

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

FÁBIO SOARES LOYOLA

**MODELAGEM DA TEMPERATURA E OTIMIZAÇÃO DO
ÍNDICE DE DESPLACAMENTO DE PAINÉIS DE MDF
ENVERNIZADOS EM FORNOS UV**

SÃO MATEUS-ES

2018

FÁBIO SOARES LOYOLA

**MODELAGEM DA TEMPERATURA E OTIMIZAÇÃO DO ÍNDICE DE
DESPLACAMENTO DE PAINÉIS DE MDF ENVERNIZADOS EM FORNOS UV**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Energia

Orientador: Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Silveira Bachelos

SÃO MATEUS-ES

2018

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

- L923m Loyola, Fabio Soares Loyola, 1979-
Modelagem da temperatura e otimização do índice de deslocamento de painéis de MDF envernizados em fornos UV : Modelagem e otimização do processo de cura de verniz por fornos UV / Fabio Soares Loyola Loyola. - 2018.
107 f. : il.
- Orientador: Daniel da Cunha Ribeiro Ribeiro.
Coorientador: Marcelo Silveira Bacelos Bacelos.
Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.
1. Otimização do processo de cura por Ultravioleta. 2. Modelagem da temperatura de cura. 3. Análise da variáveis de operação do forno por meios de estatística. I. Ribeiro, Daniel da Cunha Ribeiro. II. Bacelos, Marcelo Silveira Bacelos. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

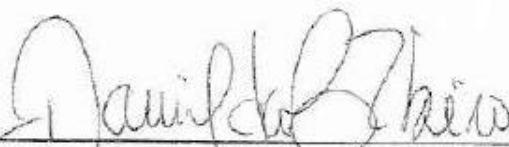
FABIO SOARES LOYOLA

Modelagem da temperatura e otimização do índice de deslocamento de painéis de MDF envernizados em fornos UV

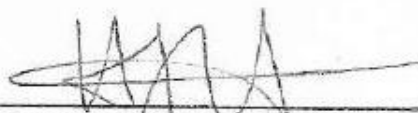
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 07 de novembro de 2018.

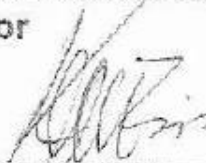
COMISSÃO EXAMINADORA



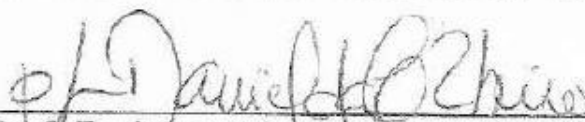
Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Marcelo Silveira Bacelos
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador



Prof.^a. Dr.^a. Kátia Maria Moraes Eiras
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
Universidade Federal da Integração Latino-Americana

Dedico este trabalho à minha esposa Keila e aos meus dois filhos Pedro e João, que sempre estiveram comigo em todos os momentos. Sem eles, jamais teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

“A Deus, todas as coisas, sem Ele nada do que foi feito se fez...” [João 1:3].

Louvo ao Senhor pelo dom da vida que me destes, louvo uma vez mais, por dar-me forças diante de cada obstáculo enfrentado ao longo dessa jornada. Agradeço ao Senhor por fazer-me ver suas mãos sobre mim e não deixou queixar-me nas horas mais difíceis.

Agradeço à minha esposa Keila por ficar ao meu lado em todo esse trajeto, juntos, abdicamos parte de nossas vidas para dedicar-me aos estudos. Aos meus dois filhos, por compreenderem a minha falta em alguns momentos importantes de nossas vidas. Sei o quanto foi difícil, mas valeu a pena, esse é o momento que tanto esperávamos.

Agradeço às pessoas que acreditaram que seria possível, meus pais, minha sogra meu sogro, minhas cunhadas, meus concunhados, enfim... a todos que ao falarem com Deus, rogaram-lhe para que me sustentasse.

Aos meus orientadores, professor Dr. Daniel da Cunha Ribeiro e professor Dr. Marcelo Silveira Bacelos por acreditarem e orientarem-me frente aos desafios deste trabalho.

Agradeço às indústrias de Linhares-ES por abrirem as portas para execução do planejamento experimental, além de cederem instrumentos, equipamentos de segurança e prestarem todo suporte técnico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo.

Espero assim ter recordado de todos, se não citei algum outro nome, quero que todos saibam o quanto sou grato a Deus, por tudo e a todos, chegar até aqui, o único sentimento que sobeja em nós é a gratidão.

Afinal....

“Sei estar abatido, e sei também ter abundância, em toda a maneira, e em todas as coisas estou instruído, tanto a ter fartura, como a ter fome, tanto a ter abundância, como a padecer necessidade, posso todas as coisas naquele que me fortalece” (Filipenses 4:12,13).

RESUMO

A cura de verniz em painéis de MDF envernizados em escala industrial normalmente é realizada com uso de fornos UV. A falha nos ajustes destes fornos, pode levar ao superaquecimento do filme, provocando a degradação do verniz. Na prática, essa degradação é reconhecida como deslocamento e compromete a qualidade do filme. Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo, avaliar o efeito da radiação, convecção e velocidade de transporte dos painéis sobre a temperatura de cura e o ID (índice de deslocamento). A metodologia empregada foi experimental em escala industrial, além de abordagem matemática. Diante dos resultados e com base no que a literatura reporta, o efeito do fenômeno de radiação sobre a temperatura é cinco vezes mais importante em relação aos demais fatores. Os resultados revelaram que o efeito da convecção e de velocidade de transporte, são inversamente proporcionais para o aumento da temperatura do filme e deslocamento. Já os resultados do modelo de transporte de calor a parâmetros concentrados, mostraram boa aderência aos dados de temperaturas experimentais. As condições operacionais ótimas (temperatura de 53⁰C, ID até 26% e padrão de qualidade ISO 3/ ASTM 2B) aceitáveis para a prática de cura UV podem ser alcançadas com ajuste da potência em 190 W/cm², velocidade de transporte em 18 m/min e velocidade de ventilação em 24 m/s.

Palavras-chave: Temperatura de cura; Deslocamento de verniz; Abordagem experimental.

ABSTRACT

Varnish curing on varnished MDF panels on an industrial scale is usually accomplished using UV kilns. Failure to adjust these ovens can lead to film overheating, causing the degradation of the lacquer. In practice, this degradation is recognized as displacement and compromises the quality of the film. In this context, the objective of this research is to evaluate the effect of radiation, convection and transport velocity of the panels on the curing temperature and ID (displacement index). The methodology used was experimental on an industrial scale, besides a mathematical approach. Considering the results and based on what the literature reports, the effect of the phenomenon of radiation on temperature is five times more important in relation to the other factors. The results showed that the effect of convection and transport velocity are inversely proportional to the increase in film temperature and displacement. The results of the heat transfer model to the concentrated parameters showed good adherence to the experimental temperature data. Optimum operating conditions (temperature of 53⁰C, ID up to 26% and ISO 3 / ASTM 2B quality standard) acceptable for UV curing can be achieved with power setting at 190 W / cm², transport speed at 18 m / min and ventilation velocity at 24 m / s.

Keywords: Curing temperature; Displacement of varnish; Experimental approach.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forno de secagem e cura de amostra de verniz por infravermelho.	23
Figura 2 - Secador experimental.....	24
Figura 3 - Esquemática do forno real e hipotético.....	34
Figura 4 - Esquema do forno com o painel irradiado.....	36
Figura 5 - Troca de energia entre meio e volume controle.....	36
Figura 6 - Perfil real das linhas de corrente sobre o painel.....	36
Figura 7 - Representação das etapas e procedimentos adotados.....	42
Figura 8 - Rolo aplicador de verniz (a) e forno UV (b).....	49
Figura 9 - Esquema de aplicação de verniz e esquema de cura (a), (b).....	50
Figura 10 - Procedimento de medição da temperatura experimental sobre o painel.....	51
Figura 11 - Redução das amostras	52
Figura 12 - Realização do teste de adesão	52
Figura 13 - Imagem padrão para calibração do programa <i>Image J</i>	55
Figura 14 - Área de cálculo gerada pelo programa <i>Image J</i>	56
Figura 15 - Gráficos de superfícies para a temperatura (a), e ID (b).....	59
Figura 16 - Probabilidade versus resíduos para a temperatura (a), ID (b).....	60
Figura 17 - Resíduos versus valores preditos para a temperatura (a), e ID (b).....	60
Figura 18 - Comparativo entre temperaturas simuladas e experimentais	62
Figura 19 - Correlação entre temperatura de cura e ID de filme.....	63
Figura 20 - Esquema do forno de UV com adaptação.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formulação de verniz.....	28
Tabela 2 - Planejamento de experimentos de cura UV.....	29
Tabela 3 - Planejamento de experimentos de cura EB.....	29
Tabela 4 - Potência das lâmpadas coletadas.....	42
Tabela 5 - Velocidade de transporte coletada.....	43
Tabela 6 - Velocidade de ventilação do ar coletada.....	44
Tabela 7 - Limite dos fatores.....	44
Tabela 8 - Matriz planejamento preliminar 2 ²	44
Tabela 9 - Efeito dos fatores no planejamento preliminar	47
Tabela 10 - Matriz planejamento experimental 3 ³	47
Tabela 11 - Composição química do verniz experimental	47
Tabela 12 - Propriedade do verniz experimental	47
Tabela 13 - Norma para teste de adesão ASTM D 3359.....	53
Tabela 14 - Amostras recortadas.....	53
Tabela 15 - Estimativa de efeitos para a temperatura.....	57
Tabela 16 - Estimativa de efeitos para o ID de filme	58
Tabela 17 - Modelo matemático usando variáveis reais.....	60
Tabela 18 - Resultados de temperaturas simuladas e experimentais.....	61
Tabela 19 - Condições ótimas de trabalho.....	64
Tabela 20 - Velocidade do ar.....	73
Tabela 21 - Propriedade do ar.....	74
Tabela 22 - Coeficiente de convecção calculado.....	74
Tabela 23 - Resultado de temperatura da vizinhança estimada para cada experimento.....	75
Tabela 24 - Relação entre os resultados dos experimentos.....	77
Tabela 25 - Resultados de áreas deslocadas para cada amostra	78

Tabela 26 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 1.....	79
Tabela 27 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 2.....	80
Tabela 28 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 3.....	81
Tabela 29 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 4.....	82
Tabela 30 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 5.....	83
Tabela 31 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 6.....	84
Tabela 32 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 7.....	85
Tabela 33 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 8.....	86
Tabela 34 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 9.....	87
Tabela 35 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 10.....	88
Tabela 36 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 11.....	89
Tabela 37 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 12.....	90
Tabela 38 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 13.....	91
Tabela 39 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 14.....	92
Tabela 40 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 15.....	93
Tabela 41 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 16.....	94
Tabela 42 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 17.....	95
Tabela 43 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 18.....	96
Tabela 44 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 19.....	97
Tabela 45 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 20.....	98
Tabela 46 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 21.....	99
Tabela 47 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 22.....	100
Tabela 48 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 23.....	101
Tabela 49 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 24.....	102
Tabela 50 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 25.....	103
Tabela 51 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 26.....	104
Tabela 52 - Resultados de temperatura simulada para o experimento 27.....	105

LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	- Área Desplacada
AND	- Área não Desplacada
AT	- Área Total
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CFD	- Computational Fluid Dynamics
DO	- Discrete Ordinate
EB	- Aceleração de Elétrons
FTIR	- Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
ID	- Índice de Desplacamento
IHT	- Interactive Heat Transfer
ISO	- International Organization for Standardization
MDF	- Fibra de Média Densidade
NBR	- Norma Brasileira Registrada
Nu	- Número de Nusselt
Pr	- Número de Prandtl
PVA	- Polivinílica
Re	- Número de Reynolds
REA	- Engenharia de Reação
S2S	- Surface-to-Surface
UV	- Ultravioleta
UVA	- Classificação Ultravioleta Longo Alcance Comprimento de Onda
UVB	- Classificação Ultravioleta Médio Comprimento de Onda

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos gregos

Σ	- Constante de Stefan Boltzmann	[W/m ² .K ⁴]
ε	- Emissividade	[-]
ρ	- Massa Específica	[kg/m ³]
μ	- Viscosidade Dinâmica	[N.s/m ²]

Símbolos

q''_{rad}	- Fluxo de Calor por Radiação	[W/m ²]
q''	- Fluxo de Calor	[W/m ²]
C_p	- Calor Específico	[kJ/kg.K]
A_s	- Área Superficial	[m ²]
A	- Absortividade	[-]
\dot{E}_{ar}	- Energia Armazenada	[J]
P	- Potência da Lâmpada	[W/cm ²]
Q	- Vazão	[m ³ /min]
T	- Temperatura	[K]
t	- Tempo	[s]
T_s	- Temperatura Superficial	[K]
T_{lamp}	- Temperatura da Lâmpada	[K]
H	- Coeficiente de Convecção	[W/m ² .K]
V_{ar}	- Velocidade de Ventilação do Ar	[m/s]
V_t	- Velocidade de Transporte	[m/min]
V	- Velocidade	[m/s]
W	- Potência	[W]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 ANÁLISE E MODELAGEM MATEMÁTICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FORNOS....	19
2.1.1 ABORDAGEM POR COEFICIENTE DE CONVECÇÃO	19
2.1.2 ABORDAGEM POR ACOPLAMENTO DE ENERGIA E QUANTIDADE DE MOVIMENTO.....	21
2.2 ANÁLISE TÉRMICA DE FORNOS POR MEIO DE MÉTODOS EXPERIMENTAIS	23
2.3 RELAÇÕES ENTRE QUALIDADE DE REVESTIMENTO E TEMPERATURA DE CURA DO VERNIZ.....	25
2.4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM A TEMPERATURA SUPERFICIAL	28
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	31
3. MODELAGEM MATEMÁTICA E ABORDAGEM NUMÉRICA.....	33
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA	33
3.2 ABORDAGEM NUMÉRICA.....	35
3.3 HIPÓTESES ASSUMIDAS	36
3.3.1 REGIME TRANSIENTE	36
3.3.2 GEOMETRIA DO FORNO	36
3.3.3 SUPERFÍCIE OPOSTA DO PAINEL ADIABÁTICA	37
3.3.4 AUSÊNCIA DE GERAÇÃO DE ENERGIA INTERNA	37
3.3.5 VERNIZ TRANSLÚCIDO	38
3.3.6 COEFICIENTE DE CONVECÇÃO EMPÍRICO	38
3.3.7 EMISSIVIDADE DAS SUPERFÍCIES.....	39
3.3.8 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA LÂMPADA.....	40
3.4 CONDIÇÕES INICIAIS	41
4. METODOLOGIA	42
4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES AJUSTÁVEIS.....	42
4.1.1 POTÊNCIA DAS LÂMPADAS.....	43

4.1.2	VELOCIDADE DE TRANSPORTE.....	43
4.1.3	VELOCIDADE DE VENTILAÇÃO.....	44
4.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PRELIMINAR.....	45
4.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DEFINITIVO	47
4.4	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	49
4.5	PREPARAÇÃO DO VERNIZ E APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO	49
4.6	INÍCIO DO PROCESSO DE CURA DAS AMOSTRAS.....	50
4.7	MEDIÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS	51
4.8	REDUÇÃO DA SEÇÃO DAS AMOSTRAS.....	52
4.9	TESTE DE ADESÃO SOBRE O FILME CURADO	53
4.10	IMAGENS FOTOGRÁFICAS DA ÁREA EM ANÁLISE DAS AMOSTRAS.....	54
4.11	CÁLCULO DE ÁREA DESPLACADA.....	56
4.11.1	CALIBRAÇÃO DO PROGRAMA.....	56
4.11.2	MÉTODO DE CÁLCULO DE ÁREA.....	56
4.12	MODELAGEM MATEMÁTICA	57
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	EFEITO DOS FATORES SOBRE AS VARIÁVEIS RESPOSTAS TEMPERATURA E ID DE FILME 59	
5.2	TEMPERATURA SIMULADA VERSUS EXPERIMENTAL.....	63
5.3	CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE CURA E ID DE FILME	65
5.4	CONDIÇÕES ÓTIMAS DE OPERAÇÃO	65
6.	CONCLUSÃO	67
7.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	68
	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTO PARA MEDIR A VELOCIDADE DO AR NA SAÍDA DO FORNO	74
	APÊNDICE B – PROCEDIMENTO PARA CALCULAR O COEFICIENTE CONVECTIVO.....	76

APÊNDICE C – PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DA VIZINHANÇA (LÂMPADA) SOBRE O FORNO UV.....	77
APÊNDICE D – CÁLCULO DA TEMPERATURA USANDO O MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	79
APÊNDICE E – PERCENTUAL DE DESPLACAMENTO DE FILME PARA CADA EXPERIMENTO	80
APÊNDICE F - MÉTODO PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA COM SOFTWARE IHT 4.0	81

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a primazia do emprego de radiação UV para cura foi em 1969 na indústria gráfica (ALMEIDA, 2011). Um ano mais tarde, em 1970, já se aplicava o UV para a cura de verniz na indústria moveleira brasileira (ALMEIDA, 2011). Para Gao *et al.* (2018) e Magnoni *et al.* (2018), essa técnica tem sido muito aceita por dispensar uso de fontes de energia orgânicas e poluentes, além da vantagem como produção acelerada e reduzido consumo de energia em comparação a outras técnicas de cura.

Entretanto, os autores enfatizam que durante o processo podem surgir imperfeições na cura, como exemplo, irrisistência a arranhões ou abrasão, muito comum na prática e reconhecido empiricamente como deslocamento de verniz. Para Martins (2011), é preciso compreender como acontece o processamento de cura, além das razões que levam ao deslocamento do filme, acrescenta ainda que as perdas de produção, quando ocorrem por problemas como estes são irreparáveis. De acordo com o boletim técnico emitido pela *Visioncure UV & Technologya* (2014) sobre aspectos importantes de cura a UV, tais imperfeições sobre o filme são inerentes a vários fatores incutidos ao processo, daí ser importante estudar a cura de verniz por UV.

Rodrigues e Neumann (2003) descrevem que na prática, a reação de cura deve ser processada sob uma temperatura ótima para que ocorram as etapas de iniciação e propagação. Caso a temperatura seja baixa demais, a reação pode ser iniciada, mas não propagada, o que impede a formação de película sólida. Por outro lado, se a temperatura for elevada demais, pode provocar a degradação do filme. Qualquer uma das duas situações é prejudicial ao produto final já que não confere qualidade aceitável (FRAGATA; AMORIM; ORDINE, 2010).

Apesar de ser recente o emprego de UV voltado à cura de vernizes, pouco tem sido feito em pesquisas voltadas à melhoria do processo. Autores como Ruiz e Machado (2010), investigaram os efeitos da velocidade de cura e a intensidade da radiação UV sobre painéis revestidos, porém em escala de bancada. Recentemente, em escala laboratorial, Ciofini *et al.* (2016) analisaram os espectros resultantes da composição

do filme, por meio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

É importante salientar que as causas que levam ao desprendimento de filme, ainda não foram exploradas na Literatura. Dessa forma, o conhecimento do melhor ajuste entre os fatores e seus efeitos sobre a transferência de calor do verniz aplicado à superfície é essencial para prever, antes da produção, se o conjunto de variáveis de processo produzirá, ou não, um revestimento de qualidade.

Com o objetivo de contribuir com o processamento de MDF na indústria moveleira, neste trabalho avaliou-se experimentalmente e em escala industrial, os efeitos das variáveis de processo (velocidade do ar, velocidade de transporte e potência das lâmpadas) em termos de resposta temperatura e ID do filme (Índice de Deslocamento). A metodologia empregada foi experimental com uso do *software Estatística*, além de abordagem matemática com modelo de transporte de calor a parâmetros concentrados. Os resultados deste modelo, foi confrontado com dados experimentais levantados em planta de revestimento de painéis de *Medium Density Fiberboard* (MDF), situado no município de Linhares Espírito Santo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, buscou-se investigar na literatura, trabalhos que tratam de análise e modelagem de transferência de calor em processos de cura ou secagem de revestimentos, além de técnicas experimentais. Temas como a relação entre qualidade do revestimento e temperatura de cura, variáveis que influenciam na temperatura de cura, serão abordadas. Ao final, conclusões desta revisão são reunidas e relacionadas à metodologia proposta.

2.1 ANÁLISE E MODELAGEM MATEMÁTICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FORNOS

A modelagem matemática desse processo é, de uma maneira geral, complexa e exige soluções iterativas. A complexidade surge do fato de os fenômenos de transferência de massa, calor e quantidade de movimento estarem acoplados. Não é raro, na literatura, serem propostas hipóteses simplificadoras, de modo a ser possível uma solução em tempo aceitável, de um projeto ou até para obter uma solução fisicamente consistente. É possível, também, elencar dois tipos de abordagem desse problema: resolver a interação entre o transporte de quantidade de movimento e energia ou apenas modelá-la, por meio de um coeficiente empírico de convecção. Nessa primeira seção, serão apresentadas as propostas de modelagem por coeficiente de convecção empírico e modelagem por campo de velocidades e temperatura.

2.1.1 Abordagem por Coeficiente de Convecção

Sakin, Kaymak-ertekin e Ilicali (2009) avaliaram o coeficiente de transferência de calor combinado (convectivo e radiativo) na superfície de um cilindro de alumínio aquecido em forno, com e sem convecção forçada. A proposta delineou-se por meio de dois modelos distintos: parâmetros concentrados, em que a única variável independente é o tempo, e parâmetros distribuídos em que, além do tempo, duas coordenadas espaciais foram consideradas variáveis independentes. Os dois modelos propostos apresentaram boa aderência aos dados experimentais publicados na literatura, mostrando que a consideração de temperatura uniforme no volume não representa

uma hipótese simplificadora que incorra em margem de erro apreciável. Os autores ainda afirmam que os modelos propostos podem ser aplicados em outros fornos.

De acordo com Miranda, Ziviani e Fullin Júnior (2007), os grandes desafios na modelagem de aquecimento de placas em forno de soleira residem em tratar a interação entre a radiação e os gases. A presença de gases leva ao espalhamento da radiação baseado no fato de a espessura ótica do meio ser extensa, em função de serem fornos de grandes dimensões. O modelo proposto baseou-se no conceito de resistências térmicas, simulando o aquecimento das placas, usando técnicas de diferenças finitas e volume finitos. Os autores consideram o fenômeno de espalhamento por meio das propriedades físicas dos gases, como absorvidade, transmissividade e emissividade. Assim, o sistema de equações é acoplado e requer solução numérica por meio do método das diferenças finitas. Os resultados do perfil de temperatura, foram confrontados, com os dados experimentais da unidade fabril, mostrando boa concordância.

Putranto, Chen e Webley (2010) investigaram o processo de secagem de uma solução a base de polímero aquoso, por convecção. Normalmente, a literatura mostra modelos por difusão para casos similares a esse. Entretanto, o método aplicado para a abordagem, nesse trabalho, é conhecido como engenharia de reação (REA). Na visão dos autores, a abordagem REA oferece a vantagem de ser expressa em termos de equação diferencial ordinária simples, em relação ao tempo, o que evita todas as complicações decorrentes do uso de equações diferenciais parciais. O objetivo foi avaliar o perfil de temperatura e o teor de umidade em função do tempo, durante o processo de secagem. Para equacionamento, foi necessário o balanço de massa e energia.

Os autores anteriormente citados explicam que as análises experimentais, em paralelo ao modelo, são determinantes, pois se completam. Sugerem, sempre que possível, confrontar resultados simulados com análise experimental. Os resultados em discussão mostraram, por meio do modelo REA, pouca diferença entre os resultados com índices de umidade em relação à variação de temperatura entre os resultados experimentais. Na visão dos autores, não há restrições quanto à aplicação do modelo para secagem de outros tipos de soluções, com uso de infravermelho.

Cabe ressaltar que, nesse trabalho, os autores tratam como sistema um fluido, ao invés de sólidos como normalmente se costuma modelar.

Allanic, Salagnac e Glouannec (2009) integraram um controle ótimo em malha fechada ao processo de secagem de uma solução aquosa polivinílica (PVA) com plastificante, por meio de um controlador implementado ao forno. Esse controlador permitiu aperfeiçoar o processo com uma função objetiva, o que levou em conta o tempo de secagem, consumo de energia e temperatura, além da qualidade da cura. Para simular a ação controlada de maneira experimental, foi adotado o modelo determinístico a parâmetros concentrados. Este consiste em fornecer os valores de temperatura superficial do sistema em investigação de modo homogêneo (no caso a solução aquosa), além das equações para a conservação da energia e outra para a difusão da água. Os resultados apontaram boa concordância com os dados experimentais, levantados pelos próprios autores, mostrando que o sistema montado possui, na prática, propriedades homogêneas no volume de teste.

Putranto, Chen e Webley (2010) propõem a aplicação de princípios de engenharia de reações químicas no mesmo processo de secagem estudado por Allanic, Salagnac e Glouannec (2009). Nessa abordagem, esses princípios são utilizados para correlacionar os dados de cinética de secagem. A vantagem dela é prover um modelo relativamente simples de equações diferenciais ordinárias facilmente acopladas a códigos tipos *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Diferente da primeira proposta, os autores, ao invés do uso de PVA com plastificante, utilizam agora uma mistura de água, PVA e glicerol, entretanto sem o uso de uma estratégia de controle.

2.1.2 Abordagem por Acoplamento de Energia e Quantidade de Movimento

Satit (2010) propõe estudar o efeito das propriedades radiativas da superfície de recobrimento em pó de painéis de Fibra de Média Densidade (MDF) sobre a transferência de calor em um forno de infravermelho. O modelo proposto acopla os modos de transferência de calor por convecção e radiação por meio da solução simultânea das Equações de *Navier-Stokes* em três dimensões e do modelo de radiação P1. As simulações foram conduzidas de forma transiente até atingir o regime permanente, o que significa um tempo real de 1500 s. Em outras palavras, o processo de cura foi conduzido em batelada. O autor usa o *software ANSYS CFX*, mas não

informa a versão. Os resultados numéricos foram comparados entre si sem dados experimentais de literatura para referência. O autor conclui que materiais com baixa condutividade, como o MDF, podem apresentar dificuldade no aquecimento durante a reação de cura, o que é confirmado por Carrasco *et al.* (2010). Quanto à temperatura obtida, não foi quantificado pelo autor, pois seu maior interesse foi comparar a maneira como se comportavam diversos materiais quando aquecidos. Dentre os tais, destaca-se o MDF e a chapa de aço que, aliás, teve aquecimento em curto tempo. Além disso, o modo de transferência de calor por energia de radiação, em um processo como esse, é quarenta vezes mais rápido que a convecção, o que favorece o aquecimento de modo contínuo.

Rek, Rudolf e Zun (2012) estudaram a influência da geometria e condições de contorno de fornos para panificação. O objetivo principal foi criar condições ideais de cozimento para distintos sistemas de aquecimento. Ao modelo de escoamento com troca de calor, foi acoplado o modelo “Discrete Ordinate” (DO) para descrever a radiação, já que o meio tem espessura óptica baixa ($\ll 1$). Os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais levantados pelos próprios autores e mostraram boa concordância (~15% de desvio). Os autores ressaltam a importância da escolha de um modelo de radiação adequado, já que os valores de temperatura foram bem divergentes para todas as outras alternativas de modelagem. Finalmente, os autores concluíram que não se deve, em qualquer hipótese, desprezar as variações geométricas, em casos de modelagens. Outra discussão relevante foi sobre as condições de contorno de velocidades, seus efeitos podem alterar, em potencial, a distribuição homogênea do campo de temperaturas na cavidade.

Já os autores Saravanan e Sivaraj (2013) investigaram, de forma teórica, os efeitos tanto da convecção como da radiação, sobre um painel posicionado na horizontal e na vertical em um forno. O modelo matemático foi baseado na conservação da quantidade de movimento, massa e energia, em domínio bidimensional. A radiação, foi baseada no conceito *Surface-to-Surface* (S2S) e não requer uma equação de transporte. Para a discretização do modelo, foi empregado o Método dos Volumes Finitos, usando uma malha uniforme com arranjo deslocado. Para ambos os casos, foi avaliado o efeito da variação da emissividade do material, no comprimento da placa e o número de Rayleigh sobre a temperatura superficial. O trabalho enfatiza que não

considerar a radiação, leva a erros de predição. Além disso, a convecção tem papel importante quando a amostra está posicionada na horizontal.

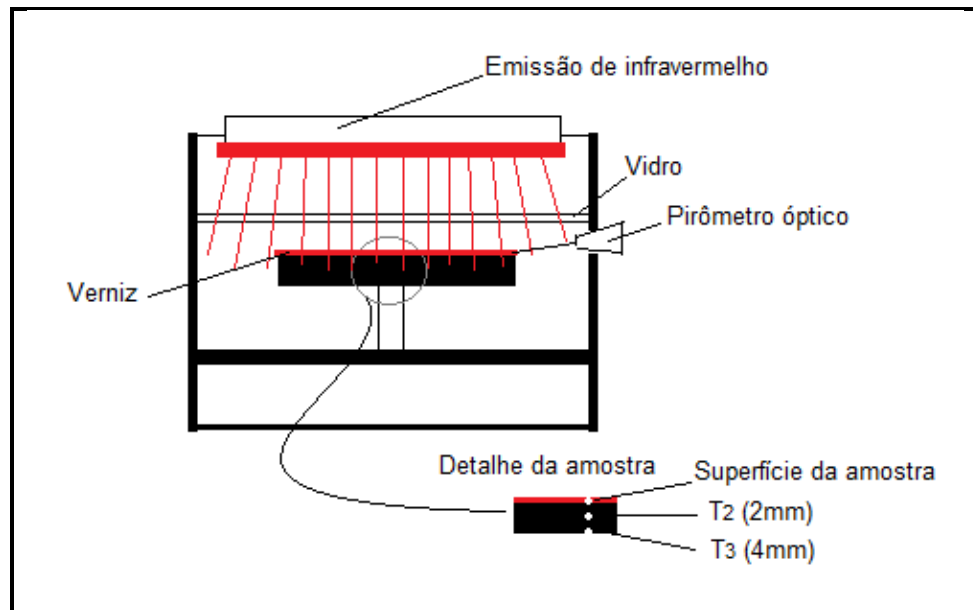
Yi *et al.* (2017) investigaram um forno de cura contínua industrial, utilizando ferramentas CFD, de modo a estimar a velocidade máxima de esteira ou mínimo tempo de produção. Para que haja eficiência máxima do processo, a qualidade da cura deve ser constantemente avaliada. Então, foi desenvolvido um modelo para simular a eficiência de transferência térmica do forno por convecção. Na discussão sobre os resultados, três fatores tiveram seus efeitos avaliados frente a qualquer alteração da velocidade de transporte, a saber: o fluxo de ar, a temperatura e o posicionamento dos bicos de aquecimento. O modelo mostrou ser capaz de prever o aumento da velocidade de transporte de forma simples, com pequenos ajustes sobre a posição dos bicos de aquecimento.

2.2 ANÁLISE TÉRMICA DE FORNOS POR MEIO DE MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O trabalho de Allanic *et al.* (2014) mostrou o processo de secagem de verniz de poliuretano com base aquosa, sobre substrato de elastômero por radiação infravermelha. O objetivo principal foi avaliar o efeito da modulação da radiação emitida sobre o tempo de secagem e taxa de aquecimento. Foi utilizado um secador com aquecimento por infravermelho, combinado com convecção natural.

Os valores de potência de emissão da radiação infravermelha utilizados foram de até 2 kW para ondas médias e de 1,5 kW para ondas curtas. Cada lâmpada continha refletores que concentraram o foco da irradiação infravermelha em um só ponto. A Figura 1 mostra o equipamento usado para o experimento, a região em que foi depositado o verniz e a posição projetada para emissão de irradiação.

Figura 1 – Forno de secagem e cura de amostra de verniz por infravermelho



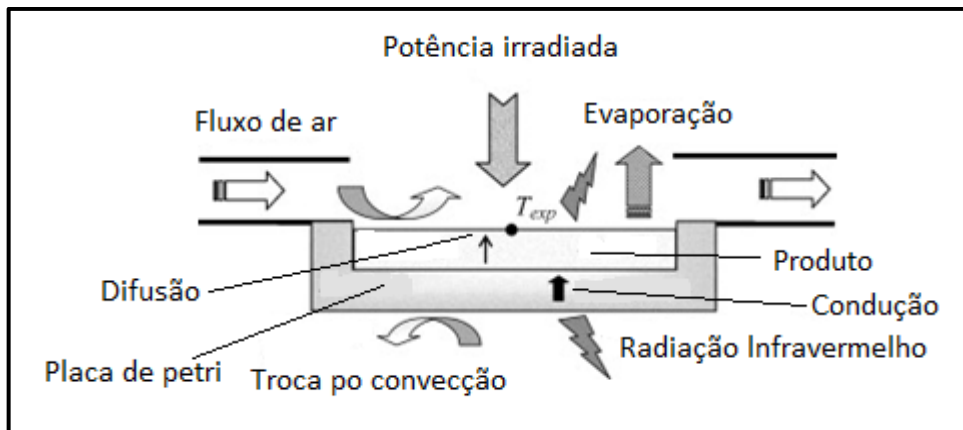
Fonte: Allanic *et al.* (2014).
Adaptada pelo autor

Conforme a Figura 1, na região central do forno, é possível observar onde é posicionada a solução de verniz sobre o substrato. Logo acima, estão as lâmpadas de infravermelho. Para medir a temperatura, foi usado um pirômetro óptico, com a projeção do feixe de luz na direção do substrato.

Para os autores, a investigação experimental mostrou a importância em ajustar a potência de emissão de infravermelho sobre o verniz de forma dosada, pois a taxa de cura está relacionada ao aumento da temperatura do verniz que, por sua vez, tem influência nas propriedades termofísicas do filme curado.

Allanic, Salagnac e Glouannec (2009) investigaram experimentalmente o processo de secagem de uma solução aquosa de PVA com plastificante. A Figura 2 mostra uma representação esquemática do secador usado para cura do solvente, além das entradas de ar e os fenômenos de troca de calor existente.

Figura 2 – Secador experimental



Fonte: Allanic, Salagnac e Glouannec (2009).
Adaptada pelo autor

Conforme mostra a Figura 2, a solução é armazenada em uma placa de Petri, logo acima, é posicionado a fonte de radiação infravermelha sobre a solução. O experimento foi controlado por meio de duas estratégias: controle proporcional e controle ótimo. Foram medidas a umidade e a temperatura da solução. A variável controlada foi a potência de emissão do infravermelho.

O experimento mostrou que é possível reduzir o tempo de secagem, conseqüentemente, maximizar sua velocidade, utilizando uma estratégia de controle. Para obter o mínimo de tempo de secagem, foi preciso manter a solução a uma temperatura ótima, de modo a não afetar a qualidade. Além disso, uma restrição quanto ao gradiente máximo de temperatura foi imposto para evitar a distorção da placa formada após a secagem. De acordo com os autores, a qualidade foi o parâmetro mais difícil a correlacionar. Por fim, eles concluíram que o modelo experimental é capaz de prever redução no consumo de energia, além de evitar distorções sobre a placa e o surgimento de estrias.

2.3 RELAÇÕES ENTRE QUALIDADE DE REVESTIMENTO E TEMPERATURA DE CURA DO VERNIZ

Geralmente, deseja-se da camada sólida formada após o processamento de cura melhor índice possível de qualidade. O que se faz, normalmente, é avaliar os resultados com base em valores previamente definidos como padrões para cada categoria de produto.

No caso de vernizes, de acordo com Rodrigues e Neumann (2003), a elevação da temperatura pode afetar o filme de verniz, causando pequenos níveis de degradação, comprometendo a qualidade.

De acordo com Fragata, Amorim e Ordine (2010), a degradação em vernizes ocorre pelo rompimento de ligações químicas do filme, durante e após a cura. Para os autores, o que provoca o rompimento de ligações químicas, na maioria dos casos, são prolongadas taxas de energia radiativa. Cada substância, quando submetida ao processo de cura, deve, de forma limitada, receber energia irradiada ao ponto que não comprometa a cura, isto é, um comprimento de onda ideal para ocorrer o início e término da reação. A degradação química do verniz ocorre quando esse limite de energia é insuficiente, ou ainda, quando há prolongada exposição à radiação ultravioleta (UV).

Dentro desse entendimento, os autores anteriormente citados investigaram o grau de qualidade do verniz em função de seu processo de degradação exposto à radiação UV. Para isso, foi usado o método de envelhecimento acelerado. A técnica consistiu em expor corpos de prova sob a ação ultravioleta, em câmaras fechadas, controlando a irradiação, a temperatura e a umidade.

Para os ensaios, foram testadas as radiações UVB e UVA, com comprimento de onda entre 315 a 340 nm, respectivamente. O tempo de vida útil das lâmpadas foi estimado em 1500 horas pelo fabricante. Quanto aos experimentos, foram definidas as seguintes condições: 8 horas de exposição à radiação UV, em temperatura de $60 \pm 3^\circ\text{C}$ e 4 horas de condensação de umidade, à temperatura de $50 \pm 3^\circ\text{C}$. Para comparar os índices de qualidade, foram adotadas as normas *American Society for Testing and Materials* (ASTM G 154, 2008) e *International Organization for Standardization* (ISO) 4628/6 (2011).

Quanto aos resultados, os autores concentraram maior interesse em avaliar aspectos qualitativos de gizamento, brilho e cor. Ao que refere ao gizamento, as amostras foram analisadas com base à norma ISO 4628/6 (2011) que informa ser preciso aderir uma fita sobre a área em exame e posteriormente removê-la. Em seguida, por meio da análise comparativa, com espelho padrão, é possível definir se o grau de concordância de gizamento é aceitável ou não.

Outras técnicas muito próximas a esse tipo de avaliação são encontradas na literatura, por exemplo, a norma ASTM D 3359 (2007), que descreve ser preciso fazer riscos na horizontal e vertical, sobre a área teste. Recomenda-se manter espaçamentos de 2 a 3 mm entre os riscos, na sequência, aplicar fita autoaderente apropriada ao teste, e retirá-la de forma contínua. Por fim, deve ser feito o cálculo de percentual de desprendimento do verniz e comparar com os índices, que acentuam o grau de qualidade variando de 0 a 5. Embora seja amplo o emprego dessa norma, os autores adotaram a norma ISO 4628/6 (2011). As análises de brilho foram feitas com base na norma ASTM D 523 (1999), e o instrumento usado foi o brilhômetro, mantendo um ângulo de 60° com feixe refletido. Com respeito à cor, foi usada a norma ASTM D 2244 (2008).

As amostras curadas com UVB apresentaram maior propensão ao gizamento, entretanto, segundo os autores Fragata, Amorim e Ordine (2010), isso já era esperado devido ao menor comprimento de onda do UVB, quando comparado ao UVA. Qualitativamente, observou-se que os vernizes em testes apresentaram comportamentos semelhantes em ambos os ensaios. A única diferença apontada nos testes foi a intensidade da energia associada a cada faixa de comprimento de onda em que aquela que possui maior energia mostrou-se, portanto, mais agressiva, o que causou degradação do revestimento em um tempo menor de ensaio.

A busca na literatura ainda mostrou outros métodos para avaliar os efeitos de temperatura sobre a qualidade do filme de vernizes curados por UV. Recentemente, Ciofini *et al.* (2016) usaram a técnica por meio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para analisar os espectros resultantes da composição do filme curado. Quanto ao método para a cura, aplicou-se o princípio de envelhecimento acelerado, que consiste em induzir o filme ao processo de envelhecimento.

As amostras foram submetidas à exposição, numa espécie de câmara de xênon, arrefecidas a ar, e mantidas por 500 h e 290 nm. O potencial irradiado foi mantido constante, em dose aproximadamente a 50 mW/cm². Já a temperatura da câmara não excedeu os 50 °C, mantendo-se próxima à temperatura limite para a cura, mediante o tipo de verniz usado. De acordo com a explicação dos autores, esse é

o limite máximo aceitável, caso exceda, aumentam-se as chances em ocorrer degradação do filme.

Isso ficou confirmado sobre os resultados experimentais em que os autores concluíram ter ocorrido maior foto oxidação e consequente aumento de temperatura sobre o filme sujeito à abrasão, com irradiação em comprimento de onda acima de 266 nm. Já para comprimento de onda a 213 nm, o teste obteve melhores resultados à abrasão além de melhor brilho e menor temperatura.

2.4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM A TEMPERATURA SUPERFICIAL

De acordo com Ruiz e Machado (2010), para ocorrer a cura do verniz sobre um determinado substrato, é necessário uma completa absorção dos fótons de luz pelo fotoiniciador. Nesse caso, destacamos os parâmetros de velocidade de cura e potência irradiada, como fatores de maior influência ao processo de cura. Quanto à velocidade, é relacionada à quantidade absorvida de fótons de luz pela superfície. A velocidade alta indica menor absorção dos fótons e, de forma oposta, com menor velocidade, mostra maior absorção. Para Javadi *et al.* (2016), a velocidade ainda pode ser relacionada em termos de tempo de exposição ao potencial irradiador. Conseqüentemente, um tempo maior de exposição pode causar um aumento do gradiente de temperatura superficial durante a cura.

A dose de irradiação deve ser constantemente avaliada. Normalmente, é mensurada em termos de potência por unidade de área e ao tempo de exposição. Já a potência mostra a intensidade com que os fótons incidem sobre a superfície. Os autores Ruiz e Machado (2010) propuseram uma análise das variáveis do processo, tanto em cura com ultravioleta (UV) quanto em aceleração de elétrons (EB).

Na cura por UV, foi preciso irradiar a superfície revestida por filme líquido com determinada potência, de maneira controlada, a fim de ativar a reação. Entretanto, para o modo de cura EB, a cura ocorre por meio de aceleração de elétrons. Para as análises do modo de cura a UV, foram testados os números de passada do filme sob as lâmpadas. Já para a cura EB, os autores variaram a dose em função da corrente, velocidade do processo e números de passadas sob o feixe.

A Tabela 1 mostra os componentes da formulação dos vernizes A e B, usado na cura UV e EB, respectivamente.

Tabela 1 – Formulação de verniz

Componente de formulação	Cura por EB	Cura por UV
	Verniz A	Verniz B
Resina	65%	63%
Monômeros	35%	34%
Fotoiniciador	-	3%

Fonte: Ruiz e Machado (2010).

Nota: Adaptado pelo autor.

A Tabela 1 mostra a composição em percentual mássico para os dois modos de cura experimental, usado por Ruiz e Machado (2010). O verniz usado para o modo de cura EB foi constituído de resina uretana alifática diacrilada e monômeros 1,6-hexanodiol diacrilado, dispensando o uso de fotoiniciador, com a denominação de verniz A. Já, para a estratégia de cura por UV, foi usado o mesmo verniz, porém com a adição de fotoiniciador do tipo 2-hidroxi-2-metil-2-fenil-propanona, do fabricante Darocur, identificado por verniz B.

A Tabela 2 mostra o planejamento experimental que os autores usaram para as análises de cura UV, variando a potência das lâmpadas, dose e números de passadas.

Tabela 2 – Planejamento experimental de cura UV

Amostra	Potência W/cm^{-1}	Dose /p $mJ.cm^{-2}$	Número de passada
UV1	125	25	4
UV2	125	50	2
UV3	200	50	2
UV4	200	100	1
UV5	300	100	1

Fonte: Ruiz e Machado (2010).

Nota: Adaptada pelo autor.

Diante da Tabela 2 é observado que os autores usaram para cura, dose variando entre 25, 50 e 100 $mJ.cm^{-2}$ e empregando potência das lâmpadas entre 125 W/cm^2 , 200 W/cm^2 e 300 W/cm^2 . O número de passadas refere-se à quantidade de vezes em que

as amostras foram submetidas a energia radiativa das lâmpadas neste caso, variando entre 1 a 4 passadas.

Já a Tabela 3 mostra os fatores usados para o planejamento experimental de cura por EB, variando a corrente do feixe, a taxa de dose, a dose por passada, a velocidade da esteira e o número de passadas.

Tabela 3 – Planejamento experimental de cura EB

Amostra	Corrente de feixe mA	Taxa de dose kGy/s	Dose /p kGy/p	Velocidade da esteira m/min	Número de volta na esteira
EB1	1,0	5,83	5,2	1,68	1
EB2	1,0	5,83	2,6	3,36	2
EB3	1,0	5,83	1,3	6,72	4
EB4	0,5	2,92	1,3	3,36	4
EB5	0,5	2,92	5,2	0,84	1
EB6	2,0	11,67	5,2	3,36	1

Fonte: Ruiz e Machado (2010).

Nota: Adaptada pelo autor.

A Tabela 3 anterior descreve as amostras para cura de EB1 a EB6 para a corrente elétrica do feixe acelerado, variando de 0,5 a 2,0 mA, em seguida, a taxa de dose variando entre 2,92 a 11,67 kGy, a dose por passada entre 1,3 à 5,2 kGy. Já a velocidade de esteira variou entre 0,84 à 6,72 m/min e o número de voltas da esteira entre 1 a 4.

As amostras foram submetidas em equipamento específico para os testes, com variações, desde a temperatura ambiente até 250 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. Foi verificada a ocorrência de maior grau de cura, com potência entre 200 W/cm⁻¹ à 300 W/cm⁻¹ para UV. Portanto, o aumento da potência acelerou o processo de cura, o que levou ao aumento precoce da temperatura superficial. Por fim, concluíram que é importante, para o processo de cura, o controle de fatores como potência irradiada, velocidade da esteira e taxa de dose sobre o substrato.

Corroborando com Ruiz e Machado (2010), os autores Kowalczyk e Kowalczyk (2015) investigaram a cura de duas resinas, polivinil butíricas (PVB) e uma resina polivinil butiral-acetal, com uso de UV. Embora o autor tenha, como objetivo, analisar a influência do tipo de resina sobre a composição da solução, seus resultados foram importantes no

que refere às propriedades térmicas do filme curado. Para eles, ocorreram alterações, principalmente transmitância ao UV, e reações ao tipo de aditivo (ligante). Os efeitos dessas alterações foram notados com surgimento de rugas sobre o revestimento do filme após cura. Em síntese, esses efeitos podem ser bem compreendidos por causarem aumento térmico sobre o filme, devido à potência irradiada.

De acordo com Ruiz e Machado (2010), é importante observar, além da potência irradiada, também a intensidade total do comprimento de onda emitida. Isso só é possível concentrando todos os fótons emitidos em uma única área do substrato. Costuma-se usar refletores do tipo elípticos para melhor concentrar a incidência de luz, mantendo certa distância do substrato. A literatura descreve a distância que se deve manter entre ambas as fontes: irradiadora e superfície do substrato. Geralmente, essas dimensões variam entre os fabricantes de equipamento.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

De acordo com o que mostrou a literatura, não é fato recente o interesse por elucidar problemas que envolvem transferência de calor sobre fornos. Ao que se refere à modelagem, houve maior aderência ao método a parâmetros concentrados, já que ele fornece seus resultados em termos de superfície homogênea do objeto a ser modelado.

Em outros casos, a modelagem foi tratada como parâmetros distribuídos. Entre os métodos, ainda merecem ressalva, o *Computational Fluid Dynamics* (CFD), por ser ferramenta de maior abrangência; e Engenharia de reação (REA), que oferece a vantagem por poder de ser expressa em termos da equação diferencial ordinária simples, eliminando todas as complicações decorrente do uso de equações diferenciais parciais.

Os autores entendem que os efeitos da convecção em meio à radiação na cavidade de fornos são distintos, dessa forma, aconselham não dissociarem, seja em qualquer hipótese. Embora, em alguns casos a convecção aparenta ter menor efeito, ainda assim não pode ser desprezada, já que pode levar a erros de predição.

A maioria dos autores investigados, adotaram o emprego de abordagem experimental, além de modelagem. Eles comentam ser importante quando possível, associar as análises de modelagem às análises experimentais. Embora haja casos que tornam inviável a construção física experimental devido a fatores peculiares, é extremamente válido corroborar os resultados simulados com os experimentais.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E ABORDAGEM NUMÉRICA

Conforme se observou na literatura e em acordo ao que muitos autores descreveram este trabalho delineou-se com abordagem experimental além de método matemático. A metodologia para a modelagem matemática adotada foi a parâmetros concentrados, já que esse modo empregado foi predominante entre a maior parte dos autores.

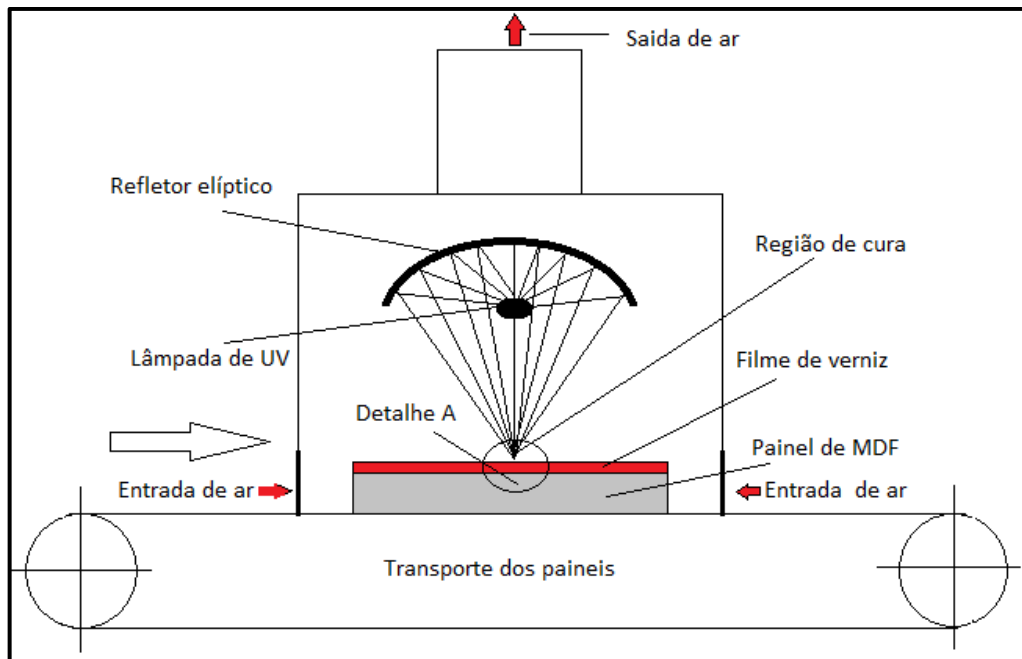
Quanto ao desenvolvimento da parte experimental, entende-se que este seja o diferencial desta proposta, por duas razões: a primeira, é dada à possibilidade de validar os resultados experimentais durante o processo real de produção, além disso, esse método ainda não foi explorado na literatura. Já a segunda, diz respeito à ferramenta estatística que foi delineada para avaliar os efeitos dos fatores sobre o forno, frente às variáveis respostas temperatura e ID de filme, e que também, ainda não foi experimentada.

Neste capítulo, foram introduzidos os aspectos que concernem à modelagem da placa de MDF e a abordagem numérica, além das hipóteses assumidas. Este capítulo se encerrou apresentando e discutindo as condições iniciais de contorno consideradas.

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática proposta é baseada no princípio da conservação de energia, aplicada ao volume de controle, que envolve o verniz e painel na cavidade do forno. A Figura 4 apresenta o esquema do forno em estudo e o painel em sua cavidade.

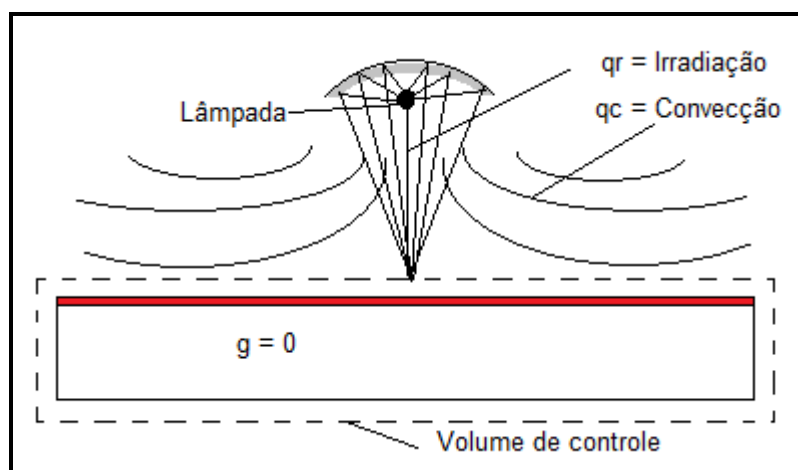
A Figura 4 - Esquema do forno com o painel irradiado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com esta Figura, existe no interior a combinação da lâmpada de UV e do refletor tipo elíptico. Este refletor projeta o foco de irradiação sobre o revestimento líquido de verniz, previamente aplicado sobre o painel. As aberturas laterais representam as entradas de ar e a saída na parte superior. Logo na sequência, a Figura 5 mostra o detalhe A.

Figura 5 – Detalhe dos fenômenos sobre o volume de controle



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este detalhe descreve a região compreendida pelo volume de controle, a entrada de energia irradiada sobre a superfície de interesse, o termo nulo de geração interna de energia, além da ação convectiva devido a ventilação.

A partir desse volume de controle, é possível escrever a Equação 1 (Equação da energia a parâmetros concentrados), a ser empregada na metodologia deste trabalho:

$$\rho c_p V \frac{dT_s}{dt} = [h(T_s - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_{lamp}^4 - T_s^4)]A \quad (1)$$

Nessa equação, T_s é a temperatura média na superfície do painel. Na presente modelagem, os fatores da equação: massa específica do MDF (ρ), calor específico do MDF (c_p) e volume de MDF (V) são considerados constantes ao longo do tempo. Essas hipóteses implicam que a transferência de massa não será levada em conta.

A equação de conservação de energia contempla dois modos de transferência de calor: radiação e convecção. Desse modo, a solução analítica para essa equação diferencial é inviável o que sugere implementação de métodos numéricos

3.2 ABORDAGEM NUMERICA

Para a resolução da equação 1, foi utilizado um método de Euler implícito. Reescrevendo a equação 1, de forma mais genérica, obtém-se a equação 3:

$$\frac{dG}{dt} = f(x, G) \quad (3)$$

O método de Euler se baseia na aplicação da expansão em série de Taylor truncada no segundo termo, após definição de um passo Δx . Então, a equação discretizada obtida é:

$$G_{i+1} = G_i + \Phi(x_i, G_i, \Delta x)\Delta x \quad (4)$$

Esse procedimento está implementado no *software Interactive Heat Transfer 4.0* que acompanha o livro de Bergman *et al.* (2014).

3.3 HIPÓTESES ASSUMIDAS

Nesta modelagem foi conveniente estabelecer considerações importantes tais como: regime transiente, geometria simétrica do forno, superfície oposta do painel adiabática, ausência de geração de energia interna, troca de calor entre a parede do forno com ambiente externo desprezível, verniz translucido e coeficiente de convecção empírico.

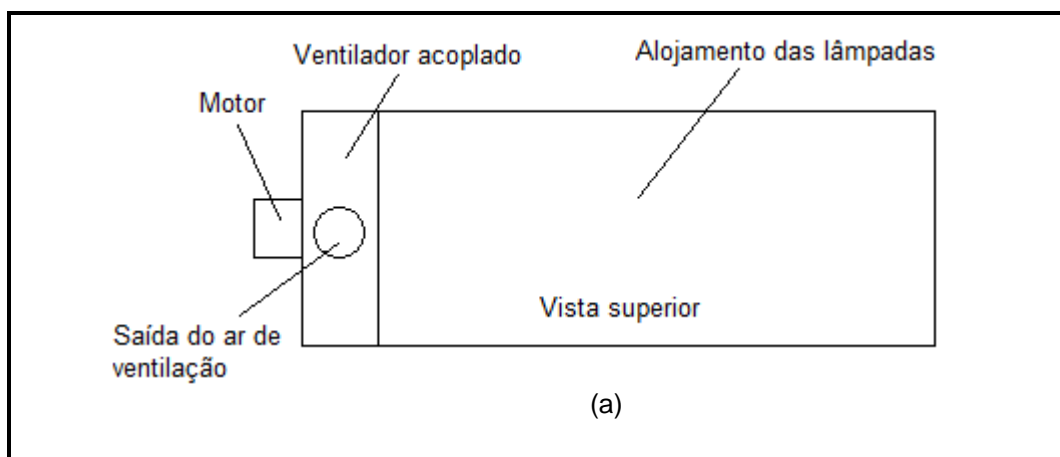
3.3.1 Regime Transiente

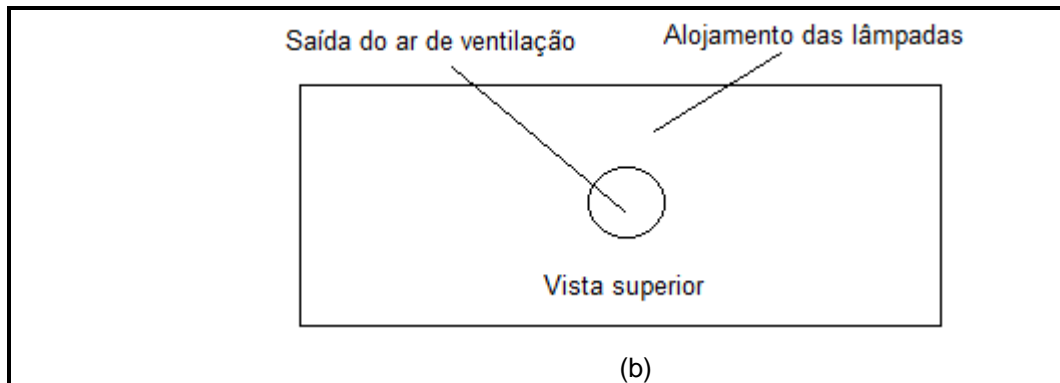
De acordo com os autores Incropera e Dewitt (2006); Verboven *et al.* (2000); Purlis (2012) e Niamsuwan, Kittisupakorn e Suwatthikul (2015); e as investigações *in loco*, foi adotado neste trabalho o regime de fluxo de calor transiente. Além disso, a condição transiente pode ser implícita apenas com a ação da convecção, antes mesmo de o painel ser irradiado, o que é notado com a ação de ventilação (KREITH; MANGLIK; BOHN 2014).

3.3.2 Geometria do Forno

A Figura 3 (a,b) apresenta a vista superior do forno em estudo. A Figura (a) mostra o esquema real, já a Figura (b) mostra a hipótese assumida.

Figura 3 – Esquema do forno real e esquema do forno hipotético





Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o esquema (a), o forno é composto por alojamento de lâmpadas, ventilador acoplado ao lado esquerdo, além de tubo de saída de ar na vertical, fixado à estrutura do ventilador. O esquema (b) mostra na região central do alojamento de lâmpadas, o tubo de saída de ar de ventilação na vertical, porém, nesse caso, o motor é do tipo axial, localizado entre a junção do tubo e alojamento.

Ao que diz respeito à geometria do forno, assumiu-se que a saída do tubo de ventilação deve ficar posicionada sobre a região central do alojamento das lâmpadas. Entende-se que a saída do fluxo convectivo, deveria ser tratada nessa primeira abordagem sobre um ponto central do forno. A posição real do ventilador e o comportamento real do fluxo, levariam ao uso de ferramentas mais completas e complexas, e que estariam além do que se propõe neste trabalho.

3.3.3 Superfície Oposta do Painel Adiabática

A área de interesse do painel é somente a face superior que recebe o revestimento prévio do verniz e, na sequência, a cura. Assim, foram consideradas, como adiabáticas, tanto a superfície oposta à face de interesse, como também as bordas. A razão para essas considerações foi o tempo de cura, por ser relativamente curto, não sendo suficiente para condução de calor através da face oposta e bordas, além da irradiação ser concentrada somente sobre a face de interesse.

3.3.4 Ausência de Geração de Energia interna

De acordo com a investigação o processo de cura do verniz ocorre pelo aquecimento do painel devido à irradiação e não há outros modos de aquecimento explícitos, tais

como fluxo de corrente elétrica ou reações químicas, conforme argumentam os autores (KREITH, MANGLIK E BOHN, 2014).

Além disso, as trocas de calor existentes entre as paredes do forno e meio externo foram desprezadas, por se entender que a cura do verniz ocorre em uma área concentrada pelo foco de irradiação sobre o painel, embora o calor seja difuso em torno de todo alojamento das lâmpadas. Além disso, sobre as paredes internas do forno, existe revestimento de material refratário impedindo a troca de calor com meio externo.

3.3.5 Verniz Translúcido

Quanto ao verniz, ele foi considerado translúcido, ocorrendo absorção total da irradiação emitida pela temperatura da vizinhança sobre o painel. Essa hipótese foi considerada devido à espessa camada de revestimento aplicado à superfície do MDF, não ultrapassando à 50 μm .

3.3.6 Coeficiente de Convecção Empírico

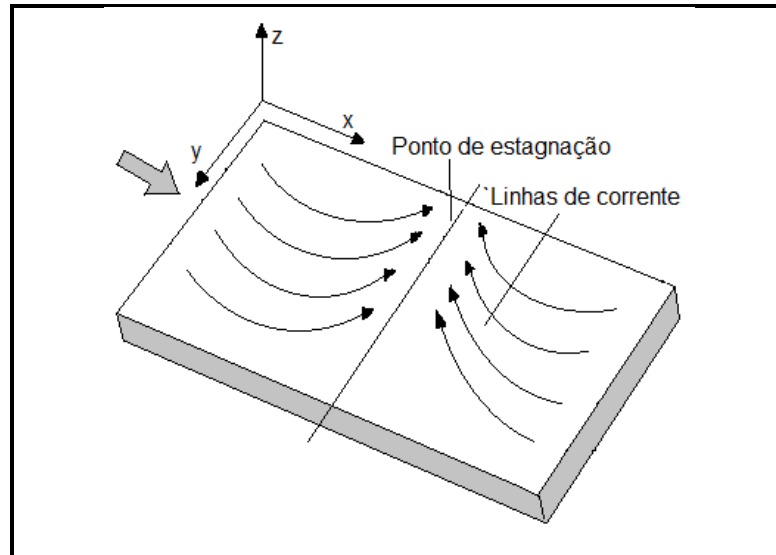
De acordo com Litouche e Bougriou (2017), os efeitos da convecção dependem do perfil de velocidade com que o fluido escoar sobre determinadas superfícies. Para Kreith, Manglik e Bohn (2014) e Incropera e Dewitt (2006), portanto, para cada caso, há uma condição específica de escoamento, por isso é preciso estimar o coeficiente de convecção apropriado.

Normalmente, considera-se, para calcular tal coeficiente, as propriedades físicas do fluido, as condições dinâmicas do escoamento, além das dimensões físicas do sistema.

De acordo com a investigação, ao passar o painel exatamente na linha de simetria (central) do forno, ocorre a concentração da incidência da irradiação da lâmpada, em conjunto com refletor. Do lado esquerdo, haverá um fluxo convectivo no sentido do movimento do painel, já do lado direito, uma corrente oposta. Embora seja intuitivo que o ponto de estagnação esteja localizado no centro do forno, será considerado que a estagnação seja na linha de simetria do forno. A Figura 6 ilustra

esse fenômeno, e as linhas de corrente denotam o perfil de velocidade devido à posição do ventilador.

Figura 6 – Perfil real das linhas de corrente sobre o painel



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em algum instante, cada ponto do painel passará por um ponto de estagnação. Nesse instante, a convecção será mínima e, portanto, a temperatura será máxima.

Vale dizer que as trocas de calor que possam ocorrer entre a parede do forno e o ambiente externo foram desprezadas. Além disso, a superfície oposta à que recebe a camada de verniz, conforme já dito, deve ser considerada adiabática. O procedimento para calcular o coeficiente de convecção para cada experimento está apresentado no APÊNDICE B.

3.3.7 Emissividade das Superfícies

A emissividade determina a maior ou menor quantidade de energia que um corpo emite num dado comprimento de onda, podendo variar entre 0 e 1, e depende de fatores como as propriedades da superfície e a temperatura do objeto (NOVO *et al.*, 2014).

Ao ocorrer a irradiação, uma fração dela é absorvida pela superfície do material que recebe os espectros (no caso o MDF), resultando no aumento de sua temperatura, enquanto a outra fração poderá ser reirradiada para o ambiente de origem.

De acordo com Kreith, Manglik e Bohn (2014) as propriedades de emissividade para o MDF e o refletor, foram de 0,82 e 1 respectivamente. Já as paredes do forno são revestidas por material refratário, então, foi assumido como não participante ao processo de modelagem.

3.3.8 Temperatura da Superfície da Lâmpada

A temperatura da lâmpada foi estimada a partir dos dados de potência, previamente definida na fase experimental. Hipoteticamente, foi considerada nula a ação convectiva para essa estimativa.

Tal hipótese foi com base no que diz os autores Sakin, Kaymak-Ertekin e Ilicali (2009). Em resumo, os autores afirmam, no caso em que há dois modos de troca de calor, a ação convectiva pouco interfere na variação da temperatura, mantendo a radiação como modo predominante. Mais adiante, outros autores, como Saravanan e Sivaraj (2013), corroboram esse entendimento ao concluir que há aumento da ação convectiva, quando situa o objeto na posição vertical dentro do forno, devido à maior área em contato com a região de maior velocidade. Entretanto, para objetos situados na horizontal (tal como o painel de MDF), seus efeitos são grandemente reduzidos.

A Equação 2 descreve como estimar a taxa de energia emitida por irradiação a partir de um corpo emissor, assim como a lâmpada. Tendo o fluxo de calor, pode-se calcular a temperatura da lâmpada.

$$q''_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_1 (T_s^4 - T_{\text{lâmp}}^4) \quad (2)$$

Em que:

q''_{rad} = Fluxo de calor radiativo [W/m²]

A_1 = Área superficial [m²]

ε = Constante de emissividade

σ = Constante de Stefan Boltzmann [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}^4$]

T^4_s = Temperatura da fonte irradiada [K]

T^4_{lamp} = Temperatura da fonte irradiadora [K]

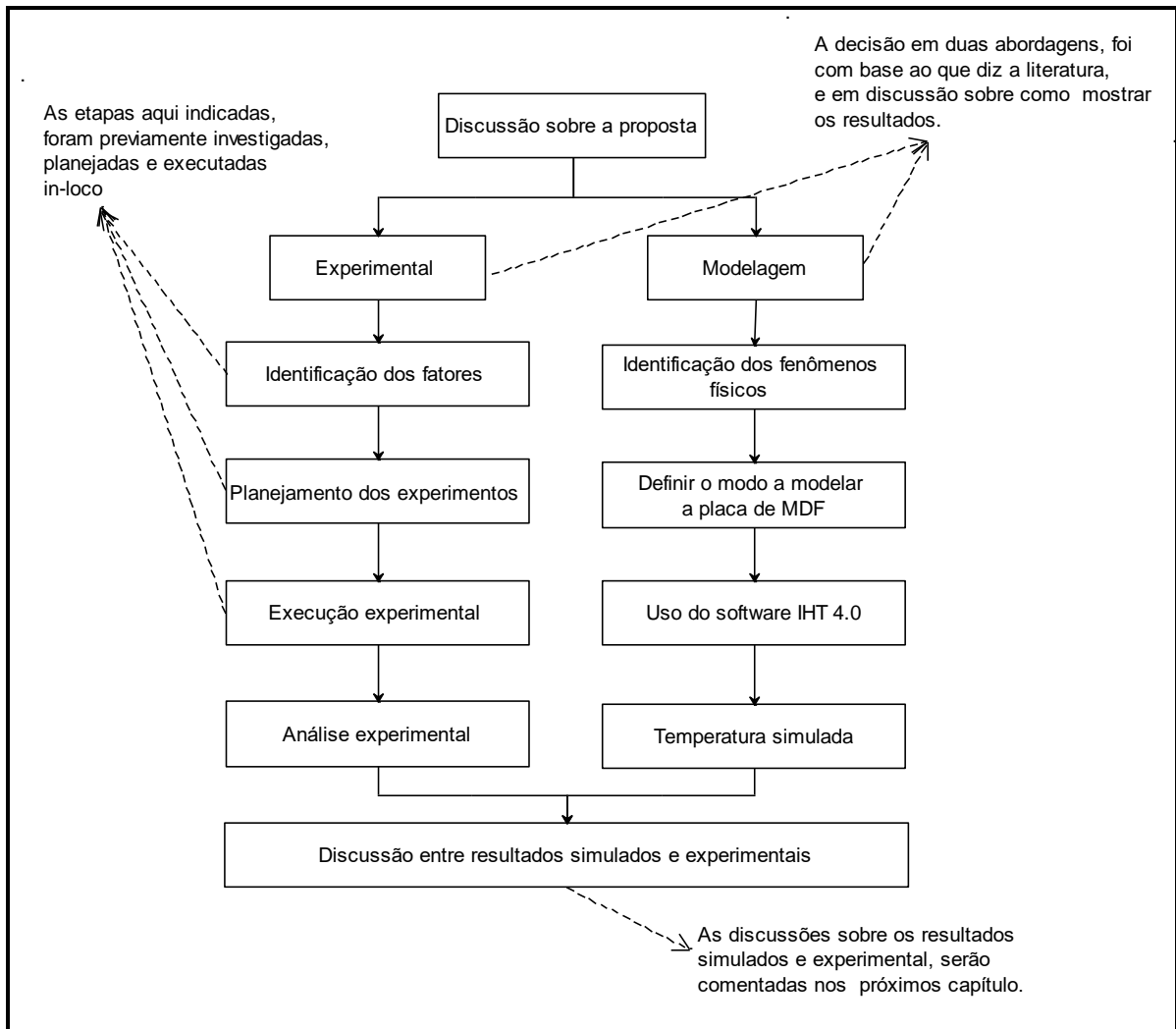
3.4 CONDIÇÕES INICIAIS

Para cada amostra, foi medido a temperatura superficial antes de entrar no forno, o APÊNDICE E mostra os resultados. Já as condições iniciais de temperatura da lâmpada, baseou-se nos resultados estimados, conforme o fluxo de calor (potência de cada experimento) e os resultados podem ser verificados no APÊNDICE C. O coeficiente de convecção empírico, foi calculado de acordo com a conveniência de cada experimento, variando a velocidade de ventilação; os cálculos são apresentados no APÊNDICE B.

4. METODOLOGIA

Com base no que foi visto na literatura, a metodologia empregada neste trabalho foi dividida em duas partes: análise experimental e modelagem matemática. A Figura 7 ilustra um esquema das etapas e procedimentos estratégicos adotados. Na sequência, é descrito, em maior detalhe, cada etapa desta metodologia.

Figura 7 – Representação esquemática das etapas e procedimentos adotados



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES AJUSTÁVEIS

O processo de cura ocorre por irradiação ultravioleta sobre o painel em movimento contínuo em forno, além de ventiladores para a remoção do ar quente gerado.

Entende-se que, alterando qualquer um dos fatores (potência irradiada, velocidade de transporte e velocidade do ar), modificará a temperatura de cura dos painéis, além da qualidade. Por essa razão, os fatores citados foram investigados de forma preliminar.

4.1.1 Potência das Lâmpadas

A literatura afirma que a potência irradiada do forno UV é um dos fatores essenciais para haver a cura. A escolha por investigar a potência das lâmpadas está de acordo com Ruiz e Machado (2010), que a definiram, dentre outros parâmetros como fator importante em sua pesquisa. A faixa de ajuste do forno é de 150W/cm² à 330 W/cm², portanto com base a estes dados foram adotados três níveis para serem investigados (P₁, P₂ e P₃). Para cada nível foram coletadas três medidas e em seguida considerado o valor médio conforme mostra a Tabela 4.

O tipo de lâmpada usado foi vapor de mercúrio da marca Germetec, estimada em 1500 horas de trabalho e comprimento de onda de 385nm. Os ajustes de potência em cada nível foram por meio de botão localizado no próprio forno, logo na sequência medindo o seu valor.

Tabela 4 – Potência das lâmpadas coletadas

	P ₁ [W/cm ²]			P ₂ [W/cm ²]			P ₃ [W/cm ²]		
Valor coletado	168,30	171,25	172,85	243,15	244,10	245,20	331,10	329,70	330,90
Valor médio considerado	170,80			244,15			330,55		

Fonte: Elaborado pelo autor.

O instrumento utilizado nas medições foi o radiômetro, com precisão de 0,1 W/cm², para medida acima de 10 W/cm².

4.1.2 Velocidade de Transporte

Quanto à velocidade de transporte, de acordo com a descrição de Cuenca (2011), ela é a variável totalmente dependente do tempo de cura, para que a reação de

polimerização se complete. O autor ainda enfatiza estar intrinsecamente relacionada à produtividade.

A faixa de ajuste de velocidade de transporte encontrada foi de 10m/min à 22m/min, com base a estes dados foram adotados três níveis para serem investigados V_{t_1} , V_{t_2} e V_{t_3} . Para cada nível foram coletadas três medidas e em seguida considerado o valor médio conforme mostra a Tabela 5

Os ajustes entre os níveis foram feitos por meio de inversor de frequência indicando no *display* o valor desejado. Contudo ainda foi conveniente certificar o valor real fisicamente, medindo sobre a esteira de transporte, com instrumento adequado, se os valores estavam em acordo.

Tabela 5 - Tabela de velocidade de transporte coletada

	V_{t_1} [m/min]			V_{t_2} [m/min]			V_{t_3} [m/min]		
Valor coletado	8,20	12,80	11,20	13,10	14,20	16,15	20,00	22,15	24,3
Valor médio considerado	10,70			14,45			22,15		

Fonte: Elaborado pelo autor.

O instrumento utilizado para a coleta dos valores reais sobre o transporte foi o tacômetro, com resolução 0,1 rpm e precisão de 0,05%.

4.1.3 Velocidade de Ventilação

Por fim, a escolha da velocidade de ventilação se fundamentou em duas razões: a primeira, diz respeito à refrigeração da área em que ficam alojadas as lâmpadas, o que pode dificultar a modelagem em fornos caso seja desprezada. Contudo, de acordo com *Visioncure UV & IR Technology* (2014), na publicação BT18, ventilação em alta velocidade significa excesso de refrigeração, conseqüentemente, problemas de estabilização do arco da lâmpada. Já, na ventilação em baixa, os efeitos são inversos, resultando em falta de refrigeração, ocasionando superaquecimento que pode danificar o bulbo da lâmpada.

A segunda razão diz respeito ao que comentam os autores Miranda; Ziviani e Fullin Júnior (2007) sobre problemas e dificuldades em modelar fornos, principalmente quando se tem radiação diante a existência de gases em suspensão, sobre a cavidade. Para os autores, a presença desses gases leva à interceptação dos feixes de luz e requerem sua remoção de forma dosada.

Na prática, normalmente os fornos permitem ajustes de ventilação entre 5 m/s a 31 m/s, logo foi adotado nesta investigação três níveis de ventilação V_{ar_1} , V_{ar_2} e V_{ar_3} . Para obter os valores conforme descreve a Tabela 6, foi coletado três medidas para cada nível e em seguida considerado o valor médio. O APÊNDICE A descreve como foi realizado o procedimento para essa coleta *in loco*.

Tabela 6 - Velocidade de ventilação do ar coletada

	Var ₁ [m/s]			Var ₂ [m/s]			Var ₃ [m/s]		
Valor coletado	18,20	20,10	17,20	23,00	25,20	26,10	32,10	30,50	31,0
Valor médio considerado	18,50			24,70			31,25		

Fonte: Elaborado pelo autor.

O instrumento utilizado foi o anemômetro, com precisão de $\pm 3\%$ leit. + 0,8D. A Tabela 7, a seguir, resume os níveis, ou seja, os valores investigados dos fatores.

Tabela 7 - Limite dos fatores

Fatores	Nível Inferior	Nível Médio	Nível Superior
P	170,80	244,15	330,55
Vt	10,45	14,45	22,15
Var	18,50	24,70	31,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

A Tabela 8 mostra o planejamento experimental preliminar 2³ com a inclusão do ponto central. O interesse neste planejamento foi avaliar previamente a amplitude dos efeitos dos fatores adotados, além das possíveis interações. Esse procedimento foi

importante, já que os resultados prévios poderão mostrar a estimativa de erro caso exista e os efeitos de curvatura para um índice de 5% do P- valor.

Tabela 8 – Matriz planejamento preliminar

Fatores			
Experimentos	P[W]	Vt [m/min]	Var [m/s]
1	330,55	22,15	31,25
2	330,55	22,15	18,50
3	330,55	10,70	31,25
4	330,55	10,70	18,50
5	244,15	14,45	24,70
6	170,80	22,15	31,25
7	170,80	22,15	18,50
8	170,80	10,70	31,25
9	170,80	10,70	18,50
10	244,15	14,45	24,70
11	244,15	14,45	24,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 9 mostra os efeitos significativos das variáveis independentes referente ao planejamento preliminar, considerando um índice de 5% do P valor. Além da potência, notou-se que o efeito da curvatura foi significativo e o valor de erro estimado com base no ponto central foi de 0,68 °C. De acordo com estes resultados, adotou-se o mesmo valor de erro a um novo planejamento experimental e definitivo, desta vez 3³ e sem a necessidade da replica sobre o ponto central.

Tabela 9 – Efeito dos fatores no planejamento preliminar

	Efeito	Desvio padrão	t	P-valor
Média	58,9375	0,292083	201,7834	0,000025
Curvatura	-12,3669	1,137346	-10,8735	0,008352
Var	-2,5250	0,584166	-4,3224	0,049577
Vt	-7,4750	0,584166	-12,7960	0,006052
P	27,0250	0,584166	46,2625	0,000467
Vt x P	-4,6250	0,584166	-7,9173	0,015581

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DEFINITIVO

Em seguida, foi preciso relacionar os três fatores já ditos, avaliando seus efeitos sobre o filme curado em termos das respostas temperatura e percentual de deslocamento. Quanto à temperatura, a escolha dessa variável se justificou com base no que diz os autores Ciofini *et al* (2016) sobre a degradação de verniz, com aumento térmico do filme quando expostos a índices elevados de irradiação solar. Isso já havia sido confirmado por Paoli (2008), que relatou ocorrer propensão à degradação do filme polimerizado quando se tem aumento de temperatura, devido à exposição prolongada de energia radiativa.

Além da temperatura, estabeleceu-se a qualidade em termos do percentual de filme deslocado, como resposta secundária. O que levou a essa escolha foi a possibilidade em analisar, de maneira comparativa, os resultados de cada revestimento experimental, com o espelho padrão, que determina a norma ASTM D 3359 (2017).

A relação entre os fatores foi por meio de matriz planejamento para cada experimento a ser executado em escala industrial, durante o processo real de produção. Para elaborar a matriz, foi usado *software Statistica versão 10*, com a inserção de dados que se delineou de forma randômica.

O planejamento experimental, adequado à investigação sobre o forno, foi 3^3 (três fatores e três níveis), totalizando 27 experimentos. A Tabela 10 descreve a matriz planejamento gerada, baseada nos fatores adotados (potência irradiada, velocidade de transporte e velocidade do ar) e executados de forma aleatória.

Tabela 10 – Matriz planejamento

Experimentos	Fatores		
	P[w]	Vt [m/min]	Var [m/s]
1	330,55	22,15	31,25
2	330,55	22,15	24,70
3	330,55	22,15	18,50
4	330,55	14,45	31,25
5	330,55	14,45	24,70
6	330,55	14,45	18,50

Continuação			
7	330,55	10,70	31,25
8	330,55	10,70	24,70
9	330,55	10,70	18,50
10	244,15	22,15	31,25
11	244,15	22,15	24,70
12	244,15	22,15	18,50
13	244,15	14,45	31,25
14	244,15	14,45	24,70
15	244,15	14,45	18,50
16	244,15	10,70	31,25
17	244,15	10,70	24,70
18	244,15	10,70	18,50
19	170,80	22,15	31,25
20	170,80	22,15	24,70
21	170,80	22,15	18,50
22	170,80	14,45	31,25
23	170,80	14,45	24,70
24	170,80	14,45	18,50
25	170,80	10,70	31,25
26	170,80	10,70	24,70
27	170,80	10,70	18,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto à execução dos dois planejamentos, procurou-se antecipadamente conhecer o processo, o equipamento e os procedimentos que normalmente são praticados ao se tratar de cura com uso de fornos UV. A partir daí, foi conveniente buscar outras fontes de informações, por meio de empresas, com as mesmas práticas de cura, no sentido de corroborar o modo em que foi executado.

Por fim, a realização experimental teve o auxílio do corpo técnico de indústria situada na região de Linhares, ES. Vale ressaltar que todos os equipamentos e orientações de segurança, instrumentos usados para medições, foram cedidos pela empresa, além de técnicos do setor de pintura para acompanhamento. As seções, a seguir, descrevem como ocorreu todo passo a passo da realização experimental.

4.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram preparadas, perfazendo 27 unidades, com material MDF do fabricante Duratex Madeira, medindo 600 mm de comprimento, 300 mm de largura e 6 mm espessura, todas recortadas em seccionadora do tipo automática.

4.5 PREPARAÇÃO DO VERNIZ E APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO

Os painéis foram revestidos por uma camada úmida de 50 μm de verniz. As Tabelas 11 e 12 mostram a composição e as propriedades físicas do verniz, respectivamente, usado neste trabalho. O fabricante foi a empresa Rochesa S/A Tintas e Vernizes.

Tabela 11 – Composição química do verniz usado nos experimentos

Nome químico comum	Concentração (%)
Resina poliéster acrilada	6,7% - 13%
2-Hidroxi-2-Metil-1-Fenil-1-Propanol	3,0% - 6,3%
Triacrilato de Trimetilolpropano	2,3% - 4,8%
Solvente	75% - 88%

Fonte: Rochesa S.A. Tecnologia em Tintas e Vernizes (2018).

Nota: Adaptada pelo autor.

Conforme a Tabela 11, a resina usada na composição do verniz foi do tipo acrilada, em concentração próxima a 6,7%. O foto-iniciador foi do tipo 2-hidroxi-2-metil-1-fenil-1-propanol com concentração de 3,0% a 6,3%, além de triacrilato de trimetilolpropano com 2,3% a 4,8% e completando a solução com solvente, entre 75% a 88%. Na sequência, a Tabela 12 mostra os dados que se referem à propriedade do verniz.

Tabela 12 – Propriedade do verniz usado nos experimentos

Propriedades físico químico	
Estado físico	Líquido.
Viscosidade dinâmica	$6,069 \cdot 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ à 25°C.
Massa específica	1,32 +/- 0,02 g/cm ³
Solubilidade	Insolúvel em água
Ponto de fulgor	85°C.

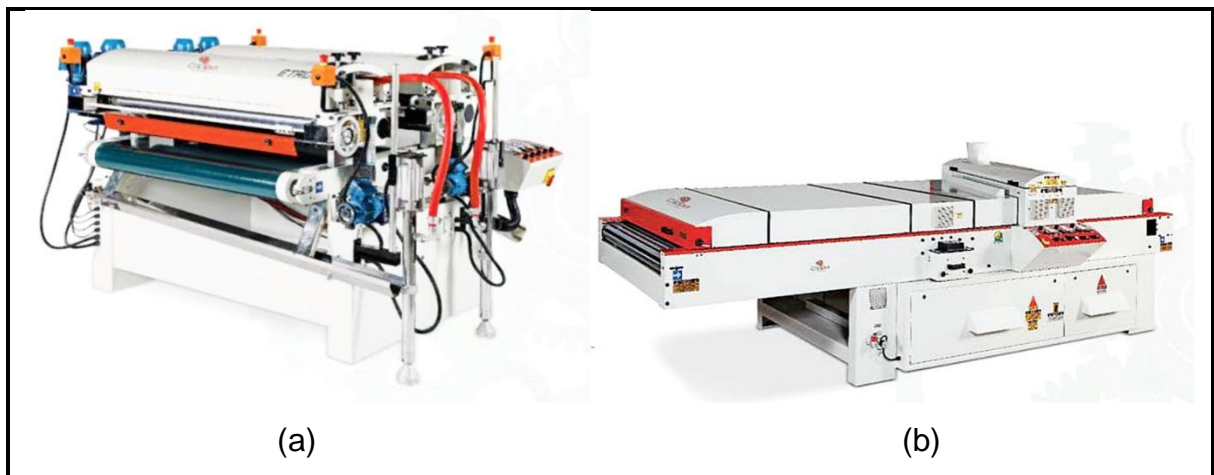
Fonte: Rochesa S.A. Tecnologia em Tintas e Vernizes (2018).

Nota: Adaptada pelo autor.

De acordo com a Tabela 12, o verniz apresenta propriedade líquida à temperatura de 25°C, viscosidade dinâmica a $6,069 \cdot 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ à 25°C, a massa específica varia entre $1,32 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ insolúvel em água e ponto de fulgor em 85°C. A temperatura ambiente, no momento da execução indicou 28°C, o instrumento utilizado foi o termo higrômetro digital, com precisão de temperatura de *IN* e *OUT* de $\pm 1^\circ\text{C}/^\circ\text{F}$.

Para aplicação do revestimento úmido, foi usado rolo aplicador, conforme mostra a Figura 8(a), e para cura, foi com forno UV, conforme Figura (8b), ambos do fabricante Crippa máquinas e equipamentos.

Figura 8 – Rolo aplicador de verniz (a) e forno UV (b)

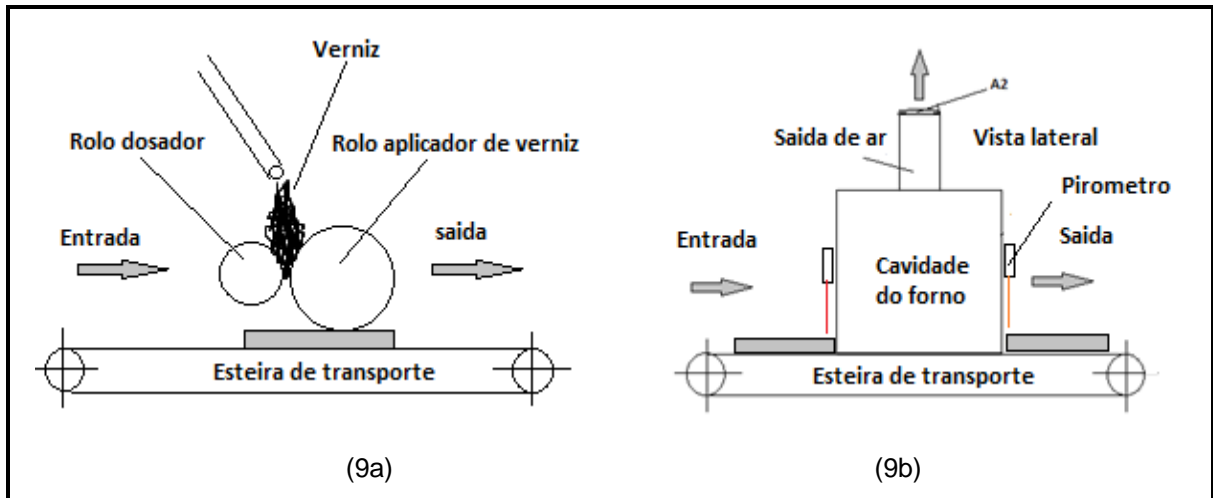


Fonte: Crippa Máquinas e Equipamento

4.6 INÍCIO DO PROCESSO DE CURA DAS AMOSTRAS

Na sequência, as amostras foram conduzidas por esteiras transportadoras até o forno UV, que iniciou a cura. A Figura (9a) e (9b) descreve o esquema com os dois processos, respectivamente.

Figura 9 – Esquema de aplicação de verniz e esquema de cura



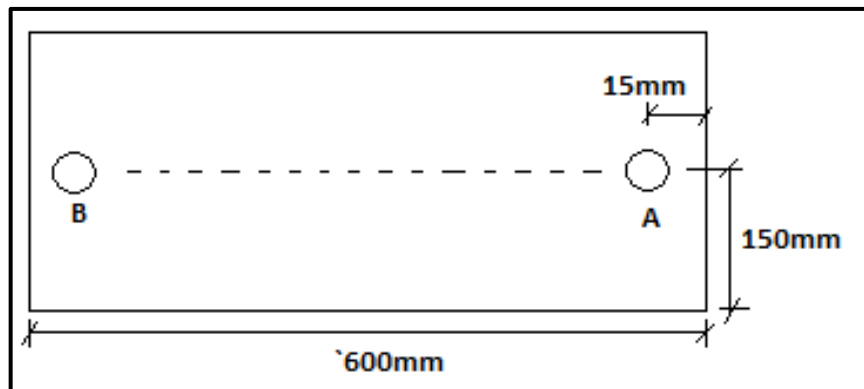
Fonte: Elaborado pelo autor.

Este processo teve duas etapas: a Figura (9a) mostra a etapa do verniz sendo dosado e aplicado sobre o painel por meio de rolo. Já a Figura (9b) mostra os painéis após o revestimento, sendo introduzidos ao forno, e curados, além de mostrar o modo como foi medido a temperatura de cura, com dispositivo medidor logo na saída do forno. Quanto aos ajustes, foram feitos no equipamento, de acordo com a conveniência do planejamento para cada amostra.

4.7 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS

Para a medição de temperatura superficial das amostras, na entrada e saída do forno, foi preciso posicionar o instrumento numa região mais próxima possível do cabeçote. A Figura 10 descreve os pontos da superfície do painel onde foi coletada a temperatura.

Figura 10 – Procedimento de medição experimental da temperatura sobre o painel



Fonte: Elaborado pelo autor.

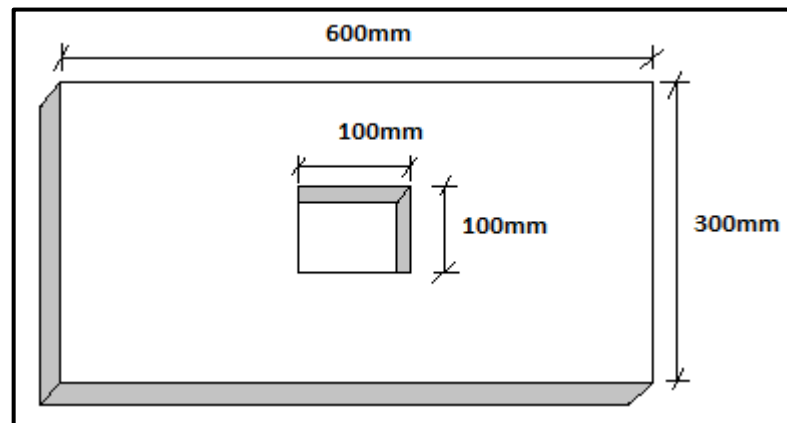
Na sequência, foi calculado o valor médio de temperatura, medido nos pontos A e B. Para essa medição, foi mantido o gatilho do instrumento acionado de modo contínuo. O procedimento foi aplicado para cada amostra, e o instrumento usado para medir a temperatura foi o pirômetro com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,5\%$ e faixa de emissividade de 0,10 a 1,0. Cabe dizer que o instrumento foi ajustado para o verniz sobre a madeira, na faixa de 0,90 de acordo com o fabricante (MINIPA DO BRASIL, 2017).

Quanto aos ajustes dos fatores, foram feitos no próprio equipamento seguindo a conveniência de cada experimento planejado.

4.8 REDUÇÃO DA SEÇÃO DAS AMOSTRAS

Assim que todos os experimentos foram executados, foi preciso reduzir o tamanho das amostras. A Figura 11 mostra a retirada da parte central de cada amostra na medida de 100 mm x 100 mm. A razão disso foi facilitar o manejo com painéis nas etapas seguintes. Já a escolha da área central foi simplesmente para assegurar a área de aplicação mais homogênea possível.

Figura 11 – Redução das amostras

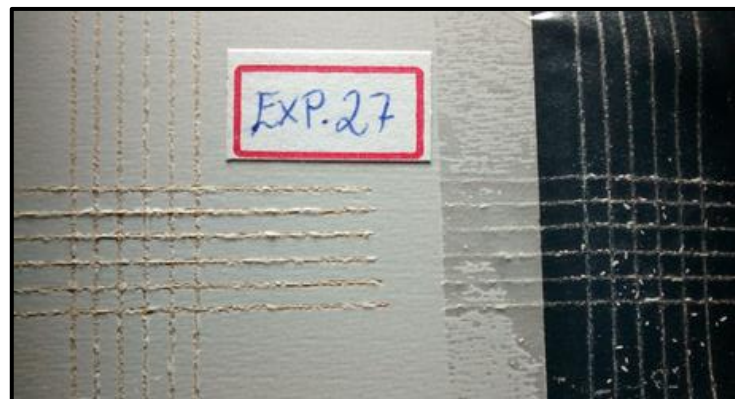


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.9 TESTE DE ADESÃO SOBRE O FILME CURADO

Primeiramente, foi feita leve limpeza sobre a região a ser feito o teste, em seguida iniciou os procedimentos. A Figura 12 descreve o teste com riscos na vertical e horizontal, feito sobre a amostra de número 27.

Figura 12 - Realização do teste de adesão





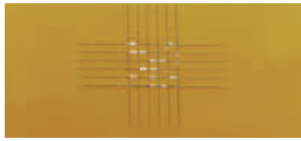

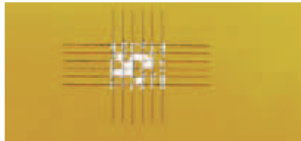
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os procedimentos seguiram a norma ASTM D 3359 (2017), que descreve ser preciso realizar seis cortes na vertical e horizontal, mantendo 90°. Sobre os cortes, a norma diz ser preciso manter espaçamento entre 2 mm à 3 mm, o que foi seguido rigorosamente. Após, foi coberta a área com fita de alta aderência própria para o teste, friccionando de forma suave e certificando a completa adesão. Na sequência, a remoção foi de maneira rápida em um só movimento. Os testes foram realizados com materiais disponibilizados

pela empresa, além de acompanhamento e orientações da equipe do setor técnico de qualidade.

A Tabela 13 descreve seis classes padronizadas, segundo a norma ASTM D 3359, que define a qualidade do filme de verniz curado usado como referencial, além de mostrar, passo a passo, o modo de avaliar qualquer amostra, indicando a faixa aceitável em percentual de desprendimento de filme. As classes são 5B, 4B, 3B, 2B, 1B e 0, com seu respectivo espelho de comparação.

Tabela 13 - Norma para teste de adesão ASTM D 3359 (2017)

Norma para realização de teste adesão		
ISO Classe: 0 ASTM Classe: 5 B	As bordas dos cortes são completamente lisas; nenhum dos quadrados da treliça são destacados.	
ISO Classe: 1 ASTM Classe: 4 B	Destacamento de pequenos flocos do revestimento nas interseções dos cortes. Uma área de corte transversal não é significativa superior a 5%.	
ISO Classe: 2 ASTM Classe: 3 B	Uma área de corte transversal significativamente superior a 5%, mas não significativamente superior a 15%.	
ISO Classe: 3 ASTM Classe: 2 B	O revestimento lascou ao longo das bordas dos cortes em parte ou totalmente em grandes fitas e / ou lascou em parte ou totalmente em diferentes partes dos quadrados. Uma área de corte transversal significativamente maior que 15%, mas não significativamente maior de 35%.	
ISO Classe: 4 ASTM Classe: 1 B	O revestimento lascou ao longo das bordas dos cortes em grandes fitas e / ou alguns quadrados se destacaram parcialmente ou completamente. Uma área de corte transversal significativamente maior que 35%, mas não significativamente maior que 65%.	
ISO Classe: 5 ASTM Classe: 0 B	Qualquer grau de descamação que não possa ser classificado pela classe 4.	Não há espelho

Fonte: Annual Book of ASTM Standards (2008).

Nota: Adaptado pelo autor.











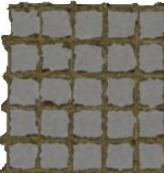
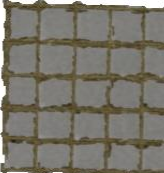















4.10 IMAGENS FOTOGRÁFICAS DA ÁREA EM ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Previamente, foram retiradas imagens fotográficas sobre a área de teste, o equipamento usado para as fotografias foi uma câmera Canon Rebel Ts, com lente objetiva 18-55 mm

e ponto focal em 55 mm. Em seguida, foram recortadas, deixando apenas a área para calcular o deslocamento, de acordo com a norma ASTM D 3359 (2017).

O programa usado para o recorte das imagens foi o *Paint* do pacote *Office*, com aumento da resolução em 300%. A Tabela 14 mostra todas as imagens fotográficas, apenas com a área de teste considerada em análise.

Tabela 14 - Amostras recortadas

Imagens recortadas das amostras				
Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
				
Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8	Exp. 9	Exp.10
				
Exp. 11	Exp. 12	Exp.13	Exp. 14	Exp.15
				
Exp. 16	Exp. 17	Exp.18	Exp. 19	Exp. 20
				
Exp. 21	Exp. 22	Exp.23	Exp. 24	Exp. 25
				
Exp. 26	Exp. 27			
				

Fonte: Elaborado pelo autor.

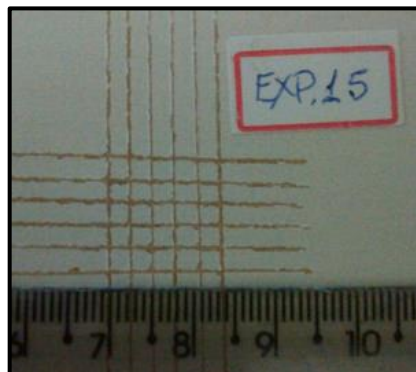
4.11 CÁLCULO DE ÁREA DESPLACADA

Na sequência, foi calculado o percentual da área que sofreu desprendimento de verniz pelo teste de adesão. Para isso, foi usado o programa *Image J*, que forneceu o cálculo de área. De acordo com o programa, antes de qualquer cálculo, foi preciso adotar dois procedimentos importantes, como calibração e definição do método a calcular a área.

4.11.1 Calibração do Programa

A Figura 13 apresenta a amostra 15, com uma escala conhecida usada para calibração do programa. Esse procedimento requer a inserção de imagem que contenha escala métrica conhecida e, na sequência, por meio do menu “*Set Scale*”, fazer o ajuste. Essa medida assegura que os cálculos estejam em acordo com as dimensões reais da imagem.

Figura 13 – Imagem padrão para calibração do programa



Fonte: Elaborado pelo autor.

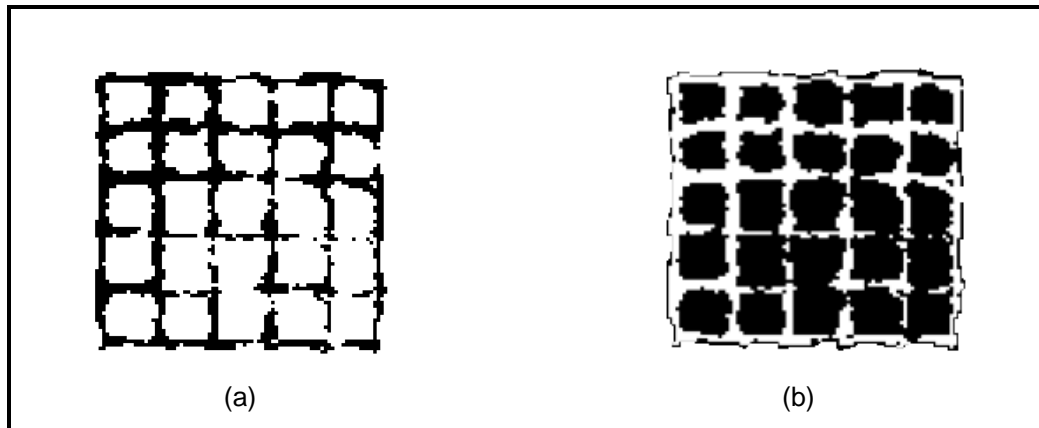
4.11.2 Método de Cálculo de Área

Os cálculos adotados foram área deslocada (AD), área não deslocada (AND), área total (AT) e índice de deslocamento (ID) para cada amostra. O local considerado para cálculo foi somente sobre as áreas cruzadas dos riscos em cada amostra.

A Figura 14 (a,b) mostram a área gerada e calculada pelo programa. Ambas as figuras representam a área deslocada e calculada, evidentes na cor preta. Embora a

diferença seja apenas na seção entre uma e outra. As imagens foram aumentadas em 300% com resolução em 8bit-9K.

Figura 14 – Área de cálculo gerada pelo programa Image J



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.12 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a modelagem matemática, primeiramente foram verificados que fenômenos de transferência de calor se mostraram predominantes no processo de aquecimento de painéis, além das relações que acontecem, de forma simultâneas, ao ajustar os fatores. Percebeu-se que a radiação e convecção foram fenômenos dominantes sobre o forno. O que é corroborado pelos autores Rek, Rudolf e Zun (2012); Satit (2010); Saravanan e Sivaraj (2013), que sugerem não dissociar os fenômenos físicos ao se tratar de fornos, o que pode incorrer a erros caso um deles sejam desprezados.

Na sequência, para se abordar a modelagem, foi delineado tratá-la como parâmetros concentrados, devido a ser o melhor modo em combinar os fenômenos de transferência de calor, previamente investigados para este caso.

O estudo dos fenômenos físicos levou à equação diferencial ordinária de segunda ordem, o que não permite soluções analíticas. Dessa forma, os resultados estimados de temperatura, foram implementados com auxílio do *software Interactive Heat Transfer IHT 4.0*, que acompanha o livro Fundamentos de Transferência de Calor e

Massa dos autores Incropera e Dewitt (2002). O desenvolvimento dessa etapa pode ser verificado no capítulo 3 sobre modelagem matemática e abordagem numérica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, foram discutidos os efeitos dos fatores sobre as variáveis temperatura e ID de filme, os resultados de temperaturas simuladas por meio do modelo de transporte de calor a parâmetros concentrados e a correlação entre os resultados de temperaturas experimentais com ID de filme. Encerrou-se este capítulo, mostrando as condições ótimas experimentais indicada para prática de cura, em escala industrial.

5.1 EFEITO DOS FATORES SOBRE AS VARIÁVEIS RESPOSTAS TEMPERATURA E ID DE FILME

Os efeitos de cada variável independente foram calculados sobre a variável resposta temperatura e ID de filme. Os resultados apresentados consideram os termos lineares e quadráticos, além de suas interações. A Tabela 15 mostra a estimativa dos efeitos significativos em relação à temperatura, considerando um p-valor abaixo do nível de significância de 5%.

Tabela 15 – Estimativa de efeitos para a temperatura

	Efeito	Desvio padrão	t	P-valor
Média	57,79434	0,789976	73,15958	0,000000
Var (L)	-4,23333	1,915559	-2,20997	0,038929
Var (Q)	-1,42393	1,660558	-0,85750	0,401327
Vt (L)	-5,03333	1,915559	-2,62761	0,016133
Vt (Q)	-5,20000	1,689364	-3,07808	0,005932
P (L)	23,88889	1,915559	12,47098	0,000000
P (Q)	1,91806	1,660477	1,15512	0,261655

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 15 mostrou todos os efeitos dos fatores lineares e quadráticos sobre a temperatura. Com base a estes resultados foi conveniente simplificar, eliminando os termos não significativos de Var (Q) e P(Q), pois seus efeitos mostraram o p-valor acima de 5%. Por outro lado, a P(L) sobressai em relação aos demais fatores com maior efeito para o aumento de temperatura, considerando o mesmo P-valor

anteriormente citado. Já a Vt (L) e Var (L) apresentaram valores negativos apesar de serem significativos, isso indica que o aumento deles diminui temperatura.

A Tabela 16 mostra a estimativa de todos os efeitos dos termos significativos além dos termos não significativos, em relação ao ID de filme, considerando um nível de significância de 5%. Os termos com p-valor acima de 5% como Var (L), Var (Q), Vt (L), Vt (Q) foram desconsiderados, pois eles estão além da margem de 5% de significância previamente estabelecido.

Tabela 16 – Estimativa de efeitos sobre ID de filme

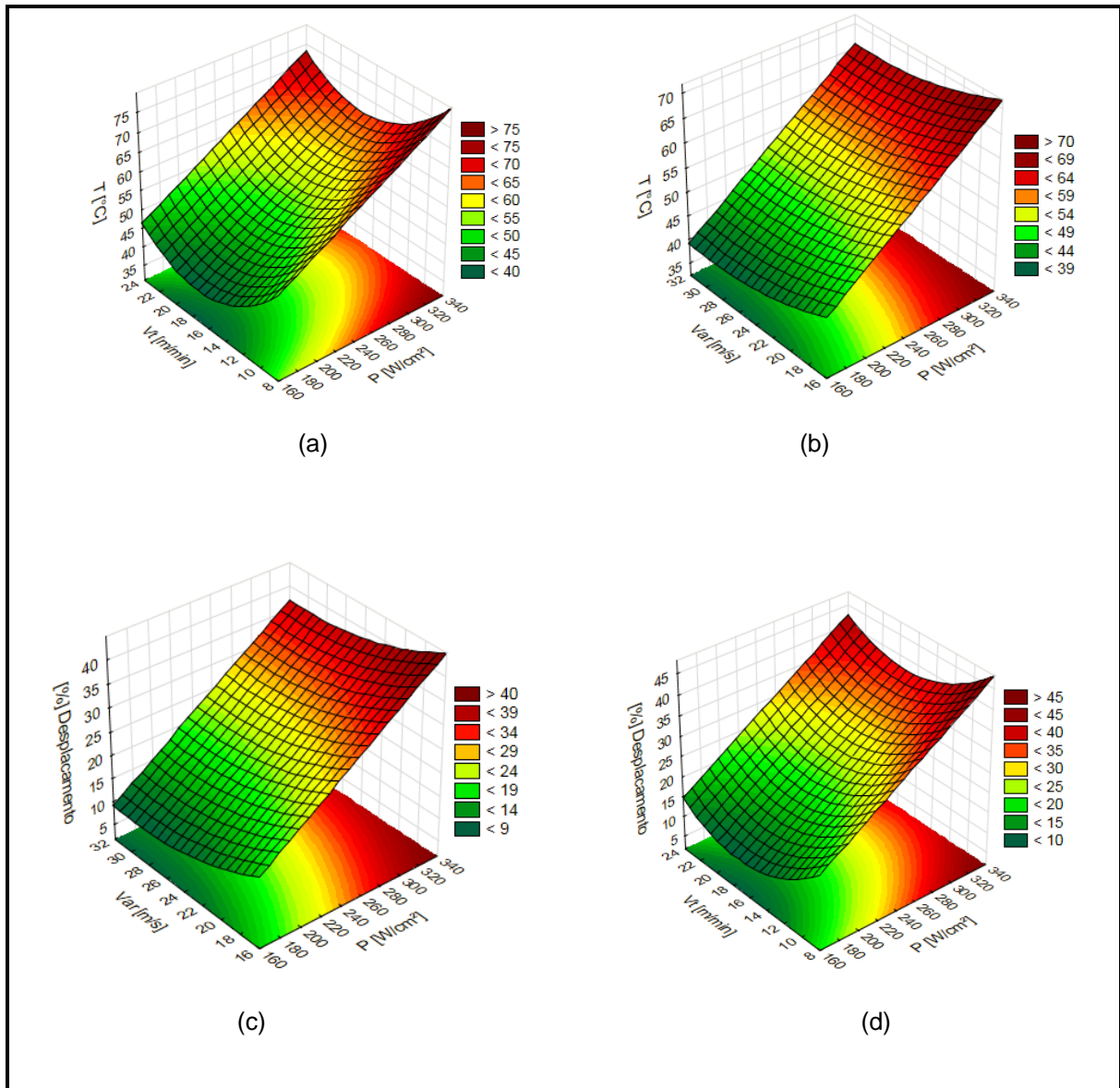
	Efeito	Desvio padrão	t	P-valor
Média	27,90504	1,738672	16,04963	0,000000
Var (L)	-5,73111	4,215985	-1,35938	0,189159
Var (Q)	-1,90932	3,654749	-0,52242	0,607116
Vt (L)	-4,10222	4,215985	-0,97302	0,342167
Vt (Q)	-3,89593	3,718149	-1,04781	0,307223
P (L)	25,37222	4,215985	6,01810	0,000007
P (Q)	11,88424	3,654571	3,25188	0,003993

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com resultados indicados na Tabela anterior, a potência prevalece como fator de maior efeito. Desta vez, os efeitos de potência linear e quadrático aumentaram o ID de filme. Outro fator de maior efeito é a velocidade de transporte, entretanto, seus valores negativos, indicam que quanto maior seu índice, menor a tendência ao deslocamento. Por último, a velocidade do ar quadrático também apresenta valores negativos, o que leva ao deslocamento em menor potencial quando comparado aos demais fatores.

A Figura 15 mostra a superfície ajustada aos dados experimentais, considerando um intervalo de confiança de 95% para as respostas temperatura (a,b) e ID de filme (c,d). Esta figura ilustra a dependência das variáveis resposta em relação aos fatores investigados.

Figura 15 – Gráficos de superfícies para as respostas temperatura (a,b) e ID (c,d)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 mostra a probabilidade normal como função dos resíduos. Nessa análise, nota-se que os pontos representando a dispersão residual se distribuem normalmente ao longo da reta.

Já a Figura 17 descreve os resíduos em função dos valores preditos. Analisando os dados, pode-se comprovar que os resíduos estão normalmente localizados em torno do zero, indicando que o modelo consegue prever de forma satisfatória todos as tendências apresentadas pelos resultados experimentais em acordo com as variações dos fatores. Isso torna possível a utilização deste modelo para prever os valores de temperatura e ID frente às mudanças nos fatores adotados.

Figura 16 – Probabilidade versus resíduo (a) temperatura, (b) ID de filme

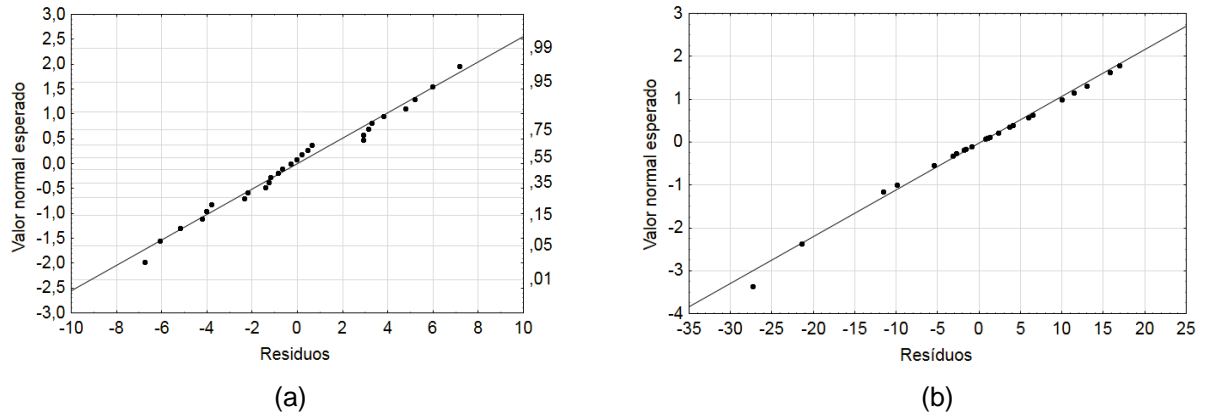
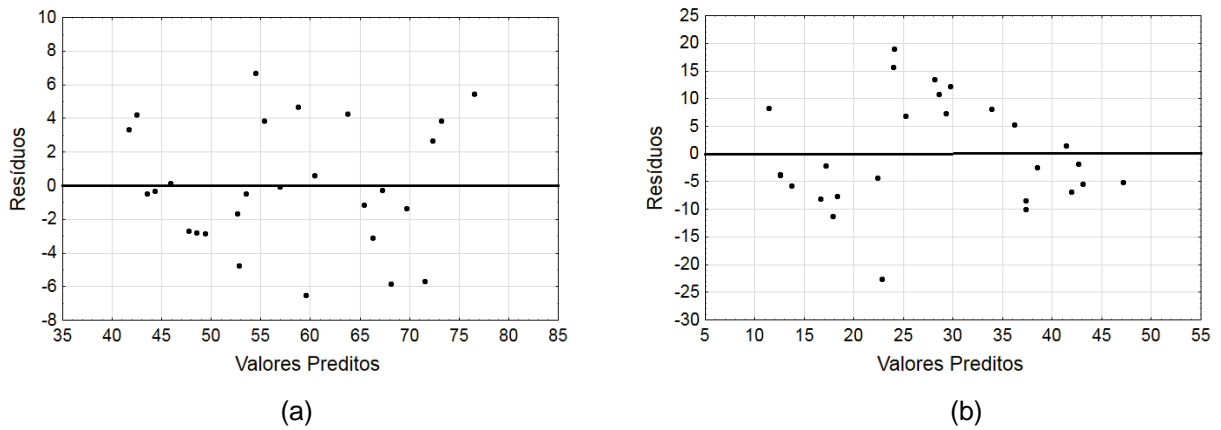


Figura 17– Resíduos versus valores preditos (a) temperatura, (b) ID de filme



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os modelos de regressão que preveem as variáveis temperatura e ID de filme são descritos nas equações conforme mostra a Tabela 17. Para aplicação em escala industrial, determinou-se a equação modelo para a temperatura e ID, considerando a interação entre os termos V_t e P , já que o efeito da Var foi muito menor em relação ao demais fatores.

Tabela 17 – Modelo matemático utilizando as variáveis reais

Faixa	R ²	Equação
18,50 < Var < 31,25	0,88	$T = 47,16 - 5,16 V_t + 0,16 V_t^2 + 0,3P - 0,0003P^2$
10,70 < Vt < 22,15		
170,80 < P < 330,55	0,50	$ID = - 94,39 - 0,015V_t^2 + 0,91P + 0,001P^2 - 62,14$

Fonte: Elaborado pelo autor.

“T” nesta tabela, é a temperatura de cura do filme de verniz expresso em °C; “ID” representa o índice de deslocamento do filme de verniz; “P” é a potência da lâmpada e “Vt” é a velocidade de transporte do painel.

5.2 TEMPERATURA SIMULADA VERSUS EXPERIMENTAL

Os valores de temperaturas simuladas encontrados a partir do modelo de transporte de calor por convecção e radiação a parâmetros concentrados, mostrou boa concordância com os resultados de temperaturas experimentais de cura. O APÊNDICE D, deste trabalho, descreve em detalhes como esses valores foram calculados por meio do *software IHT 4.0*. A Tabela 18 mostra os resultados de temperaturas simuladas, além de mostrar o erro médio em percentual associado aos resultados do modelo.

Tabela 18 – Resultados de temperaturas simuladas e experimentais

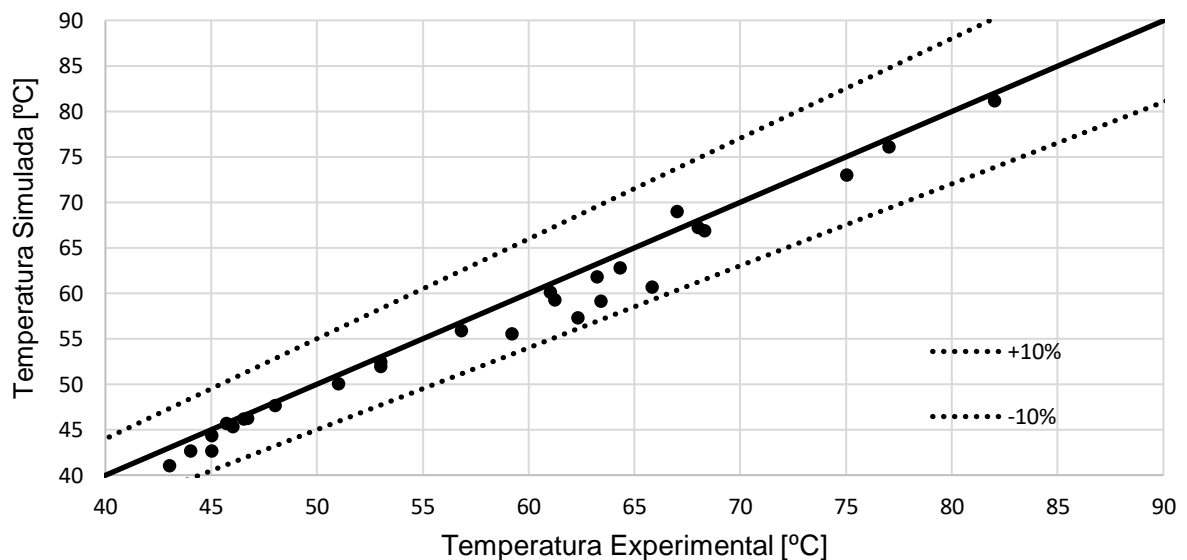
Experimento	T [°C]	T [°C]	Erro médio associado [%]
	Experimental	Simulada	Modelo
1	67,00	69,03	3,02
2	62,30	57,30	8,02
3	65,80	60,66	7,80
4	64,30	62,80	2,30
5	63,20	61,83	2,16
6	68,30	66,89	2,06
7	75,00	73,00	2,66
8	77,00	76,08	1,19
9	82,00	81,15	1,03
10	61,20	59,31	3,08
11	59,20	55,53	6,19
12	63,40	59,13	6,73
13	51,00	50,06	1,84
14	53,00	51,99	1,92
15	56,80	55,87	1,63
16	53,00	52,46	1,00
17	61,00	60,13	1,42
18	68,00	67,27	1,07
19	43,00	41,08	4,46
20	44,00	42,70	2,95
21	45,00	42,69	5,13

Continuação			
22	45,00	44,39	1,35
23	46,70	46,27	0,90
24	46,00	45,33	1,45
25	45,70	45,71	0,02
26	46,50	46,19	0,67
27	48,00	47,65	0,72

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 18, o modelo de transporte de calor a parâmetros concentrados, consegue prever os valores de temperatura com erro médio relativo de 2,7%. Ao passo que a Figura 18 mostra a concordância entres os valores encontrados de temperaturas simuladas com relação aos dados experimentais.

Figura 18 – Comparativo entres temperaturas simuladas e experimentais



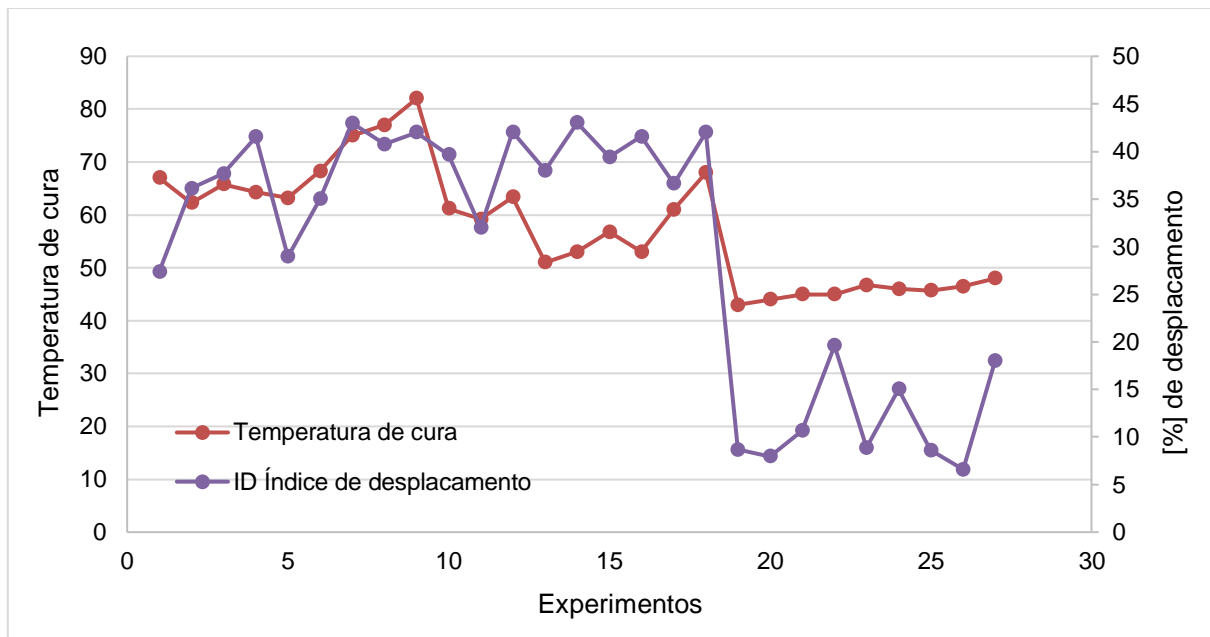
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 18, os pontos comparativos em torno da linha de referência indicam boa concordância entre os resultados de temperaturas simuladas e experimentais. Foi considerado um erro máximo de 10% representado pelas linhas pontilhadas.

5.3 CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE CURA E ID DE FILME

A Figura 19 mostra a correlação entres os resultados de temperaturas experimentais e ID de filme.

Figura 19 – Correlação entre ID de filme com a temperatura experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na Figura anterior, notou-se que os maiores índices de deslocamento de filme (ID), foram tidos com temperaturas elevadas acima de 50°C. Ao passo que os menores ID (entre 5 % a 15% de área deslocada), foram com temperatura de cura média abaixo de 50°C. De acordo com a norma referência usada neste trabalho, estes resultados estão em acordo com padrões desejados pelo processo, além de boa classificação de qualidade ISO 2 ou ASTM 3B.

5.4 CONDIÇÕES ÓTIMAS DE OPERAÇÃO

De acordo com as condições operacionais investigadas na metodologia deste trabalho, foi possível determinar sobre o processo, faixas de trabalho aceitáveis para a prática de cura de painéis envernizados e curados com uso forno UV.

A Tabela 19 mostra as condições mais adequadas para trabalho com o menor índice de deslocamento (ID), menor temperatura de cura experimental e maior velocidade de trabalho.

Tabela 19 – Condições ótimas de trabalho

Variável	Valor ótimo	Condições ótimas ajustadas		
		P[W/cm ²]	Vt [m/min]	Var [m/s]
Temperatura de cura	52,00 ^o C			
Temperatura simulada	51,00 ^o C	190	18	24
ID	26%			
Qualidade do revestimento	ISO 3 / ASTM 2B			

Fonte: Elaborado pelo autor.

As condições operacionais ótimas de acordo com modelo estocástico (temperatura de 53,00^oC, ID de 26% e padrão de qualidade ISO 3 ou ASTM 2B (ASTM D 3359, 2017), aceitáveis para prática de cura UV) podem ser alcançadas com ajuste de potência em 190 W/cm², velocidade de transporte em 18 m/min e ventilação à 24 m/s.

6. CONCLUSÃO

Com base nas análises dos resultados estatísticos, experimental e nos resultados simulados realizados neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser apontadas:

- o método empregado nesta abordagem, foi adequado para avaliar os efeitos dos fatores sobre a temperatura e o ID de filme em fornos UV;
- dentre os três fatores avaliados o fenômeno de radiação mostrou maior efeito sobre a temperatura de cura e ID;
- o efeito da convecção e velocidade de transporte são inversamente proporcionais a temperatura de cura e o ID;
- com 95% de confiança, o modelo estatístico consegue prever todas as tendências dos dados de temperatura de cura e o ID;
- o modelo de transferência de calor por convecção e radiação pode prever temperatura de cura com um erro relativo percentual de 2,7%;
- existe uma correlação entre temperatura elevada e altos índices de deslocamento de filme;
- as condições operacionais ótimas de acordo com modelo estocástico (temperatura de 53,00^oC, ID entre 26% e padrão de qualidade ISO 3/ ASTM 2B) são alcançadas com ajuste da potência em 190 W/cm², velocidade de transporte à 18 m/min e velocidade do ar de 24m/s;

7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Avaliar as condições ótimas indicadas neste trabalho para diferentes composições de vernizes.

Quantificar os prejuízos diretos e indiretos gerados por problemas de deslocamento de filme de verniz em linhas de produção.

Quantificar a redução de consumo de energia obtida ao ajustar o forno dentro das condições ótimas apontadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALLANIC, N. *et al.* A. Infrared drying of water based varnish coated on elastomer substrate. **International Journal of Thermal Sciences**, 79, 103–110, 2014.

ALLANIC, N.; SALAGNAC, P.; GLOUANNEC, P. Optimal constrained control of an infrared-convective drying of a polymer aqueous solution. **Chemical Engineering Research and Design**, 87(7), 908-914, 2009.

ALMEIDA, H. **Tintas UV**: cura por UV alia produtividade alta com menor gasto de energia. 2011. Disponível em: <<https://www.quimica.com.br/tintas-uv-cura-por-uv-alia-produtividade-alta-com-menor-gasto-de-energia/>>. Acesso em: 02 maio 2018.

ANNUAL BOOK OF *ASTM* STANDARDS. **No checks**: National Penn Bank, Philadelphia and Reading Avenues, Boyertown, PA 19512, USA, 2008.

ASTM D 523. **Standard test method for specular gloss**, ASTM, Philadelphia, USA 1999.

ASTM D 2244. **Standard practice for calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates**, ASTM, Philadelphia, USA 2008.

ASTM G 154. **Standard practice for operating fluorescent light apparatus for uv exposure of nonmetallic materials**, ASTM, Philadelphia, USA 2008.

ASTM D 3359. **Standard test methods for rating adhesion by tape test**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

BERGMAN, T. L. *et al.* **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CARRASCO, E.V.M. *et al.* Análise numérica da transferência de calor em madeiras brasileiras em situação de incêndio. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 58-65, jul. 2010.

CIOFINI, D. *et al.* Spectroscopic assessment of the UV laser removal of varnishes from painted surfaces. **Microchemical Journal**, 124, 792–803, 2016.

CRIPPA MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Av. do Progresso, 135– Distrito industrial-Balsámos São Paulo, CEP: 15140-000. 2018.

CUENCA, R. “**Será que curou**”. **Revista tecnologia gráfica, edição nº 78, 2011.**

DURATEX MADEIRA S.A - Chapas de MDF. Condomínio Edifício Sul Americano - Av. Paulista, 1938 - Bela Vista, São Paulo - SP 01310-942

FRAGATA, F.; AMORIM, C.C.; ORDINE, A.P. Desempenho de tintas de acabamento frente às radiações ultravioleta, UVA e UVB, e condensação de umidade. **Corrosão Prot. Mater**, vol. 29, Nº 3, 2010.

GAO, C. *et al.* Facile preparation of UV-cured films from waterborne unsaturated polyester via click reaction. **Progress in Organic Coatings**. Elsevier B.V. 124, 232–239, 2018.

GERMETEC UV & IR TECHNOLOGY. Rua Matinoré 239 – Jacaré – cep. 20.975-100 Rio de Janeiro – RJ – Brasil

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 3. ed. RIO DE Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2006.

ISO 4628-6 **Provides pictorial reference standards for designating the degree of chalking of paint coatings. It also describes a method by which the degree of chalking is rated**. Edition 3, Number of pages 5, Publication date 2011-09.

JAVADI, A. *et al.* Cure-on-command technology: a review of the current state of the art. **Progress in Organic Coatings**, 100, 2-31, 2016.

KOWALCZYK, K.; KOWALCZYK, A. **UV-curable epoxy varnishes modified with polyvinyl resins**. **Progress in Organic Coatings**, vol. 89, p. 100-105), Elsevier, 2015.

KREITH, F.; MANGLIK, R.; BOHN, M. **Principles of heat transfer de calor**. São Paulo: Editora Cengage learning, 2014.

LITOUICHE, B.; BOUGRIOU, C. Effects of convective instabilities on heat exchangers. **International Journal of Hydrogen Energy**, 42(8), 5381-5389, 2017. Citado junto com outros p. 41

MAGNONI, F. *et al.* Correlation between the scratch resistance of UV-cured PUA-based coatings and the structure and functionality of reactive diluents. **Progress in Organic Coatings**. 124, 193–199, 2018.

MINIPA DO BRASIL. **Boletim de instruções e especificações técnicas** Av. Carlos Liviero, 59 Vl.Liviero – São Paulo/SP Cep:04186-100

MIRANDA, L.L.; ZIVIANI, M.; FULLN JÚNIOR, B. Modelagem matemática do processo do forno de reaquecimento wb2 da Itq da acesita. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.3, n.2. out-dez, 2007.

NIAMSUWAN, S.; KITTISUPAKORN, P.; SUWATTHIKUL, A. Enhancement of energy efficiency in a paint curing oven via CFD approach: case study in an air-conditioning plant. **Journal homepage**, Applied Energy, 465-477, 2015.

NOVO, M. M. M. *et al.* Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade. **Cerâmica**, 60 (353), 22-33, 2014.

PAOLI, M.A. de. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. 1. ed., 2ª versão *online*. São Paulo: Editora **Artliber**, 2008.

POTTER, M.C.; RAMADAN B.H.; WIGGERT, D.C. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo, tradução da 4ª edição norte-americana. Editora Cengage Learning, 2015.

PURLIS, E. Baking process design based on modelling and simulation: towards optimization of bread baking. **Science Direct Food Control**, 27 45-52, 2012.

PUTRANTO, A.; CHEN, X. D.; WEBLEY, P. A. Application of the reaction engineering approach (REA) to model cyclic drying of thin layers of polyvinyl alcohol (PVA)/glycerol/water mixture. **Chemical Engineering Science**, 65 (18) 2010.

REK, Z.; RUDOLF, M.; ZUN, I. Application of CFD simulation in the development of a new generation heating oven. **Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering**, 58(2), 2012.

ROCHESA S.A. TECNOLOGIA EM TINTAS E VERNIZES. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ)**. Produto: K314W015. Parque Industrial e Centro de Pesquisas Rochesa, Rodovia Regis Bittencourt - Br 116, km 80, CEP: 83420-000, Quatro Barras, PR. Revisão: abril de 2018.

RODRIGUES, M. R.; NEUMANN, M. G. Fotopolimerização: princípios e métodos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 13, nº 4, p. 276-286, 2003.

RUIZ, C.S.B.; MACHADO, L.D.B **Influência da taxa de dose e da velocidade de processo na cura de revestimentos por radiação UV/EB**. International Nuclear Atlantic Conference; National Meeting on Nuclear Applications, 2010.

RUEDEN, C. T.; SCHINDELIN, J.; HINER, M. C. Image J2: Image J for the next generation of scientific image data, **BMC Bioinformatics** 18:529, doi:10.1186/s12859-017-1934-z, 2017

SAKIN, M.; KAYMAK-ERTEKIN, F.; ILICALI, C. Convection and radiation combined surface heat transfer coefficient in baking ovens. **Journal of Food Engineering**, 94(3-4), 344–349, 2009.

SARAVANAN, S.; SIVARAJ, C. Coupled thermal radiation and natural convection heat transfer in a cavity with a heated plate inside. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 40, 54-64, 2013.

SATIT, P. **Computational Fluid Dynamic (CFD) modeling and validation of temperature distribution in the infrared oven**. School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, 2010.

SOUZA, B.; SANTOS, A. P. L.; SANTOS FILHO, M.L. **Uso de projeto robusto para identificação de fatores que contribuem par a intensidade do aspecto de casca**

de laranja em superficial de para-choques pintados. Gestão e produção. São Carlos, Ahead of Print, 2018, Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0104-530X3160-18>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

VERBOVEN, P. *et al.* Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven. **Journal of Food Engineering**, 43(2), 61–73, 2000.

VISIONCURE UV & TECHNOLOGY. Boletim Técnico 018. **Dimensionamento do Sistema de refrigeração UV a ar.** Setembro, 2014.

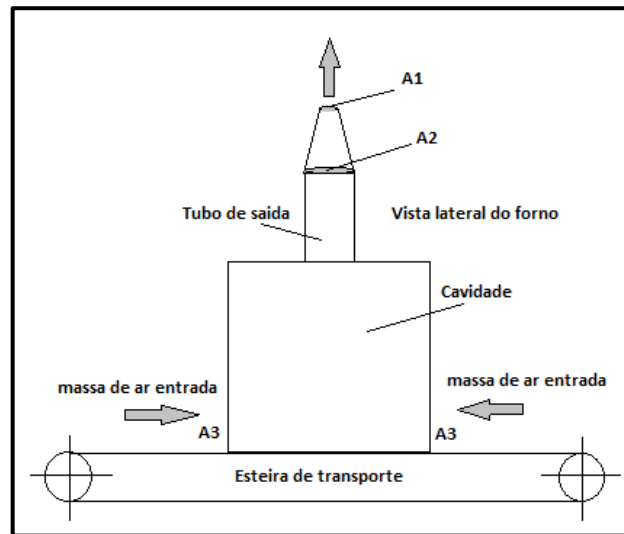
YI, Y. *et al.* Improving the curing cycle time through the numerical modeling of air flow in industrial continuous convection ovens. **Procedia CIRP** vol. 63, pp. 499–504. Elsevier B.V, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Procedimento para Medir a Velocidade do Ar na Saída do Forno

Para medir a velocidade de exaustão, foi utilizado um ANEMÔMETRO DIGITAL MODELO MDA-11 MINIPA. Além disso, devido às dimensões físicas do sensor do instrumento, foi adaptado um cone com diâmetro de 60mm na saída A1 e, do lado oposto, na entrada A2 com diâmetro de 250mm. A Figura 20, mostra o esquema do forno com a adaptação do cone.

Figura 20 – Esquema do forno de UV com adaptação



Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo a obter a velocidade real de operação, foi necessário aplicar o princípio da conservação da massa, com a hipótese de escoamento incompressível (POTTER *et. al.* 2015). Assim, para obtenção da velocidade na área A2, tem-se:

$$\vartheta_2 = \frac{A_1 \vartheta_1}{A_2} \quad (1)$$

Onde as áreas das seções A1 e A2 são:

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0,06)^2}{4} = 2,826 \times 10^{-3} \text{m}^2 \quad (2)$$

$$A_2 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0,25)^2}{4} = 0,0490625 \text{m}^2 \quad (3)$$

A velocidade ϑ_1 é a velocidade medida com o anemômetro.

A Tabela 20 mostra os valores de velocidade do ar obtida após as medições e cálculos para os três níveis.

Tabela 20 – Velocidade do ar

	Velocidade [m/s]		
	1º Nível	2º Nível	3º Nível
Valor obtido com anemômetro sobre A1	550	420	315
Valor calculado sobre A2	31	24	18
Valor calculado sobre A3	2,5	1,9	1,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – Procedimento para Calcular o Coeficiente Convectivo

Cálculo de coeficiente de convecção para os três níveis de velocidade. A Tabela 21, mostra as propriedades físicas para o ar seco à 40°C (POTTER *et al.* 2015)

Tabela 21 – Propriedade do ar

Propriedades do ar à 40°C	
c_p	1,007 kJ/kg.K
μ	19,15x10 ⁻⁶ N.s/m ²
ρ	1,127 kg/m ³
k	0,027W/m ² /°C

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a literatura, foi obtido o coeficiente convectivo por meio do método empírico, com uso de Reynolds, Prandtl e Nusselt (POTTER *et al.* 2015; KREITH *et al.* 2014).

Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot x}{\mu} \quad (4)$$

Prandtl

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (5)$$

Nusselt

$$NU = 0,036(Pr)^{0,333} \times (Re)^{0,8} \quad (6)$$

A Tabela 22 mostra o valor obtido do o coeficiente de convecção para cada velocidade de saída do forno, além dos valores dos números adimensionais de Reynolds, Prandtl e Nusselt.

Tabela 22 - Coeficiente de convecção calculado

Velocidade sobre a área A ₃	Reynolds	Prandtl	Nusselt	Coeficiente convecção [W/m.k]
2,5	14124	7,11x10 ⁻⁴	6,7306	0,1139
1,9	18832	7,11x10 ⁻⁴	8,4724	0,1435
1,5	24482	7,11x10 ⁻⁴	10,4513	0,1770

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – Procedimento para Cálculo da Temperatura da Vizinhança (Lâmpada) sobre o Forno UV

$$\dot{q} = \sigma A \varepsilon (T^4_s - T^4_{viz})$$

Em que:

σ = Constante de Stefan Boltzman

ε = Emissividade do MDF

A = Área superficial da placa de MDF

T^4_s = Temperatura experimental de cura

T^4_{viz} = Temperatura vizinhança

A temperatura foi calculada, considerando as unidades no sistema internacional (SI). A Tabela 23 mostra cada experimento a potência, tempo de cura experimental, temperatura de cura experimental, além da temperatura da vizinhança (lâmpada) estimada.

Tabela 23 – Resultado de temperatura da vizinhança estimada para cada experimento

Temperatura da vizinhança no interior do forno				
Experimento	P [W/cm ²] Experimental	t [s] de cura Experimental	T [°C] de cura Experimental	T [°C] Vizinhança Estimada
1	330,55	4,10	67,00	68,00
2	330,55	4,10	62,30	63,00
3	330,55	4,10	65,80	66,00
4	330,55	7,15	64,30	65,00
5	330,55	7,15	63,20	64,00
6	330,55	7,15	68,30	68,50
7	330,55	10,2	75,00	75,00
8	330,55	10,2	77,00	78,00
9	330,55	10,2	82,00	82,00
10	244,15	4,10	61,20	64,30
11	244,15	4,10	59,20	60,20
12	244,15	4,10	63,40	63,50
13	244,15	7,15	51,00	51,00
14	244,15	7,15	53,00	53,00
15	244,15	7,15	56,80	57,00
16	244,15	10,2	53,00	53,00
17	244,15	10,2	61,00	61,00
18	244,15	10,2	68,00	68,00

Tabela 1 Continuação

Temperatura da vizinhança no interior do forno				
Experimento	P [W/cm ²] Experimental	t [s] de cura Experimental	T[°C] de cura Experimental	T[°C] Vizinhança Estimada
19	170,80	4,10	43,00	43,00
20	170,80	4,10	44,00	45,00
21	170,80	4,10	45,00	45,00
22	170,80	7,15	45,00	45,00
23	170,80	7,15	46,70	47,00
24	170,80	7,15	46,00	46,00
25	170,80	10,2	45,70	46,00
26	170,80	10,2	46,50	47,00
27	170,80	10,2	48,00	48,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D – Cálculo da Temperatura Usando o Modelo Matemático Proposto

A Tabela 24 mostra a relação entre os resultados de cada experimento com o ID de filme, qualidade conforme a norma ASTM, temperaturas experimentais e simuladas, além do erro médio em percentual associado ao modelo.

Tabela 24 - Relação entre os resultados dos experimentos

Relação entre resultado geral de cada experimento					
Experimento	ID [%]	Qualidade	T [°C] Experimental	T [°C] Simulada	Erro médio Associado [%].
1	27,38	ISO 3 / ASTM 2B	67,00	69,03	3,02
2	36,12	ISO 4 / ASTM 1B	62,30	57,30	8,02
3	37,68	ISO 4 / ASTM 1B	65,80	60,66	7,80
4	41,54	ISO 4 / ASTM 1B	64,30	62,80	2,30
5	28,94	ISO 3 / ASTM 2B	63,20	61,83	2,16
6	1300	ISO 2 / ASTM 3B	68,30	66,89	2,06
7	42,97	ISO 4 / ASTM 1B	75,00	73,00	2,66
8	40,75	ISO 4 / ASTM 1B	77,00	76,08	1,19
9	42,00	ISO 4 / ASTM 1B	82,00	81,15	1,03
10	39,65	ISO 4 / ASTM 1B	61,20	59,31	3,08
11	17,73	ISO 3 / ASTM 2B	59,20	55,53	6,19
12	42,04	ISO 4 / ASTM 1B	63,40	59,13	6,73
13	00,29	ISO 1 / ASTM 4B	51,00	50,06	1,84
14	43,00	ISO 4 / ASTM 1B	53,00	51,99	1,92
15	39,43	ISO 4 / ASTM 1B	56,80	55,87	1,63
16	41,58	ISO 4 / ASTM 1B	53,00	52,46	1,00
17	36,61	ISO 4 / ASTM 1B	61,00	60,13	1,42
18	42,00	ISO 4 / ASTM 1B	68,00	67,27	1,07
19	08,66	ISO 2 / ASTM 3B	43,00	41,08	4,46
20	07,98	ISO 2 / ASTM 3B	44,00	42,70	2,95
21	10,67	ISO 2 / ASTM 3B	45,00	42,69	5,13
22	19,61	ISO 3 / ASTM 2B	45,00	44,39	1,35
23	08,88	ISO 2 / ASTM 3B	46,70	46,27	0,90
24	15,04	ISO 2 / ASTM 3B	46,00	45,33	1,45
25	08,60	ISO 2 / ASTM 3B	45,70	45,71	0,02
26	06,59	ISO 2 / ASTM 3B	46,50	46,19	0,67
27	41,38	ISO 4 / ASTM 1B	48,00	47,65	0,72

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE E – Percentual de deslocamento de filme para cada experimento

A Tabela 25 descreve os resultados de cálculos de áreas deslocadas (AD), áreas não deslocadas (AND), áreas totais (AT) e índices deslocados (ID) para cada amostra com base à norma ASTM D 3359.

Tabela 25 – Resultado de áreas deslocadas para cada amostra

Calculo de área das amostras				
Amostra	AD [mm ²]	AND [mm ²]	AT [mm ²]	ID [%]
1	98,308	260,627	358,935	27,38
2	437,00	773,807	1211,459	36,12
3	118,341	195,671	314,012	37,68
4	154,273	217,311	371,367	41,54
5	89,517	219,756	309,273	28,94
6	39,751	266,038	305,789	13,00
7	175,167	232,389	407,552	42,97
8	172,253	250,416	422,669	40,75
9	186,439	253,052	439,511	42,00
10	127,109	193,396	320,505	39,65
11	36,761	170,533	207,294	17,73
12	191,315	263,722	455,042	42,04
13	0,664	227,192	227,856	38,00
14	195,977	250,166	445,936	43,00
15	149,833	229,745	379,578	39,43
16	185,139	260,072	445,211	41,58
17	149,279	258,380	407,659	36,61
18	183,352	252,886	436,238	42,00
19	22,529	237,403	259,932	8,66
20	19,060	219,756	238,818	7,98
21	27,743	232,131	259,874	10,67
22	64,981	266,232	331,213	19,61
23	26,469	271,698	298,167	8,88
24	48,642	274,639	323,281	15,04
25	24,026	255,716	279,186	8,60
26	19,005	269,034	288,039	6,59
27	195,810	277,358	473,168	41,38

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE F - Método para cálculo da temperatura com software IHT 4.0

Para cada cálculo, foram consideradas as propriedades do MDF, as condições de contorno para cada experimento, a geometria da placa de MDF, além da equação modelo conforme interface fornecida pelo *software* (BERGMAN *et al.* 2014).

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 1

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 340 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1770 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 26 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 26 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 1

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	48,64	59,01	65,29	69,03	71,24	72,53	73,29	73,73	73,98
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	321,6	332	338,3	342	344,2	345,5	346,3	346,7	347

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 2

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 335 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1435 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \text{rho} * V * c * \text{Der}(T, t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 27 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 27 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 2

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	43,05	50,12	54,55	57,3	59	60,04	60,67	61,06	61,29
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	316	323,1	327,6	330,3	332	333	333,7	334,1	334,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 3

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
 rho = 800 //Massa especifica, kg/m³
 c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
 Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
 Tsur = 338,7 //Temperatura da lâmpada, K
 h = 0.1139 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
 V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \text{rho} * V * c * \text{Der}(T, t)$
 Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 28 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 28 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 3

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	44,59	52,6	57,59	60,66	62,52	63,66	64,34	64,75	65
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	338,7	338,7	338,7	338,7	338,7	338,7	338,7	338,7	338,7	338,7
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	317,6	325,6	330,6	333,7	335,5	336,7	337,3	337,8	338

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 4

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 337.26 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1770 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 29 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 29 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 4

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	43,98	51,61	56,36	59,28	61,06	62,14	62,8	63,19	63,43
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	337,3	337,3	337,3	337,3	337,3	337,3	337,3	337,3	337,3	337,3
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	317	324,6	329,4	332,3	334,1	335,1	335,8	336,2	336,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 5

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 336.19 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1435 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 30 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 30 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 5

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	43,54	50,9	55,51	58,36	60,11	61,18	61,83	62,22	62,46
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	336,2	336,2	336,2	336,2	336,2	336,2	336,2	336,2	336,2	336,2
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	316,5	323,9	328,5	331,4	333,1	334,2	334,8	335,2	335,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 6

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 341.6 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1139 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \text{rho} * V * c * \text{Der}(T, t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 31 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 31 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 6

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	45,69	54,37	59,74	63,01	64,99	66,18	66,89	67,32	67,57
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	341,3	341,3	341,3	341,3	341,3	341,3	341,3	341,3	341,3	341,3
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	318,7	327,4	332,7	336	338	339,2	339,9	340,3	340,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 7

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 348 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1770 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \rho * V * c * \text{Der}(T, t)$
TC = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 32 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 32 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 7

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	48.64	59.01	65.29	69.03	71.24	72.53	73.29	73.73	73.98
As	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
c	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
eps	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
h	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348
V	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	321.6	332	338.3	342	344.2	345.5	346.3	346.7	347

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 8

//Propriedade

```

eps = 0.82           //Emissividade
rho = 800           //Massa especifica, kg/m³
c = 2.30           //Calor específico J/kgK

```

//Condições de contorno

```

Ti = 305           //Temperatura inicial, K
Tinf = 318        //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 350        //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1435        //Coeficiente de convecção, W/m²K

```

//Constante física

```

sigma = 5.67e-8    //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

```

//Geometria da placa

```

As = 0.6*0.3       //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

```

//Equação Modelo

```

-(h*(T -Tinf)+eps*sigma*(T⁴- Tsur⁴))*As = rho*V*c*Der(T,t)
Tc = T - 273       //Temperatura em Celsius

```

A Tabela 33 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 33 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 8

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	49,55	60,47	67,06	70,97	73,26	74,59	75,37	75,82	76,08
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	322,6	333,5	340,1	344	346,3	347,6	348,4	348,8	349,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 9

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 355 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1139 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \text{rho} * V * c * \text{Der}(T, t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 34 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 34 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 9

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	51.89	64.16	71.47	75.75	78.21	79.63	80.43	80.89	81.15
As	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
c	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
eps	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
h	0.1139	0.1139	0.1139	0.1139	0.1139	0.1139	0.1139	0.1139	0.1139	0.1139
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
V	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	324.9	337.2	344.5	348.7	351.2	352.6	353.4	353.9	354.2

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 10

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 337,3 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1770 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \text{rho} * V * c * \text{Der}(T, t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 35 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 35 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 10

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	44	51.63	56.39	59.31	61.1	62.18	62.83	63.23	63.47
As	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
c	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
eps	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
h	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8	5.67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	337.3	337.3	337.3	337.3	337.3	337.3	337.3	337.3	337.3	337.3
V	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108	0.00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	317	324.6	329.4	332.3	334.1	335.2	335.8	336.2	336.5

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 11

//Propriedade

```

eps = 0.82           //Emissividade
rho = 800           //Massa específica, kg/m³
c = 2.30           //Calor específico J/kgK

```

//Condições de contorno

```

Ti = 305           //Temperatura inicial, K
Tinf = 318        //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 333        //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1435        //Coeficiente de convecção, W/m²K

```

//Constante física

```

sigma = 5.67e-8    //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

```

//Geometria da placa

```

As = 0.6*0.3       //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

```

//Equação Modelo

```

-(h*(T -Tinf)+eps*sigma*(T⁴- Tsur⁴))*As = rho*V*c*Der(T,t)
Tc = T - 273       //Temperatura em Celsius

```

A Tabela 36 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 36 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 11

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	42,23	48,8	52,95	55,53	57,14	58,12	58,73	59,1	59,33
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	315,2	321,8	325,9	328,5	330,1	331,1	331,7	332,1	332,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 12

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
 rho = 800 //Massa específica, kg/m³
 c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
 Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
 Tsur = 337 //Temperatura da lâmpada, K
 h = 0.1139 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa, m²
 V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \rho * V * c * \text{Der}(T, t)$
 Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 37 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 37 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 12

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	43,87	51,45	56,2	59,13	60,92	62,01	62,68	63,08	63,33
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	316,9	324,5	329,2	332,1	333,9	335	335,7	336,1	336,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 13

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 324 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1770 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \text{rho} * V * c * \text{Der}(T, t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 38 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 38 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 13

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	38,74	43,12	45,94	47,74	48,88	49,6	50,06	50,35	50,53
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	324	324	324	324	324	324	324	324	324	324
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	311,7	316,1	318,9	320,7	321,9	322,6	323,1	323,3	323,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 14

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 326 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1435 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 39 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 39 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 14

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	39,48	44,35	47,46	49,45	50,7	51,49	51,99	52,3	52,5
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	326	326	326	326	326	326	326	326	326	326
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	312,5	317,3	320,5	322,4	323,7	324,5	325	325,3	325,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 15

//Propriedade

```

eps = 0.82           //Emissividade
rho = 800           //Massa específica, kg/m³
c = 2.30            //Calor específico J/kgK

```

//Condições de contorno

```

Ti = 305            //Temperatura inicial, K
Tinf = 318          //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 329,8        //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1139          //Coeficiente de convecção, W/m²K

```

//Constante física

```

sigma = 5.67e-8     //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

```

//Geometria da placa

```

As = 0.6*0.3        //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006  //Volume da placa, m³

```

//Equação Modelo

```

-(h*(T -Tinf)+eps*sigma*(T⁴- Tsur⁴))*As = rho*V*c*Der(T,t)
Tc = T - 273        //Temperatura em Celsius

```

A Tabela 40 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 40 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 15

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	41,03	46,87	50,58	52,92	54,39	55,3	55,87	56,22	56,44
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	314	319,9	323,6	325,9	327,4	328,3	328,9	329,2	329,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 16

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 326 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1770 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 41 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 41 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 16

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	39,49	44,35	47,46	49,44	50,68	51,47	51,96	52,27	52,46
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	326	326	326	326	326	326	326	326	326	326
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	312,5	317,4	320,5	322,4	323,7	324,5	325	325,3	325,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 17

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 334 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1435 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 42 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 42 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 17

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	42,64	49,46	53,75	56,42	58,07	59,08	59,7	60,08	60,31
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	334	334	334	334	334	334	334	334	334	334
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	315,6	322,5	326,7	329,4	331,1	332,1	332,7	333,1	333,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 18

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 341 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1139 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 43 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 43 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 18

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	45,56	54,16	59,49	62,74	64,71	65,89	66,6	67,02	67,27
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	318,6	327,2	332,5	335,7	337,7	338,9	339,6	340	340,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 19

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 316 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1770 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 44 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 44 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 19.

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	35,83	38,35	40	41,08	41,78	42,23	42,52	42,71	42,83
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	316	316	316	316	316	316	316	316	316	316
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	308,8	311,4	313	314,1	314,8	315,2	315,5	315,7	315,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 20

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 318 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1435 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa, m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \rho * V * c * \text{Der}(T, t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 45 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 45 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 20

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	36,52	39,5	41,44	42,7	43,52	44,05	44,39	44,6	44,75
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	309,5	312,5	314,4	315,7	316,5	317	317,4	317,6	317,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 21

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 318 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1139 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \text{rho} * V * c * \text{Der}(T, t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 46 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 46 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 21

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	36,51	39,48	41,42	42,69	43,51	44,04	44,38	44,6	44,74
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	309,5	312,5	314,4	315,7	316,5	317	317,4	317,6	317,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 22

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 318 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1770 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 47 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 47 – Resultados de temperatura simulada para o experimento 22

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	36,54	39,52	41,46	42,72	43,53	44,06	44,39	44,61	44,75
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	309,5	312,5	314,5	315,7	316,5	317,1	317,4	317,6	317,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 23

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 320 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1435 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \rho * V * c * \text{Der}(T, t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 48 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 48 – Resultados de temperatura simulada para experimento 23

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	37,24	40,68	42,92	44,37	45,3	45,89	46,27	46,52	46,68
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	310,2	313,7	315,9	317,4	318,3	318,9	319,3	319,5	319,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 24

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 318 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1139 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 49 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 49 – Resultados de temperatura simulada para experimento 24

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	36,87	40,07	42,16	43,52	44,4	44,96	45,33	45,56	45,71
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	309,9	313,1	315,2	316,5	317,4	318	318,3	318,6	318,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 25

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 319 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1770 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 50 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 50 – Resultados de temperatura simulada para experimento 25

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	36,9	40,11	42,2	43,55	44,42	44,97	45,33	45,56	45,71
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	309,9	313,1	315,2	316,5	317,4	318	318,3	318,6	318,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 26

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 319.5 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1435 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - T_{inf}) + \text{eps} * \text{sigma} * (T^4 - T_{sur}^4)) * A_s = \rho * V * c * \text{Der}(T, t)$
Tc = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 51 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 51 – Resultados de temperatura simulada para experimento 26

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	37,06	40,39	42,55	43,95	44,85	45,43	45,8	46,04	46,19
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435	0,1435
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	310,1	313,4	315,5	316,9	317,8	318,4	318,8	319	319,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DE TEMPERATURA DO EXPERIMENTO 27

//Propriedade

eps = 0.82 //Emissividade
rho = 800 //Massa específica, kg/m³
c = 2.30 //Calor específico J/kgK

//Condições de contorno

Ti = 305 //Temperatura inicial, K
Tinf = 318 //Temperatura do ar interior do forno, K
Tsur = 321 //Temperatura da lâmpada, K
h = 0.1139 //Coeficiente de convecção, W/m²K

//Constante física

sigma = 5.67e-8 //Constante de Stefan-Boltzmann, W/m²K⁴

//Geometria da placa

As = 0.6*0.3 //Área superficial da placa,m²
V = 0.6*0.3*0.006 //Volume da placa, m³

//Equação Modelo

$-(h*(T - Tinf) + eps*sigma*(T^4 - Tsur^4))*As = rho*V*c*Der(T,t)$
TC = T - 273 //Temperatura em Celsius

A Tabela 52 mostra os resultados calculados pelo *software*, destacando em vermelho os resultados que correspondem ao tempo, próximo ao tempo de cura experimental.

Tabela 52 – Resultados de temperatura simulada para experimento 27

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc	32	37,6	41,27	43,66	45,2	46,19	46,82	47,23	47,49	47,65
As	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
eps	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
h	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139	0,1139
rho	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
sigma	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8	5,67E-8
Ti	305	305	305	305	305	305	305	305	305	305
Tinf	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318
Tsur	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321
V	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108	0,00108
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T	305	310,6	314,3	316,7	318,2	319,2	319,8	320,2	320,5	320,7

Fonte: Elaborado pelo autor.