sua aplicação e difusão bibliográfica são pouco significativas.

Na Figura 3.12 apresenta-se o gráfico de variação da condutividade térmica do PP em função da temperatura.

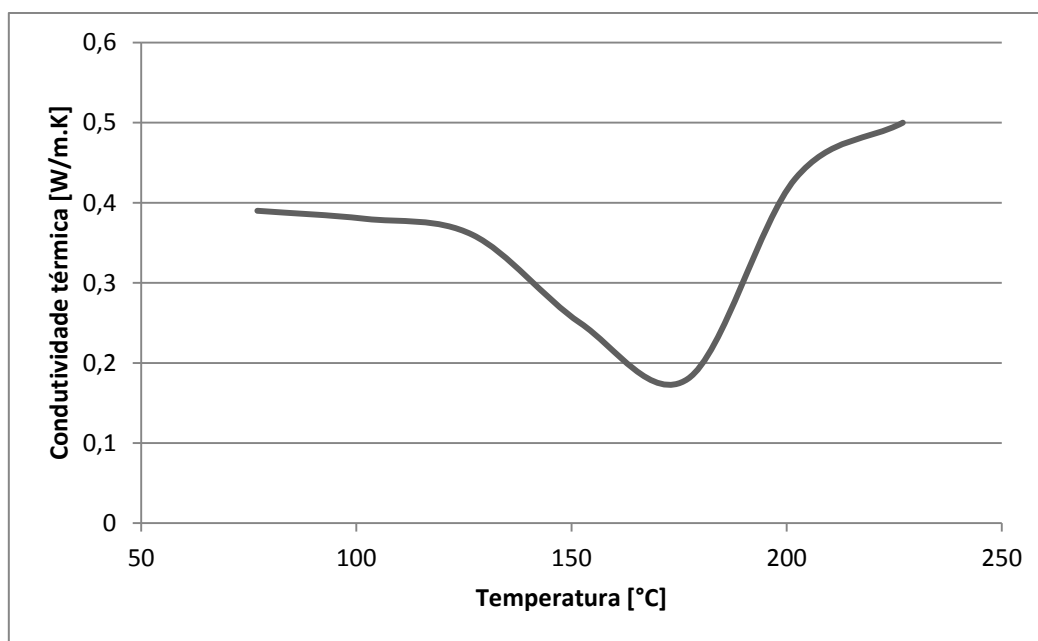


Figura 3.12 - Variação da condutividade térmica do PP em função da temperatura

O valor da condutividade térmica da fibra de vidro tipo E é apresentado na Tabela 3.4. Neste caso não foi possível recolher bibliograficamente informação relativa à dependência da condutividade relativamente à temperatura.

Tabela 3.4 - Propriedades térmicas da fibra de vidro E [93]

Condutividade térmica	1. 40 W/m.K
-----------------------	-------------

3.3.2 Calor Específico

O calor específico a pressão constante, C_p , é uma propriedade termodinâmica, definida como a variação da entalpia do polímero com a temperatura, a pressão constante:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (3.26)$$

O valor do calor específico num material compósito pode ser calculado por,

$$C_{pc} = X_{mm}C_{pm} + (1 - X_{mf})C_{pf} \quad (3.27)$$

onde C_{pc} representa o calor específico do compósito, C_{pm} e C_{pf} representam, respectivamente, o calor específico da matriz termoplástica e da fibra de vidro. X_{mm} e X_{mf} representam respectivamente a fracção mássica da matriz e a fracção volúmica da fibra [16].

Na Figura 3.13 representa-se a variação do calor específico do PP em função da temperatura.

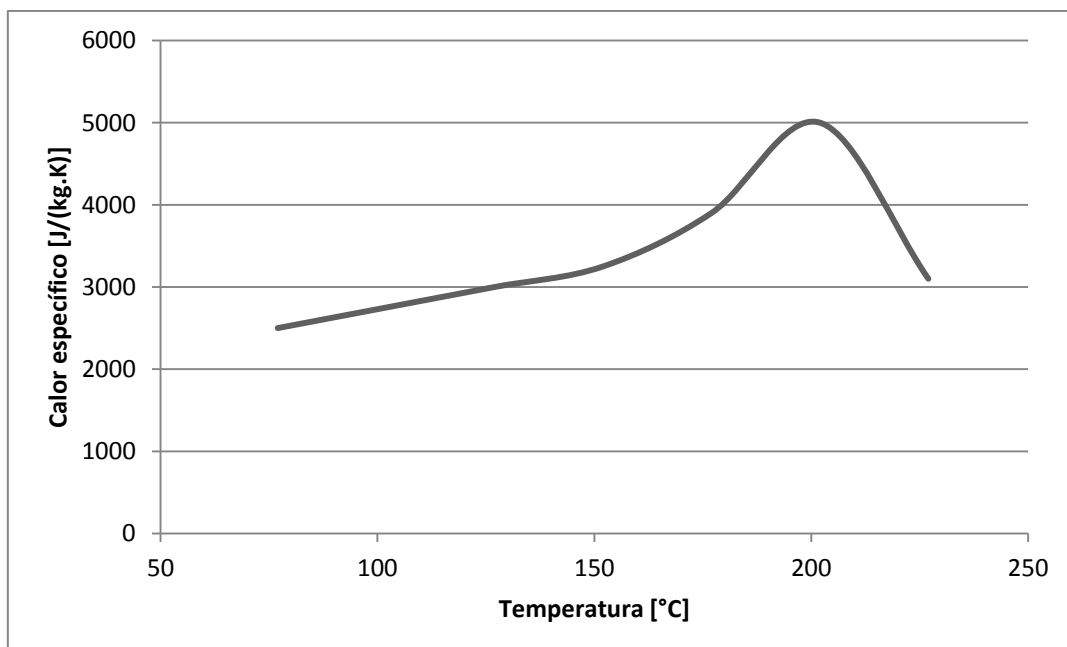


Figura 3.13 - Variação do calor específico do PP em função da temperatura ([75])

Na Figura 3.14 mostra-se a variação do calor específico da fibra de vidro tipo E em função da temperatura.

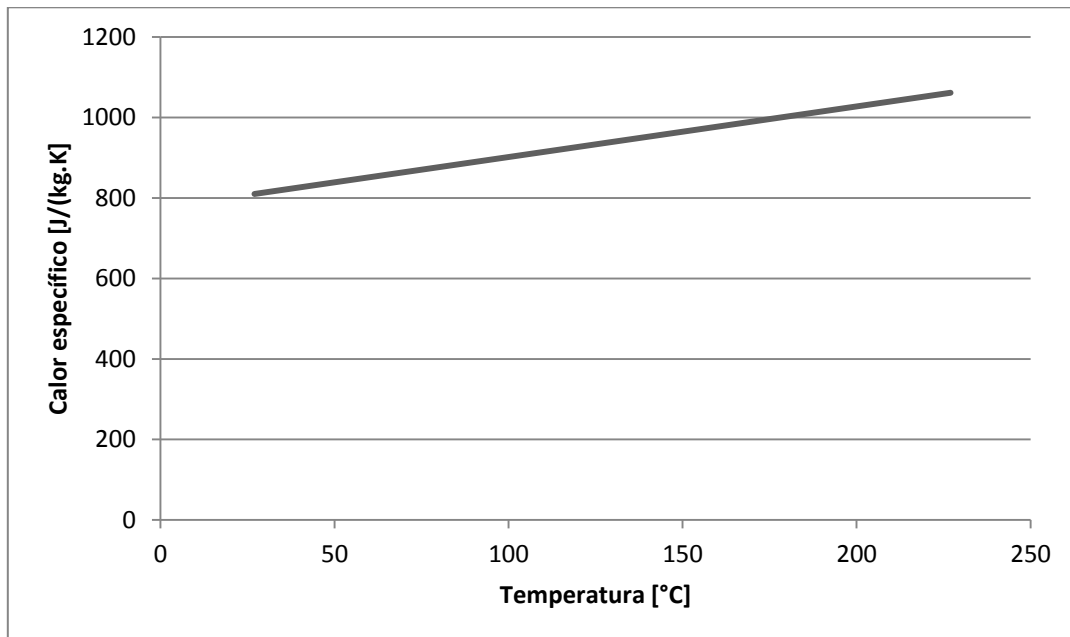


Figura 3.14 - Variação do calor específico da fibra de vidro em função da temperatura [95]

3.3.3 Propriedades Ópticas

Os parâmetros ópticos permitem caracterizar a reflectância, a transmitância e a absorvância do material em estudo em função do comprimento de onda da radiação incidente, sendo fundamental para o dimensionamento do sistema de aquecimento conhecer as diferentes frações energéticas, cujo somatório é representado pela equação (3.28).

$$\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (3.28)$$

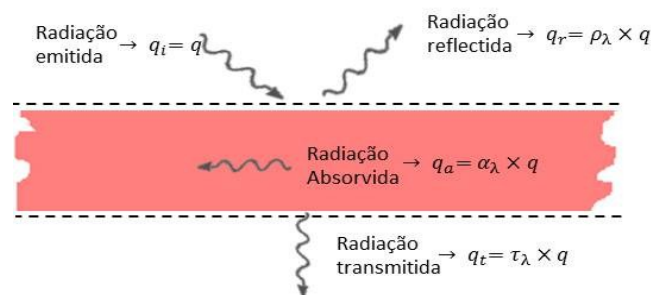


Figura 3.15 - Absorção, reflexão e transmissão em meio semitransparente

A absorvidade determina a fracção de radiação absorvida pela superfície receptora, sendo independente da temperatura da superfície e caracteriza a percentagem da energia que provoca o aquecimento do material. É baseada na estimulação das moléculas conduzindo ao aumento da temperatura [86]. A transmissividade representa a fracção da energia incidente que é transmitida através do material. Por último, a reflectividade é a propriedade que determina a fracção de radiação incidente reflectida pela superfície. Neste caso, as superfícies podem definir-se como *difusas* e *especulares*, de acordo com a forma que reflectem a radiação. A reflexão difusa ocorre independentemente da direcção da radiação incidente, e a intensidade da radiação reflectida é independente do ângulo de reflexão. Na reflexão especular, a radiação é reflectida com o mesmo ângulo com que incide [82], Figura 3.16.

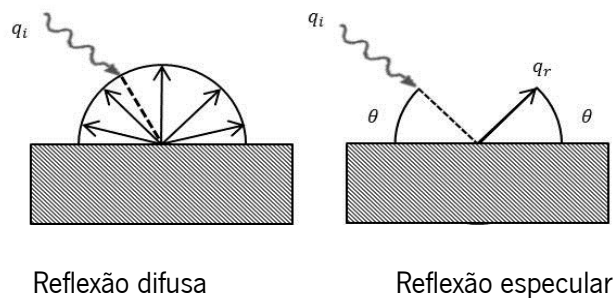


Figura 3.16 – Esquema de diferentes tipos de reflexão da radiação incidente [adaptado de [82]]

No sentido de determinar as propriedades ópticas da fita pré-impregnada, em PP e fibra de viro, realizou-se um estudo de uma amostra da fita em estudo para determinação da transmitância, reflectância difusa e reflectância especular num espectrofotómetro Shimadzu UV 3101PC, no espectro compreendido entre 700 e 2500 nm, que cobre as zonas de maior intensidade de radiação do espectro de emissão das lâmpadas de infravermelho utilizadas no estudo.

O espectrofotómetro permite a obtenção dos valores de transmitância, reflectância especular e reflectância difusa da amostra. A reflectância total é representada pelo somatório das reflectâncias parciais. Conhecidos estes valores, pode determinar-se a absorvância espectral da amostra a partir da equação (3.28).

Na Figura 3.3 apresentam-se as curvas relativas às diferentes fracções da radiação incidente na fita.

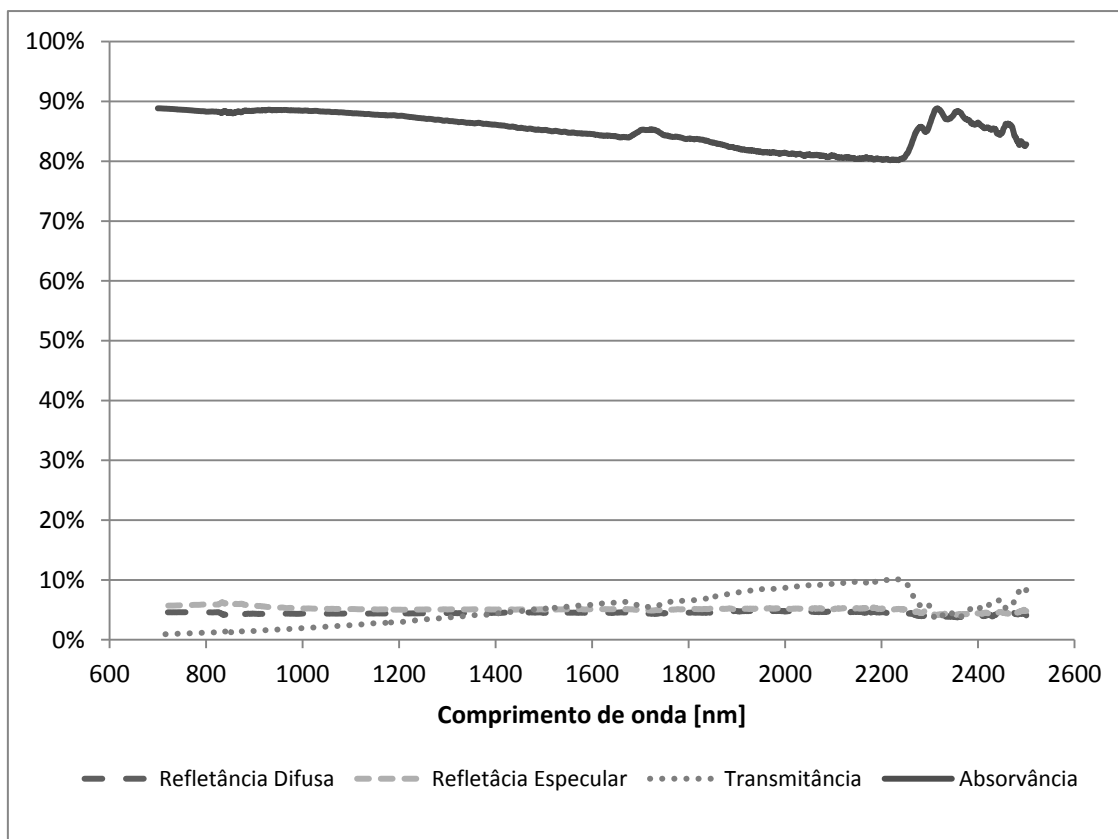


Figura 3.17 - Características espectrais da fita em estudo PP/FV

Observa-se que os valores da refletância difusa e especular apresentam pouca dependência do comprimento de onda ao longo do espectro analisado, com valor médio de 5%. Os valores de transmitância são muito baixos na zona do espectro visível e de transição para o infravermelho, aumentando gradualmente até ao comprimento de onda de 2300 nm, onde atinge 8% de transmitância. Em função destes valores, a absorvância é maior na zona de transição do espectro visível para o infravermelho, devido à reduzida transmitância, atingindo o valor máximo de 89%. Ao longo do espectro a absorvância baixa progressivamente até ao mínimo de 83%, para 2300 nm de comprimento de onda. O valor médio de absorvância para o espectro analisado é 85%.

3.4 Dimensionamento do Sistema de Aquecimento

A quantidade de energia necessária para aquecer uma massa de fita, desde da temperatura ambiente, T_{∞} , até a uma temperatura desejada, T_d , pode calcular-se pela seguinte equação:

$$Q = \int_{T_{\infty}}^{T_d} c_p(T) dT \quad (3.29)$$

em que $c_p(T)$ é o calor específico em função da temperatura.

No final do processo de aquecimento a fita a temperatura da fita deve estar dentro do intervalo de temperaturas de processamento, 190 a 225 °C para evitar a degradação da matriz termoplástica. Considerando que a fita se encontra inicialmente à temperatura ambiente, 20 °C, a quantidade de energia para aquecer 1 cm² de fita é 23,86 J.

Para determinar a potência necessária para o aquecimento é considerado o tempo de passagem da fita pelo interior do sistema de aquecimento, calculado em função da velocidade e do comprimento útil de aquecimento das lâmpadas, 470 mm. Assim, determinar-se a potência útil de aquecimento, isto é, a potência que é necessário fornecer considerando 100% de eficiência no processo, equação (3.30).

$$P_{\text{útil}}[W] = \frac{Q[J]}{t[s]} \quad (3.30)$$

No entanto, nenhum processo de aquecimento é 100% eficiente. Independentemente da natureza do material a aquecer, qualquer sistema de aquecimento necessita de fornecer mais energia relativamente à quantidade de energia calculada teoricamente [53]. Assim, para determinação da potência eléctrica a instalar em função da velocidade é necessário considerar a absorvância média do material a aquecer e a emissividade do filamento de tungsténio, Figura 3.17 e Figura 3.9 respectivamente.

Conhecidos estes valores, pode relacionar-se a potência que é necessário fornecer à fita em função da velocidade de aquecimento e do número de lâmpadas instaladas, Figura 3.18.

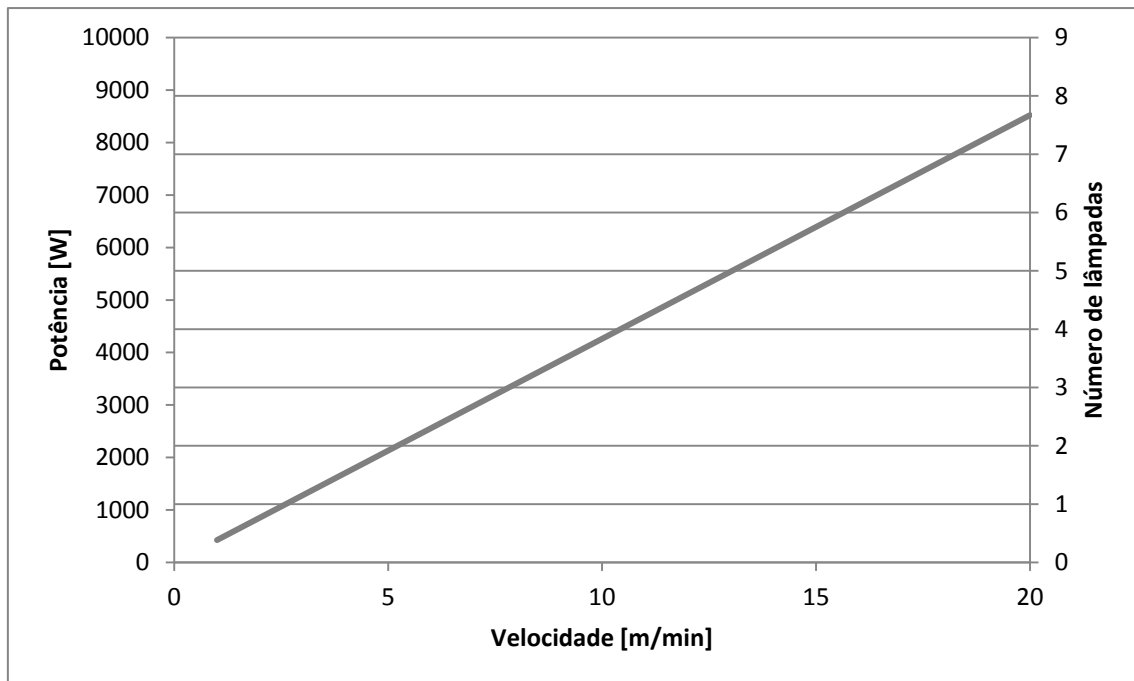


Figura 3.18- Relação entre potência fornecida e velocidade da fita

Observa-se que a instalação de um sistema de aquecimento com 2 lâmpadas permite velocidades de processamento na ordem dos 5 m/min. Esta configuração implica a instalação de um sistema de aquecimento com uma lâmpada em cada face da fita com 550 mm de comprimento total, Figura 3.19.

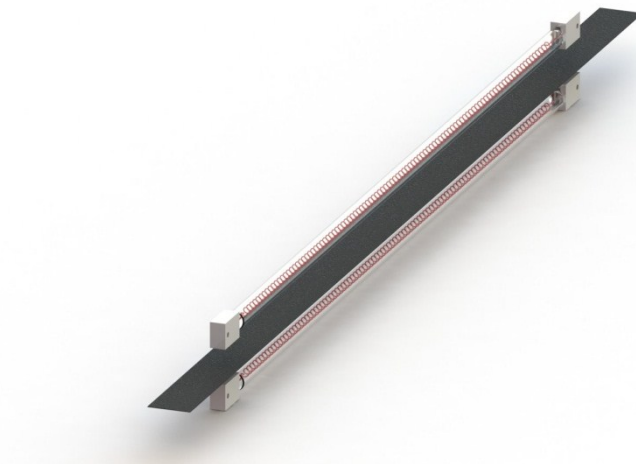


Figura 3.19 - Esquema do sistema de aquecimento com 2 lâmpadas

A instalação de um sistema com 4 lâmpadas permite a duplicação da velocidade implementada, para cerca de 10 m/min. Devido ao diâmetro das lâmpadas, 10,5 mm, ser inferior a metade da

largura da fita, 25 mm, é possível colocar duas lâmpadas em paralelo sobre cada face da fita, solução que permite duplicar a potência aplicada sem implicar alterações do atravancamento do sistema de aquecimento, Figura 3.20.

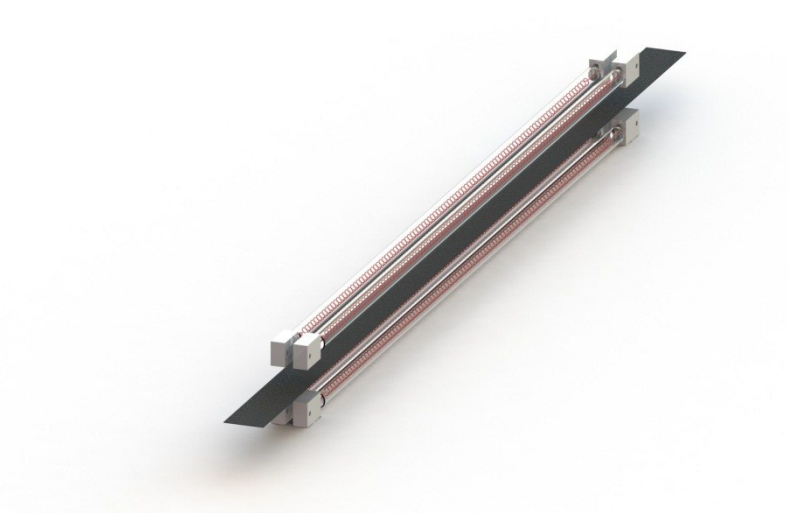


Figura 3.20 - Esquema do sistema de aquecimento com 4 lâmpadas

O incremento do número de lâmpadas permite obter outras configurações que possibilitam a implementação de velocidades de processamento mais elevadas, até cerca de 20 m/min. No entanto, estas configurações implicam a colocação de lâmpadas em série, provocando o aumento do atravancamento do sistema de aquecimento, duplicando o seu comprimento. Portanto, o sistema torna-se menos compacto, envolvendo maiores restrições à sua aplicação em equipamentos de enrolamento filamental e de deposição automatizada de fibra. Desta forma, devido à diminuição da compacticidade do sistema de aquecimento, implícita na implementação de um sistema de aquecimento mais comprido, e à necessidade de desenvolvimento de uma estrutura de suporte mais complexa, justifica-se que o comprimento do sistema de aquecimento seja limitado ao comprimento de uma lâmpada.

Capítulo 4

Modelo Computacional

No presente capítulo discute-se a definição do modelo matemático aplicado na resolução numérica do modelo computacional, a escolha do método de discretização, sendo caracterizado o método dos volumes finitos. Procede-se também à definição das condições de fronteira e finalmente é discutido o método de solução para o problema discretizado.

4.1 Modelação de Fenómenos Térmicos em Aplicações de Enrolamento Filamentar e de Deposição de Fibra

Na literatura existem vários modelos de análise térmica aplicados a diferentes fontes de aquecimento. As primeiras investigações consideram modelos estacionários ou quase estacionários. Em 1988, Grove [96] desenvolveu um modelo 1D e depois 2D, estado estacionário, baseado em elementos finitos aplicado a uma fonte de aquecimento de laser, para obter a distribuição da temperatura ao longo da fita e durante o processo de enrolamento em função das variáveis velocidade de enrolamento, intensidade do laser, propriedades do material e condições de fronteira. Em 1987, Beyeler e Güçeri citado por Toso *et al.* [97] desenvolveram um modelo 2D para determinação do perfil de temperatura e sua evolução em redor da zona de consolidação. Mais tarde, em 1992, este modelo foi validado experimentalmente por Agarwal *et al.* [66]. Ghasemi Nejhad *et al.* [98] desenvolveram um modelo 2D baseado no método das diferenças finitas, estado estacionário, para análise da transferência de calor durante o processo de deposição de fita em molde plano. O modelo permite variações não uniformes da malha, calculando a distribuição da temperatura em função da velocidade da fita e da intensidade e largura da fonte de calor.

Em 1996 é apresentado um modelo, estado transiente, desenvolvido por James e Black [99], aplicado a um sistema de enrolamento filamentar com aquecimento por radiação infravermelha, subdividido num modelo 1D para análise da temperatura da fita que aquando do enrolamento da fita no mandril é conjugado com um modelo 3D para determinação da temperatura do substrato e durante a consolidação. No mesmo ano, Kim *et al.* [100] apresentaram um modelo 2D recorrendo ao método dos elementos finitos, regime quase estacionário, para estudar a transferência de calor no aquecimento por tocha de um sistema de deposição de fibra, comprovando a fiabilidade dos resultados recorrendo uma instalação experimental dotada de termopares.

No trabalho desenvolvido por Sonmez e Hahn [101] em 1997, é aplicado o método dos volumes finitos, regime quase-estacionário, a uma modelação 3D, que pode ser aplicada ao aquecimento

por laser e por radiação infravermelha. É considerada a dependência da temperatura das propriedades do material e a cinética de cristalização da matriz termoplástica.

No trabalho desenvolvido por Tumkor *et al.* [102], em 2001, é apresentado um modelo 2D em regime transiente, baseado no método dos volumes finitos, aplicado a um sistema de aquecimento por tocha com o objectivo de determinar a influência dos diferentes parâmetros do processo de deposição de fibra na qualidade do produto final.

Em 2004, Toso *et al.* [97] desenvolveram um modelo 3D, regime transiente, para simulação dos fenómenos térmicos envolvidos num processo de enrolamento filamentar dotado de aquecimento por tocha, discretizado pelo método dos volumes finitos. O modelo efectua a previsão da temperatura da fita no ponto de contacto e do substrato durante o enrolamento, não considerando a geração de calor, sendo cada simulação numérica integrada explicitamente em ordem ao tempo. O modelo foi testado experimentalmente, recorrendo a pirómetros de infravermelhos, obtendo-se resultados práticos muito próximos dos resultados teóricos.

Em 2010, Groupe *et al.* [103] desenvolveram um modelo computacional 1D, estado transiente, para determinação da temperatura de fita e do substrato durante o processo aquecidos por laser.

Na Tabela 4.1 são documentados resumidamente alguns parâmetros das modelações de fenômenos térmicos em aplicações de enrolamento filamentar e de deposição de fibra referidas neste documento.

Tabela 4.1 – Parâmetros de algumas modelações de fenômenos térmicos em aplicações de enrolamento filamentar e de deposição de fibra

Autores	Ano	Método de Aquecimento	Método de discretização	Estacionário / Transiente	Dimensão
Grove	1988	Laser	Método dos elementos finitos	Estacionário	1D
Beyeler e Güçeri	1987	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	2D
Ghasemi Nejjhad <i>et al.</i>	1991	Não aplicável	Método das diferenças finitas	Não aplicável	Não aplicável
James e Black	1996	Radiação infravermelha	Não aplicável	Transiente	1D
Kim <i>et al.</i>	1996	Tocha	Método dos elementos finitos	Transiente	Não aplicável
Sonmez e Hahn	1997	Tocha, laser e radiação infravermelha	Método dos volumes finitos	Transiente	3D
Tumkor <i>et al.</i>	2001	Tocha	Método dos volumes finitos	Transiente	2D
Toso <i>et al.</i>	2004	Tocha	Método dos volumes finitos	Transiente	3D
Grouve <i>et al.</i>	2010	Laser	Não aplicável	Transiente	1D

Apesar de alguns autores considerarem em modelações de transferência de calor os efeitos devidos à cristalização da matéria, designado como termo fonte na equação da continuidade, a magnitude da energia de cristalização associada ao termo fonte é insignificante quando comparada com os outros termos de energia da equação da continuidade, podendo ser considerado desprezável a implementação do termo fonte na modelação de transferência de

calor em materiais poliméricos [16, 104]. Além disto, os ganhos ou perdas de calor pelas faces laterais da fita pré-impregnada são desprezáveis desde que a espessura seja muito menor que a largura e comprimento. Desta forma, o problema é reduzido à transferência de calor 1D ao longo da espessura da fita [16].

4.2 Modelo Matemático

Fenómenos físicos como transferência de calor ou dinâmica de fluidos podem traduzir-se em equações diferenciais. No entanto os modelos definidos normalmente não têm solução analítica, implicando a sua resolução numericamente. O ponto de início de uma simulação numérica é o modelo matemático, isto é, o conjunto de equações diferenciais e de condições de fronteira. A geometria é discretizada no espaço através de um conjunto de pontos nos quais as equações diferenciais são resolvidas, aproximadas através de um sistema de equações algébricas [105], sendo a solução determinada nos diversos pontos a cada etapa de tempo. O modelo matemático deve incluir simplificações das leis da conservação. Desta forma, representando a variável dependente por ϕ , pode escrever a seguinte equação diferencial [106]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\vec{u}\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S \quad (4.1)$$

em que Γ representa o coeficiente difusivo e S é o termo fonte, sendo ambos especificados para cada ϕ .

Geralmente uma equação diferencial apresenta quatro termos: termo transiente, termo convectivo, termo difusivo e o termo fonte. A variável dependente ϕ pode representar diversas grandezas, entre as quais temperatura.

Sempre que presente, um escoamento deve obedecer à equação da continuidade ou conservação da massa,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}) = 0 \quad (4.2)$$

O problema pode classificar-se como unidimensional, bidimensional ou tridimensional, recorrendo a uma, duas ou três coordenadas espaciais, em função do número de coordenadas

esaciais. Relativamente ao tempo, o problema pode ser definido como transiente ou estacionário, em função da sua dependência ou não da variável tempo. Assim, no problema em estudo, unidimensional e transiente a variável dependente ϕ é função de uma coordenada espacial e do tempo, definindo-se,

$$\phi = \phi(x, t) \quad (4.3)$$

em que, $x, e t$ representam as variáveis independentes.

4.2.1 Equação da Energia

A equação fundamental para a resolução do problema de transferência de calor na fita é a equação da energia, que pode ser obtida a partir da equação (3.29), impondo a temperatura como grandeza fundamental, resultando,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \text{div}(\rho c_p \vec{u} T) = \text{div}(k \text{grad} T) + S \quad (4.4)$$

Aplica-se uma simplificação da equação anterior sem o termo fonte, definindo-se,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \text{div}(\rho c_p \vec{u} T) = \text{div}(\Gamma \text{grad} T) \quad (4.5)$$

4.2.2 Condições de Fronteira

No domínio do aquecimento da fita é considerada em ambas as faces da fita a existência de uma fronteira radiativa, definida por h_{rad} , e uma fronteira convectiva, definida por h_{∞} , estabelecendo-se o balanço da conservação da energia,

$$k \frac{dT}{dx} = h_{rad}(T_{rad} - T_{sup}) + h_{\infty}(T_{\infty} - T_{sup}) \quad (4.6)$$

em que, T_{rad} representa a temperatura da fonte radiativa, T_{sup} a temperatura superficial da fita e T_{∞} a temperatura do meio envolvente.

A variação do fluxo de calor recebido pela fita varia significativamente ao longo do comprimento da lâmpada, sendo crescente desde da borda até ao centro e diminuindo a partir daí na mesma proporção, Figura 4.1.

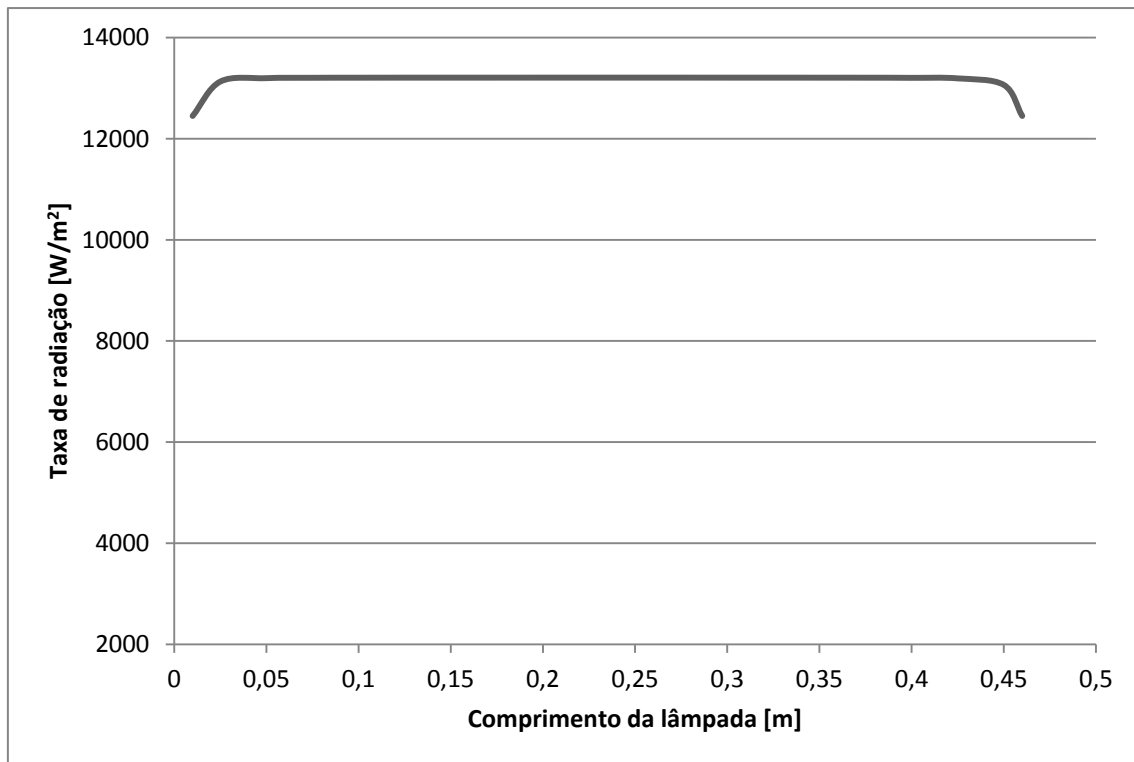


Figura 4.1 - Variação da densidade de radiação incidente na fita ao longo do comprimento da lâmpada

A evolução da variação da intensidade do fluxo de radiação recebido pela fita ao longo do comprimento da lâmpada e da largura da fita manifesta-se no valor do factor de forma para a área elementar em torno da posição do ponto computacional. Assim, o valor do coeficiente de transferência de calor por radiação, h_{rad} é influenciado pela posição do ponto computacional relativamente às lâmpadas. O factor de forma pode ser calculado recorrendo à álgebra dos factores forma. Somam-se os factores de forma elementares relativos a cada um dos elementos de área que compõe a superfície atingida pela radiação e divide-se pelo número de elementos de área considerados.

A cada incremento de tempo, durante a execução do programa, é actualizada a posição do ponto computacional ao longo do comprimento da lâmpada. A cada posição actualizada é calculando o valor do factor de forma para dez pontos ao longo da largura da fita, Figura 4.2.

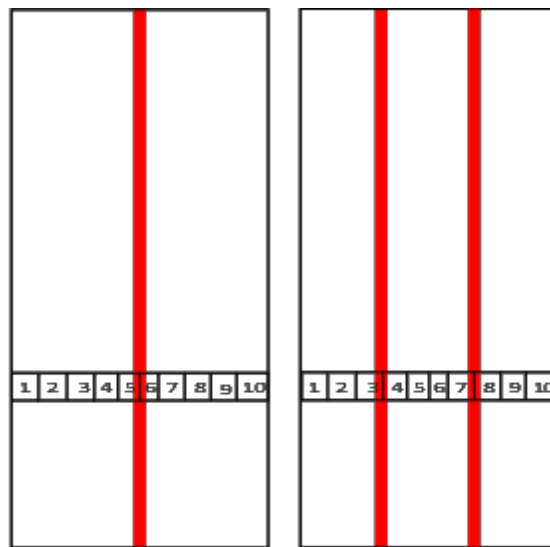


Figura 4.2 – Exemplo dos diversos elementos de área ao longo da largura da fita e posição relativa das lâmpadas nas diferentes configurações

O valor do factor de forma considerado para o cálculo computacional é a média dos valores do factor de forma calculados para cada área elementar, actualizando assim o valor do coeficiente de transferência de calor por radiação.

Simultaneamente, durante a fase de aquecimento a diferença de temperatura entre a fita e o ar envolvente promovendo a transferência de calor por convecção, equação (4.7).

$$k \frac{dT}{dx} = h_{\infty} (T_{\infty} - T_{sup}) \quad (4.7)$$

A fita está animada de movimento linear, provocando a existência de um escoamento ao longo da superfície da fita que influencia o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção.

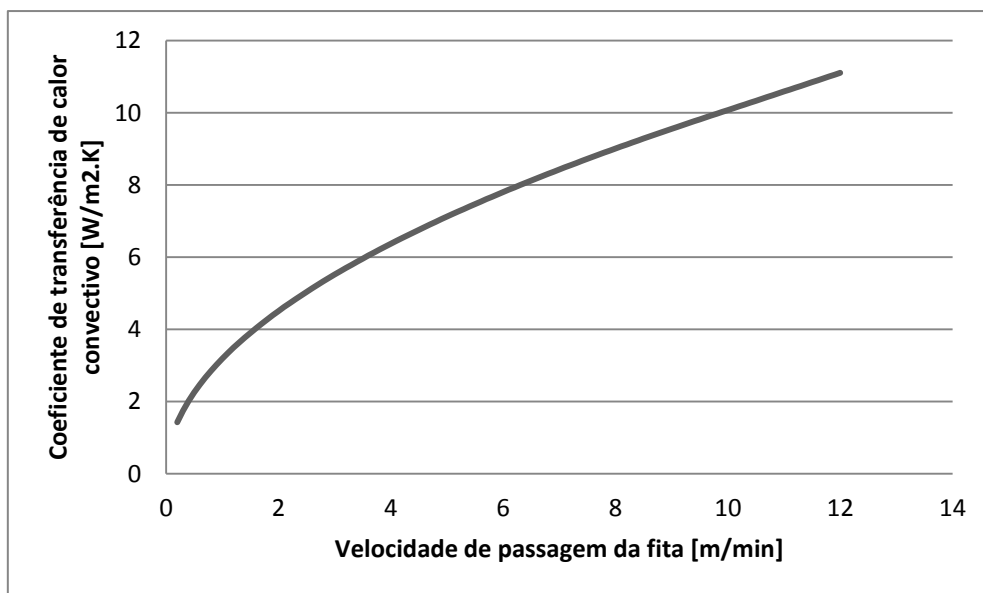


Figura 4.3 - Variação do coeficiente de transferência de calor por convecção em função da velocidade

Na Figura 4.3 observa-se que a variação da velocidade apresenta elevada influência no valor do coeficiente de transferência de calor por convecção. Desta forma, é importante que o coeficiente de transferência de calor por convecção seja calculado em função da velocidade da fita, através do número de *Nusselt*, que pode expressar-se em função dos números de *Reynolds*, Re , e de *Prandtl*, Pr , secção 3.1.2.

4.3 Método de Discretização

O modelo matemático definido para o fenómeno em estudo é regulado por equações diferenciais, que são representadas por uma equação geral da variável \emptyset . É então necessário resolver as equações que o constituem, através de um método de discretização adequado, isto é, aproximando as equações diferenciais através de um sistema de equações algébricas construídas para um conjunto de pontos distribuídos no espaço e no tempo. Assim, a solução de equação diferencial obtida por um método numérico, consiste num conjunto de resultados discretos, a partir dos quais a distribuição da variável \emptyset pode ser construída. Podem ser utilizados vários tipos de aproximações, dos quais se destacam, devido à sua importância os métodos dos volumes finitos, diferenças finitas e elementos finitos.

Em cada ponto da malha, designado por nó ou ponto computacional, é definido o valor da variável contida na solução da equação diferencial. As equações algébricas representam os valores de \emptyset a cada nó discretizado. O método de discretização pressupõe que a informação contínua relativa à solução exacta das equações diferenciais é substituída por valores discretos.

A partir de uma equação diferencial é possível gerar várias discretizações distintas, em função de diferentes abordagens aos métodos de derivação e à variação do perfil. O valor de \emptyset a cada nó influencia a distribuição da variável \emptyset na sua vizinhança. À medida que a malha é refinada, isto é, que se definem um maior número de pontos, é esperado que a solução das equações discretizadas se aproxime da solução exacta das equações diferenciais. Consequentemente, à medida que os pontos da malha são mais próximos, a variação dos valores de \emptyset entre os pontos vizinhos é menor [106].

As principais diferenças entre os três métodos de discretização acima referidos baseiam-se na forma como a variável diferencial é aproximada à solução exacta e com o processo de discretização. Quando as equações discretizadas são resolvidas para obter o valor da variável discretizada a cada ponto, \emptyset , o resultado deve ser lido em função do método de discretização aplicado. Nos métodos de elementos finitos assume-se que a variação de \emptyset consiste na interpolação entre os valores dos pontos da malha representa a solução aproximada. O método das diferenças finitas é semelhante ao anterior, no entanto apenas os valores da variável \emptyset a cada nó constituem a solução, sem qualquer referência explícita à forma como a variável \emptyset evolui entre os diferentes pontos. No método dos volumes finitos evoluiu a partir do método das diferenças finitas, sendo os valores da variável \emptyset calculados a cada nós, referindo-se o nome volume finito a um pequeno volume em torno de cada nó. Neste método o fluxo de calor que entra num volume de controlo é idêntico ao fluxo de calor que sai do volume adjacente, sendo por isso um método conservativo, sendo também um método relativamente fácil de discretizar [106, 107], sendo este método seleccionado para o presente trabalho.

4.3.1 Método dos Volumes Finitos

O método dos volumes finitos é utilizado frequentemente na resolução de problemas de transferência de calor pois usa de forma integral as equações de conservação em todos os

volumes de controlo que compõem o domínio de estudo, sendo esta uma das características mais atractivas deste método é o facto da formulação dos volumes de controlo implicar a conservação integral de quantidades como a massa, o momento e a energia, ao longo de todo o domínio de cálculo, independentemente do grau de refinamento da malha [106].

De acordo com Versteeg e Malalasekera [107] a conservação de qualquer propriedade no interior de um volume de controlo pode ser expressa como um balanço dos vários processos com influência sobre a mesma, podendo ser sumariada como:

$$\begin{aligned} \text{Taxa de} \\ \text{variação de } \phi \\ \text{com o tempo} \end{aligned} = \begin{aligned} & \text{fluxo líquido de } \phi \text{ por} \\ & \text{convecção no VC} \end{aligned} + \begin{aligned} & \text{fluxo líquido de } \phi \text{ por} \\ & \text{difusão no VC} \end{aligned} + \begin{aligned} & \text{taxa de geração de} \\ & \phi \text{ no VC} \end{aligned}$$

A discretização pelo método dos volumes finitos é a forma integral da equação diferencial, que para um caso geral, estacionário, assume a seguinte forma:

$$\int_A \rho \phi \vec{u} \cdot \vec{n} dA = \int_A \Gamma \text{grad} \phi \cdot \vec{n} dA + \int_V S_V dV \quad (4.8)$$

Para problemas no estado transiente, isto é, dependentes da variável tempo, é necessário integrar a variável tempo, t , ao longo de um pequeno intervalo, Δt , obtendo-se

$$\begin{aligned} \int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} (\rho \phi) dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_A n(\rho \phi u) dA dt \\ = \int_{\Delta t} \int_A n(\Gamma_{\phi} \text{grad} \phi) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{CV} S_{\phi} dV dt \end{aligned} \quad (4.9)$$

O domínio de cálculo é dividido num número de volumes de controlo não sobrepostos, gerando uma malha, que contrastando com o método das diferenças finitas, define as fronteiras dos volumes de controlo de forma que exista um ponto no interior de cada volume de controlo.

Para exemplificar a construção das equações discretizadas num domínio unidimensional analisam-se separadamente os termos da equação geral de conservação.

4.3.2 Discretização do Termo Difusivo a 1D

Considerando a equação que governa a difusão de uma propriedade ϕ , com Γ a representar o coeficiente difusivo num domínio unidimensional, 1D, sem geração de calor,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) = 0 \quad (4.10)$$

Designa-se por P o ponto relativamente à qual a equação é construída, contendo como pontos adjacentes W , à esquerda e E , à sua direita. Definem-se os pontos w e e na intercepção entre a linha entre os pontos P e E e P e W e as faces dos respectivos volumes de controlo, Figura 4.4.

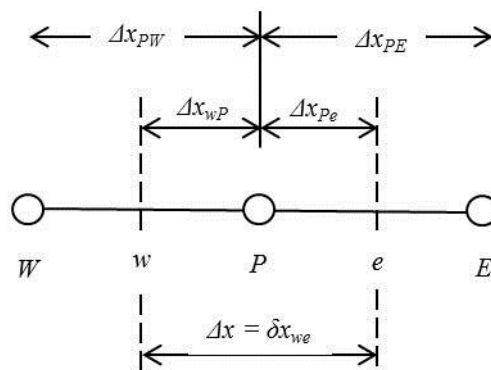


Figura 4.4 - Esquema da malha unidimensional (adaptado de Patankar [106])

Integrando a equação (4.10) sobre o volume de controlo da célula P , obtém-se

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) dV = \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right)_w = 0 \quad (4.11)$$

Interpolando linearmente entre P e E aproxima-se à derivada na face, necessária para a determinação dos fluxos.

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \frac{\phi_E - \phi_P}{x_E - x_P} \quad (4.12)$$

Utilizando a expansão de séries de Taylor em volta de ϕ_e , é possível mostrar que o erro de truncatura da aproximação anterior é:

$$e_t = \frac{(x_e - x_p)^2 - (x_E - x_e)^2}{2(x_E - x_p)} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) - \frac{(x_e - x_p)^3 - (x_E - x_e)^3}{6(x_E - x_p)} \left(\frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right) + H \quad (4.13)$$

Quando a face e está entre P e E (por exemplo para uma malha uniforme), a aproximação é de segunda ordem de precisão, pois o primeiro termo passando o termo principal a ser proporcional a (Δx^2) . Para casos em que a malha não é uniforme, o termo principal do erro é proporcional ao produto de Δx pelo factor de expansão da malha. Assim, em vez de uma aproximação típica de primeira ordem de precisão, a redução do erro quando a malha é refinada é semelhante à verificada em aproximações de segunda ordem, mesmo para malhas não uniformes [105].

4.3.3 Coeficiente Difusivo nas Faces dos Volumes de Controlo

O coeficiente difusivo pode ser dependente da temperatura, assim é desejável que a condutividade nas faces seja avaliada em função dos valores conhecidos da variável T , que se resumem aos valores conhecidos nos nós computacionais.

A variação do valor da condutividade pode dever-se à falta de homogeneidade do material. No entanto, nos materiais homogéneos, a dependência da condutividade para com a temperatura, pode por si só conduzir a variações significativas dos seus valores, devido a gradientes térmicos que por vezes ocorrem ao longo do material.

De acordo com Patankar [106] uma das formas mais simples de obter o valor da condutividade k na interface entre dois pontos adjacentes, P e E , é assumir uma variação linear de k , resultando

$$k_e = f_e k_p + (1 - f_e) k_E \quad (4.14)$$

onde o factor de interpolação f_e é razão entre das distâncias da face ao ponto E (Δx_{pE}),

$$f_e = \frac{\Delta x_{eE}}{\Delta x_{pE}} \quad (4.15)$$

Se a face se situe no ponto médio entre os nós computacionais, f_e será 0,5 e o valor de k_e será igual à média aritmética entre k_p e k_E . No entanto esta aproximação simples pode conduzir a incorrecções nos valores de k , sobretudo em casos nos quais a condutividade muda de forma

repentina. O mesmo autor propõe uma metodologia alternativa para a determinação correcta da condutividade na face e , k_e , conduzindo ao valor correcto do fluxo de calor, q_e ,

$$q_e = k_e \frac{(T_p - T_e)}{\Delta x_e} \quad (4.16)$$

Considerando um volume de controlo em torno do ponto P e que o material apresenta condutividade uniforme, k_p , apresentando na sua vizinhança o ponto E com condutividade k_E , resultando para esta face,

$$q_e = \frac{T_p - T_E}{\frac{\Delta x_{pe}}{k_p} + \frac{\Delta x_{eE}}{k_E}} \quad (4.17)$$

Da combinação das equações (4.15) e (4.17) resulta,

$$k_e = \left(\frac{1 - f_e}{K_p} + \frac{f_e}{K_E} \right)^{-1} \quad (4.18)$$

Desta forma, quando a face e está colocada no ponto médio entre P e E , ou seja $f_e = 0,5$ então

$$k_e = \frac{2k_p k_E}{K_p + K_E} \quad (4.19)$$

onde k_e representa a média harmónica entre k_p e k_E . Aplicando a equação (4.18) na definição dos coeficientes da equação geral para a condução, obtém-se,

$$a_E = \left[\frac{\Delta x_{pe}}{K_p} + \frac{\Delta x_{pE}}{K_E} \right]^{-1} \quad (4.20)$$

Os restantes índices podem ser definidos analogamente, representando neste caso a_E a condutividade do material entre P e E .

Os termos da equação (4.11) podem agora ser reformulados,

$$\begin{aligned} \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e &= \Gamma_e A_e \frac{\phi_E - \phi_P}{x_E - x_P} \\ \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w &= \Gamma_w A_w \frac{\phi_P - \phi_W}{x_P - x_W} \end{aligned} \quad (4.21)$$

podendo representar-se a equação (4.11) como,

$$\Gamma_e A_e \frac{\phi_E - \phi_P}{x_E - x_P} - \Gamma_w A_w \frac{\phi_P - \phi_W}{x_P - x_W} = 0 \quad (4.22)$$

rearranjando,

$$\left(\Gamma_e \frac{A_e}{x_E - x_P} + \Gamma_w \frac{A_w}{x_P - x_W} \right) \phi_P = \left(\Gamma_e \frac{A_e}{x_E - x_P} \right) \phi_E + \left(\Gamma_w \frac{A_w}{x_P - x_W} \right) \phi_W \quad (4.23)$$

podendo ser apresentada na forma,

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W \quad (4.24)$$

em que,

$$\begin{aligned} a_E &= \Gamma_e \frac{A_e}{x_E - x_P} \\ a_W &= \Gamma_w \frac{A_w}{x_P - x_W} \\ a_P &= a_E + a_W \end{aligned} \quad (4.25)$$

4.3.4 Condução em Estado Transiente 1D

A equação que governa a transferência de calor 1D é,

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.26)$$

Por simplicidade assume-se que ρ e C_p , como constantes.

O tempo pode ser definido como uma coordenada unidireccional, sendo necessário obter uma solução à medida que o tempo avança. Em função dos valores da distribuição da temperatura, T no instante de tempo t , o objectivo é calcular os valores de T no instante de tempo $t + \Delta t$ as temperaturas nos pontos no instante de tempo t serão designadas por T_E^0, T_W^0 e T_P^0 , sendo as novas incógnitas no instante de tempo $t + \Delta t$ representadas por T_E^1, T_W^1 e T_P^1 .

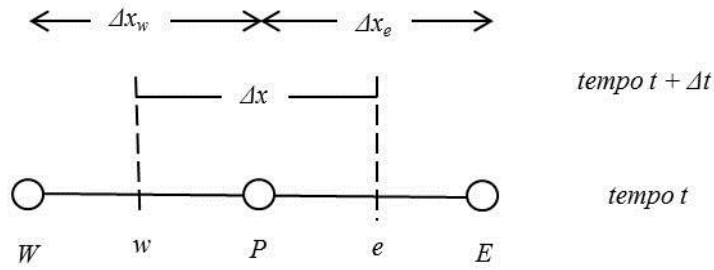


Figura 4.5 – Representação de um volume de controle 1D (adaptado de [85])

Integrando a equação (4.26) no volume de controle, Figura 4.5, e no intervalo de tempo t a $t + \Delta t$,

$$\rho C_p \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad (4.27)$$

onde a ordem de integração é escolhida de acordo com a natureza do termo. Para representação do termo $\partial T / \partial t$, assumindo-se que a temperatura do ponto computacional prevalece em todo o domínio do volume de controle. Assim,

$$\rho C_p \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \rho C_p \Delta x (T_P^1 - T_P^0) \quad (4.28)$$

Substituindo na equação (4.27) e discretizando o termo condutivo recorrendo às diferenças centrais, obtém-se:

$$\rho C_p \Delta x (T_P^1 - T_P^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e (T_E - T_P)}{\partial x_{PE}} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{\partial x_{WP}} \right] dt \quad (4.29)$$

É necessário assumir a forma como a temperatura T_E , T_W e T_P varia de t a $t + \Delta t$. Existem muitas formas de o fazer, no entanto todas elas podem ser definidas na expressão:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [f T_P^1 + (1 - f) T_P^0] \Delta t \quad (4.30)$$

onde f pode variar entre 0 e 1. Utilizando uma formulação semelhante para a integração de T_E e T_W para a equação (4.29),

$$\begin{aligned}
 & \rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_P^1 - T_P^0) \\
 &= f \left[\frac{k_e (T_E^1 - T_P^1)}{\partial x_{PE}} - \frac{k_w (T_P^1 - T_W^1)}{\partial x_{PE}} \right] \\
 &+ (1 - f) \left[\frac{k_e (T_E^0 - T_P^0)}{\partial x_{PE}} - \frac{k_w (T_P^0 - T_W^0)}{\partial x_{PE}} \right]
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

rearranjando a equação (4.31).

$$\begin{aligned}
 a_P T_P^1 &= a_E [f T_E^1 + (1 - f) T_E^0] + a_W [f T_W^1 + (1 - f) T_W^0] \\
 &+ [a_P^0 - (1 - f) a_E - (1 - f) a_W] T_P^0
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

onde:

$$\begin{aligned}
 a_E &= \frac{k_e}{\partial x_{PE}} \\
 a_W &= \frac{k_w}{\partial x_{WP}} \\
 a_P^0 &= \rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{4.33}$$

$$a_P = f a_E + f a_W + f a_P^0$$

Para valores de $f = 0$ designa-se por método explícito, $f = 0,5$ designa-se por método de Crank-Nicolson e para valores de $f = 1$ o método designa-se por totalmente implícito.

Cada um dos métodos representa uma forma diferente de evolução da temperatura ao longo do tempo. O método explícito assume que o valor de T_P^0 permanece durante todo o intervalo de tempo excepto no instante $t + \Delta t$, no qual assume o valor de T_P^1 . O método totalmente implícito define que no instante de tempo t a temperatura no volume de controlo varia bruscamente de T_P^0 para T_P^1 , permanecendo ai até ao instante $t + \Delta t$. O método de Crank-Nicolson propõe uma evolução linear ao longo de T durante todo o intervalo de tempo.

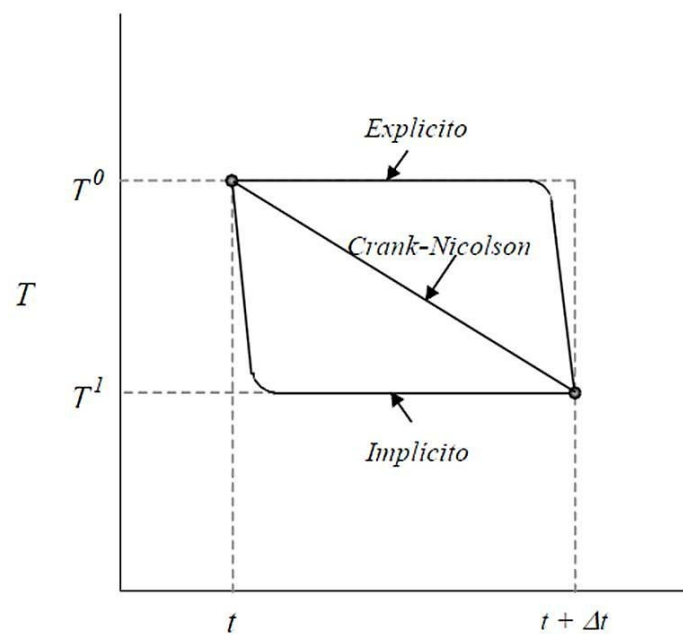


Figura 4.6 - Variação da temperatura com o tempo para os três esquemas

Aplicando o método explícito à equação (4.32),

$$a_p T_p^1 = a_E T_E^0 + a_W T_W^0 + (a_p^0 - a_E - a_W) T_p^0 \quad (4.34)$$

Mostra-se que T_p^1 não está relacionado com as outras incógnitas, com T_E^1 ou T_W^1 . Esta é a razão deste método se designar explícito. Qualquer outro método com $f \neq 0$ é considerado implícito, isto é, o valor da incógnita T_p^1 estará relacionado com o valor das incógnitas T_E^1 e T_W^1 , o que implica a que a solução seja obtida através de um sistema de equações em simultâneo. O método explícito é atraente do ponto de vista do método de resolução a utilizar, no entanto este método implica a utilização de intervalos de tempo muito pequenos, de forma a garantir resultados aceitáveis. Assim, é necessário que se verifique a seguinte condição:

$$\Delta t < \rho \frac{C_p \Delta x^2}{2k} \quad (4.35)$$

Caso esta condição não ser verifique, o coeficiente T_p^0 seria negativo, implicando que ao aumento de T_p^0 resultaria a diminuição de T_p^1 e *vice-versa*, o que é irreal. Outro dos problemas deste método é o facto de ao reduzir o valor de Δx para aumentar a precisão, é necessário diminuir quadraticamente o valor de dt , garantindo o critério de estabilidade do método explícito.

O método de Crank-Nicolson é geralmente descrito como incondicionalmente estável, no qual se podem gerar resultados independentemente da dimensão de dt . No entanto este método pode gerar resultados oscilatórios. Este comportamento é fácil de explicar. Para $f = 0,5$, o coeficiente T_p^0 da equação (4.34) torna-se,

$$a_p^0 = \frac{(a_E - a_W)}{2} \quad (4.36)$$

que, para o caso de condutividade constante e malha uniforme, conduz a,

$$\rho \frac{C_p \Delta x}{\Delta t} = \frac{k}{\Delta x} \quad (4.37)$$

Assim, verifica-se que podem ser gerados resultados irrealistas sempre que o valor de Δt não obedecer à seguinte condição,

$$\Delta t < \rho \frac{C_p \Delta x^2}{k} \quad (4.38)$$

Desta forma, a correspondência linear entre o tempo e a temperatura apresenta-se como solução razoável para pequenos intervalos de tempo. Para intervalos de tempo maiores, o comportamento exponencial da temperatura de um corpo com o tempo implica que esta apresente grande declive nos instantes de tempo iniciais, apresentando de seguida um patamar constante. Assim, os métodos completamente implícitos estão mais próximos de gerar resultados realistas, em particular para intervalos de tempo maiores [106].

De forma a garantir resultados fisicamente consistentes, o método totalmente implícito revela-se uma escolha adequada.

4.3.5 Condições de Fronteira

Ao utilizar a técnica dos volumes finitos para discretizar um domínio obtém-se um conjunto de equações discretizadas, correspondentes aos volumes de controlo. Estas equações podem ser definidas em função da temperatura num ponto interior de cada volume de controlo, T_p . No entanto duas destas equações envolvem pontos de fronteira com o exterior, sendo necessário definir a temperatura nesses pontos através das condições de fronteira para que o sistema de equações seja resolvido.

Tipicamente existem três formas de definir as condições de fronteira em problemas de transferência de calor:

- Fornecimento da temperatura na fronteira;
- Fornecimento de um fluxo de calor na fronteira;
- Definição do fluxo de calor através da especificação da temperatura do meio envolvente, T_∞ e do coeficiente de transferência de calor com o exterior, h_∞ .

Quando a temperatura de fronteira, T_B , é conhecida não se apresentam dificuldades adicionais, pois o sistema de equações tem imediatamente solução. No entanto, tal como no caso em estudo, quando a temperatura de fronteira não é conhecida, é necessário construir uma equação adicional em função da temperatura, T_B . Desta forma, integra-se a equação diferencial sobre metade do volume de controlo adjacente à fronteira, Figura 4.7.

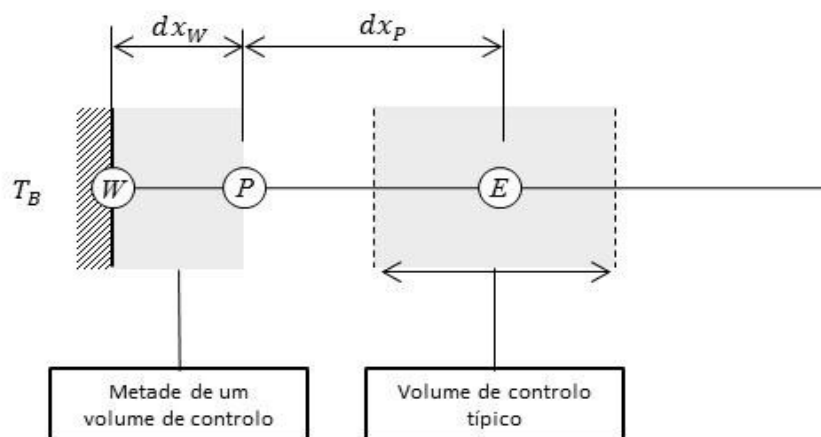


Figura 4.7 - Esquema de uma malha 1D na região da fronteira oeste, W (adaptado de Patankar [106])

Na equação discretizada (4.39) para um volume de controlo de fronteira, o termo de índice W apresenta algumas particularidades. Além da distância entre os pontos P e W ser metade de dx , também o valor de T_W não pode ser definido implicitamente, pois depende do fluxo de calor na fronteira.

$$k_e \frac{(T_E^1 - T_P^1)}{dx} - k_w \frac{(T_P^1 - T_W^1)}{dx/2} = \rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_P^1 - T_P^0) \quad (4.39)$$

Desta forma, a temperatura na fronteira, T_B , no ponto W , tem que ser definida em função do fluxo de calor.

$$q_W = \frac{(T_P - T_W)}{dx/2} \quad (4.40)$$

definindo T_W ,

$$k \frac{T_W}{dx/2} = q_W + \frac{T_P}{dx/2} \quad (4.41)$$

$$T_W = q_W \frac{dx/2}{k} + T_P$$

Substituindo a equação (4.41) na equação (4.39), resulta:

$$k_e \frac{(T_E^1 - T_P^1)}{dx} - k_w \frac{\left(T_P^1 - \left(q_W \frac{dx/2}{k} + T_P \right) \right)}{dx/2} = \rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_P^1 - T_P^0) \quad (4.42)$$

Podendo ser reescrita na forma,

$$a_P T_P^1 = a_E T_E^1 + a_W T_W^1 + b \quad (4.43)$$

em que

$$a_E = \frac{k}{dx}$$

$$a_W = 0$$

$$a_P^0 = \rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.44)$$

$$b = a_P^0 T_P^0 + q_W \frac{dx/2}{k}$$

$$a_P = a_E + a_P^0$$

Caso o fluxo de calor q_W seja definido em função de um coeficiente de transferência de calor e da temperatura do meio, a temperatura de fronteira T_W deve ser definida em função destes parâmetros [106].

No caso em estudo existem dois domínios:

- Aquecimento da fita por radiação infravermelha com trocas de calor por convecção para o ambiente;
- Após aquecimento, a fita apenas troca calor por convecção para o ambiente.

Por simplicidade, aborda-se primeiramente a definição da condição de fronteira no domínio apenas convectivo. Neste domínio, o fluxo de calor na fronteira é definido por,

$$q_{cond} = q_{conv} \quad (4.45)$$

Em que o fluxo de calor convectivo pode ser definido como,

$$q_W = h_\infty(T_\infty - T_W) \quad (4.46)$$

em que h_∞ é o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_∞ representa a temperatura do meio envolvente e T_{sup} representa a temperatura superficial da fita.

$$-k \frac{(T_P - T_W)}{dx/2} = h_\infty(T_\infty - T_W) \quad (4.47)$$

$$\left(h_\infty + k \frac{1}{dx/2} \right) T_W = h_\infty T_\infty + \frac{k}{dx/2} T_P \quad (4.48)$$

podendo definir-se a temperatura na fronteira como:

$$T_W = \frac{h_\infty T_\infty}{h_\infty + k \frac{1}{dx/2}} + \frac{\frac{k}{dx/2}}{h_\infty + k \frac{1}{dx/2}} T_P \quad (4.49)$$

Substituindo a equação (4.49) na equação (4.47) pode discretizar-se a condição de fronteira convectiva para o lado Oeste do domínio,

$$k_e \frac{(T_E^1 - T_P^1)}{dx} - k_w \frac{\left[T_P^1 - \left(\frac{h_\infty T_\infty}{h_\infty + \frac{k}{dx/2}} + \frac{\frac{k}{dx/2}}{h_\infty + \frac{k}{dx/2}} T_P^1 \right) \right]}{dx/2} = \rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_P^1 - T_P^0) \quad (4.50)$$

Sendo o procedimento análogo para definição da condição de fronteira no lado Este do domínio.

No domínio com aquecimento por radiação e troca de calor convectiva com o meio envolvente o balanço de fluxos de calor na fronteira pode definir-se como,

$$q_{cond} = q_{rad} + q_{conv} \quad (4.51)$$

onde q_{cond} representa o fluxo de calor conduzido ao longo da espessura da fita, q_{rad} o fluxo de calor de radiação que incide na superfície da fita e q_{conv} o fluxo de calor trocado entre a superfície da fita e o ambiente.

O fluxo de calor radiativo pode ser definido como,

$$q_{rad} = h_{rad}(T_{rad} - T_{sup}) \quad (4.52)$$

A combinação de fluxos de calor na fronteira pode expressar-se como,

$$q_W = h_{\infty}(T_{\infty} - T_W) + h_{rad}(T_{rad} - T_W) \quad (4.53)$$

$$-k \frac{(T_P - T_W)}{dx/2} = h_{\infty}(T_{\infty} - T_{sup}) + h_{rad}(T_{rad} - T_{sup}) \quad (4.54)$$

$$\left(h_{\infty} + h_{rad} + k \frac{1}{dx/2} \right) T_W = h_{\infty} T_{\infty} + h_{rad} T_{rad} + \frac{k}{dx/2} T_P \quad (4.55)$$

podendo definir-se a temperatura na fronteira como:

$$T_W = \frac{h_{\infty} T_{\infty}}{h_{\infty} + h_{rad} + \frac{k}{dx/2}} + \frac{h_{rad} T_{rad}}{h_{\infty} + h_{rad} + \frac{k}{dx/2}} + \frac{\frac{k}{dx/2}}{h_{\infty} + h_{rad} + \frac{k}{dx/2}} T_P \quad (4.56)$$

Substituindo a equação (4.56) na equação (4.54), obtém-se:

$$\begin{aligned} & k_e \frac{(T_E^1 - T_P^1)}{dx} \\ & - k_w \frac{\left[T_P^1 - \left(\frac{h_{\infty} T_{\infty}}{h_{\infty} + h_{rad} + \frac{k}{dx/2}} + \frac{h_{rad} T_{rad}}{h_{\infty} + h_{rad} + \frac{k}{dx/2}} + \frac{\frac{k}{dx/2}}{h_{\infty} + h_{rad} + \frac{k}{dx/2}} T_P^1 \right) \right]}{dx/2} \quad (4.57) \\ & = \rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_P^1 - T_P^0) \end{aligned}$$

4.4 Solução das Equações Algébricas

Ao longo deste capítulo foi descrita a forma como as equações foram discretizadas as equações que governam a transferência de calor no caso em estudo. Deste processo resulta a obtenção de um sistema de equações lineares que necessita de ser resolvido. A complexidade e o tamanho do sistema dependem da dimensão do problema, do número de pontos computacionais e do tipo de discretização utilizado. Deve ser notado que enquanto as equações discretizadas são construídas, elas são definidas linearmente, mas não estão associadas a nenhum método específico para a sua resolução. Desta forma, qualquer método de resolução pode ser aplicado, existindo duas grandes famílias de técnicas de resolução de equações algébricas lineares [106, 107]:

- Métodos directos;
- Métodos indirectos.

De acordo com Patankar [106] a aplicação de métodos directos para a resolução de sistema de equações lineares torna-se complexa quando os problemas envolvem domínios a 2D e a 3D, devido à elevada necessidade de alocação de memória computacional e elevado tempo de processamento, enquanto a sua aplicação a problemas 1D, com equações lineares é adequada. Versteeg e Malalasekera [107] afirmam que os métodos iterativos são mais adequados que os métodos directos para sistemas com um número de equações acima de 1.000.000.

No caso do sistema de equações resultante da discretização de um domínio unidimensional é gerada uma matriz em que apenas os coeficientes da diagonal superior, diagonal inferior e diagonal principal são diferentes de zero, ou seja é gera-se uma matriz tridiagonal. Um dos métodos que facilmente pode ser aplicado é o método de resolução de matrizes tridiagonais. Este método pode ser aplicado como método directo ou iterativo, sendo computacionalmente pouco exigente e rápido [107].

$$\phi_3 = \left(\frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 \frac{\alpha_2}{D_2}} \right) \phi_4 + \left(\frac{\beta_3 \left(\frac{\beta_2}{D_2} \phi_1 + \frac{C_2}{D_2} \right) + C_3}{D_3 - \beta_3 \frac{\alpha_2}{D_2}} \right) \quad (4.64)$$

Adoptando-se a notação,

$$A_2 = \frac{\alpha_2}{D_2} \quad (4.65)$$

e

$$C'_2 = \frac{\beta_2}{D_2} \phi_1 + \frac{C_2}{D_2} \quad (4.66)$$

podendo a equação (4.64) ser escrita como,

$$\phi_3 = \left(\frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \right) \phi_4 + \left(\frac{\beta_3 C'_2 + C_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \right) \quad (4.67)$$

e considerando,

$$A_3 = \frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \quad (4.68)$$

e

$$C'_3 = \frac{\beta_3 C'_2 + C_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \quad (4.69)$$

a equação (4.67) pode ser reformulada como

$$\phi_3 = A_3 \phi_4 + C'_3 \quad (4.70)$$

A equação (4.70) pode agora ser utilizada para eliminação do coeficiente ϕ_3 da equação (4.62), podendo o mesmo procedimento ser replicado para as restantes equações do sistema.

Para a retrossubstituição é utilizada a formulação geral a partir da equação (4.70):

$$\phi_j = A_j \phi_{j+1} + C'_j \quad (4.71)$$

onde,

$$A_j = \frac{\alpha_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}} \quad (4.72)$$

e

$$C'_j = \frac{\beta_j C'_{j-1} + C_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}} \quad (4.73)$$

Esta formulação pode ser aplicada aos pontos de fronteira $j = 1$ e $j = n + 1$ através da atribuição dos seguintes valores de A e C' :

$$A_1 = 0 \text{ e } C'_1 = \emptyset_1$$

$$A_{n+1} = 0 \text{ e } C'_{n+1} = \emptyset_{n+1}$$

De forma a resolver o sistema de equações na sua primeira forma, equação (4.59) e com α_j , β_j , D_j e C'_j identificados. Os valores de A_j e C'_j são calculados a cada j , iniciando-se em $j = 2$ até $j = n$, através das equações (4.72) e (4.73). Desde que o valor de \emptyset seja conhecido no ponto computacional de fronteira $(n + 1)$ os valores de \emptyset_j podem ser obtidos por ordem inversa $(\emptyset_n, \emptyset_{n-1}, \emptyset_{n-2}, \dots, \emptyset_2)$ através da equação (4.71).

4.5 Algoritmo de Solução

Genericamente o programa principal apresenta os seguintes passos:

1. Inicialização de todo o domínio
 - É chamada uma sub-rotina na qual são lidas as propriedades do ar, do sistema de aquecimento, nomeadamente, temperatura da fonte radiativa, dimensões e distância entre painel radiativo e a fita e o número de lâmpadas em cada superfície da fita. As propriedades dos materiais da fita (fibra de vidro e PP) são também lidas pelo programa, nomeadamente, massa volúmica, condutividade térmica, calor específico e fracções volúmicas respectivas, sendo calculadas as propriedades da fita enquanto composto em função da temperatura.
 - São carregados os dados relativos ao número de nós computacionais requeridos pelo utilizador, e a dimensão dos incrementos de tempo, Δt .
2. Definição da malha do domínio.

- Esta sub-rotina permite definir diferentes malhas, ou seja, maior ou menor número de nós computacionais ao longo da espessura da fita.

3. Cálculo das temperaturas a cada instante de tempo, Δt .

- São calculados os coeficientes da equação da temperatura;
- É calculado o coeficiente de transferência de calor por radiação;
- É chamada a sub-rotina de resolução do sistema de equações;
- A cada intervalo de tempo, o tempo é incrementado $t + \Delta t$, sendo actualizados os valores das temperaturas, T_i , e o coeficiente de transferência de calor, h_{rad}

4. Apresentação dos resultados

- Os resultados são impressos a cada instante de tempo

Capítulo 5

Resultados do Modelo Computacional e Projecto de Instalação Experimental

O modelo computacional implementado foi simulado utilizando a aplicação programada em linguagem Fortran. Foram estudados os efeitos de alguns parâmetros do sistema de aquecimento, nomeadamente condições de velocidade e temperatura

As simulações computacionais são efectuadas com o objectivo de prever o aquecimento da fita em função das condições de processamento. Assim, nas diferentes simulações efectuadas foram alteradas as condições de processamento para testar o seu efeito relativo no aquecimento da fita. As condições de processamento controladas foram a velocidade, distância entre as lâmpadas e a superfície da fita e o número de lâmpadas em cada face da fita. As simulações computacionais realizadas podem repartir-se em dois grandes grupos, Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Esquema das simulações realizadas

Simulação Nº	Número de lâmpadas em cada superfície da fita	Velocidade	Distância entre as lâmpadas e a superfície da fita
1	1	3 m/min	0,75 cm
2	1	3 m/min	1 cm
3	1	3 m/min	1,25 cm
4	1	4 m/min	0,75 cm
5	1	4 m/min	1 cm
6	1	4 m/min	1,25 cm
7	2	8 m/min	0,75 cm
8	2	8 m/min	1 cm
9	2	8 m/min	1,25 cm
10	2	9 m/min	0,75 cm
11	2	9 m/min	1 cm
12	2	9 m/min	1,25 cm
13	2	3 m/min	2 cm
14	2	3 m/min	3 cm
15	2	3 m/min	4 cm
16	2	4 m/min	2 cm
17	2	4 m/min	3 cm
18	2	4 m/min	4 cm

- Simulações realizadas com uma e duas lâmpada em cada superfície da fita em diferentes velocidades com distâncias entre a fita e as lâmpadas designadas como curtas, próximas do mínimo admissível, que variam entre 0,75 e 1,25 cm.

- Simulações realizadas com duas lâmpadas em cada superfície da fita em diferentes velocidades com distâncias entre a fita e as lâmpadas designadas como longas, que variam entre 2 e 4 cm.

Os principais parâmetros fixos considerados nas simulações são descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Principais parâmetros de entrada do modelo computacional considerados nas simulações efectuadas

Temperatura do filamento de tungsténio	1500 K
Emissividade do filamento de tungsténio	0,27
Diâmetro aproximado do filamento de tungsténio	2 mm
Comprimento de aquecimento da lâmpada	470 mm
Temperatura inicial da fita	293,15 K
Número de nós computacionais	15
Incremento de tempo	0,1 s

Antes de proceder ao tratamento de dados das simulações estudou-se a variação do gradiente térmico existente entre a superfície da fita e o ponto médio da espessura da fita. Consideram-se os valores da velocidade mais elevada considerada neste estudo, 9 m/min e da mais pequena distância entre as lâmpadas e a superfície da fita utilizada nas simulações, 0,75 cm. Ou seja, perante as condições de estudo que impõe o aquecimento mais rápido, é gerado o maior gradiente térmico ao longo da espessura da fita, Figura 5.1.

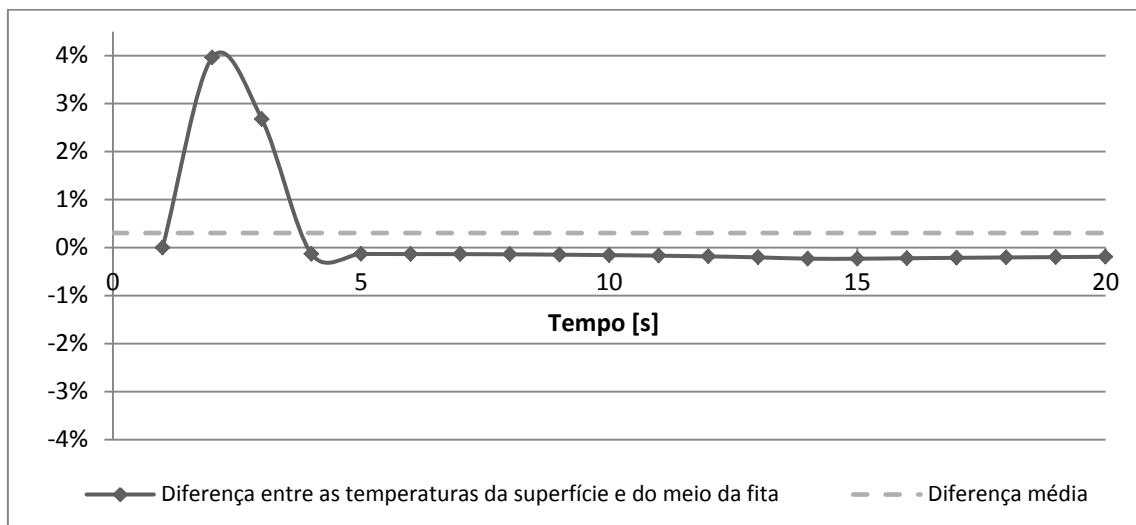


Figura 5.1 - Diferença entre as temperaturas na superfície da fita e no meio da fita, para um caso com 2 lâmpadas a 1 cm da superfície da fita e velocidade de 8 m/min

O valor máximo do gradiente térmico gerado entre a superfície da fita e o ponto médio da sua espessura é inferior a 4%, à saída do sistema de aquecimento. A temperatura ao longo da espessura da fita rapidamente atinge um equilíbrio, com o valor da temperatura da superfície 0,3% abaixo do valor da temperatura no ponto médio, devido às perdas de calor por convecção. Dado que o gradiente térmico gerado ao longo da espessura da fita apresenta pouca significância, são apenas apresentados os resultados relativos à temperatura superficial da fita.

5.1 Resultados das Simulações Computacionais

Cada simulação efectuada compreendeu a análise do perfil da temperatura superficial da fita para três diferentes distâncias entre as lâmpadas e a superfície da fita para uma velocidade e número de lâmpadas por face estabelecidos.

5.1.1 Configuração de Uma Lâmpada em Cada Face da Fita

Na Figura 5.2 e na Figura 5.3 apresenta-se a evolução da temperatura superficial da fita, considerando uma lâmpada em cada face da fita, para as velocidades de 3 m/min e de 4 m/min e com distâncias curtas entre as lâmpadas e a fita.

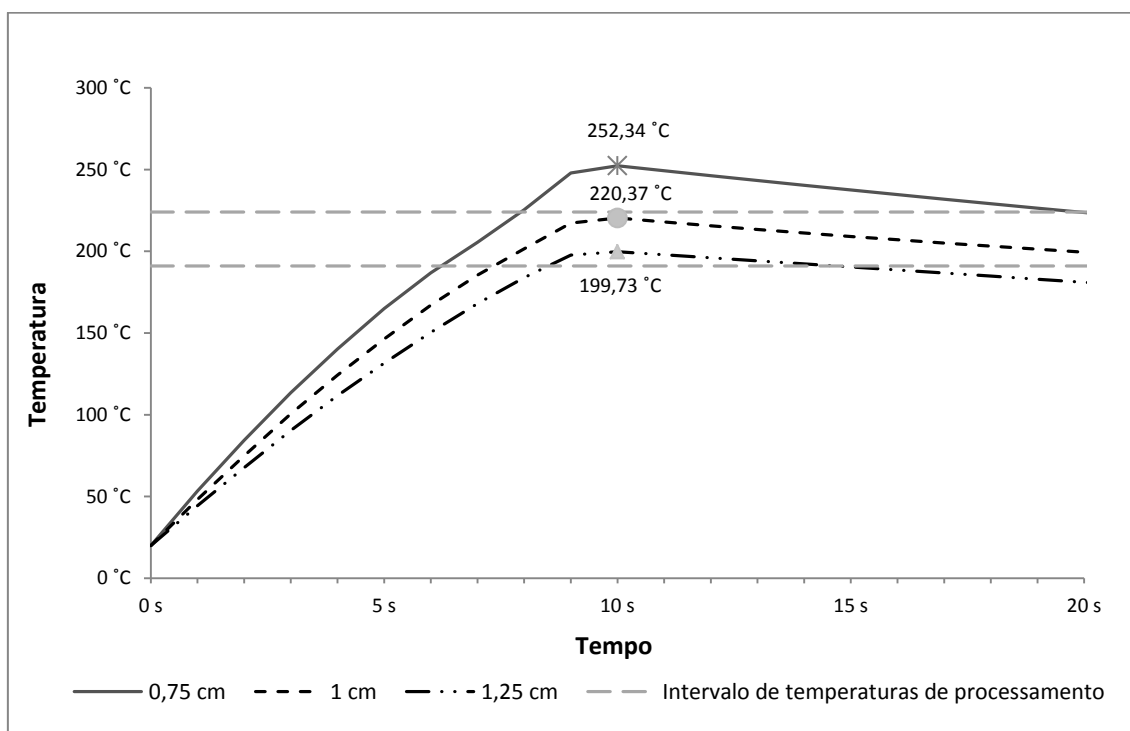


Figura 5.2 – Evolução da temperatura superficial da fita para diferentes distâncias com 1 lâmpada em cada face e velocidade de 3 m/min

As simulações demonstradas na Figura 5.2 cujas condições de processamento incluem a utilização de uma lâmpada em cada face da fita à distância de 0,75 cm e velocidade de 3 m/min, a temperatura superficial da fita, 252,34 °C ultrapassa a temperatura de processamento máxima admissível. Nos casos das simulações em que consideram as distâncias de 1 e 1,25 cm as temperaturas superficiais calculadas computacionalmente, 220,37°C e 199,73°C, respectivamente, encontram-se dentro do intervalo de temperaturas de processamento.

No caso das condições de processamento com 1 cm de distância, salienta-se o elevado tempo de permanência da temperatura superficial da fita dentro do intervalo de temperaturas de processamento, cerca de 10 s.

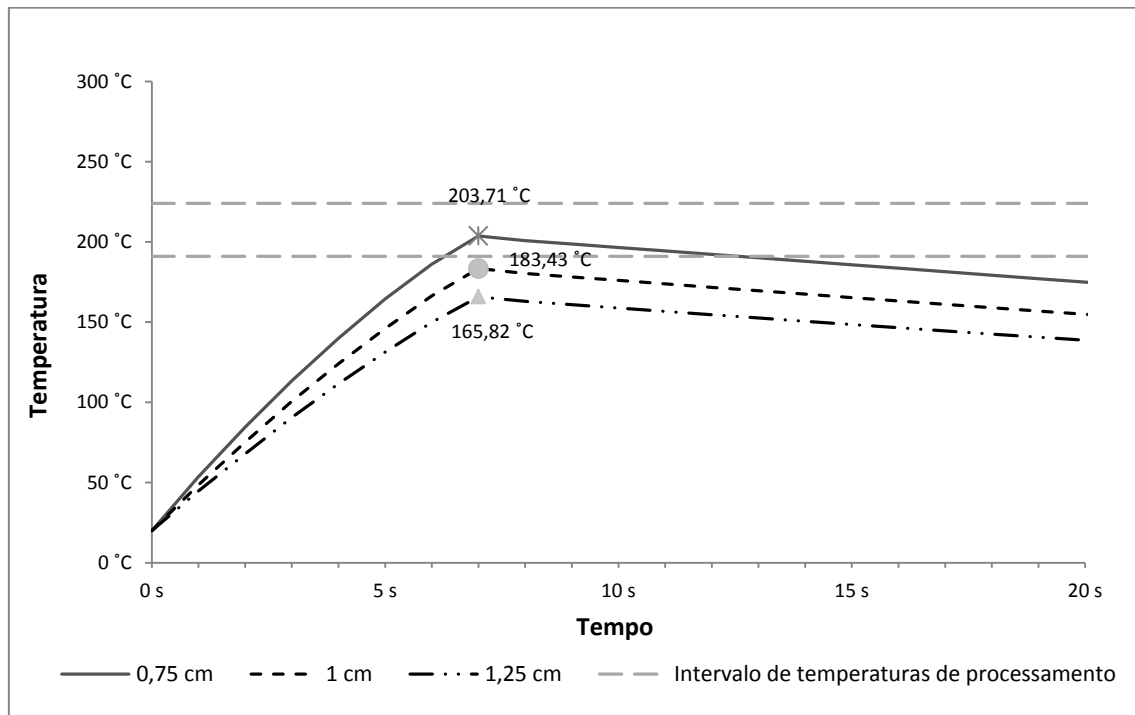


Figura 5.3 - Evolução da temperatura superficial da fita para diferentes distâncias com 1 lâmpada em cada face e velocidade de 4 m/min

Nas simulações relativas à Figura 5.3, com uma lâmpada em cada face da fita e velocidade de 4 m/min apenas uma das três condições de processamento impostas, distância de 0,75 cm, se atinge uma temperatura superficial da fita, 203,71 °C, dentro do intervalo admitido. Para os casos simulados com as distâncias de 1 e de 1,25 cm as temperaturas superficiais obtidas foram respectivamente de 183,43°C e 165,82°C, abaixo do limite mínimo de processamento.

5.1.2 Configuração de Duas Lâmpadas em Cada Face da Fita - Distâncias Curtas

Na Figura 5.4 e na Figura 5.5 apresenta-se a evolução da temperatura superficial da fita, considerando duas lâmpadas em cada face da fita, para as velocidades de 8 m/min e de 9 m/min e com distâncias curtas entre as lâmpadas e a fita.

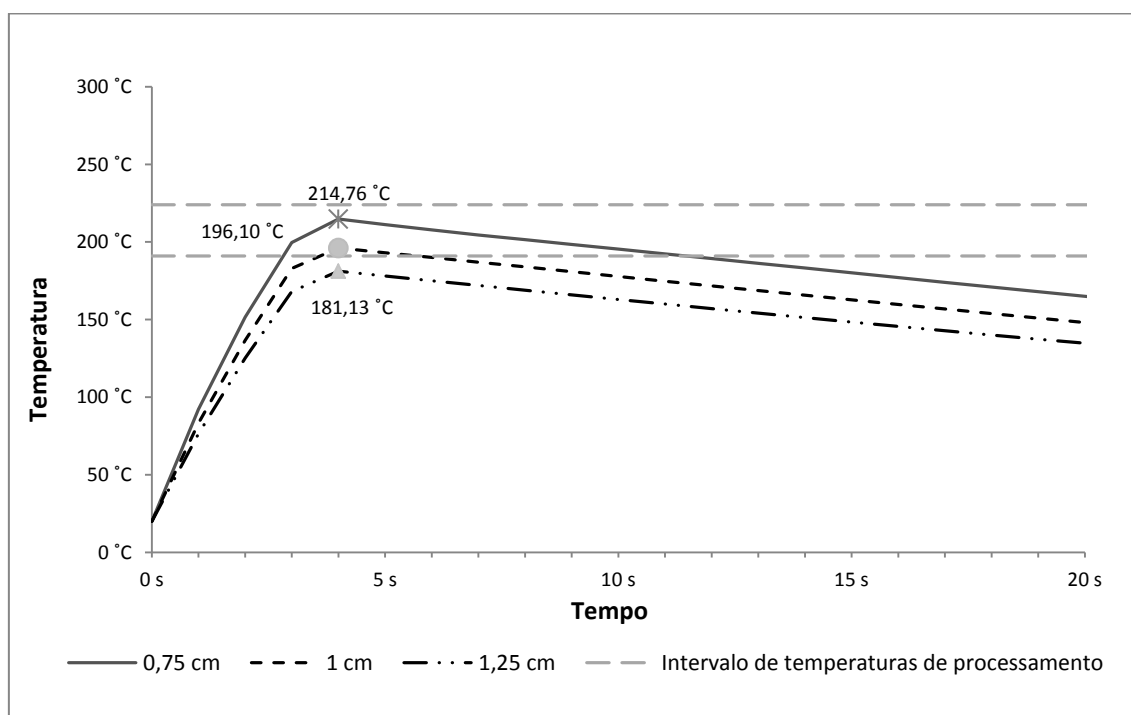


Figura 5.4 - Evolução da temperatura superficial da fita para diferentes distâncias com 2 lâmpadas em cada face e velocidade de 8 m/min

Na Figura 5.4 mostram-se os resultados das simulações efectuadas com condições de processamento a utilizando duas lâmpadas em cada face da fita e velocidade de 8 m/min. Nos casos dos processamentos às distâncias de 0,75 e 1 cm as temperaturas superficiais da fita, 214,76 °C e 196,10 °C, respectivamente, ultrapassam a temperatura de processamento mínima admissível. No entanto, à distância de 1 cm, a temperatura calculada é próxima do limite inferior do intervalo de temperaturas de processamento, implicando que a permanência da temperatura superficial da fita dentro do intervalo de temperaturas seja muito curta, 2 s. Na simulação à distância de 1,25 cm a temperatura superficial calculada computacionalmente, 181,13°C encontra-se abaixo do intervalo de temperaturas de processamento.

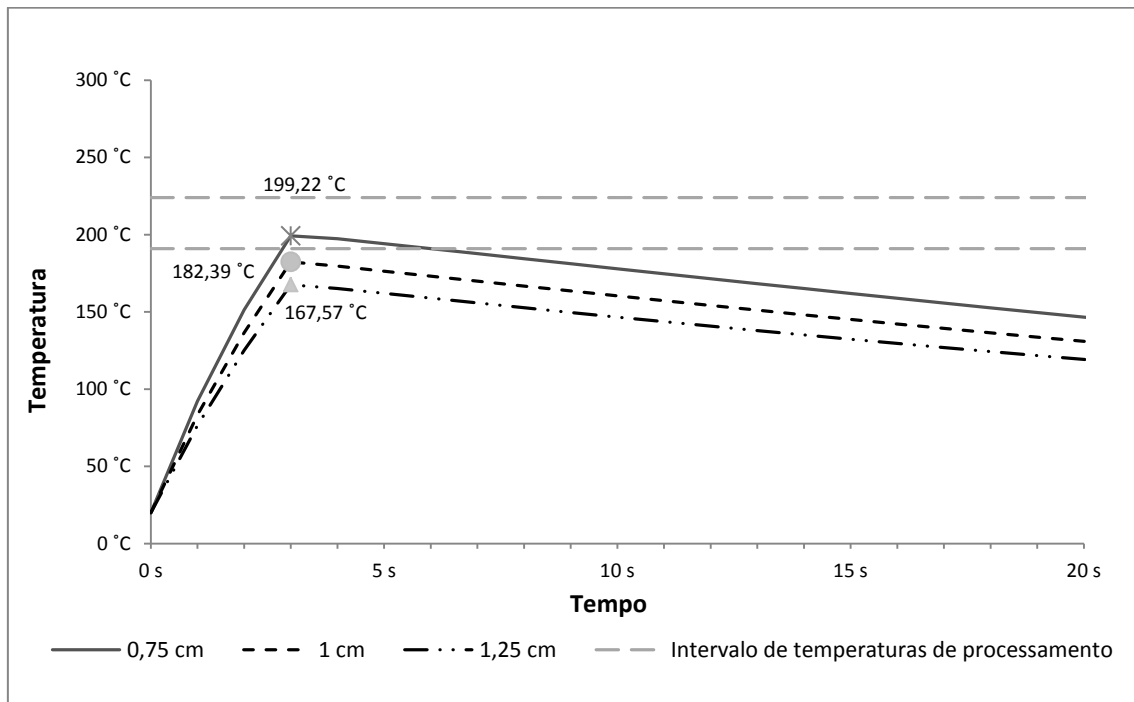


Figura 5.5 - Evolução da temperatura superficial da fita para diferentes distâncias com 2 lâmpadas em cada face e velocidade de 9 m/min a distâncias curtas

Relativamente às simulações documentadas na Figura 5.5, cujas condições de processamento envolvem duas lâmpadas em cada face da fita e passagem da fita à velocidade de 9 m/min apenas à distância de 0,75 cm a temperatura superficial da fita, 199,22 °C, se encontra dentro do intervalo de temperaturas admitido. De salientar que apesar da temperatura superficial se encontrar dentro do intervalo de temperaturas de processamento admissíveis, o tempo de permanência da temperatura da fita nesse intervalo de temperaturas é muito curto, cerca de 3 s.

Para os casos simulados com as distâncias de 1 e de 1,25 cm as temperaturas superficiais obtidas foram respectivamente de 182,39°C e 167,57°C, abaixo do limite mínimo de processamento.

5.1.3 Configuração de Duas Lâmpadas em Cada Face da Fita – Distâncias

Longas

Na Figura 5.6 e na Figura 5.7 apresenta-se a evolução da temperatura superficial da fita, considerando duas lâmpadas em cada face da fita, para as velocidades de 8 m/min e de 9 m/min e com distâncias longas entre as lâmpadas e a fita.

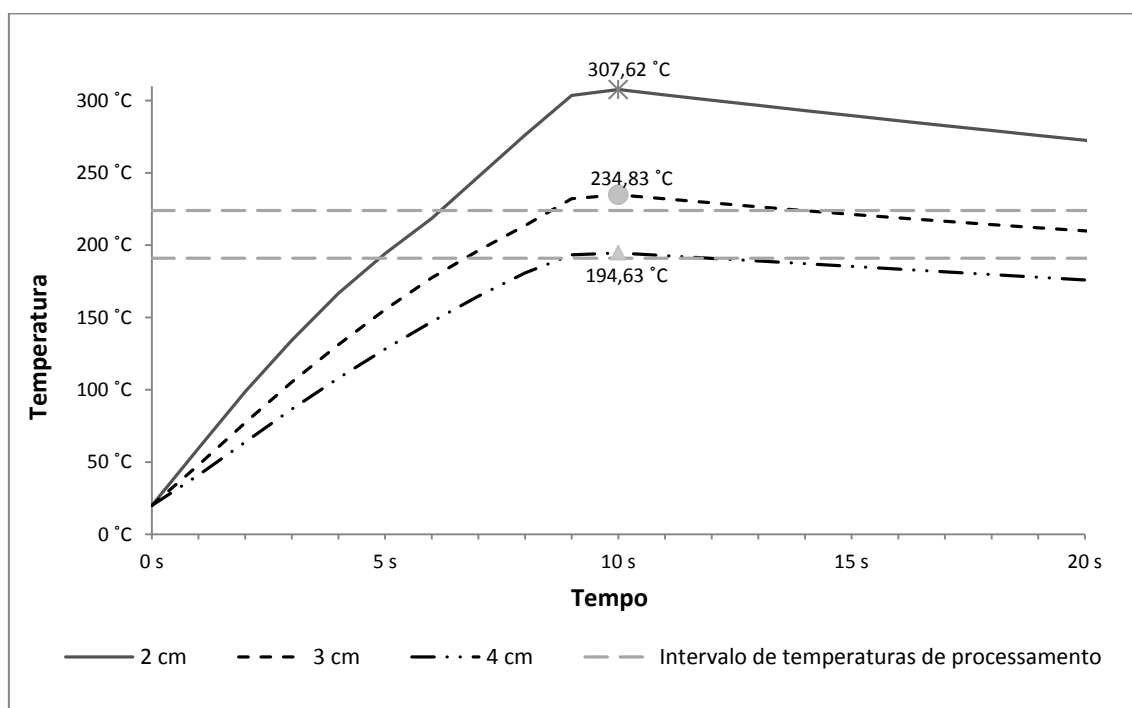


Figura 5.6 - Evolução da temperatura superficial da fita para diferentes distâncias com 2 lâmpadas em cada face e velocidade de 3 m/min a distâncias longas

Relativamente às simulações apresentadas na Figura 5.6, cujas condições de processamento envolvem duas lâmpadas em cada face da fita e passagem da fita à velocidade de 3 m/min à distância de 2 cm a temperatura superficial da fita, 307,62 °C, acima do limite superior de temperatura admitido. Para o caso simulado à distância de 2 cm a temperatura de 234,83 °C permanece acima do limite superior de temperatura admitido. Apenas no caso da distância a 4 cm a temperatura se encontra dentro do intervalo admitido, com 194,63 °C.

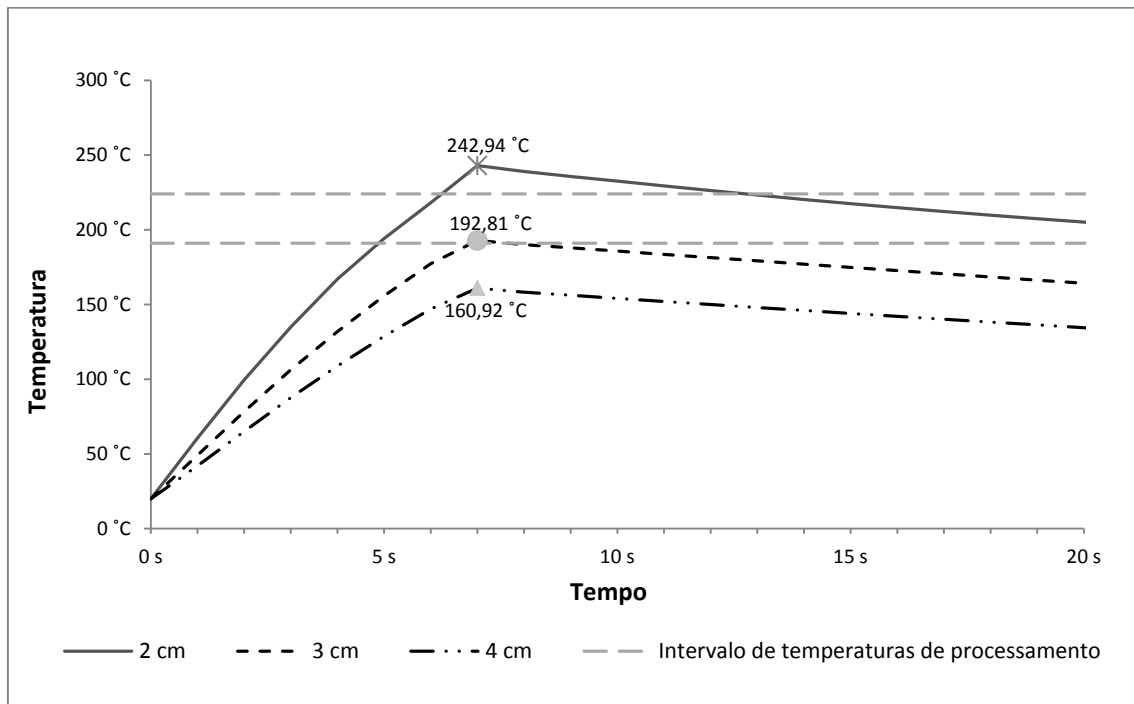


Figura 5.7 - Evolução da temperatura superficial da fita para diferentes distâncias com 2 lâmpadas em cada face e velocidade de 4 m/min a distâncias longas

Na Figura 5.7, cujas condições de processamento envolvem duas lâmpadas em cada face da fita e passagem da fita à velocidade de 4 m/min, apenas à distância de 3 cm a temperatura superficial da fita, 192,81 °C, se encontra dentro do intervalo admissível, embora tangencialmente. No caso da simulação à distância de 2 cm, a temperatura de 242,94 °C encontra-se acima do limite superior de temperatura admitido. Por fim, à distância de 4 cm a temperatura de 160,92 °C permanece abaixo do limite inferior de temperatura admitido.

5.2 Análise e Discussão dos Resultados

Para um melhor entendimento dos resultados das simulações, é importante perceber de que forma as diferentes configurações simuladas, nomeadamente o número de lâmpadas e a distância entre as lâmpadas e a fita influenciam o aquecimento da fita.

As simulações efectuadas são baseadas num modelo 1D. Tal como descrito na secção 4.2.2, ao longo do processo do aquecimento o valor do factor de forma é actualizado a cada posição do ponto computacional relativamente ao sistema de aquecimento. O valor do factor de forma a cada ponto computacional é obtido pela média dos valores do factor de forma em dez pontos ao longo da largura da fita. O cálculo analítico da distribuição da radiação emitida pelas lâmpadas permite perceber a susceptibilidade das configurações simuladas formarem gradientes térmicos significativos ao longo da largura da fita.

A distribuição da radiação incidente na fita é calculada pela equação (3.14).

$$q_{rad} = \varepsilon\alpha\sigma F_{ij}(T_{rad}^4 - T_s^4) \quad (3.14)$$

São analisados os resultados computacionais do ponto de vista da distribuição do fluxo de radiação ao longo da largura da fita em função do número de lâmpadas em cada face da fita e a influência da distância entre a superfície da fita e as lâmpadas no fluxo de radiação incidente.

5.2.1 Estudo da Variação do Fluxo de Radiação na Largura da Fita uma Lâmpada – Distâncias Curtas

Na Figura 5.8 são comparadas os fluxos de radiação, para a configuração de uma lâmpada em distâncias curtas, em função do factor de forma analítico e do factor de forma médio, usado nas simulações computacionais. Para o cálculo do factor de forma analítico no domínio da projecção da lâmpada sobre a fita é dividido em 6 áreas elementares à largura por 20 áreas elementares ao comprimento, de igual dimensão, num total de 120 áreas elementares.

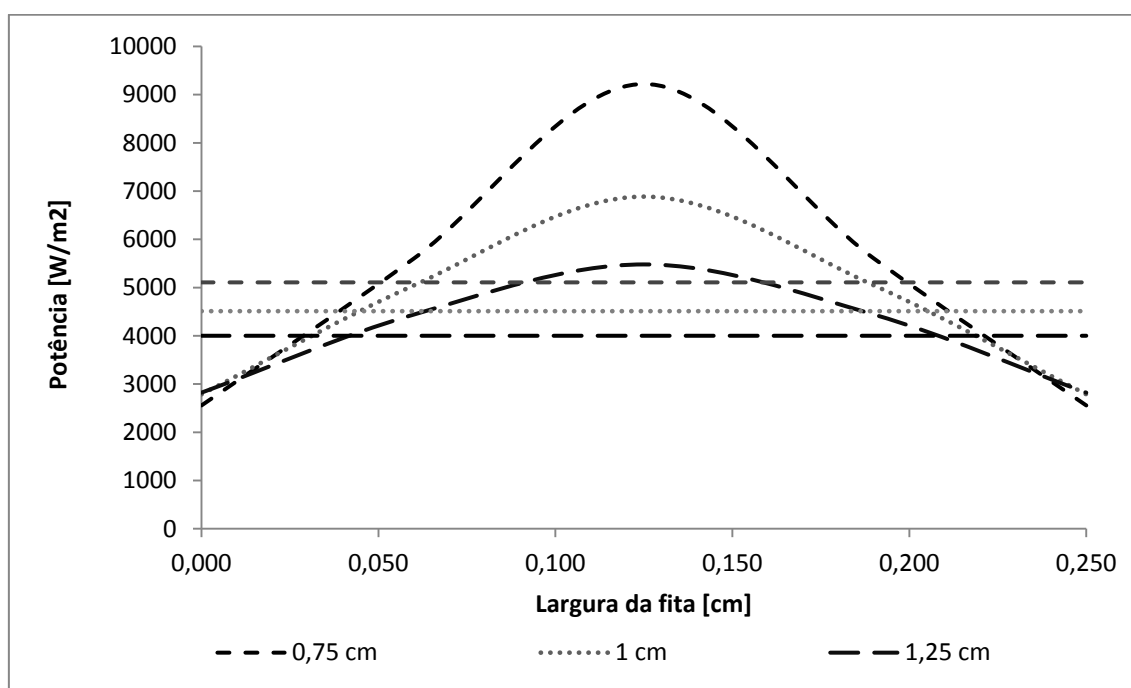


Figura 5.8 - Perfil da potência incidente ao longo da largura da fita e da potência média, emitida por 1 lâmpada - - distâncias curtas

Observa-se que quanto menor a distância maior é a diferença de intensidade do fluxo de radiação ao longo da largura da fita, sendo a potência incidente máxima na zona central da fita, sendo mínima nas extremidades. Para a distância de 0,75 cm a intensidade mínima do fluxo de radiação representa apenas 28% da intensidade máxima. Na distância de 1 cm, a intensidade mínima representa cerca de 40% da intensidade máxima, enquanto para a distância de 1,25 cm, a intensidade mínima é 51% da intensidade máxima.

Analisando o caso onde existe maior disparidade entre os valores de intensidade mínima e máxima, à distância de 0,75 cm. Na Figura 5.9 observa-se o fluxo de radiação no domínio da fita abaixo da projecção da lâmpada, em função do factor de forma analítico calculado para 120 áreas elementares de igual dimensão.

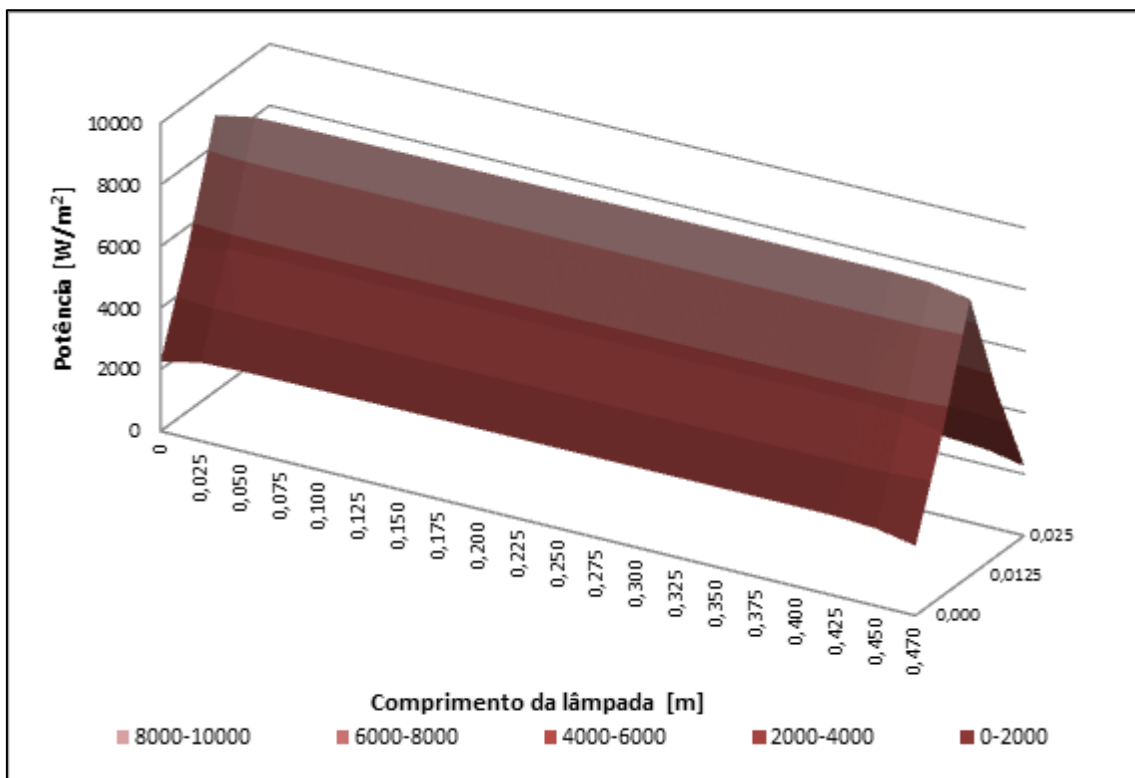


Figura 5.9 - Distribuição do fluxo de radiação incidente na projecção de uma lâmpada sobre a superfície da fita à distância de 0,75 cm – calculada analiticamente

Observa-se que existe grande variação do fluxo radiativo ao longo da largura e do comprimento do domínio em estudo. Para a mesma posição ao longo do comprimento, o fluxo mínimo de radiação ao longo da largura varia entre 35,6% e 39% relativamente ao fluxo de radiação máximo.

Na Figura 5.10 é apresentado o fluxo de radiação usado nas simulações computacionais para a distância de 0,75 cm.

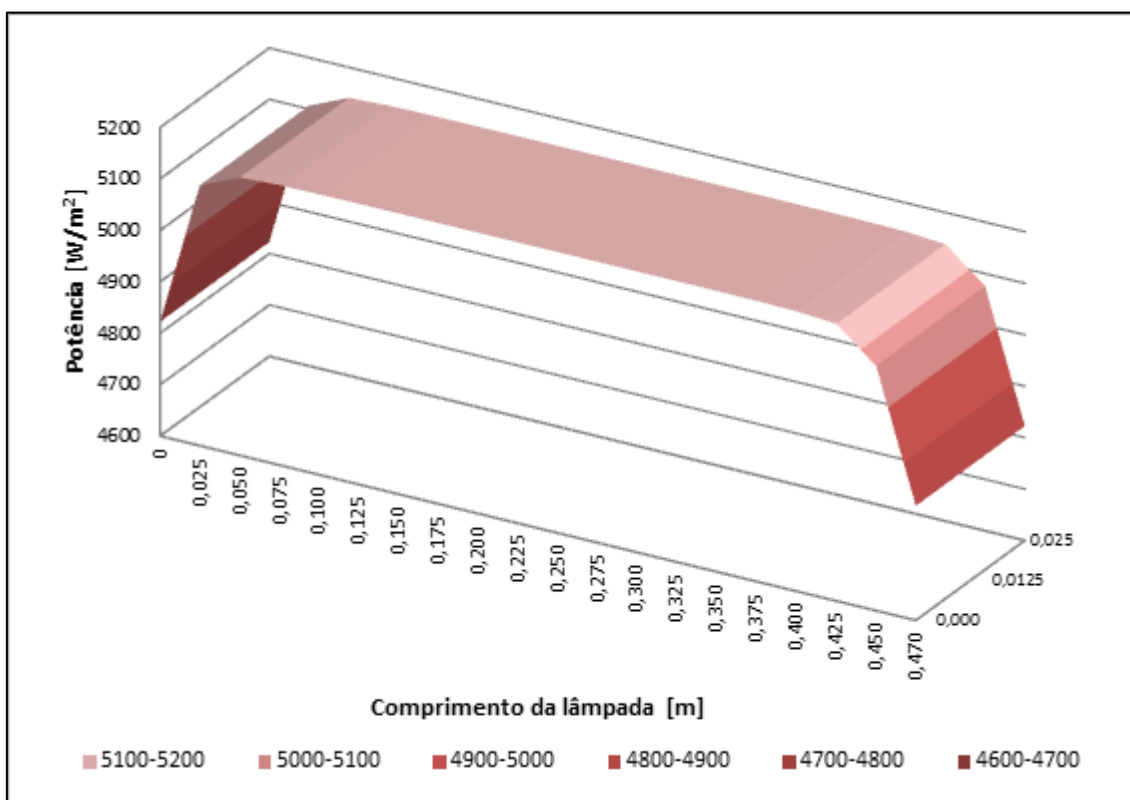


Figura 5.10 - Distribuição do fluxo de radiação incidente na projecção de uma lâmpada sobre a superfície da fita à distância de 0,75 cm – usada na simulação computacional

Comparando o fluxo de radiação calculado analiticamente, 2D, da Figura 5.9 com o fluxo de radiação calculado nas simulações computacionais, 1D, da Figura 5.10, observa-se que o fluxo médio de radiação, a cada posição do ponto computacional, representa entre 53,7% e 55,6% do fluxo máximo de radiação, e entre 198% e 213% do fluxo mínimo de radiação.

Dada a diferença significativa entre os fluxos de radiação incidentes ao longo da largura da fita, observa-se que esta diferença pode fomentar a formação de gradientes térmicos significativos.

5.2.2 Estudo da Variação do Fluxo de Radiação na Largura da Fita com Duas Lâmpadas – Distâncias Curtas

Na Figura 5.11 são comparadas os fluxos de radiação, para a configuração de duas lâmpadas em distâncias curtas, em função do factor de forma analítico e do factor de forma médio, usado nas simulações computacionais. Para o cálculo do factor de forma analítico no domínio da projecção da lâmpada sobre a fita foi seguido método análogo ao da configuração com uma lâmpada.

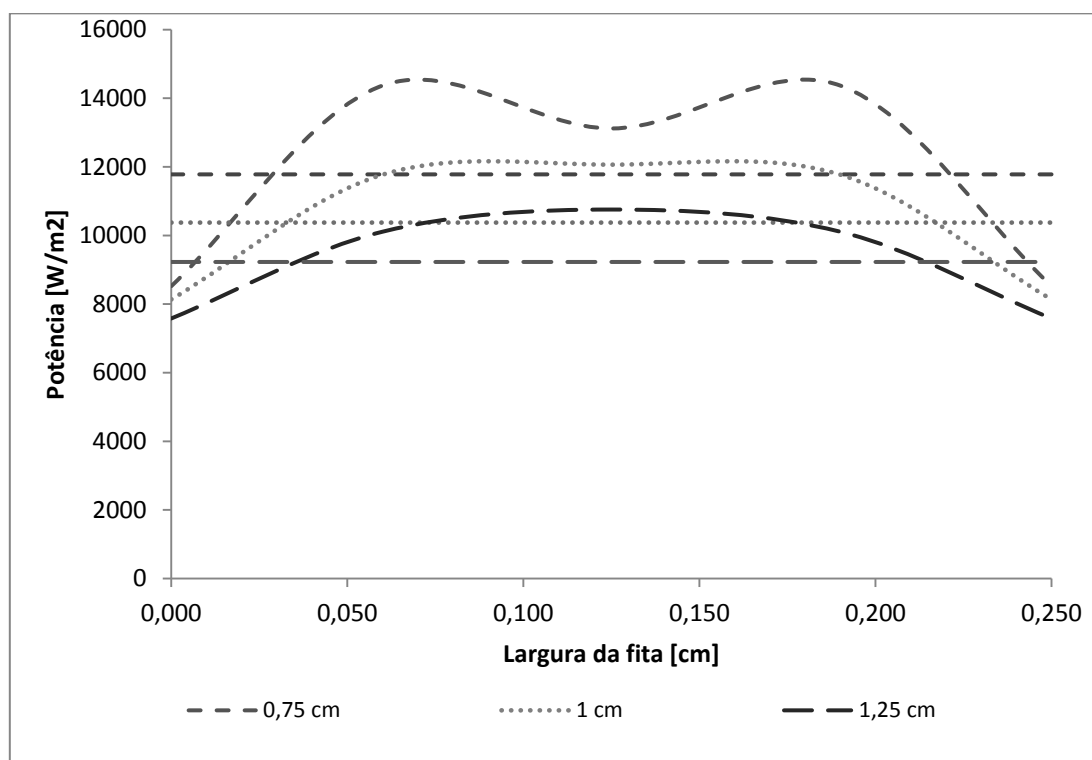


Figura 5.11 - Perfil da potência incidente ao longo da largura da fita e da potência média, emitida por 2 lâmpadas – distâncias curtas

Observa-se que quanto menor a distância maior é a diferença de intensidade do fluxo de radiação ao longo da largura da fita, sendo a potência incidente máxima nas zonas imediatamente abaixo das lâmpadas, sendo mínima nas extremidades. Para a distância de 0,75 cm a intensidade mínima do fluxo de radiação representa 59% da intensidade máxima. Na distância de 1 cm, a intensidade mínima representa cerca de 69% da intensidade máxima,

enquanto para a distância de 1,25 cm, a intensidade mínima é 75% da intensidade máxima. Comparativamente à configuração com uma lâmpada por face da fita, a solução de aplicação de duas lâmpadas apresenta-se como mais equilibrada em termos de distribuição do fluxo de radiação.

Analisando o caso onde existe maior disparidade entre os valores de intensidade mínima e máxima, à distância de 0,75 cm. Na Figura 5.12, observa-se o fluxo de radiação no domínio da fita abaixo da projecção das lâmpadas, em função do factor de forma analítico calculado para 120 áreas elementares de igual dimensão.

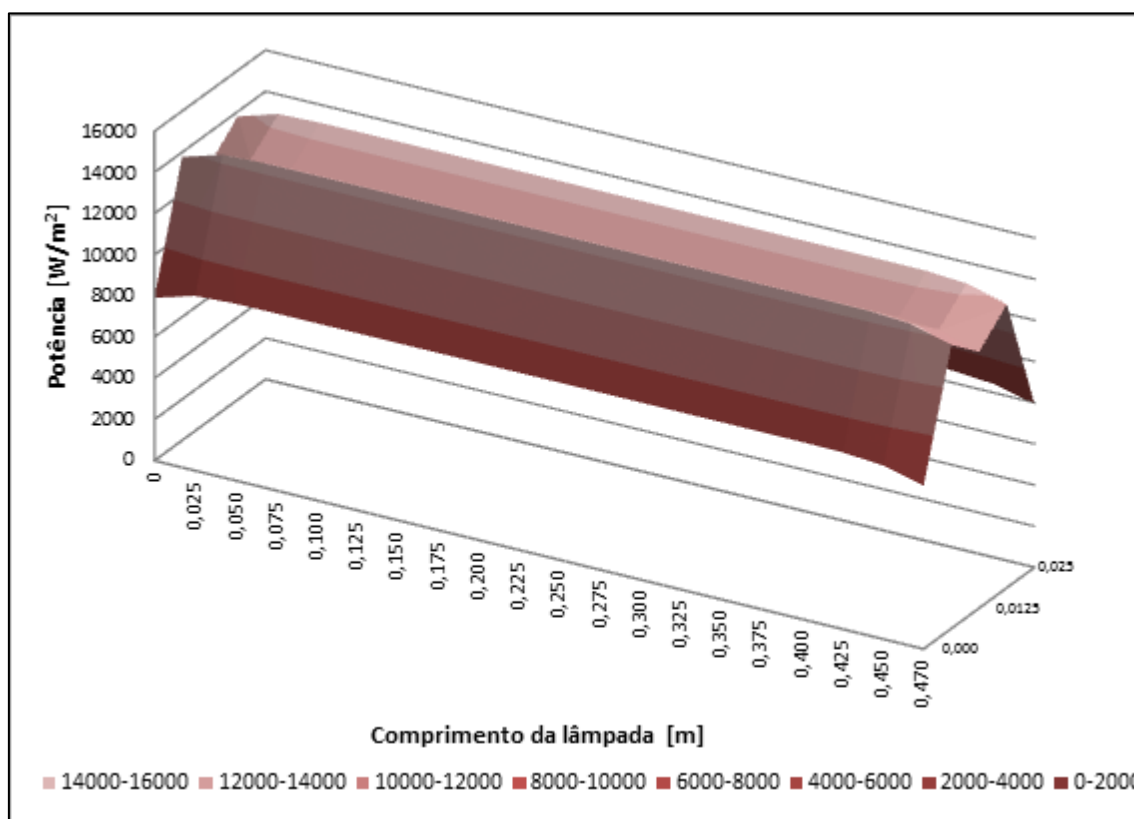


Figura 5.12 - Distribuição do fluxo de radiação incidente na projecção de duas lâmpadas sobre a superfície da fita à distância de 0,75 cm – calculada analiticamente

Observa-se que existe grande variação do fluxo radiativo ao longo da largura do domínio em estudo. Para a mesma posição ao longo do comprimento, o fluxo mínimo de radiação ao longo da largura varia entre 57,5% e 59,6% relativamente ao fluxo de radiação máximo.

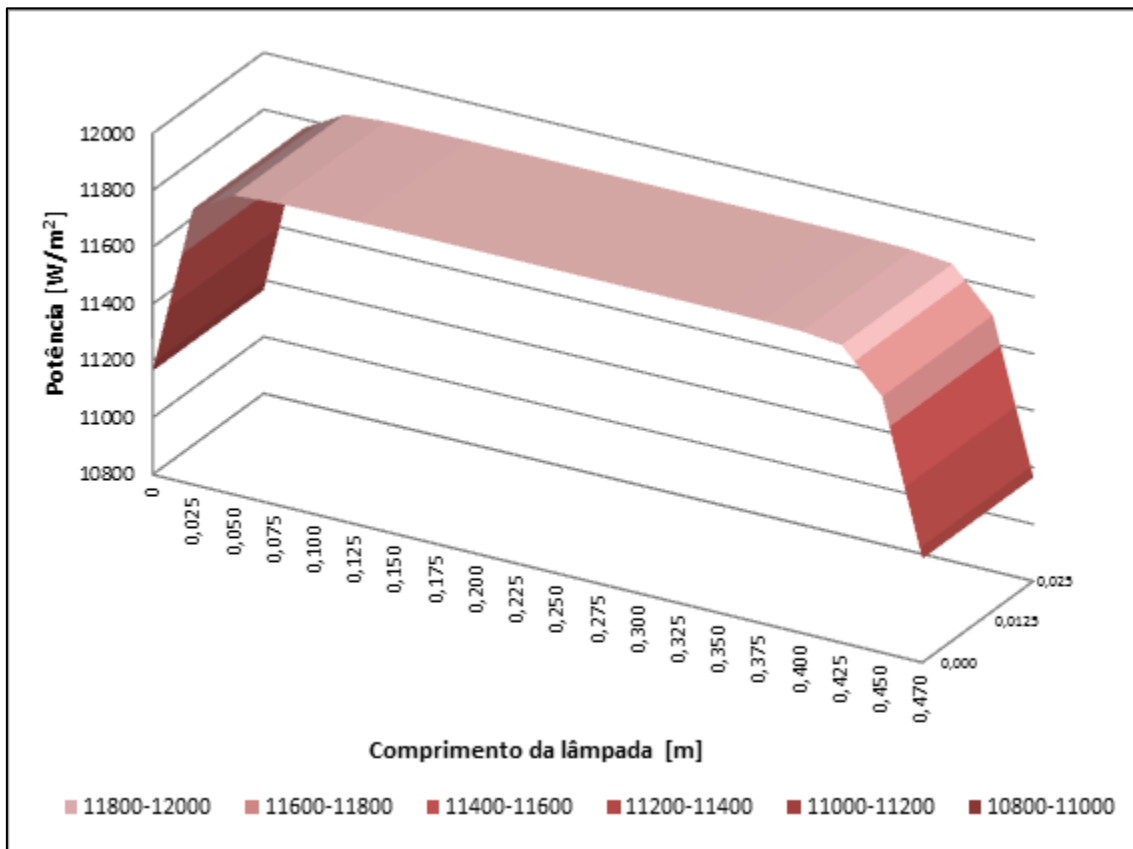


Figura 5.13 - Distribuição do fluxo de radiação incidente na projecção de duas lâmpadas sobre a superfície da fita à distância de 0,75 cm – usada na simulação computacional

Comparando o fluxo de radiação calculado analiticamente, 2D, da Figura 5.12, com o fluxo de radiação calculado nas simulações computacionais, 1D, da Figura 5.13, observa-se que o fluxo médio de radiação, a cada posição do ponto computacional, representa entre 81% e 82,1% do fluxo máximo de radiação, e entre 137,8% e 141% do fluxo mínimo de radiação.

5.2.3 Estudo da Variação do Fluxo de Radiação na Largura da Fita com Duas Lâmpadas – Distâncias Longas

De forma análoga aos casos anteriores, na Figura 5.14 comparam-se os fluxos de radiação, para a configuração de duas lâmpadas em distâncias, em função do factor de forma analítico e do factor de forma médio, usado nas simulações computacionais.

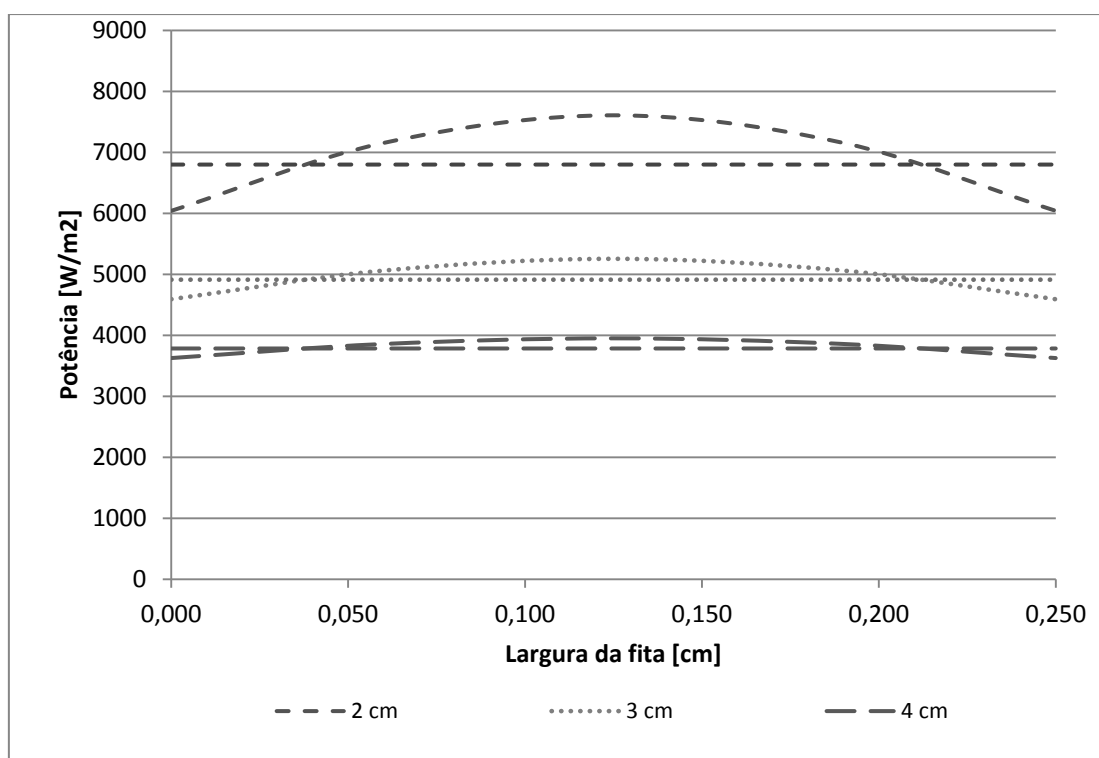


Figura 5.14 - Perfil da potência incidente ao longo da largura da fita e da potência média, emitida por 2 lâmpadas – distâncias longas

Comparativamente aos casos anteriores, observa-se maior equilíbrio entre a distribuição de potência calculada analiticamente e a calculada numericamente. Para a distância de 2 cm a intensidade mínima do fluxo de radiação representa 80% da intensidade máxima. Na distância de 3 cm, a intensidade mínima representa cerca de 87% da intensidade máxima, enquanto para a distância de 4 cm, a intensidade mínima é 92% da intensidade máxima. Comparativamente às configurações anteriores, com distâncias mais curtas entre as lâmpadas e a fita, a intensidade

de radiação é mais equilibrada ao longo da largura da fita, apesar de proporcionar menores velocidades de processamento.

Para a configuração em análise neste ponto, o caso onde existe maior disparidade entre os valores de intensidade mínima e máxima ocorre à distância de 2 cm. Na Figura 5.15, observa-se o fluxo de radiação no domínio da fita abaixo da projecção das lâmpadas, em função do factor de forma analítico calculado para 120 áreas elementares de igual dimensão.

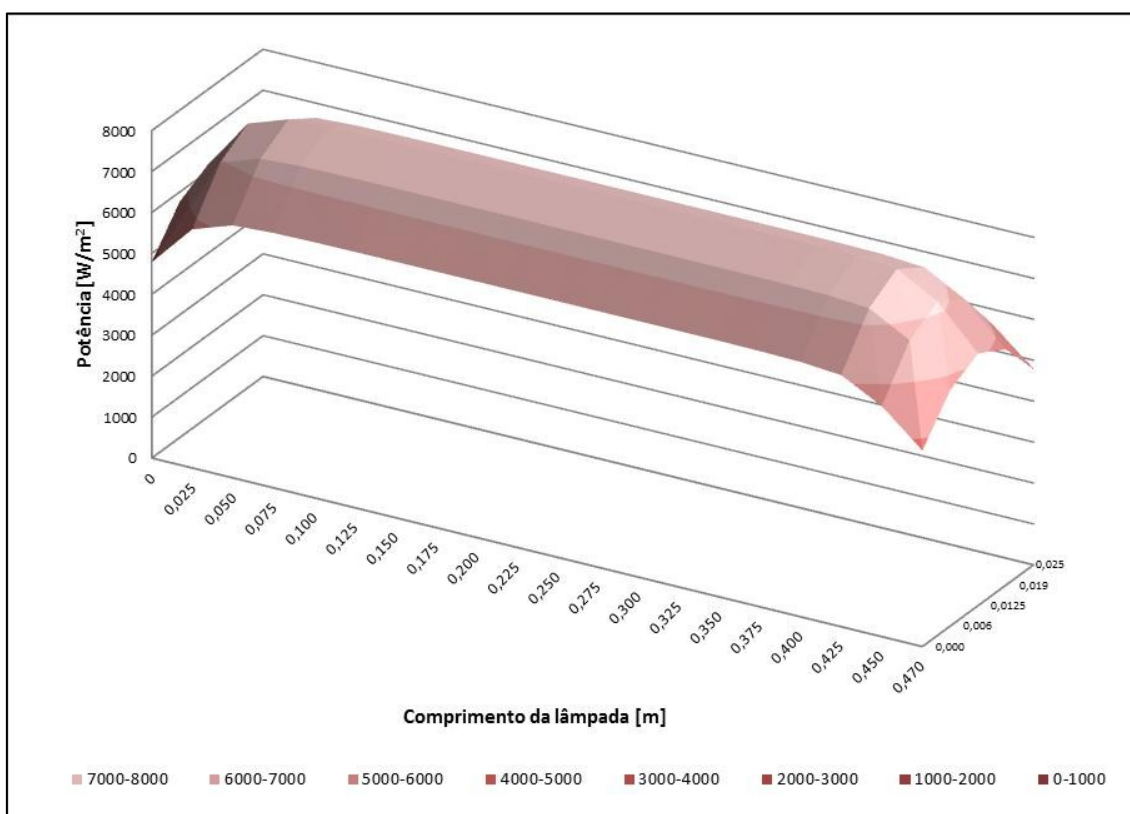


Figura 5.15 - Distribuição do fluxo de radiação incidente na projecção de duas lâmpadas sobre a superfície da fita à distância de 2 cm – calculada analiticamente

A variação do fluxo radiativo ao longo da largura e do comprimento do domínio em estudo é menor quando comparada com os casos apresentados à distância de 0,75 cm. Para a mesma posição ao longo do comprimento, o fluxo mínimo de radiação ao longo da largura varia entre 77,7% e 79,7% relativamente ao fluxo de radiação máximo.

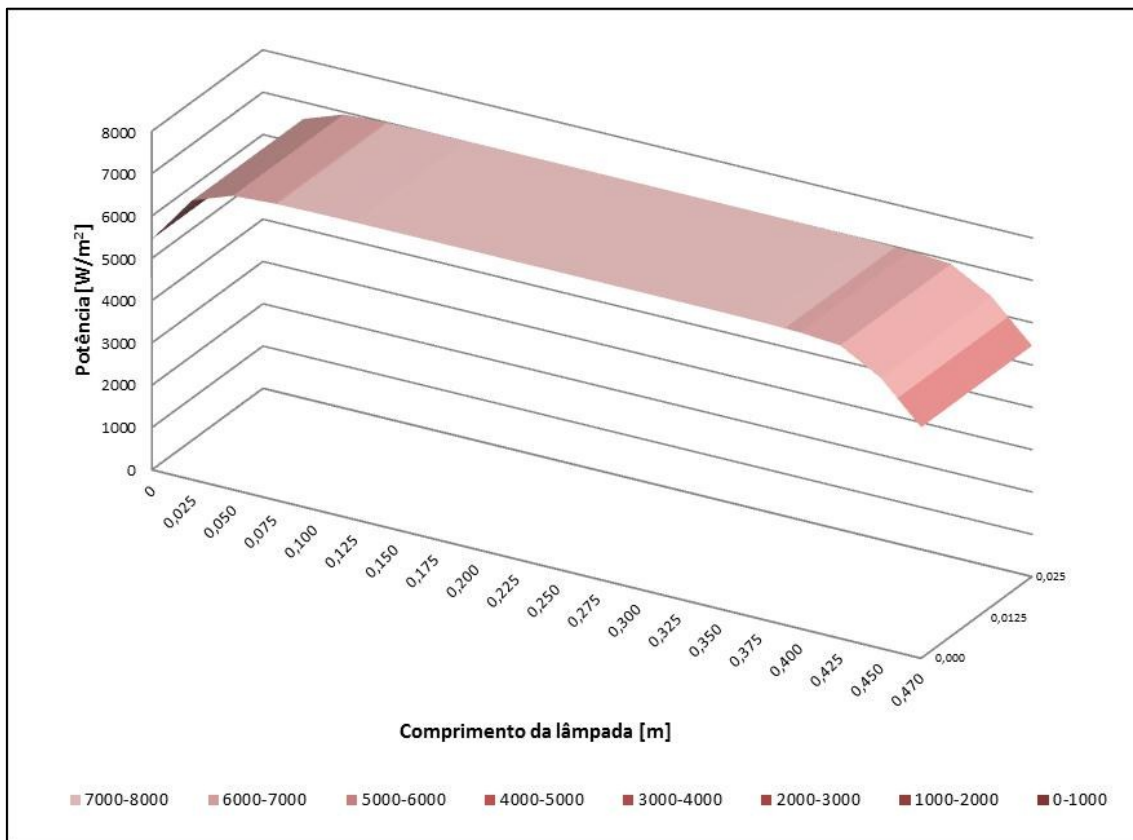


Figura 5.16 - Distribuição do fluxo de radiação incidente na projecção de duas lâmpadas sobre a superfície da fita à distância de 2 cm – usada na simulação computacional

Comparando o fluxo de radiação calculado analiticamente, 2D, da Figura 5.15, com o fluxo de radiação calculado nas simulações computacionais, 1D, da Figura 5.16, observa-se que o fluxo médio de radiação, a cada posição do ponto computacional, representa entre 88,5% e 89,5% do fluxo máximo de radiação, e entre 112,3% e 113,9% do fluxo mínimo de radiação.

5.2.4 Influência da Distância no Fluxo de Radiação Incidente

Os resultados das simulações mostram que a distância entre a superfície da fita e as lâmpadas apresenta elevada influência na temperatura da superficial da fita à saída do sistema de aquecimento.

Na Figura 5.17 mostra-se a variação do fluxo de radiação incidente na superfície da fita em função da distância, para as configurações de uma e duas lâmpadas em cada face da fita.

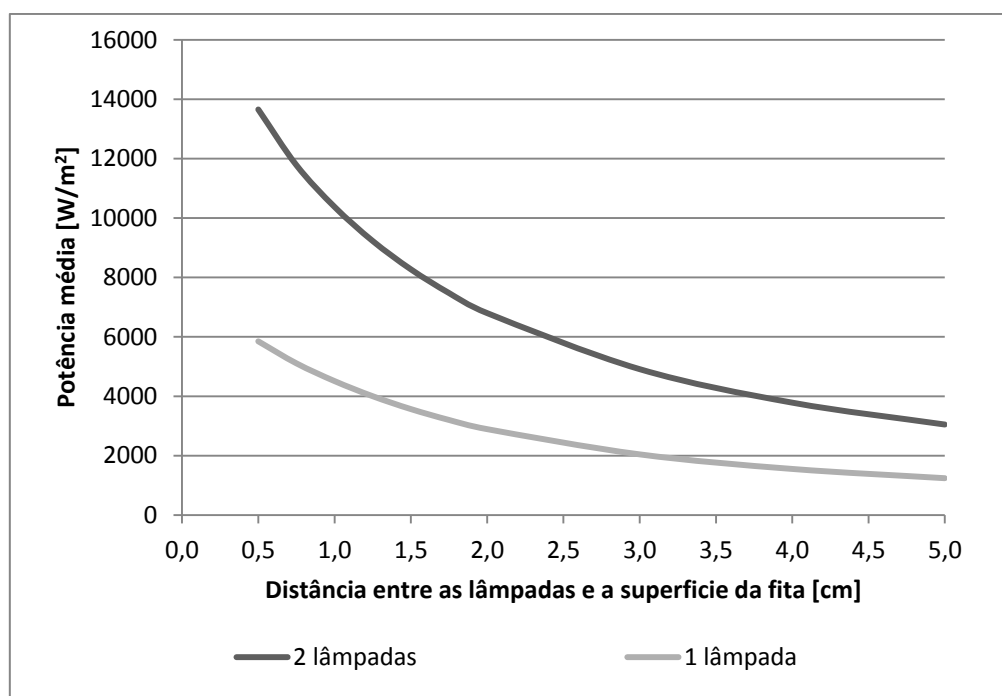


Figura 5.17 - Variação da potência média incidente na fita em função da distância entre as lâmpadas e a fita

Para a configuração de uma lâmpada em cada face da fita a variação é menos significativa comparativamente à configuração com duas lâmpadas. À distância de 0,75 cm o fluxo médio de radiação incidente é 5107 W/m^2 . À distância de 1 cm, ou seja, com uma variação de 0,25 cm, o fluxo de radiação incidente é 4510 W/m^2 , correspondente a 88% do fluxo de radiação à distância de 0,75 cm. Já à distância de 1,25 cm, o fluxo de radiação incidente é 4000 W/m^2 ,

que representa 78% do fluxo de radiação à distância de 0,75 cm. Desta forma, a variação de 0,5 cm na distância conduz a uma perda relativa de 22% do fluxo de radiação incidente.

Este facto é evidenciado pelas temperaturas superficiais da fita obtidas computacionalmente. Assim, com a velocidade de processamento de 3/min, à saída do sistema de aquecimento a temperatura superficial da fita, para as distâncias de 0,75, 1 e 1,25 cm é respectivamente, 252,34 °C, 220,37 °C e 199,73 °C. Ou seja, com a variação de 0,5 na distância a temperatura superficial da fita varia 52,61 °C. Com a velocidade de processamento de 4/min, à saída do sistema de aquecimento a temperatura superficial da fita, para as distâncias de 0,75, 1 e 1,25 cm é, respectivamente, 203,71 °C, 183,43 °C e 165,82 °C, com a variação de 0,5 na distância a induzir a variação da temperatura superficial da fita em 37,89 °C.

Para a configuração de duas lâmpadas em cada face da fita, à distância de 0,75 cm o fluxo médio de radiação incidente é 11780 W/m². À distância de 1 cm, ou seja, com uma variação de 0,25 cm, o fluxo de radiação incidente é 10375 W/m², correspondente a 86% do fluxo de radiação à distância de 0,75 cm. Já à distância de 1,25 cm, o fluxo de radiação incidente é 9227 W/m², que representa 76% do fluxo de radiação à distância de 0,75 cm. Desta forma, a variação de 0,5 cm na distância conduz a uma perda relativa de 24% do fluxo de radiação incidente.

Analogamente à configuração com uma lâmpada, na configuração com duas lâmpadas a influência da distância na temperatura superficial da fita evidenciada pelas temperaturas superficiais da fita obtidas computacionalmente. Com a velocidade de processamento de 8/min, à saída do sistema de aquecimento a temperatura superficial da fita, para as distâncias de 0,75, 1 e 1,25 cm é respectivamente, 214,76 °C, 196,10 °C e 181,13 °C. Ou seja, com a variação de 0,5 na distância a temperatura superficial da fita varia 33,69 °C. Com a velocidade de processamento de 9/min, à saída do sistema de aquecimento a temperatura superficial da fita, para as distâncias de 0,75, 1 e 1,25 cm é, respectivamente, 199,22 °C, 182,39 °C e 167,57 °C, com a variação de 0,5 na distância a induzir a variação da temperatura superficial da fita em 31,65 °C.

Na configuração com duas lâmpadas em cada face da fita, à medida que a distância aumenta, a diferença do fluxo médio de radiação incidente diminui. À distância de 2 cm o fluxo médio de radiação é $6799,9 \text{ W/m}^2$. Ao variar a distância para 3 cm, o fluxo médio de radiação é $4192,26 \text{ W/m}^2$, o que corresponde a 70% do fluxo de radiação à distância de 2 cm. Aumentando a distância para 4 cm, o fluxo médio de radiação incidente é 3784 W/m^2 , o que corresponde a 77% do fluxo médio de radiação incidente sobre a fita à distância de 3 cm.

Desta forma, observa-se que para configurações a distâncias curtas, um afastamento de 0,5 cm (de 0,75 para 1,25 cm) entre as lâmpadas e a superfície da fita conduz a uma perda de 24% do fluxo de radiação incidente, enquanto em distâncias longas, uma variação de 1 cm corresponde, respectivamente, a perdas de 27% (de 2 para 3 cm) e 23% (de 3 para 4 cm). Nota-se também, que na configuração para uma lâmpada à distância de 0,75 cm o fluxo médio de radiação incidente é muito aproximado ao fluxo médio de radiação para a configuração com duas lâmpadas à distância de 3 cm. Finalmente, observa-se, que com distâncias curtas existe maior sensibilidade do fluxo de radiação incidente a pequenas variações da distância. Tal é evidenciado na Figura 5.17, em que se observa que à medida que a distância entre as lâmpadas e fita aumenta, a variação do fluxo de radiação incidente é menor.

5.3 Projecto de uma Bancada de Aquecimento Experimental

No sentido de no futuro realizar ensaios para validação experimental do modelo computacional desenvolvido, foi modelado um sistema de aquecimento experimental, adaptado a equipamento pré-existente no laboratório de compósitos do PIEP, nomeadamente um sistema tensor pneumático e um sistema de alimentação de fita. Desta forma, o projecto da instalação experimental incidiu sobre o sistema de aquecimento, estrutura de suporte e mandril de enrolamento para adaptação no motor de tensionamento pneumático.

Desta forma o projecto teve como objectivos:

- Desenvolvimento de um sistema de aquecimento por lâmpadas de infravermelhos, capaz de apresentar uma ou duas lâmpadas em cada lado da fita;
- Sistema de regulação da distância entre as lâmpadas e a fita;

- Mandril de enrolamento capaz de produzir anéis susceptíveis de serem testados de acordo com as normas EN 1228.e ASTM D2290-92.

Foram ainda considerados, com vista a desenvolvimento de futuras experiências:

- Sistema de regulação da potência das lâmpadas;
- Sistema de consolidação por rolo de compressão;
- Rolo de compressão com arrefecimento por água.

Foi desenvolvido um suporte para as lâmpadas de infravermelhos, capaz de suportar duas lâmpadas em paralelo, Figura 5.18.

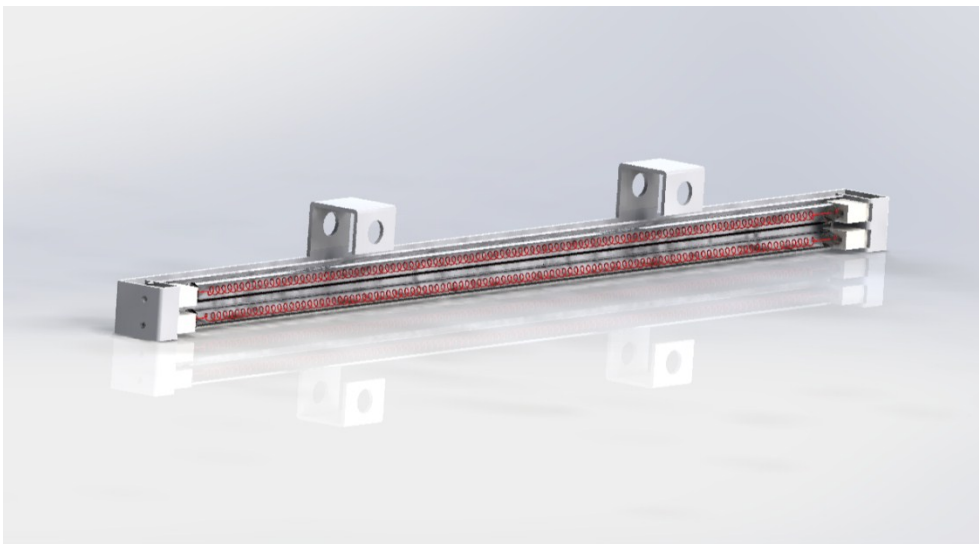


Figura 5.18 - Sistema de suporte das lâmpadas

A estrutura de suporte das lâmpadas foi projectada contemplando um sistema de ajustamento da posição das lâmpadas relativamente à fita. Projectaram-se dois veios com roscados, que rodam solidariamente por meio de uma corrente, accionados por uma manivela manual. Desta forma, o utilizador tem a possibilidade de facilmente implementar alterações na distância, sendo a distância máxima entre lâmpadas de 100 mm, Figura 5.19 e Figura 5.20.

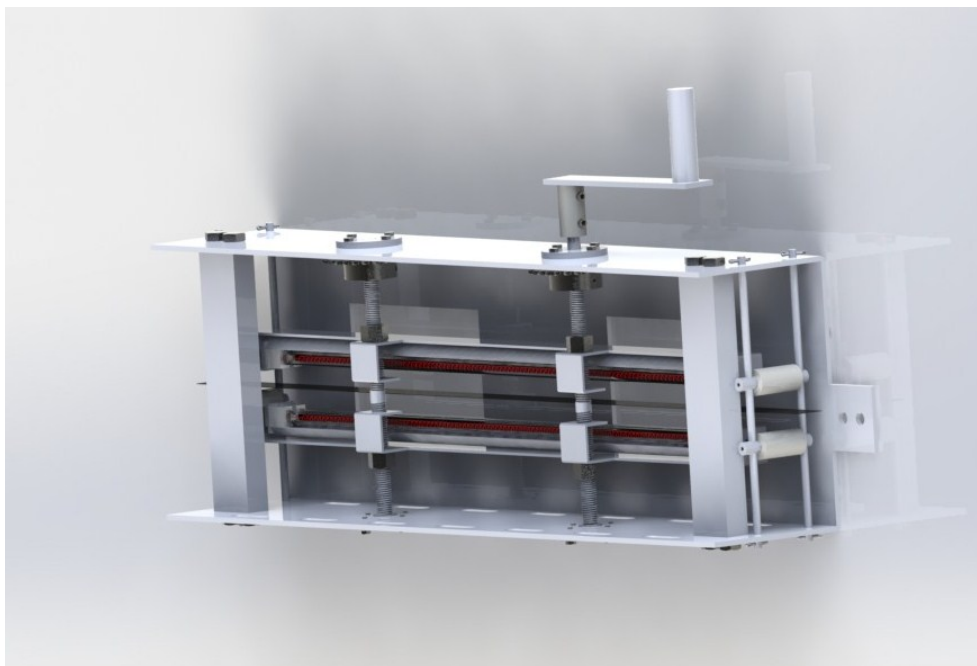


Figura 5.19 - Estrutura de suporte

A distância máxima entre a fita e as lâmpadas no sistema de aquecimento projectado é de 5 cm, permitindo uma distância máxima entre lâmpadas de 10 cm no total.

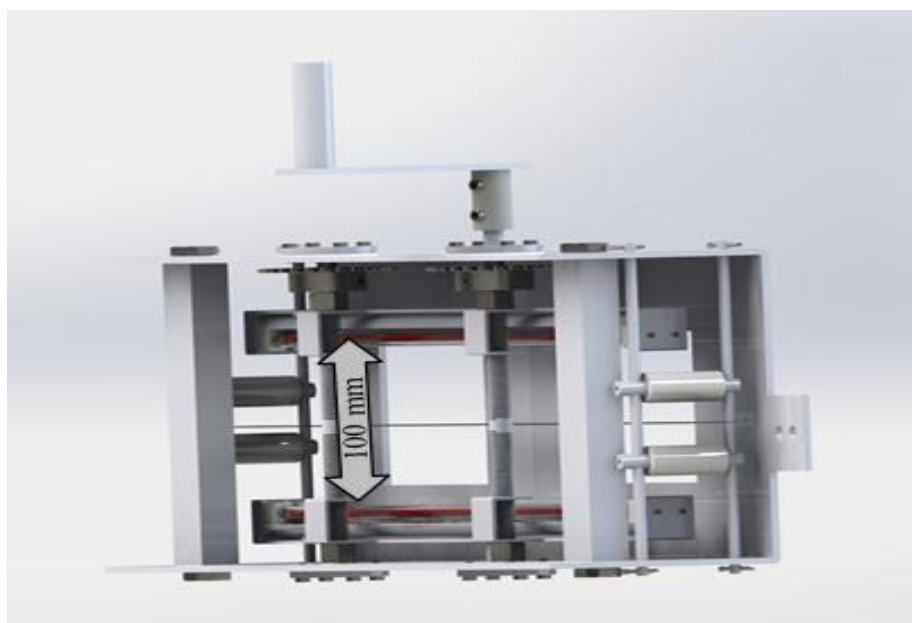


Figura 5.20 - Distância máxima entre lâmpadas

O projecto do sistema com todos os seus componentes pode observar-se na Figura 5.21.

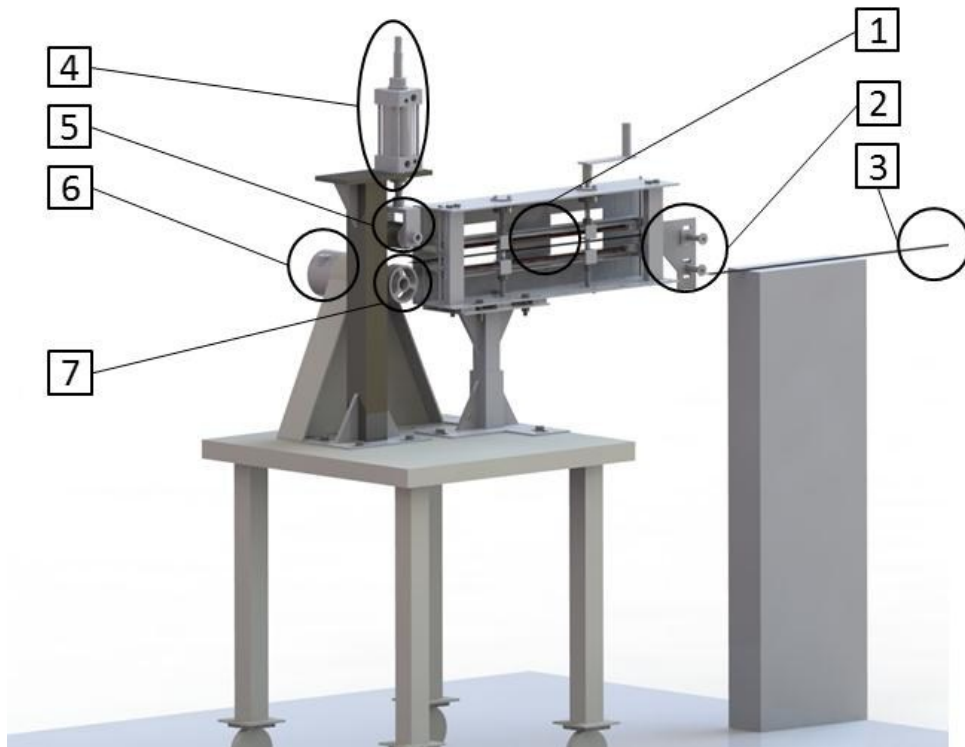


Figura 5.21 - Bancada experimental

Identificando-se os seguintes componentes:

1. Sistema de aquecimento;
2. Sistema de guiamento de fita;
3. Rolos de puxo da fita, montados na máquina de pultrusão, que definem a altura de alimentação da fita;
4. Actuador pneumático modelo Camozzi AC95SDB63 50W, existe no laboratório de compósitos do PIEP;
5. Rolo de consolidação com possibilidade de ser arrefecido a água;
6. Motor pneumático de tensão constante, modelo GAST 4AM-NRV-22B;
7. Mandril de enrolamento;

A implementação do motor pneumático de tensão constante permite que durante o processamento a tensão da fita seja regulável, possibilitando o ajustamento da tensão exercida em função das condições de consolidação desejadas. É também possível realizar a consolidação por rolo de compressão, com diferentes forças de consolidação e temperaturas do rolo.

Possibilita-se assim a obtenção de anéis com diferentes com diferentes condições de processamento diversas, nomeadamente com variação da velocidade de enrolamento, com variação potência das lâmpadas, variação da distância entre a superfície da fita e as lâmpadas de infravermelhos, e ainda com diferentes condições de consolidação, seja ao nível da temperatura ou da tensão, abre a possibilidade de realização de obtenção de provetes, através de enrolamento circunferencial, para diversos estudos de diferentes condições de processamento.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, sendo também efectuadas algumas considerações sobre trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

O desenvolvimento de um modelo matemático para previsão da temperatura da fita pré-impregnada em função das condições de processamento diminui a necessidade de avaliação das mesmas pelo método de tentativa e erro.

Os resultados das simulações computacionais mostram que a temperatura ao longo da espessura da fita atinge rapidamente o equilíbrio após a fase de aquecimento.

Quanto mais próxima a temperatura superficial da fita à saída do sistema de aquecimento estiver da temperatura máxima admissível maior é o tempo que a fita permanece dentro do intervalo de temperaturas de processamento, podendo este factor ser determinante no sucesso da aplicação da bancada experimental projectada a um equipamento industrial.

Nas condições de processamento cuja temperatura superficial à saída do sistema de aquecimento é próxima da máxima temperatura limite de processamento, o intervalo de tempo no qual a temperatura superficial da fita permanece no intervalo de temperatura de processamento admissíveis indicia a possibilidade de fácil adaptação da bancada experimental projectada a um equipamento industrial de enrolamento filamentar ou de deposição automatizada de fita, pois permite que o equipamento de aquecimento seja montado a montante do local de consolidação da fita com razoável margem.

A aplicação de duas lâmpadas em cada face da fita é vantajosa relativamente à aplicação de uma lâmpada. Além da potência aplicada ser duplicada, permitindo velocidades de processamento maiores, a distribuição do fluxo de radiação incidente é mais equilibrada ao longo da largura da fita, o que conduz à formação de menores gradientes térmicos ao longo da largura, logo uma melhor qualidade de processamento.

A distância entre a fita pré-impregnada e as lâmpadas de infravermelho influencia significativamente a temperatura na fita. A variação do fluxo de radiação incidente com a distância é menos significativa na configuração com uma lâmpada em cada face da fita relativamente à configuração com duas lâmpadas.

No entanto, a análise dos resultados experimentais mostra que as configurações a distâncias curtas são significativamente mais sensíveis a pequenas variações de distância relativamente às configurações com distâncias longas. Isto implica, que na implementação do sistema de aquecimento a um dispositivo de deposição automatizada de fita, eventuais vibrações durante o funcionamento, e irregularidades superficiais da fita possam provocar pequenas variações na distância entre a fita e as lâmpadas, afectando significativamente a temperatura da fita à saída do sistema de aquecimento. Neste sentido, a configuração com distâncias longas, apresenta-se menos sensível a pequenas variações de distância, implicando no entanto velocidades de processamento significativamente menores.

Na configuração com duas lâmpadas a distâncias curtas atingem velocidades de processamento muito superiores às atingidas na configuração com distâncias longas. As velocidades atingidas com distâncias longas são semelhantes às atingidas com apenas uma lâmpada por superfície. Desta forma, estes resultados indicam que apesar da utilização de distâncias mais longas garantir menor sensibilidade do sistema de aquecimento a pequenas alterações da distância, a perda de rendimento é significativa, pois com a duplicação de potência instalada, atingem-se os mesmos níveis de velocidades de processamento.

A implementação de um sistema de aquecimento análogo ao projectado, funcionando com distâncias curtas, a um dispositivo de deposição automatizada de fita, implica que a estrutura de suporte do sistema de aquecimento e de guiamento da fita seja concebida com maior rigor e percepção de possíveis vibrações durante o funcionamento, relativamente à concepção de uma estrutura de um sistema de aquecimento que funcione com distâncias longas entre a fita e as lâmpadas.

6.2 Trabalho Futuro

Evolução do modelo computacional para uma configuração 2D que permita um estudo mais rigoroso e pormenorizado da formação de gradientes térmicos ao longo da largura da fita.

Implementação da bancada experimental projectada e respectiva validação experimental dos resultados obtidos através do modelo computacional.

Análise das propriedades mecânicas dos anéis obtidos em função de diferentes condições de processamento.

Implementação de uma bancada experimental com lâmpadas de maior potência, onda curta, que podem possibilitar a implementação de maiores velocidades de processamento a distâncias menos sensíveis a vibrações naturais de um equipamento mecânico e a irregularidades superficiais da fita.

Bibliografia

- [1] Nunes, J.P., J.F. Silva, J.C. Velosa, C.A. Bernardo, e A.T. Marques, *New thermoplastic matrix composites for demanding applications*. *Plastics, Rubber and Composites*, 2009. **38**(2-3): p. 167-172.
- [2] *The research requirements of the transport sectors to facilitate an increased usage of composite materials. Part I – The composite materials research requirements of the aerospace industry*. EADS Deutschland GmbH, 2004.
- [3] *New developments help composites compete*. *Reinforced Plastics*, 2003. **47**(2): p. 27-31.
- [4] Marsh, G., *Can composites get firmly on the rails?* *Reinforced Plastics*, 2004. **48**(7): p. 26-30.
- [5] O'Brien-Bernini, F., *Composites and sustainability – when green becomes golden*. *Reinforced Plastics*, 2011. **55**(6): p. 27-29.
- [6] Marsh, G., *Automating aerospace composites production with fibre placement*. *Reinforced Plastics*, 2011. **55**(3): p. 32-37.
- [7] Offringa, A.R., *Thermoplastic composites—rapid processing applications*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996. **27**(4): p. 329-336.
- [8] Olsen, H.B. e J.J. Craig. *Automated composite tape lay-up using robotic devices*. in *Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on*. 1993.
- [9] Edwards, C., *Thermoplastic pultrusion promises new synergies*. *Reinforced Plastics*, 2001. **45**(4): p. 34-39.
- [10] Van de Velde, K. e P. Kiekens, *Thermoplastic pultrusion of natural fibre reinforced composites*. *Composite Structures*, 2001. **54**(2–3): p. 355-360.
- [11] Carlsson, A. e B. Tomas Åström, *Experimental investigation of pultrusion of glass fibre reinforced polypropylene composites*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1998. **29**(5–6): p. 585-593.
- [12] Stewart, R., *New prepreg materials offer versatility, top performance*. *Reinforced Plastics*, 2009. **53**(5): p. 28-33.
- [13] Lauderdale, S.F. e R. Stewart, *COMPOSITES 2011 – looking to the US industry's future*. *Reinforced Plastics*, 2010. **54**(6): p. 40-44.
- [14] Mangino, E., J. Carruthers, e G. Pitarresi, *The future use of structural composite materials in the automotive industry*. *Repairability of Composites in Transportation*, 2002. **44**(3-4): p. 211-232(22).
- [15] Silva, J., *Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar*, in *Faculdade de Engenharia 2005*, Universidade do Porto.

- [16] Leung, C.-L. e T.T. Liao, *Process Modeling of Thermoplastic Matrix Composites*. Advances in Thermoplastic Matrix Composite Materials, Golam M. Newaz, ASTM 1044., 1989.
- [17] Lee, M., *Heat Transfer and Consolidation Modeling of Composite Fiber Tow in Fiber Placement*, in *Mechanical Engineering 2004*, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute & State University.
- [18] Atif Yardimci, M., C.M. Pistor, e S.I. Güçeri, *Process Planning for On-Line Consolidation in Tape Winding of Noncircular Thermoplastic Composites*. Journal of Manufacturing Processes, 2000. **2**(2): p. 88-99.
- [19] Dai, S.C. e L. Ye, *Characteristics of CF/PEI tape winding process with on-line consolidation*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002. **33**(9): p. 1227-1238.
- [20] Smith, W.F., *Princípios de ciência e engenharia de materiais*. 3ª Edição ed 1998: McGraw-Hill.
- [21] Miracle, D.B. e S.L. Donaldson, *ASM Handbook, Volume 21 - Composites*, ASM International.
- [22] Gay, D. e S.V. Hoa, *Composite materials: design and applications* 2007: CRC Press.
- [23] Edwards, K.L., *A designers' guide to engineering polymer technology*. Materials & Design, 1998. **19**(1-2): p. 57-67.
- [24] Bourban, P.E., N. Bernet, J.E. Zanetto, e J.-A.E. Månson, *Material phenomena controlling rapid processing of thermoplastic composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001. **32**(8): p. 1045-1057.
- [25] *Thermoplastics fit for structural use?* Reinforced Plastics, 1999. **43**(10): p. 22.
- [26] Bannister, M., *Challenges for composites into the next millennium – a reinforcement perspective*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001. **32**(7): p. 901-910.
- [27] Schell, J.S.U., J. Guilleminot, C. Binetruy, e P. Krawczak, *Computational and experimental analysis of fusion bonding in thermoplastic composites: Influence of process parameters*. Journal of Materials Processing Technology, 2009. **209**(11): p. 5211-5219.
- [28] Bunsell, A.R., *Composite pressure vessels supply an answer to transport problems*. Reinforced Plastics, 2006. **50**(2): p. 38-41.
- [29] *Driving forces*. Reinforced Plastics, 2003. **47**(2): p. 23-25.
- [30] *Recycling key to industry's survival*. Reinforced Plastics, 2001. **45**(10): p. 10.
- [31] *Reliable thermoplastics welding*. Reinforced Plastics, 1999. **43**(2): p. 20.
- [32] *US demand for composites set to grow*. Reinforced Plastics, 2009. **53**(5): p. 12.
- [33] *COMPOSITES EUROPE continues to grow*. Reinforced Plastics, 2011. **55**(6): p. 8.
- [34] Chivers, P. e A. Jacob, *UK's National Composites Centre open for business*. Reinforced Plastics, 2011. **55**(6): p. 44-46.
- [35] *Bring in the reinforcements*. Reinforced Plastics, 2003. **47**(1): p. 42-46.
- [36] Hattum, F.v. e S.v. Breugel, *LFT: the future of reinforced thermoplastics?* Reinforced Plastics, 2001. **45**(6): p. 42-44.
- [37] *Long fibre PEEK could rival metal*. Reinforced Plastics, 2005. **49**(5): p. 14.
- [38] *JEC 2001: focusing on innovation*. Reinforced Plastics, 2001. **45**(3): p. 28-65.

- [39] Antunes, P.J., G.R. Dias, J.P. Nunes, F.W.J. Van Hattum, e T. Oliveira, *Finite Element Modelling of Thermoplastic Matrix Composite Gas Cylinders*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2008. **21**(5): p. 411-441.
- [40] Fu, S.Y., B. Lauke, E. Mäder, C.Y. Yue, e X. Hu, *Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000. **31**(10): p. 1117-1125.
- [41] Fu, S.-Y. e B. Lauke, *Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers*. Composites Science and Technology, 1996. **56**(10): p. 1179-1190.
- [42] *Short fibre PP challenges long fibre performance*. Reinforced Plastics, 2003. **47**(4): p. 16.
- [43] *Long fibre pellets excellent for automotive applications*. Reinforced Plastics, 2004. **48**(9): p. 14.
- [44] Henning, F., H. Ernst, e R. Brüssel, *LFTs for automotive applications*. Reinforced Plastics, 2005. **49**(2): p. 24-33.
- [45] Brast, K. e W. Michaeli, *Processing of long-fibre reinforced thermoplastics using the direct strand-deposition process*. Plastics, Additives and Compounding, 2001. **3**(6): p. 22-29.
- [46] Roberts, T., *Rapid growth forecast for carbon fibre market*. Reinforced Plastics, 2007. **51**(2): p. 10-13.
- [47] Bowen, S.T., *Direct in-line compounding – the Pushtrusion process*. Reinforced Plastics, 2006. **50**(1): p. 36-39.
- [48] Favaloro, M., *Continuous Reinforced Thermoplastic Composites for Aircraft*. 40th ISTC - Memphis, 2008.
- [49] Burkhart, A. e D. Cramer, *Feasibility of continuous-fiber reinforced thermoplastic tailored blanks for automotive applications*. SPE Automotive Composites Conference & Exposition, Troy, Michigan, USA, 2005.
- [50] *Thermoplastic pultrusion process unveiled*. Reinforced Plastics, 2003. **47**(9): p. 18.
- [51] Gauthier, M.M. e A.I.H. Committee, *Engineered Materials Handbook 1987*: Asm International.
- [52] Jacob, A., *European production of reinforced plastics up 6% in 2006*. Reinforced Plastics, 2007. **51**(11): p. 38-41.
- [53] Throne, J.L., *Technology of thermoforming*1996: Hanser Gardner Publications.
- [54] *MatWeb*. [Numerical and factual data]; Available from: <http://www.matweb.com/>.
- [55] Soeira, L.E., *Projeto e Elaboração de um Dispositivo para Remodelagem de Fibras como Subsistema do Processo de Enrolamento Filamentar*, in *Departamento de Engenharia Mecânica* 2009, Universidade de São Paulo: São Carlos, Brasil.
- [56] Peters, S., *Composite Filament Winding*2011: Asm International.
- [57] Giacoletto, H.L., *The art of filament winding*. Reinforced Plastics, 2002. **46**(10): p. 30-31.
- [58] Henninger, F. e K. Friedrich, *Thermoplastic filament winding with online-impregnation. Part A: process technology and operating efficiency*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002. **33**(11): p. 1479-1486.
- [59] *Automation sets filament winding on the right path*. Reinforced Plastics, 1998. **42**(8): p. 48-50.

- [60] *Filament winding breathes life into gas bottles*. Reinforced Plastics, 1998. **42**(8): p. 52-53.
- [61] Lukaszewicz, D.H.J.A., C. Ward, e K.D. Potter, *The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future*. Composites Part B: Engineering, 2012. **43**(3): p. 997-1009.
- [62] Aivazzadeh, S., J.A. Ateba, D. Hearn, e G. Vervhery, *A Prototype Machine for the Manufacture of Filament-Wound Thermoplastic Matrix Composite Structures*. Proceedings of ICCM-10, Whistler, Canada, 1995: p. 389-396.
- [63] Sala, G. e D. Cutolo, *Heated chamber winding of thermoplastic powder-impregnated composites: Part 1. Technology and basic thermochemical aspects*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996. **27**(5): p. 387-392.
- [64] Romagna, J., G. Ziegmann, e M. Flemming, *Thermoplastic Filament Winding - an Experimental Investigation of the Online Consolidation of Poly(Ether Imide) Fit Preforms*. Composites Manufacturing, 1995. **6**(3-4): p. 205-210.
- [65] DuVall, F.W., *Cost Comparisons of Wet Filaments Winding Versus Prepreg Filament Winding for Type II and Type IV CNG Cylinders*. 2001.
- [66] Agarwal, V., S.I. Güçeri, R.L. McCullough, e J.M. Schultz, *Thermal Characterization of the Laser-Assisted Consolidation Process*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1992. **5**(2): p. 115-135.
- [67] Hulcher, A.B., D.M. McGowan, B.W. Grimsley, e N.J. Johnston, *Processing and Testing of Thermoplastic Composite Cylindrical Shells Fabricated by Automated Fiber Placement*. 47th International SAMPE symposium. Long Beach, California, USA, 2002.
- [68] Pitchumani, R., S. Ranganathan, R.C. Don, J.W. Gillespie Jr, e M.A. Lamontia, *Analysis of transport phenomena governing interfacial bonding and void dynamics during thermoplastic tow-placement*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996. **39**(9): p. 1883-1897.
- [69] Funck, R. e M. Neitzel, *Improved thermoplastic tape winding using laser or direct-flame heating*. Composites Manufacturing, 1995. **6**(3-4): p. 189-192.
- [70] Hauptert, F. e K. Friedrich, *Processing-Related Consolidation of High-Speed Filament-Wound Continuous Fiber Thermoplastic Composite Rings*. Composites Manufacturing, 1995. **6**(3-4): p. 201-204.
- [71] Rosselli, F., M.H. Santare, e S.I. Güçeri, *Effects of processing on laser assisted thermoplastic tape consolidation*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1997. **28**(12): p. 1023-1033.
- [72] Pistor, C.M., M.A. Yardimci, e S.I. Güçeri, *On-line consolidation of thermoplastic composites using laser scanning*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999. **30**(10): p. 1149-1157.
- [73] Calawa, R. e J. Nancarrow, *Medium wave infrared heater for high-speed fiber placement*. Los Angeles, California, USA: SAE Aerofast, 2007.
- [74] Quadri, F., E.A. Squeo, e C. Prospero, *Diode Laser Assisted Filament Winding of Thermoplastic Matrix Composites*. Materials, 2010. **3**(1): p. 563-571.
- [75] Maier, C. e T. Calafut, *Polypropylene - The Definitive User's Guide and Databook*, 1998, William Andrew Publishing/Plastics Design Library.
- [76] Shih, P.-J., *On-Line Consolidation of Thermoplastic Composites*, in *Engineering Mechanics* 1997, Virginia Polytechnic Institute and State University: Blacksburg, Virginia.

- [77] *JEC Composites Show 2011 – preview*. Reinforced Plastics, 2011. **55**(2): p. 37-46.
- [78] Sweeney, G.J., P.F. Monaghan, M.T. Brogan, e S.F. Cassidy, *Reduction of infra-red heating cycle time in processing of thermoplastic composites using computer modelling*. Composites Manufacturing, 1995. **6**(3-4): p. 255-262.
- [79] Bersee, H.E.N. e A. Beukers, *Consolidation of Thermoplastic Composites*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2003. **16**(5): p. 433-455.
- [80] Dai, S.-C. e L. Ye, *GF/PP Tape Winding with On-Line Consolidation*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002. **21**(1): p. 71-90.
- [81] Song, X., *Modelling of Thermoplastic Composite Filament Winding*, 2000, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [82] Incropera, F.P., T.L. Bergman, A.S. Lavine, e D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th ed 1996: John Wiley & Sons.
- [83] Hollandt, J., J. Seidel, R. Klein, G. Ulm, A. Migdall, e M. Ware, *5. Primary sources for use in radiometry*, in *Experimental Methods in the Physical Sciences*, R.U.D. Albert C. Parr e L.G. James, Editors. 2005, Academic Press. p. 213-290.
- [84] Leuenberger, H. e R.A. Person, *Compilation of radiation shape factors for cylindrical assemblies* 1956: American Society of Mechanical Engineers.
- [85] Ketkar, S.P., *Numerical thermal analysis*, 1999.
- [86] Bonten, C. e C. Tuchert, *Welding of plastics - Introduction into heating by radiation*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002. **21**(8): p. 699-709.
- [87] Bordival, M., *Modélisation et optimisation numérique de l'étape de chauffage infrarouge pour la fabrication de bouteilles en PET par injection-soufflage*, in *CROME P- Centre de Recherche Outillages, Matériaux et Procédés* 2009, Paristech > ENSMP.
- [88] Forsythe, W.E. e A.G. Worthing, *The Properties of Tungsten and the Characteristics of Tungsten Lamps*. Astrophysical Journal, 1925. **61**: p. 61.
- [89] Pettersson, M. e S. Stenström, *Modelling of an electric IR heater at transient and steady state conditions: Part I: model and validation*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000. **43**(7): p. 1209-1222.
- [90] Champin, C., *Modélisation 3D du chauffage par rayonnement infrarouge et de l'étirage soufflage de corps creux en P.E.T.*, in *CEMEF- Centre de mise en forme des matériaux* 2007, Paristech, Mines ParisTech (ENSMP).
- [91] Florian, J., *Practical thermoforming: principles and applications* 1996: M. Dekker.
- [92] Turner, T.L., R.L. Ash, e L.R. Center, *Numerical and experimental analyses of the radiant heat flux produced by quartz heating systems* 1994: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center.
- [93] Mutnuri, B., *Thermal Conductivity Characterization of Composite Materials*, in *Department of Mechanical Engineering* 2006, College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University: Morgantown, West Virginia.
- [94] Flouy, J., J. Carson, e Q. Pham, *Modelling Thermal Conductivity in Heterogeneous Media with the Finite Element Method*. Food and Bioprocess Technology, 2008. **1**(2): p. 161-170.
- [95] Reinhart, T.J. e A.I.H. Committee, *Engineered Materials Handbook: Composites* 1987: ASM International.
- [96] Grove, S.M., *Thermal modelling of tape laying with continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic*. Composites, 1988. **19**(5): p. 367-375.

-
- [97] Toso, Y.M.P., P. Ermanni, e D. Poulidakos, *Thermal Phenomena in Fiber-reinforced Thermoplastic Tape Winding Process: Computational Simulations and Experimental Validations*. Journal of Composite Materials, 2004. **38**(2): p. 107-135.
- [98] Ghasemi Nejjhad, M.N., R.D. Cope, e S.I. Güçeri, *Thermal Analysis of in-situ Thermoplastic Composite Tape Laying*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1991. **4**(1): p. 20-45.
- [99] James, D.L. e W.Z. Black, *Thermal Analysis of Continuous Filament-Wound Composites*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1996. **9**(1): p. 54-75.
- [100] Kim, H.J., S.K. Kim, e W.I. Lee, *A study on heat transfer during thermoplastic composite tape lay-up process*. Experimental Thermal and Fluid Science, 1996. **13**(4): p. 408-418.
- [101] Sonmez, F.O. e H.T. Hahn, *Modeling of Heat Transfer and Crystallization in Thermoplastic Composite Tape Placement Process*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1997. **10**(3): p. 198-240.
- [102] Tumkor, S., N. Turkmen, C. Chassapis, e S. Manoochchri, *Modeling of heat transfer in thermoplastic composite tape lay-up manufacturing*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2001. **28**(1): p. 49-58.
- [103] Groupe, W.J.B., L.L. Warnet, e R. Akkerman. *Towards a process simulation tool for the laser assisted tape placement process*. in *14th European Conference on Composite Materials, ECCM*. 2010.
- [104] Bejan, A. e A.D. Kraus, *Heat Transfer Handbook*, John Wiley & Sons.
- [105] Ferziger, J.H. e M. Perić, *Computational methods for fluid dynamics 2002*: Springer.
- [106] Patankar, S.V., *Numerical heat transfer and fluid flow* 1980: Hemisphere Pub. Corp.
- [107] Versteeg, H.K. e W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method* 1995, London.

Anexo A - Código Implementado

No presente anexo apresenta-se parte do código implementado, nomeadamente a subrotina de geração do sistema de equações.

```

“subroutine solve
(n,dx,x_length,k,cp,rho,dt,maxntimestp,tini,t_rad,t_env,t_stop,area, x, y,
h_conv, rad_coeff,fm_fiber,fv_fiber,&
      & cp_pp1,cp_pp2,cp_pp3,cp_pp4,cp_pp5,cp_pp6,cp_pp7,
cp_fiber1,cp_fiber2,cp_fiber3,cp_fiber4,cp_fiber5,cp_fiber6,cp_fiber7, &
      &
properties_temp1,properties_temp2,properties_temp3,properties_temp4,properties_tem
p5,properties_temp6,properties_temp7, &
      & k_pp1,k_pp2,k_pp3,k_pp4,k_pp5,k_pp6,k_pp7,k_fiber, &
      & heating_time, speed_ms, n_lamps, distance, filament_radius,
heater_length, tape_width)
implicit none
integer :: n
real :: dx,x_length,k,cp,rho,dt,maxntimestp,tini,t_rad,t_env,t_stop,area, x(n),
y, h_conv, rad_coeff,fm_fiber,fv_fiber,&
      & cp_pp1,cp_pp2,cp_pp3,cp_pp4,cp_pp5,cp_pp6,cp_pp7,
cp_fiber1,cp_fiber2,cp_fiber3,cp_fiber4,cp_fiber5,cp_fiber6,cp_fiber7, &
      &
properties_temp1,properties_temp2,properties_temp3,properties_temp4,properties_tem
p5,properties_temp6,properties_temp7, &
      & k_pp1,k_pp2,k_pp3,k_pp4,k_pp5,k_pp6,k_pp7,k_fiber, &
      & heating_time, speed_ms, n_lamps, distance, filament_radius,
heater_length, tape_width
!internal variables
real :: time, dx2,form_factor, h_rad,print_time, print_time_step, k_pp, cp_pp,
cp_fiber
!matrix coefficients
real, allocatable, dimension (:) :: aw, ae, ap, a0p, c, TN, TMP
integer :: ntimestp, i, node

allocate (aw(n), ae(n), ap(n), a0p(n), c(n), TN(n), TMP(n))
y=0
dx2 = dx / 2

!middle node calculation
if (MOD(n,2)==0) then
    node = n/2
else
    node = (n+1) / 2
end if

!storing the values of temperature at n^th time level
do i=1,n
    TMP(i)=tini
end do
do i=1,n
    TN(i)=TMP(i)
end do

!storing h_rad coefficient
h_rad = rad_coeff* form_factor (y, distance, filament_radius, heater_length,
tape_width,n_lamps) * (t_rad**2 + tini**2) *&
& (t_rad + tini)

```

```

ntimestep=0
time=0
print_time=0

!radiative and convection
10      if (time < heating_time ) then

        if (TMP(node) < properties_temp1) then
          cp_pp = cp_pp1
          cp_fiber = cp_fiber1
          k_pp = k_pp1
        else if (TMP(node) < properties_temp2) then
          cp_pp = -((((cp_pp2 - cp_pp1)/(properties_temp2 -
properties_temp1))*(properties_temp2 - TMP(node)))-cp_pp2)
          cp_fiber = -((((cp_fiber2 - cp_fiber1)/(properties_temp2 -
properties_temp1))*(properties_temp2 - TMP(node)))-cp_fiber2)
          k_pp = -((((k_pp2 - k_pp1)/(properties_temp2 -
properties_temp1))*(properties_temp2 - TMP(node)))-k_pp2)
        else if (TMP(node) < properties_temp3) then
          cp_pp = -((((cp_pp3 - cp_pp2)/(properties_temp3 -
properties_temp2))*(properties_temp3 - TMP(node)))-cp_pp3)
          cp_fiber = -((((cp_fiber3 - cp_fiber2)/(properties_temp3 -
properties_temp2))*(properties_temp3 - TMP(node)))-cp_fiber3)
          k_pp = -((((k_pp3 - k_pp2)/(properties_temp3 -
properties_temp2))*(properties_temp3 - TMP(node)))-k_pp3)
        else if (TMP(node) < properties_temp4) then
          cp_pp = -((((cp_pp4 - cp_pp3)/(properties_temp4 -
properties_temp3))*(properties_temp4 - TMP(node)))-cp_pp4)
          cp_fiber = -((((cp_fiber4 - cp_fiber3)/(properties_temp4 -
properties_temp3))*(properties_temp4 - TMP(node)))-cp_fiber4)
          k_pp = -((((k_pp4 - k_pp3)/(properties_temp4 -
properties_temp3))*(properties_temp4 - TMP(node)))-k_pp4)
        else if (TMP(node) < properties_temp5) then
          cp_pp = -((((cp_pp5 - cp_pp4)/(properties_temp5 -
properties_temp4))*(properties_temp5 - TMP(node)))-cp_pp5)
          cp_fiber = -((((cp_fiber5 - cp_fiber4)/(properties_temp5 -
properties_temp4))*(properties_temp5 - TMP(node)))-cp_fiber5)
          k_pp = -((((k_pp5 - k_pp4)/(properties_temp5 -
properties_temp4))*(properties_temp5 - TMP(node)))-k_pp5)
        else if (TMP(node) < properties_temp6) then
          cp_pp = -((((cp_pp6 - cp_pp5)/(properties_temp6 -
properties_temp5))*(properties_temp6 - TMP(node)))-cp_pp6)
          cp_fiber = -((((cp_fiber6 - cp_fiber5)/(properties_temp6 -
properties_temp5))*(properties_temp6 - TMP(node)))-cp_fiber6)
          k_pp = -((((k_pp6 - k_pp5)/(properties_temp6 -
properties_temp5))*(properties_temp6 - TMP(node)))-k_pp6)
        else if (TMP(node) < properties_temp7) then
          cp_pp = -((((cp_pp7 - cp_pp6)/(properties_temp7 -
properties_temp6))*(properties_temp7 - TMP(node)))-cp_pp7)
          cp_fiber = -((((cp_fiber7 - cp_fiber6)/(properties_temp7 -
properties_temp6))*(properties_temp7 - TMP(node)))-cp_fiber7)
          k_pp = -((((k_pp7 - k_pp6)/(properties_temp7 -
properties_temp6))*(properties_temp7 - TMP(node)))-k_pp7)
        end if

        cp = (cp_fiber * fm_fiber) + ((1 - fm_fiber)*cp_pp)
        k = 1/((fv_fiber/k_fiber) + ((1-fv_fiber)/k_pp))

!construction of accumulation term

```

```

do i= 1,n
a0p(i) = area*rho*cp*dx/dt
!print*, 'a0p', a0p(i)
enddo

!construction of coefficient matrix
do i= 2,n-1
    aw(i) = -area*k/dx
    ae(i) = -area*k/dx
    ap(i) = -aw(i)-ae(i)+a0p(i)
enddo

!construction of right hand side vector
do i=2,n-1
    c(i)=TN(i)*a0p(i)
enddo

!incorporation of boundary conditions
!west side
    i=1
    aw(i) = -area*k/dx2
    ae(i) = -area*k/dx
    ap(i) = a0p(i) - ae(i) - aw(i) * (1-((k/dx2)/(h_conv
+ h_rad+(k/dx2))))

    c(i) = a0p(i) * TN(i) - aw(i) * t_rad *
(h_rad/(h_conv + h_rad+(k/dx2))) - aw(i) * t_env * (h_conv/(h_conv +
h_rad+(k/dx2)))
    aw(i) = 0

!east side
    i=n
    aw(i) = -area*k/dx
    ae(i) = -area*k/dx2
    ap(i) = a0p(i) - aw(i) - ae(i) * (1-((k/dx2)/(h_conv
+ h_rad+(k/dx2))))

    c(i) = a0p(i) * TN(i) - ae(i) * t_rad *
(h_rad/(h_conv + h_rad+(k/dx2))) - ae(i) * t_env * (h_conv/(h_conv +
h_rad+(k/dx2)))
    ae(i) = 0

Call TDMA (n,aw,ap,ae,c,TMP)

!updating print time step
print_time_step = time - print_time

!updating temperature
do i=1,n
    TN(i)=TMP(i)
end do

!printing out transient temperature
if ((print_time_step>0.95) .and. (print_time_step<1.05))

then

!printing all temperatures
write(81,*), ''
write(81,*),time,'[s]'

```



```

write(81,*), ''
do i=1, n
    write(81,*), x(i), TMP(i)-273.15
end do
!printing surface temperatures
write(91,*),time,'', TMP(1)-273.15, '', TMP(node)-
273.15

!updating print_time
print_time=time
end if
!updating time
time = time + dt
!updating y position
y = speed_ms * time
!updating h_rad
i=1
h_rad = rad_coeff * form_factor (y, distance,
filament_radius, heater_length, tape_width,n_lamps) * ((t_rad**2) + (TN(i)**2)) &
&* (t_rad + TN(i))
!print*, 'position', y,'ff', form_factor (y, distance,
filament_radius, heater_length, tape_width,n_lamps)
go to 10
endif

20      if ((TN(node) >= t_stop) .or. ((ntimestp < maxntimestp)))
then

    if (TMP(node) < properties_temp1) then
        cp_pp = cp_pp1
        cp_fiber = cp_fiber1
        k_pp = k_pp1
    else if (TMP(node) < properties_temp2) then
        cp_pp = -((((cp_pp2 - cp_pp1)/(properties_temp2 -
properties_temp1))*(properties_temp2 - TMP(node)))-cp_pp2)
        cp_fiber = -((((cp_fiber2 - cp_fiber1)/(properties_temp2 -
properties_temp1))*(properties_temp2 - TMP(node)))-cp_fiber2)
        k_pp = -((((k_pp2 - k_pp1)/(properties_temp2 -
properties_temp1))*(properties_temp2 - TMP(node)))-k_pp2)
    else if (TMP(node) < properties_temp3) then
        cp_pp = -((((cp_pp3 - cp_pp2)/(properties_temp3 -
properties_temp2))*(properties_temp3 - TMP(node)))-cp_pp3)
        cp_fiber = -((((cp_fiber3 - cp_fiber2)/(properties_temp3 -
properties_temp2))*(properties_temp3 - TMP(node)))-cp_fiber3)
        k_pp = -((((k_pp3 - k_pp2)/(properties_temp3 -
properties_temp2))*(properties_temp3 - TMP(node)))-k_pp3)
    else if (TMP(node) < properties_temp4) then
        cp_pp = -((((cp_pp4 - cp_pp3)/(properties_temp4 -
properties_temp3))*(properties_temp4 - TMP(node)))-cp_pp4)
        cp_fiber = -((((cp_fiber4 - cp_fiber3)/(properties_temp4 -
properties_temp3))*(properties_temp4 - TMP(node)))-cp_fiber4)
        k_pp = -((((k_pp4 - k_pp3)/(properties_temp4 -
properties_temp3))*(properties_temp4 - TMP(node)))-k_pp4)
    else if (TMP(node) < properties_temp5) then
        cp_pp = -((((cp_pp5 - cp_pp4)/(properties_temp5 -
properties_temp4))*(properties_temp5 - TMP(node)))-cp_pp5)
        cp_fiber = -((((cp_fiber5 - cp_fiber4)/(properties_temp5 -
properties_temp4))*(properties_temp5 - TMP(node)))-cp_fiber5)

```

```

        k_pp = -((((k_pp5 - k_pp4)/(properties_temp5 -
properties_temp4))*(properties_temp5 - TMP(node)))-k_pp5)
        else if (TMP(node) < properties_temp6) then
            cp_pp = -((((cp_pp6 - cp_pp5)/(properties_temp6 -
properties_temp5))*(properties_temp6 - TMP(node)))-cp_pp6)
            cp_fiber = -((((cp_fiber6 - cp_fiber5)/(properties_temp6 -
properties_temp5))*(properties_temp6 - TMP(node)))-cp_fiber6)
            k_pp = -((((k_pp6 - k_pp5)/(properties_temp6 -
properties_temp5))*(properties_temp6 - TMP(node)))-k_pp6)
            else if (TMP(node) < properties_temp7) then
                cp_pp = -((((cp_pp7 - cp_pp6)/(properties_temp7 -
properties_temp6))*(properties_temp7 - TMP(node)))-cp_pp7)
                cp_fiber = -((((cp_fiber7 - cp_fiber6)/(properties_temp7 -
properties_temp6))*(properties_temp7 - TMP(node)))-cp_fiber7)
                k_pp = -((((k_pp7 - k_pp6)/(properties_temp7 -
properties_temp6))*(properties_temp7 - TMP(node)))-k_pp7)
            end if

cp = (cp_fiber * fm_fiber) + ((1 - fm_fiber)*cp_pp)
k = 1/((fv_fiber/k_fiber) + ((1-fv_fiber)/k_pp))

!construction of accumulation term
do i= 1,n
a0p(i) = area*rho*cp*dx/dt
!print*, 'a0p', a0p(i)
enddo

!construction of coefficent matrix
do i= 2,n-1
aw(i) = -area*k/dx
ae(i) = -area*k/dx
ap(i) = -aw(i)-ae(i)+a0p(i)
enddo

!construction of righth hand side vector
do i=2,n-1
c(i)=TN(i)*a0p(i)
enddo

!incorporation of boundary conditions
!west side
i=1
aw(i) = -area*k/dx2
ae(i) = -area*k/dx
ap(i) = a0p(i) - ae(i) - aw(i) * (1-((k/dx2)/(h_conv
+ (k/dx2))))

c(i) = a0p(i) * TN(i) - aw(i) * t_env *
(h_conv/(h_conv + (k/dx2)))
aw(i) = 0

!east side
i=n
aw(i) = -area*k/dx
ae(i) = -area*k/dx2
ap(i) = a0p(i) - aw(i) - ae(i) * (1-((k/dx2)/(h_conv
+ (k/dx2))))

```

```

                c(i) = a0p(i) * TN(i) - ae(i) * t_env *
(h_conv/(h_conv + (k/dx2)))
                ae(i) = 0

    Call TDMA (n,aw,ap,ae,c,TMP)

        !updating print time step
        print_time_step = time - print_time
        !updating temperature
        do i=1,n
            TN(i)=TMP(i)
        end do

        do i=1,n
            TN(i)=TMP(i)
        end do

        !printing out transient temperture
        if ((print_time_step>0.95) .and. (print_time_step<1.05))
then
            !printing all temperatures
            write(81,*), ''
            write(81,*),time,'[s]'
            write(81,*), ''
            do i=1, n
                write(81,*), x(i), TMP(i)-273.15
            end do
            !printing surface temperatures
            write(91,*),time,'', TMP(1)-273.15, '', TMP(node)-
273.15

            !updating print_time
            print_time=time
        end if
        !updating time
        time = time + dt
        !updating ntimstep
        ntimstep = ntimstep + 1

    go to 20
end if

print*, '***** TEMPERATURE CALCULATION IS DONE *****'
print*, ''
print*, 'Number of nodes', n
print*, 'Delta t', dt,'[s]'
print*, ''
print*, 'Your results are printed in output.txt and
surface_temperature.txt file'
print*, ''
print*, '***** :- ) *****'
print*, ''
return
end"

```


Anexo B – Manual do Programa
Desenvolvido

O programa desenvolvido foi implementado em Microsoft Visual Studio 2010, linguagem Fortran. É composto por um ficheiro executável, *Heat modelv2.exe* e por sete ficheiros relativos aos dados de entrada, extensão .dat. O resultados são obtidos a partir em dois ficheiros diferentes, extensão .txt.

O utilizador deve iniciar o preenchimento dos campos relativos aos dados de entrada. Para tal, os ficheiros estão divididos em duas áreas. O ficheiro *heater_properties.dat* encontra-se na raiz do ficheiro executável. Os outros ficheiros relativos aos dados de entrada encontram-se na pasta *input*. Esta divisão prende-se com maior facilidade de utilização do programa, dado que os dados de entrada com maior probabilidade de serem alterados nas simulações estão considerados no ficheiro *heater_properties.dat*. Na pasta *input* estão contidos os ficheiros *air_properties.dat*, *Fiber_temperature_dependence_properties.dat*, *PP_temperature_dependence_properties.dat*, *process_parameters.dat*, *tape_properties.dat*, *Temperature_dependence_properties.dat*.

Antes de executar o ficheiro *Heat modelv2.exe* o utilizador deve abrir o ficheiro *heater_properties.dat*, Figura An 0.1.

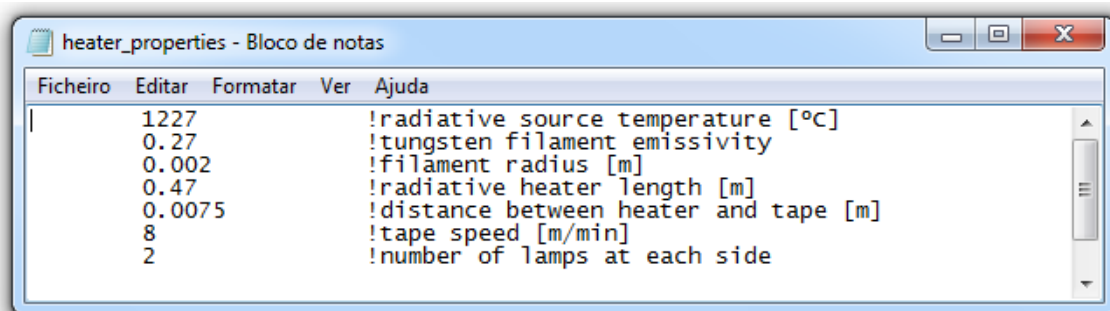


Figura An 0.1 – Imagem do ficheiro *heater_properties.dat* aberto em bloco de notas

Neste ficheiro estão contidas as variáveis:

- *radiative source temperature [°C]* – temperatura da fonte radiactiva [°C].
- *tungsten filament emissivity* – emissividade do filament de tungsténio.
- *filament radius [m]* – raio equivalente do filamento de tungsténio.
- *radiative heater length [m]* – comprimento de aquecimento efectivo da lâmpada [m].
- *distance between heater and tape [m]* – distância entre a fonte de aquecimento e a superfície da fita [m].
- *tape speed [m/min]* – velocidade de passagem da fita [m/min].
- *number of lamps at each side* – número de lâmpadas em cada face da fita.

No ficheiro `/input/air_properties.dat`, são inseridas as propriedades do ar ambiente, Figura An. 0.2.

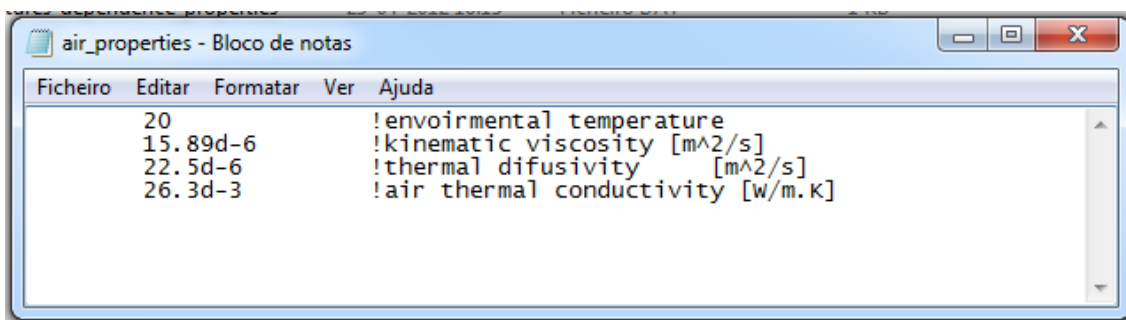


Figura An. 0.2 - Imagem do ficheiro `/input/air_properties.dat` aberto em bloco de notas

As variáveis contidas neste ficheiro são:

- *environmental temperature*
- *kinematic viscosity [m²/s]* – viscosidade cinemática do ar [m²/s]
- *thermal difusivity [m²/s]* – difusividade térmica do ar [m²/s]
- *air thermal conductivity [W/m.K]* – condutividade térmica do ar

No ficheiro `/input/Temperature_dependence_properties.dat` inseridas as temperaturas relativas às propriedades dependentes das temperatura, Figura An. 0.3.

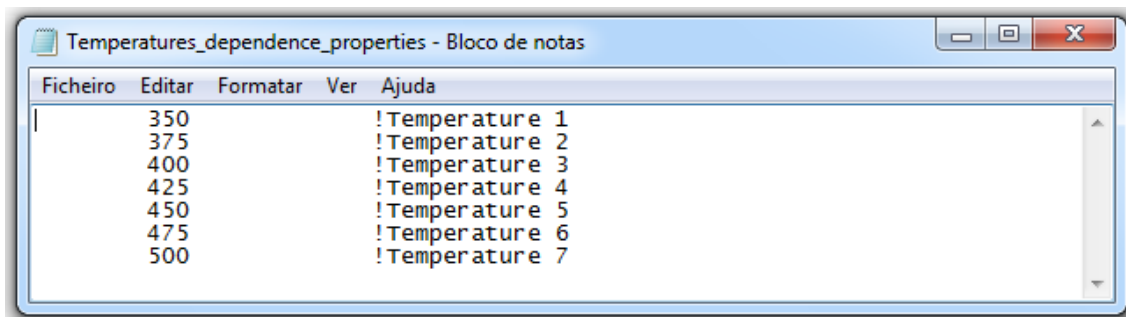


Figura An. 0.3 - Imagem do ficheiro `/input/Temperature_dependence_properties.dat` aberto em bloco de notas

As variáveis contidas neste ficheiro são:

- *Temperature 1 [K]* - Temperatura 1 [K]
- *Temperature 2 [K]* - Temperatura 2 [K]
- *Temperature 3[K]* - Temperatura 3 [K]
- *Temperature 4[K]* - Temperatura 4 [K]
- *Temperature 5 [K]* - Temperatura 5 [K]
- *Temperature 6[K]* - Temperatura 6 [K]
- *Temperature 7 [K]* - Temperatura 7 [K]

No ficheiro `/input/Fiber_temperature_dependence_properties.dat`, são inseridas as propriedades da fibra dependentes da temperatura, Figura An.0.4.

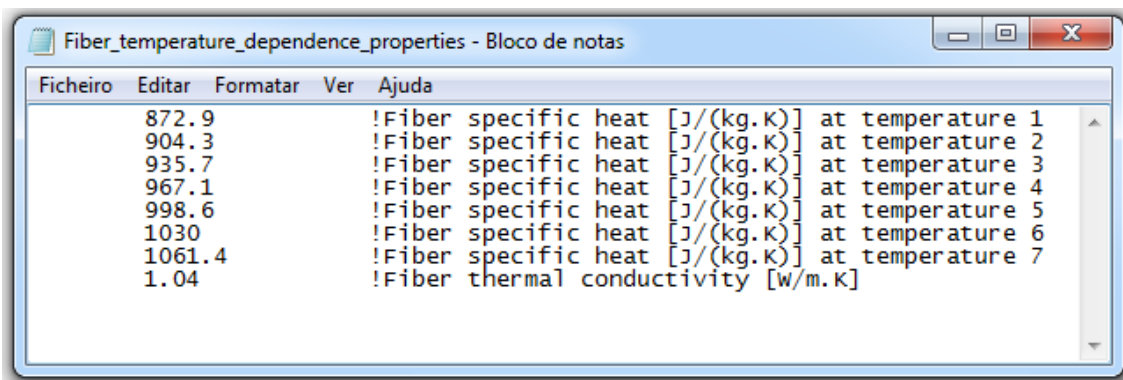


Figura An.0.4 - Imagem do ficheiro `/input/Fiber_temperature_dependence_properties.dat` aberto em bloco de notas

As variáveis contidas neste ficheiro são:

- *Fiber specific heat [J/(kg.K)] at temperature 1* – Calor específico da fibra [J/(kg.K)] à temperatura 1
- *Fiber specific heat [J/(kg.K)] at temperature 2* – Calor específico da fibra [J/(kg.K)] à temperatura 2
- *Fiber specific heat [J/(kg.K)] at temperature 3* – Calor específico da fibra [J/(kg.K)] à temperatura 3
- *Fiber specific heat [J/(kg.K)] at temperature 4* – Calor específico da fibra [J/(kg.K)] à temperatura 4
- *Fiber specific heat [J/(kg.K)] at temperature 4* – Calor específico da fibra [J/(kg.K)] à temperatura 4
- *Fiber specific heat [J/(kg.K)] at temperature 5* – Calor específico da fibra [J/(kg.K)] à temperatura 5
- *Fiber specific heat [J/(kg.K)] at temperature 6* – Calor específico da fibra [J/(kg.K)] à temperatura 6
- *Fiber specific heat [J/(kg.K)] at temperature 7* – Calor específico da fibra [J/(kg.K)] à temperatura 7
- *Fiber thermal conductivity [W/m.K]* – Condutividade térmica da fibra [W/m.K]

No ficheiro `/input/PP_temperature_dependence_properties.dat` são inseridas as propriedades do PP dependentes da temperatura, Figura An. 0.5.

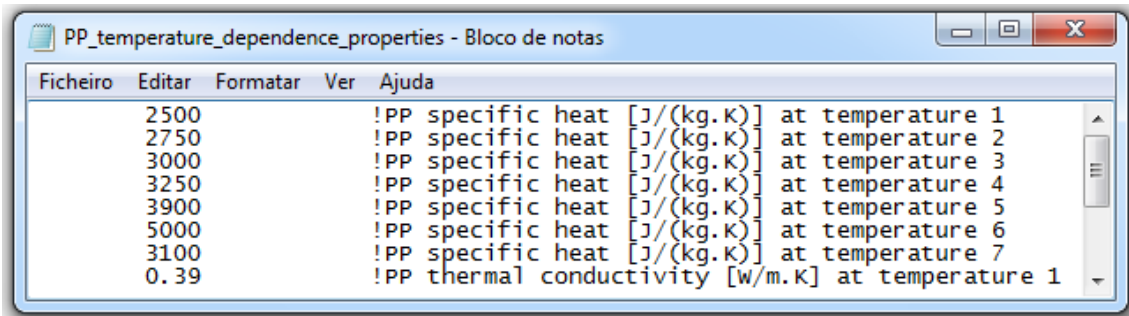


Figura An. 0.5 - Imagem do ficheiro `/input/PP_temperature_dependence_properties.dat` aberto em bloco de notas

As variáveis contidas neste ficheiro são:

- *PP specific heat [J/(kg.K)] at temperature 1* – Calor específico do PP [J/(kg.K)] à temperatura 1
- *PP specific heat [J/(kg.K)] at temperature 2* – Calor específico do PP [J/(kg.K)] à temperatura 2
- *PP specific heat [J/(kg.K)] at temperature 3* – Calor específico do PP [J/(kg.K)] à temperatura 3
- *PP specific heat [J/(kg.K)] at temperature 4* – Calor específico do PP [J/(kg.K)] à temperatura 4
- *PP specific heat [J/(kg.K)] at temperature 4* – Calor específico do PP [J/(kg.K)] à temperatura 4
- *PP specific heat [J/(kg.K)] at temperature 5* – Calor específico do PP [J/(kg.K)] à temperatura 5
- *PP specific heat [J/(kg.K)] at temperature 6* – Calor específico do PP [J/(kg.K)] à temperatura 6
- *PP specific heat [J/(kg.K)] at temperature 7* – Calor específico do PP [J/(kg.K)] à temperatura 7

No ficheiro `/input/process_parameters.dat` são inseridas as propriedades do processo, Figura An. 0.6.

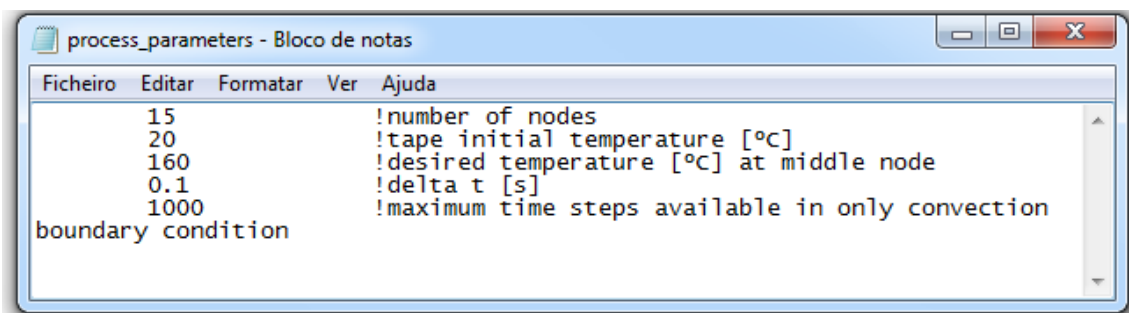


Figura An. 0.6 - Imagem do ficheiro `/input/process_parameters.dat` aberto em bloco de notas

- *number of nodes* – numero de nós
- *tape initial temperature [°C]* – temperature inicial da fita [°C]
- *desired temperature [°C] at middle node* – temperature desejada no nó central [°C]
- *delta t [s]* – incremento de tempo a cada etapa
- *maximum time steps available in only convection boundary condition /input/tape_properties.dat* – número máximo de instantes de tempo na condição de fronteira convectiva

No ficheiro *input/tape_properties.dat* são inseridas as propriedades da fita, Figura An. 0.7.

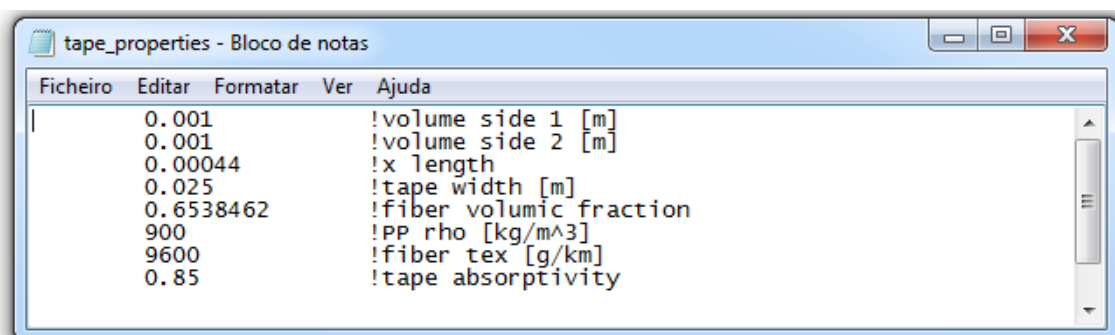
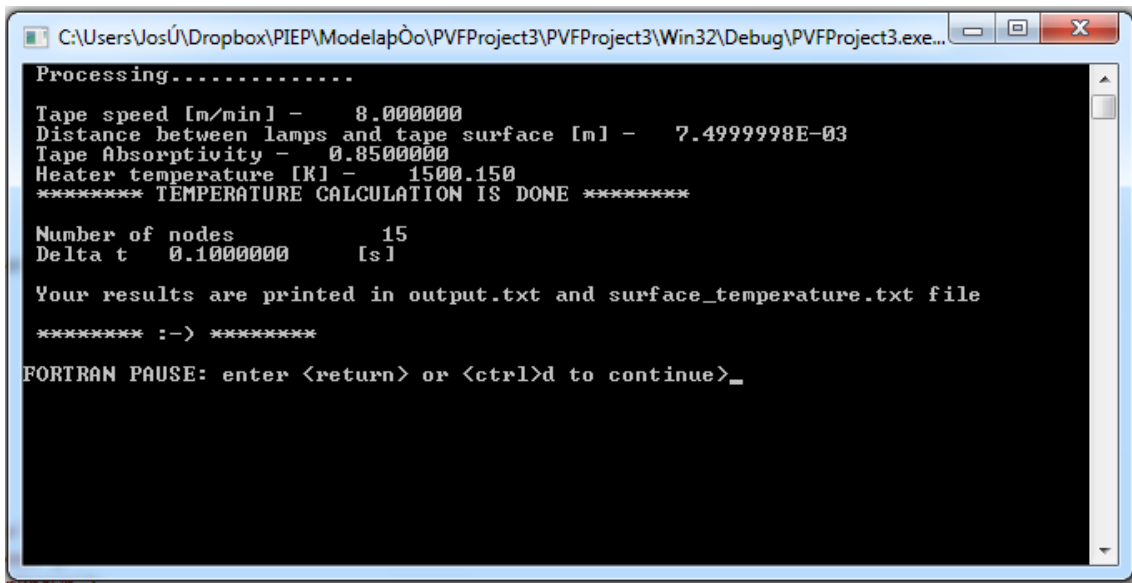


Figura An. 0.7 - Imagem do ficheiro */input/tape_properties.dat* aberto em bloco de notas

- *volume side 1 [m]* – comprimento do lado 1 do volume de controlo [m]
- *volume side 2 [m]* – comprimento do lado 2 do volume de controlo [m]
- *x length* – espessura da fita [m]
- *tape width [m]* – largura da fita [m]
- *fiber volumic fraction* – fracção volúmica da fibra
- *PP rho [kg/m³]* – massa volúmica do PP [kg/m³]
- *fiber tex [g/km]* – tex da fibra [g/km]
- *tape absorptivity* – absorptividade da fita

Inseridas todas as variáveis nos respectivos campos de cada um dos ficheiros pode executar-se o ficheiro *Heat modelv2.exe*.



```
Processing.....
Tape speed [m/min] -      8.000000
Distance between lamps and tape surface [m] -  7.4999998E-03
Tape Absorptivity -    0.8500000
Heater temperature [K] - 1500.150
***** TEMPERATURE CALCULATION IS DONE *****

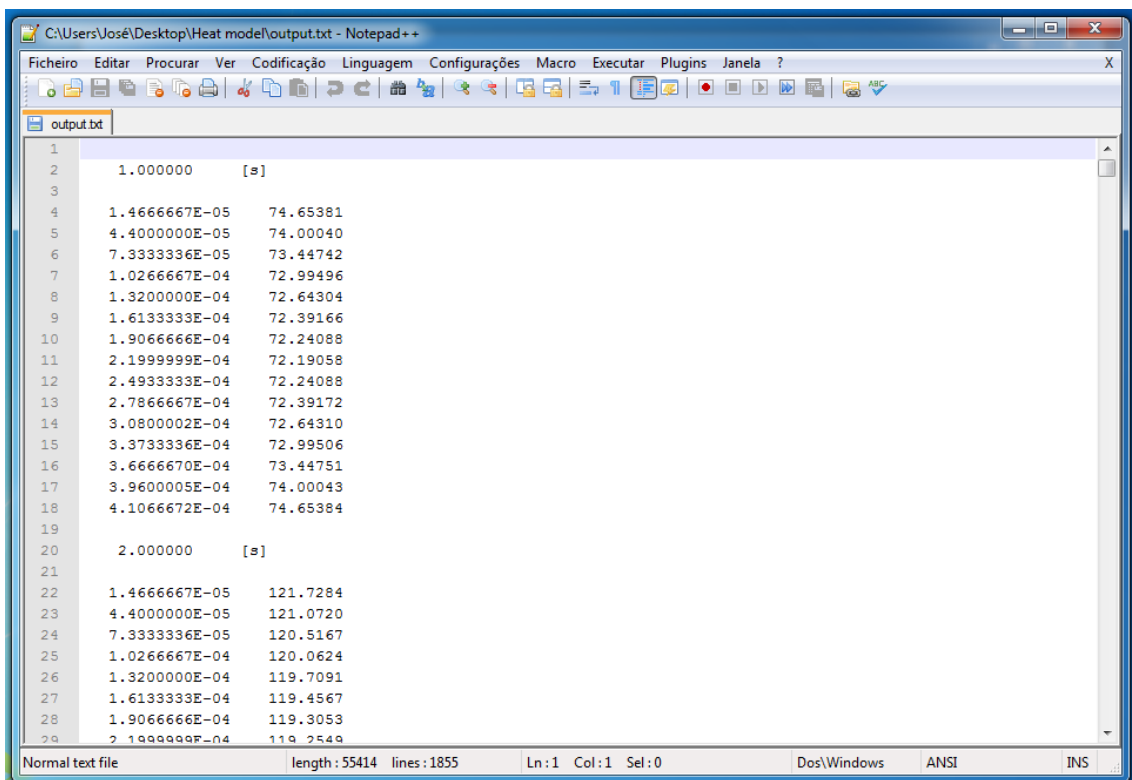
Number of nodes      15
Delta t  0.1000000   [s]

Your results are printed in output.txt and surface_temperature.txt file

***** :-> *****

FORTRAN PAUSE: enter <return> or <ctrl>d to continue>_
```

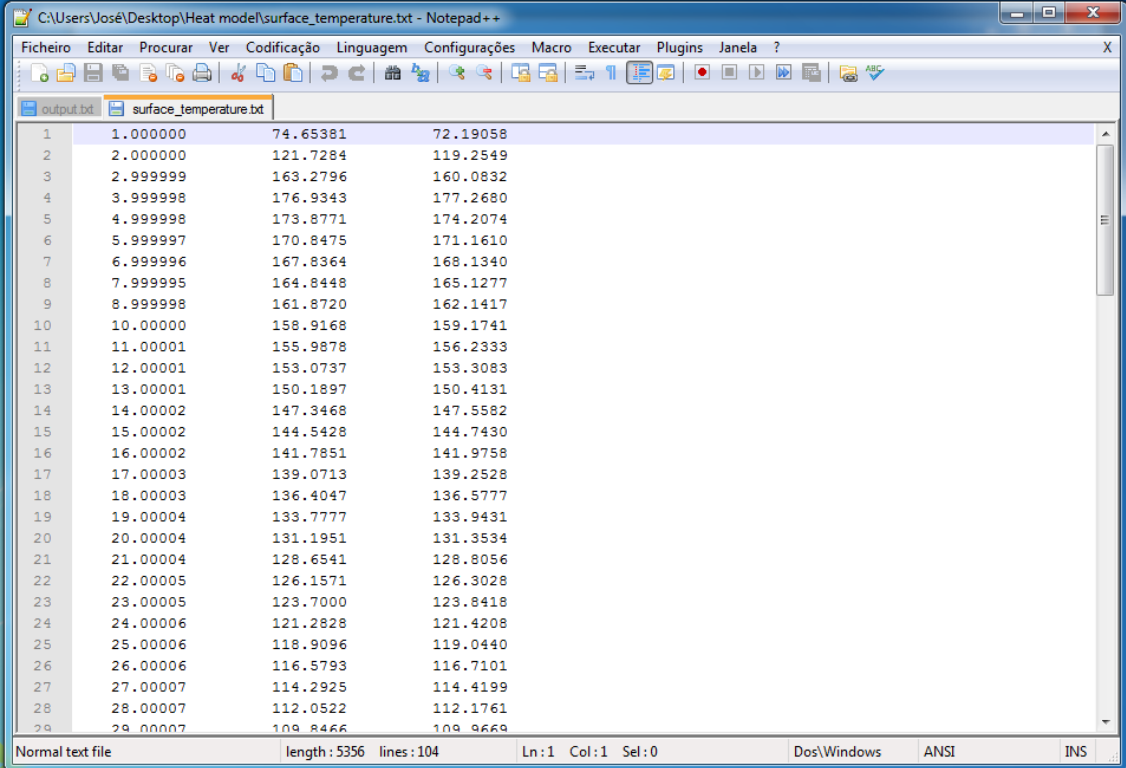
Os resultados são obtidos nos ficheiros *output.txt* e *surfasse_temperature.txt*. O ficheiro *output.txt*, Figura An 0.8, apresenta as temperaturas a cada nó computacional a cada instante de tempo.



```
1
2      1.000000      [s]
3
4      1.4666667E-05      74.65381
5      4.4000000E-05      74.00040
6      7.3333336E-05      73.44742
7      1.0266667E-04      72.99496
8      1.3200000E-04      72.64304
9      1.6133333E-04      72.39166
10     1.9066666E-04      72.24088
11     2.1999999E-04      72.19058
12     2.4933333E-04      72.24088
13     2.7866667E-04      72.39172
14     3.0800002E-04      72.64310
15     3.3733336E-04      72.99506
16     3.6666670E-04      73.44751
17     3.9600005E-04      74.00043
18     4.1066672E-04      74.65384
19
20     2.000000      [s]
21
22     1.4666667E-05      121.7284
23     4.4000000E-05      121.0720
24     7.3333336E-05      120.5167
25     1.0266667E-04      120.0624
26     1.3200000E-04      119.7091
27     1.6133333E-04      119.4567
28     1.9066666E-04      119.3053
29     2.1999999E-04      119.2549
```

Figura An 0.8 - Imagem do ficheiro *output.txt*

O ficheiro *surfasse_temperature.txt*, Figura An 0.9, apresenta as temperaturas dos nós computacionais da superfície e do centro da fita, a cada instante de tempo.



1	1.000000	74.65381	72.19058
2	2.000000	121.7284	119.2549
3	2.999999	163.2796	160.0832
4	3.999998	176.9343	177.2680
5	4.999998	173.8771	174.2074
6	5.999997	170.8475	171.1610
7	6.999996	167.8364	168.1340
8	7.999995	164.8448	165.1277
9	8.999998	161.8720	162.1417
10	10.00000	158.9168	159.1741
11	11.00001	155.9878	156.2333
12	12.00001	153.0737	153.3083
13	13.00001	150.1897	150.4131
14	14.00002	147.3468	147.5582
15	15.00002	144.5428	144.7430
16	16.00002	141.7851	141.9758
17	17.00003	139.0713	139.2528
18	18.00003	136.4047	136.5777
19	19.00004	133.7777	133.9431
20	20.00004	131.1951	131.3534
21	21.00004	128.6541	128.8056
22	22.00005	126.1571	126.3028
23	23.00005	123.7000	123.8418
24	24.00006	121.2828	121.4208
25	25.00006	118.9096	119.0440
26	26.00006	116.5793	116.7101
27	27.00007	114.2925	114.4199
28	28.00007	112.0522	112.1761
29	29.00007	109.8466	109.9669

Figura An 0.9 - Imagem do ficheiro *surface_temperature.txt*

Apêndice A - Características da lâmpada

Na Figura Ap.0.10 é apresentado o esquema com as dimensões da lâmpada utilizada a serem descritas na Tabela Ap.0.1.

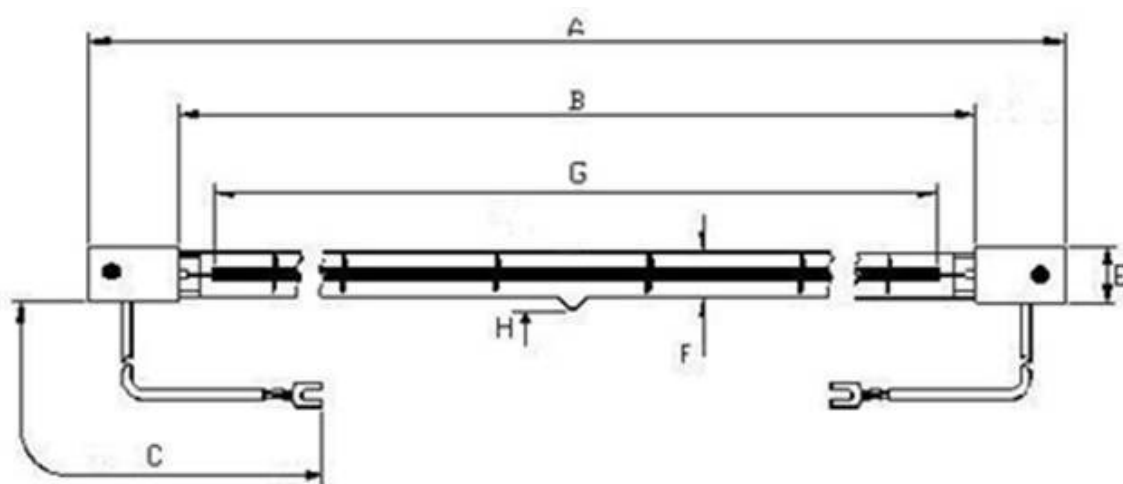


Figura Ap.0.10 - Esquema da lâmpada utilizada

Tabela Ap.0.1 – Dimensões principais

A	549±2	E	15
B	505	F	10,5
C	230±5	G	470
D		H	5 Max mm

Na Tabela Ap.0.2 são apresentados os dados técnicos da lâmpada.

Tabela Ap.0.2 – Dados técnicos

Voltagem	220	Temperatura de cor K	1500
Potência	1200 W	Tempo de utilização	5000h
Acabamento	Sem reflector	Posição de utilização	Horizontal
Casquilho	Sk15	Espectro de emissão	Pico entre 1,4 e 1,6 μm