



INSTITUTO DE FÍSICA

Universidade Federal Fluminense

Raiane Aparecida Roza de Campos

**Análise do Efeito da Rugosidade de Superfícies
Metálicas na Radiação no Infravermelho**

Volta Redonda
2022

Raiane Aparecida Roza de Campos

**Análise do Efeito da Rugosidade de Superfícies Metálicas na
Radiação no Infravermelho**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal Fluminense como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Universidade Federal Fluminense – UFF
Instituto de Física
Mestrado Acadêmico em Física

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ladário da Silva

Volta Redonda - RJ
Junho/2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BIF
Gerada com informações fornecidas pelo autor

C198a Campos, Raiane Aparecida Roza de
Análise do Efeito de Rugosidade de Superfícies Metálicas
na Radiação no Infravermelho / Raiane Aparecida Roza de
Campos ; Ladário da Silva, orientador. Niterói, 2022.
92 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGF.2022.m.15764799783>

1. Caracterização de materiais. 2. Radiação
Infravermelha. 3. Radiância. 4. Rugosidade. 5. Produção
intelectual. I. Silva, Ladário da, orientador. II.
Universidade Federal Fluminense. Instituto de Física. III.
Título.

CDD -

Raiane Aparecida Roza de Campos

**Análise do Efeito da Rugosidade Superfícies Metálicas na Radiação no
Infravermelho**

Orientador: Ladário da Silva

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado de Física da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em Volta Redonda, 27 de junho de 2022.

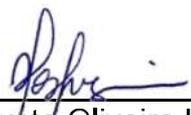
BANCA EXAMINADORA

 Assinado de forma digital por
Ladário da Silva
Dados: 2022.06.27 21:00:46 -03'00'

Prof. Ladário da Silva, D.Sc.
UFF - Universidade Federal Fluminense

Ana Lucia Ferreira de Barros  Assinado de forma digital por Ana
Lucia Ferreira de Barros
Dados: 2022.06.28 09:14:15 -03'00'

Prof.^a Ana Lucia Ferreira de Barros, D.Sc.
CEFET - RJ


Prof. José Augusto Oliveira Huguenin, D.Sc.
UFF – Universidade Federal Fluminense

Volta Redonda

2022

Agradecimentos

Este trabalho foi concluído com muito esforço e vontade pessoal, e também com muita ajuda. Iniciei uma semana antes do lockdown do país, foram momentos difíceis, o acesso ao campus/laboratório proibido e o experimento fiquei parada por alguns meses. Meu orientador professor Dr. Ladário da Silva, se fez muito solícito e me ajudou a passar por este momento de forma esplêndida. Agradeço por toda a paciência e gentileza para comigo em todos os momentos.

Agradeço também as professoras Marina Ribeiro Barros Dias e Silvânia Alves de Carvalho, que atuaram como minhas coorientadoras, sem que fossem oficiais. Seus conhecimentos e experiências, foram de extrema valia para o trabalho e meu crescimento profissional. Agradeço ainda ao Matheus Elias Pereira que foi um grande amigo e companheiro de estudos, me auxiliando sempre com seus conhecimentos teóricos.

Às agências de fomento FINEP e FAPERJ pelo apoio financeiro e a bolsa de mestrado nota 10.

Aos meus pais, Elizabete Roza de Campos e José Carlos de Campos, meus mais sinceros agradecimentos, por me apoiarem e aguentarem minhas fases durante este momento. Ao meu irmão, Ramington Roza de Campos pelo ombro amigo e pelas palavras incentivadoras.

Essa é uma conquista pessoal importante e jamais poderia de mencionar à mulher muito especial, minha avó Ana Rocha Roza, que mesmo sem entender do meu trabalho, me ouvia, abria um sorriso e me dava um dos melhores abraços do mundo. Foram momentos difíceis, a começar pela pandemia de Covid-19 até sua partida. Mesmo te acompanhando, eu fiquei ali te vigiando e lendo meus artigos até o último momento. Esse vitória com toda certeza será uma grande homenagem para a senhora (Em memória).

Meus agradecimentos a todos que me ajudaram direta ou indiretamente, nesta jornada. Obrigada.

Resumo

Em muitas indústrias existe uma certa preocupação com a qualidade de seus produtos finais. Empresas de metalurgia, automobilísticas, aeronáuticas, navais, entre outras, analisam as superfícies dos seus produtos, a fim de garantir que as mesmas estejam nas condições adequadas de trabalho para o usuário. Tais acabamentos e tratamentos destas superfícies estão fortemente relacionados com a sua rugosidade. É possível acessar a rugosidade das superfícies por diferentes métodos, que podem ser conhecidos como diretos e indiretos. Os métodos indiretos são menos invasivos, ou seja, não há contato com a superfície, o que minimiza o risco de danos à superfície durante uma medição de rugosidade. Alguns métodos analisam a interação da superfície com alguma onda eletromagnética de comprimento de onda adequado, capturada por um sensor, que pode dar origem a uma imagem digital. Essa imagem digital carrega alguma informação sobre a superfície, como sua rugosidade. Sendo assim, é possível pensar que a energia emitida por uma superfície rugosa pode conter alguma informação sobre sua rugosidade. Corpos em equilíbrio térmico a uma temperatura T , absorvem e emitem energia na mesma taxa. Grande parte da energia emitida por um corpo à temperatura ambiente se encontra na região do infravermelho, e pode ser capturada por uma câmera termográfica. A distribuição desta energia em função do comprimento de onda depende da temperatura e do material que constitui o corpo, dentre outros parâmetros. Este trabalho versa sobre a caracterização de rugosidade de superfícies metálicas, através da análise da energia emitida pela superfície do corpo, estando o mesmo a uma temperatura T , por unidade de área e tempo, e um ângulo sólido particular, a qual chamamos de radiância. Desta forma, propõe-se um processo para medir indiretamente a rugosidade da superfície de um corpo em equilíbrio térmico à uma temperatura T , usando uma câmera termográfica, capaz de detectar a radiância na região do infravermelho emitida por tais superfícies. Para este estudo foram utilizadas dois conjuntos de amostras de alumínio, cujas superfícies apresentavam diferentes rugosidades, sendo todas preparadas manualmente e cujas rugosidades foram medidas no Microscópio Confocal. O parâmetro medido foi a rugosidade média (R_a) de cada uma delas. Com o uso da câmera termográfica, foram feitas diversas medidas da radiância média, entre $3 \mu m$ e $5 \mu m$, na região central de cada amostra, variando sua temperatura entre $10^\circ C$ à $20^\circ C$ através de três materiais/equipamentos que foram as bolsas térmicas, a chapa aquecedora e o circuito eletrônico com pastilha Peltier e programação em Arduíno e também à temperatura ambiente. Como resultado, verificou-se uma tendência de diminuição da radiância a medida que aumenta a rugosidade, o que sugere a possibilidade de se estabelecer um novo método para se obter a rugosidade superficial, usando a radiância.

Palavras-chave: Rugosidade, Termografia, Caracterização de materiais, Radiância, Radiação Infravermelha (IR).

Abstract

In many industries there is a concern with the quality of their final products. Metallurgy, automotive, aeronautical, naval companies, among others, analyze the surface of their products, in order to guarantee that they are in conditions, suitable to working for the user. Such finishes and treatments are highly related to their roughnesses. It is possible to access a surface roughness by different methods, which can be known as direct and indirect. Indirect methods are less invasive, i.e. there is no contact with the surface, or they minimize the risk of damage during a roughness measurement. Indirect methods are less invasive, once there is no contact with the surface, which minimizes the risk of surface damage during a roughness measurement. Some methods analyze the interaction of the surface with some electromagnetic wave of appropriate wavelength, captured by a sensor, which can give rise to a digital image. This digital image carries some information about the surface, such as its roughness. In this sense, it is possible that the energy emitted by a rough surface may contain information about its roughness. Bodies in thermal equilibrium at a temperature T , absorb and emit energy at the same rate. Virtually all the energy emitted by a body at room temperature is in the region of the infrared and can be captured by a thermographic camera. This energy distribution as a function of wavelength depends on the temperature and on the material that makes up the body. The present work deals with the characterization of roughness of metallic surfaces, through thermography, where we evaluate the amount of energy emitted by the surface of a body at a temperature T , per unit area and at a particular solid angle, which we call radiance. In this way, a process is proposed to indirectly measure the surface roughness of a body in thermal equilibrium at temperature T , using a thermographic camera, capable of detecting the radiance in the infrared region emitted by such surfaces. For this study, we used two sets of aluminum samples, whose surfaces presented different roughness, all being prepared manually and whose roughness was measured with the Confocal Microscope. The parameter accessed was the average roughness (R_a) of each one of them. Using the thermographic camera, several measurements of the mean radiance were made, between $3 \mu m$ and $5 \mu m$, in the central region of each sample, varying its temperature between $10^\circ C$ to 20° of three materials/equipment that the thermal bags, the heating plate and the electronic circuit with Peltier insert and Arduino programming also at room temperature. As a result, there was a tendency to decrease the radiance as surface roughness rises. This behavior suggests the possibility of establishing a new method to obtain surface roughness, using radiance.

Keywords: Roughness, Thermography, Material Characterization, Radiance, Infrared Radiation (IR).

Lista de Figuras

2.1	Perfil de superfície real [25].	5
2.2	Exemplo do perfil de uma superfície rugosa [25].	5
2.3	Tabela de seleção do comprimento de amostragem [27].	7
2.4	Representação esquemática de um corpo negro.	8
2.5	Ângulo sólido entre dA_n e um ponto de dA_1 pelo sistema de coordenadas esféricas.	17
3.1	Amostras de alumínio comercial com diferentes rugosidades de superfícies.	22
3.2	Processo completo da preparação das amostras de alumínio. (a) barra maciça de alumínio com 25,5mm de diâmetro ao qual foram cortadas em 7 pedaços de 13,90mm de espessura; (b) furação a 90° na lateral das amostras com diâmetro de $\phi 1/16''$ a 6mm da base de apoio; (c) processo de tipagem, utilizando punção numérico de aço SAE 4140 na lateral perpendicular a amostra; (d) suporte de madeira com furação central de 25,5mm para fixar a amostra no processo de lixamento; (e) base de madeira que garante um movimento retilíneo, garantido que as ranhuras causadas pelas lixas estejam sempre em uma única direção; (f) processo de desbaste da superfície das amostras com lixa manual unidirecional; (g) amostra finalizadas após todo o processo.	23
3.3	Funcionamento e composição da pastilha Peltier.	24
3.4	Circuito eletrônico montado em uma placa protoboard, com display que é utilizado para monitorar e ajustar a temperatura desejada de trabalho.	25
3.5	Chapa aquecedora da marca JUNG®, modelo CV200AP01 utilizada para aquecer as amostras de alumínio comercial.	26
3.6	Equipamento de medição de temperatura.	26
3.7	Autora no LCM operando o Microscópio Confocal.	27
3.8	Imagens topográficas das amostras de maior e menor rugosidade.	28
3.9	Imagens do perfil de superfícies das amostras de maior e menor rugosidade.	29
3.10	Espectro Eletromagnético.	29
3.11	Exemplo de radiação através de uma imagem térmica, mostrando os pontos de maiores e menores temperaturas.	31
3.12	Câmera Termográfica FLIR®A6753sc	32
3.13	Montagem do experimento utilizando bolsas térmicas.	33
3.14	Programa de aquecimento da chapa (temperatura \times tempo).	34
3.15	Montagem experimental com circuito eletrônico, Arduíno e placa Peltier.	34
3.16	Experimento realizado com os ajustes da folha de papel alumínio amassado e fita 3M colada na lateral da amostra de alumínio comercial.	35
3.17	Caixa de isopor com o dissipador de calor dentro do interior da mesma (antes do modificação).	36

3.18	Caixa de isopor com o dissipador de calor fora do interior da mesma. Apenas a placa Peltier está voltada para dentro (depois da modificação). . . .	36
4.1	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 16, 75^\circ C$	38
4.2	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 15, 2^\circ C$	40
4.3	Gráfico de radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 39^\circ C$	41
4.4	Gráfico de radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 37, 95^\circ C$	42
4.5	Gráfico de radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 33, 9^\circ C$	43
4.6	Gráfico de radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 31, 85^\circ C$	44
4.7	Gráfico de radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 30, 7^\circ C$	45
4.8	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração da chapa aquecedora nas temperaturas de 100, 150 e $200^\circ C$	47
4.9	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração da chapa aquecedora nas temperaturas de 60 e $80^\circ C$	48
4.10	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração da chapa aquecedora nas temperaturas de $60^\circ C$	49
4.11	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela temperatura ($^\circ C$) da amostra de rugosidade $R_a = 0.790176\mu m$	52
4.12	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $14^\circ C$	53
4.13	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $16^\circ C$	54
4.14	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $18^\circ C$	55
4.15	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $20^\circ C$	56
4.16	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 10 e com ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado e fita isolante $3M$	58
4.17	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 14 e com ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado e fita isolante $3M$	59
4.18	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 18 e com ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado e fita isolante $3M$	60

4.19	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 20 e com ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado e fita isolante 3M.	61
4.20	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela temperatura ($^{\circ}C$) de cada amostra de alumínio. Variando a temperatura em 10, 14, 18 e 20 $^{\circ}C$	62
4.21	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 14 $^{\circ}C$, do conjunto de amostra 1 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.	64
4.22	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 16 $^{\circ}C$, do conjunto de amostra 1 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.	65
4.23	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 18 $^{\circ}C$, do conjunto de amostra 1 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.	66
4.24	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 20 $^{\circ}C$, do conjunto de amostra 1 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.	67
4.25	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier nas temperaturas de 14 $^{\circ}C$, do conjunto de amostra 2 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.	68
4.26	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier nas temperaturas de 16 $^{\circ}C$, do conjunto de amostra 2 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.	69
4.27	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier nas temperaturas de 18 $^{\circ}C$, do conjunto de amostra 2 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.	70
4.28	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier nas temperaturas de 20 $^{\circ}C$, do conjunto de amostra 2 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.	71
4.29	Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela temperatura ($^{\circ}C$) de cada amostra de alumínio com caixa de isolamento de fontes calor externas modificada. Variando a temperatura em 14, 16, 18 e 20 $^{\circ}C$	72

Lista de Tabelas

4.1	Tabela das rugosidades medidas através do microscópio confocal do conjunto de amostras 1.	37
4.2	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação.	38
4.3	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação.	39
4.4	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 39^\circ C$	41
4.5	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 37,95^\circ C$	42
4.6	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 33,9^\circ C$	43
4.7	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 31,85^\circ C$	44
4.8	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 30,7^\circ C$	45
4.9	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação às temperaturas de 100, 150 e $200^\circ C$	47
4.10	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação às temperaturas de $60^\circ C$ e $80^\circ C$	48
4.11	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $60^\circ C$	49
4.12	Tabela das rugosidades medidas através do microscópio confocal do conjunto de amostras 2.	51
4.13	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $14^\circ C$	53

4.14	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $16^{\circ}C$.	54
4.15	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $18^{\circ}C$.	55
4.16	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $20^{\circ}C$.	56
4.17	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $10^{\circ}C$.	57
4.18	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $14^{\circ}C$.	58
4.19	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $18^{\circ}C$.	59
4.20	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $20^{\circ}C$.	60
4.21	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $14^{\circ}C$.	63
4.22	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $16^{\circ}C$.	64
4.23	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $18^{\circ}C$.	65
4.24	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $20^{\circ}C$.	66
4.25	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $14^{\circ}C$.	68
4.26	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $16^{\circ}C$.	69
4.27	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $18^{\circ}C$.	70
4.28	Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $20^{\circ}C$.	71

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	Rugosidade	4
2.1.1	Parâmetros de Avaliação da Rugosidade	5
2.2	Radiação do Corpo Negro	8
2.2.1	Radiância	16
2.2.2	Radiância do Corpo Real	19
3	Material e Métodos	21
3.1	Material	21
3.1.1	Amostras de alumínio para o experimento	21
3.1.2	Circuito de aquecimento e resfriamento	24
3.1.3	Chapa aquecedora e outros equipamentos	25
3.2	Métodos	27
3.2.1	Microscópio Confocal	27
3.2.2	Câmera térmica	29
3.3	Experimento	32
3.3.1	Experimento com bolsas térmicas	32
3.3.2	Experimento com chapa aquecedora	33
3.3.3	Experimento com circuito eletrônico e placa Peltier	34
4	Resultados e Discussão	37
4.1	Medida de radiância nas amostras de alumínio utilizando bolsas térmicas	37
4.2	Medida de radiância nas amostras de alumínio utilizando chapa aquecedora	46
4.3	Medida de radiância nas amostras de alumínio utilizando circuito eletrônico	50
4.3.1	Análise do comportamento da radiância e a invariabilidade da temperatura das amostras no decorrer de 25 minutos	51
4.3.2	Análise do comportamento da radiância com o ajuste do papel alumínio amassado e da fita isolante 3M	57
4.3.3	Análise do comportamento da radiância modificando o layout da caixa de isolamento	63
	Conclusão	75

Capítulo 1

Introdução

Pode-se dizer que a Física Aplicada mantém contato direto com outras áreas de conhecimento, tornando-se difícil ver a fronteira entre as áreas envolvidas. A Física Aplicada teve uma aceleração na área de materiais, especialmente devido às Guerras Mundias.

Um problema muito interessante na área de caracterização de materiais, e que já atraiu a atenção de muitos cientistas, é o fenômeno de radiação de corpos. Foi então, em 1817 que o físico francês Pierre Louis Dulong e o matemático francês Alexis Thérèse Petit publicaram os resultados que consideravam ser puramente a transferência de calor de radiação entre um bulbo e uma câmara esférica [1]. Isso aconteceu bem antes do conceito de corpo negro ser desenvolvido. Somente em 1860 o físico e matemático Gustav Robert Kirchhoff se interessou pela quantidade de energia de radiação que aparece em diferentes comprimentos de onda [2].

Em meados de 1879, o físico experimental australiano Josef Stefan reexaminou o estudo de Dulong e Petit, corrigindo seus cálculos. Ele descobriu que a potência emitida por unidade de área de um material que absorve toda a radiação incidente sobre ele, denominado corpo negro, era proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo. Foi então que essa relação combinou melhor com os resultados obtidos por Dulong e Petit, nascendo a sua famosa lei [3]. No entanto, a lei de Stefan não atraiu a atenção de muitos físicos. Ludwig Boltzmann, aluno de Stefan deu uma reviravolta e chegou a lei de Stefan-Boltzmann. Wilhem Wien em 1893 foi o primeiro a explicar algumas características do espectro do corpo negro e como Boltzmann, também aplicou a termodinâmica à radiação. Considerou o problema da radiação contida dentro de uma caixa de volume V em equilíbrio térmico e chegou à dependência da densidade com a frequência.

Por volta de 1900, havia duas formas definidas para a densidade de radiação, uma devido aos estudos de Wien, que trabalhava com pequenos comprimentos de onda e apontava que a densidade variava exponencialmente com a temperatura [4]. E outra, devido aos estudos de Rayleigh e Jeans que trabalhavam em grandes comprimentos de onda e indicavam que a densidade de radiação é proporcional à temperatura. No entanto, ambas as fórmulas falharam na região intermediária do espectro. Foi então que Max Planck sugeriu uma forma de interpolação entre estes resultados experimentais e obteve sua fórmula [5].

Corpos reais também emitem radiação a uma temperatura T , porém não correspondem a expressão de corpo negro. No entanto as características dos materiais interferem na radiação emitida, tais como a emissividade, os compostos químicos e sua superfície que é comumente caracterizada pela rugosidade [6].

A maneira com que a superfície de um material é tratada (dependendo das suas aplicações), diz muito sobre a qualidade dos produtos, por isso, que a rugosidade superfi-

cial é um fator importante averiguado por grandes empresas. A rugosidade é uma medida que expressa as variações topográficas superficiais composta por relevos e rebaixos de uma superfície. Esta medida é fundamental para o controle de qualidade dos produtos finais de grandes empresas, tais como industriais automobilísticas, aeronáuticas, metalúrgicas, entre outras. Há algumas técnicas para acessar a rugosidade das superfícies e elas se classificam em dois tipos, que são os métodos diretos e indiretos. No entanto, os métodos indiretos estão sendo cada vez mais empregados, pelo fato de não haver contato com a superfície do material [7]. Os métodos diretos, como o próprio nome já diz, são obtidos com o contato direto com a superfície do material à ser analisado através de um apalpador de um perfilômetro ou um rugosímetro [8]. Já os métodos indiretos, são feitos através de instrumentos ópticos, tais como o rugosímetro a laser ou o microscópio confocal, por exemplo [8].

Foi observado [9, 10] que as superfícies de ligas de alumínio resistem à tendência geral do aumento da emissividade com aumento da temperatura para superfícies metálicas na faixa de infravermelho, porém apenas o AL 7150 segue a tendência esperada, enquanto a emissividade das outras ligas diminui entre 600 e 700K e aumenta entre 700 e 800k e a emissividade de alumínio comercialmente puro (AL 1100) diminui monotonicamente com o aumento da temperatura. Eles [9, 10] utilizaram o método de termometria de radiação para medir a temperatura da superfície do alumínio em rápido movimento sem contato, que emprega a intensidade espectral da radiação térmica da superfície alvo. Neste estudo, apresentaram três métodos de termometria de radiação, porém o mais eficaz para medir a temperatura da superfície foi o método de termometria de radiação multiespectral (MRT).

A exploração da relação entre a emissividade das superfícies das ligas de alumínio e a rugosidade da superfície, também foram estudados [11]. Dois métodos são usados, um deles é o modelo matemático da termometria de radiação multiespectral para determinar a temperatura da superfície e o modelo de emissividade das medições de radiância, que consiste em requerer que novas constantes de emissividade sejam determinadas para cada topografia [11].

Etienne Brodu [12] relatou a influência da rugosidade no Tungstênio e Rênio na emissividade total. Ele sugere que o aumento da rugosidade a partir de uma superfície plana, irá progressivamente dar mais peso para as emissividades de longo comprimento de onda em comparação com o curto comprimento de onda.

Peng Wang [13] também estudou o efeito da temperatura e rugosidade na emissividade dos metais. A emissividade da superfície de um metal é uma importante quantidade que reflete a capacidade de radiação dos materiais. O trabalho utilizou um método combinacional de termopares e imagens térmicas para medir a emissividade do metal, onde descobriu que a emissividade de um metal aumenta com o aumento da temperatura e rugosidade.

Um outro método indireto para a análise de superfícies rugosas bastante conhecido é estudado pelo grupo de pesquisa da Universidade Federal Fluminense-ICEX a qual faço parte, são as análises dos padrões de Speckle [14]. Os padrões de Speckle são facilmente detectados ao se incidir um feixe laser na superfície de uma amostra. Ele se deve ao espalhamento causados pela rugosidade da superfície [15, 16, 17] e à interferência gerada no plano de observação. Ulf A. Persson [18] também propôs em seu estudo uma técnica para medição da rugosidade de superfície em regiões visíveis e do infravermelho (IR) através do contraste do padrão de Speckle. Porém ele relata um desvantagem deste método, pois o contraste de Speckle usado como parâmetro de rugosidade depende da função de distribuição de alturas da superfície.

Baseados nas vantagens e desvantagens dos métodos estudados até hoje e no crescimento industrial com aplicação do método indireto, está sendo proposto neste estudo um novo método para acessar a rugosidade superficial. A medida da radiância emitida por uma mostra de alumínio comercial [19] a uma temperatura T , na faixa de $3\mu m$ a $5\mu m$, através da câmera térmica, é sensível a rugosidade superficial.

Será avaliado neste presente trabalho a relação entre rugosidade superficial e a radiância capturada da superfície de materiais metálicos, particularmente do alumínio comercial. Para se iniciar o processo de medição da radiância é necessário conhecer a topografia e então medir rugosidade dos materiais via microscópio confocal, usando a norma DIN 4768 [20] que define métodos para caracterizar a superfícies dos materiais. Para se ter acesso a radiância de cada material, é necessário o uso de uma câmera térmica capaz de detectar radiação emitida por corpo a uma determinada temperatura T , na região do infravermelho. Com as análises e caracterização dos materiais será possível estudar o efeito da rugosidade superficial e variação da radiância capturada pela câmera térmica.

No Capítulo 2 foi feita uma breve introdução teórica. No Capítulo 3 são apresentados a montagem e o procedimento experimental, ao qual foi ajustado e modificado de acordo com a necessidade e precisão dos resultados. Os resultados e discussões são apresentados no Capítulo 4. No Capítulo 4.3.3 foram organizadas as principais conclusões do estudo, e por fim a bibliografia é apresentada.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Rugosidade

A medida de rugosidade é de extrema importância no controle de qualidade de diversas indústrias. No entanto, para entender melhor a forma com que a rugosidade superficial é medida, torna-se necessário conhecer e compreender o que a rugosidade representa. A rugosidade está presente em todas as superfícies e, numa indústria, ela é monitorada regularmente como parte do controle de qualidade do produto em questão. Em indústrias ópticas, por exemplo, as superfícies precisam ser muito lisas, como no caso dos vidros que transmitem melhor as imagens quando sua superfície está altamente polida. No caso de indústrias metalúrgicas, a análise da rugosidade tem um papel muito importante, posto que materiais necessitam de acabamentos distintos em função de sua aplicação.

A rugosidade é definida informalmente como sendo saliências e reentrâncias encontradas em peças de qualquer material, ou seja, são desvios encontrados em uma superfície real em comparação a uma superfície com sua forma ideal, que seria, portanto, sem rugosidade. Existem equipamentos capazes de medir a rugosidade superficial de forma direta ou indireta. Para o caso das medidas diretas, são feitas através do contato entre o equipamento e a superfície do objeto a ser medido, por exemplo, os perfilômetros mecânicos, que consistem de uma ponta de prova (chamada de apalpador) que está conectada a um computador, e seu sinal pode sofrer alterações devido à carga aplicada e às dimensões da ponta do apalpador. Já as medições de rugosidade que são classificadas como indiretas, ou seja, sem o contato direto com a superfície do material, são feitas a partir de instrumentos ópticos.

Instrumentos ópticos podem fazer uso de variadas fontes de luz, como leds e lasers, por exemplo. Quando um feixe de luz laser ilumina a superfície de uma amostra, esse feixe sofrerá um espalhamento difuso se esta superfície for muito rugosa. Por outro lado, para o caso de superfícies com menor rugosidade superficial, haverá um menor número de espalhadores. Uma técnica bastante utilizada com os espalhamentos provenientes das superfícies das amostras são os chamados padrões de Speckle [14] e através destes padrões foi possível desenvolver diferentes aplicações. Trabalhos já publicados pelo grupo de pesquisa [15, 16, 17, 21, 22, 23, 24] usam essa técnica para determinar a rugosidade superficial de um objeto.

Um outro equipamento capaz de calcular a rugosidade da superfície de um determinado material indiretamente, e o utilizado neste trabalho é o microscópio Confocal **LEICA® DCM3D**, que está disponível no Laboratório Multiusuários de Caracterização de Materiais (LMCM) do Instituto de Ciências Exatas da UFF, em Volta Redonda (ICEX-UFF). No

entanto, sua fonte de luz é baseada em LED.

2.1.1 Parâmetros de Avaliação da Rugosidade

Como as superfícies dos materiais apresentam perfis bastante diferentes entre si, e seja necessário dar um acabamento adequado, deve-se adotar um parâmetro para possibilitar a avaliação da rugosidade superficial.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua norma NBR ISO 4287 [25], visa especificar termos, definições e parâmetros para a determinação do estado da superfície pelo método de levantamento do perfil. O perfil de superfície é o perfil resultante da interseção da superfície real (superfície que limita o corpo e o separa do meio ambiente) e o plano específico, como pode ser visto na Figura 2.1.

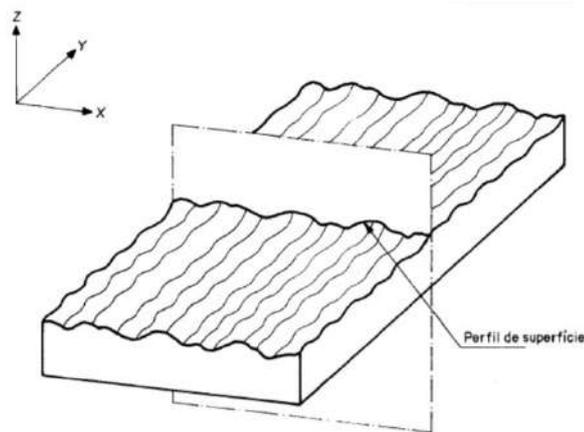


Figura 2.1: Perfil de superfície real [25].

Verificando o perfil representativo de uma superfície rugosa, há uma linha horizontal a qual será nomeada de linha média e é escolhida de forma que a variação de áreas em relação a esta linha seja zero. Os valores Z_{p_i} são os "picos" que estão acima da linha média e os valores Z_{v_i} são os "vales" que estão abaixo da linha média, como pode ser visto na Figura 2.2.

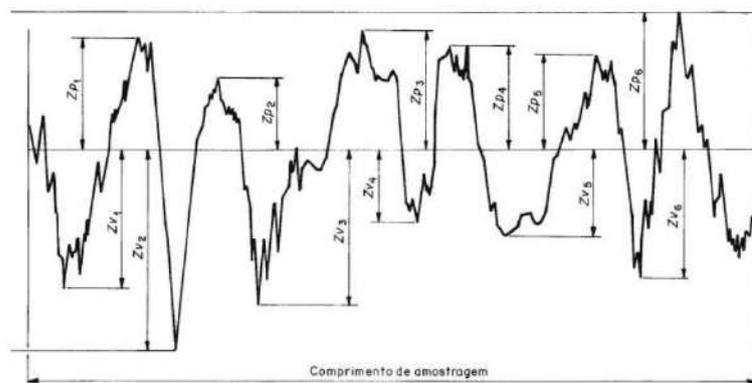


Figura 2.2: Exemplo do perfil de uma superfície rugosa [25].

Com base na análise de levantamento de perfil, existem vários parâmetros para a caracterização de rugosidade, tais como: desvio médio quadrático do perfil avaliado (R_q),

fator de assimetria (skewness), fator de achatamento (kurtosis), média aritmética (R_a), entre outros e é necessário conhecer tais parâmetros de rugosidade, para as respectivas aplicações nas operações industriais.

O desvio médio quadrático (R_q) é definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média dentro do percurso de medição, e sua equação é conhecida como

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z^2(x) dx}, \quad (2.1)$$

sendo L o comprimento da amostragem e $Z(x)$ é a altura do perfil em relação à linha média. Este parâmetro de rugosidade é empregada em superfícies onde o acabamento apresenta os riscos de usinagem bem orientados, como nos processos de torneamento e fresagem, por exemplo.

O parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo é a rugosidade média (R_a), sendo aplicável à maioria dos processos de fabricação. Por ter uma vasta utilização, grande parte dos equipamentos apresentam este parâmetro em suas configurações (de forma analógica ou digital eletrônica) [26]. A rugosidade média R_a (roughness average) é definida como sendo a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, em função do comprimento da linha média do perfil, dentro do comprimento de amostragem. Sua equação é estabelecida como

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx. \quad (2.2)$$

Na medição de rugosidade existe um valor determinado como **cutoff** (λ_c). Sabe-se que a superfície de determinados materiais podem ter um perfil periódico ou aperiódico. Para o caso de superfície com perfil aperiódico, o valor do cutoff tem relação com o grau de rugosidade média R_a a ser avaliado. A norma DIN 4768, sofreu várias evoluções e foi incorporada pela DIN EN ISO 4288 (Figura 2.3), onde temos valores tabelados com relação ao R_a e o cutoff que deverá ser utilizado.

Selection of cutoff λ_c				
DIN EN ISO 4288, ASME B46.1				
Periodic profiles	Nonperiodic profiles		Cutoff	Sampl./ Eval. length
R_{sm} (mm)	R_z (μm)	R_a (μm)	λ_c (mm)	l_r / l_n (mm)
over .013 up to .04	up to .1	up to .02	.08	.08 / .4
over .04 up to .13	over .1 up to .5	over .02 up to .1	.25	.25 / 1.25
over .13 up to .4	over .5 up to 10	over .1 up to 2	.8	.8 / 4
over .4 up to 1.3	over 10 up to 50	over 2 up to 10	2.5	2.5 / 12.5
over 1.3 up to 4	over 50 up to 200	over 10 up to 80	8	8 / 40

Figura 2.3: Tabela de seleção do comprimento de amostragem [27].

Usando o exemplo das amostras de alumínio utilizadas neste estudo, o cutoff aplicado para a maioria das medições de rugosidade foi de 0.8mm . Esse valor é geralmente o mais usual nas indústrias metalúrgicas. Neste trabalho, para verificar se a rugosidade superficial interfere na radiação emitida pelos corpos, foi utilizado apenas o parâmetro de rugosidade média (R_a) medido pelo microscópio confocal. Sendo assim, é necessário conhecer como a radiação é medida em diferentes materiais, que será descrito na seção subsequente.

2.2 Radiação do Corpo Negro

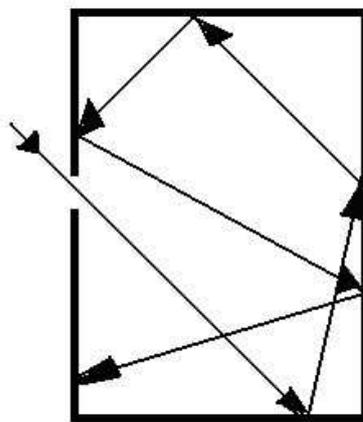
Os corpos interagem com a radiação que banha o espaço. Eles também podem emitir e absorver energia em forma de radiação [28]. A radiação está presente em nosso cotidiano, e as cores que enxergamos são provenientes do reflexo da luz no corpo e que cientificamente dizemos que nossos olhos detectam a radiação na região do visível do espectro eletromagnético. No entanto, a radiação emitida por corpos a uma temperatura de $300K$ está na região infravermelha do espectro eletromagnético [29] e possui comprimento de onda maior que $750nm$ (e menor que $1mm$). Esta radiação não é visível para os olhos humanos. Um aspecto interessante a ser observado é quando elevamos a temperatura de um corpo acima da temperatura absoluta. Os corpos aparentam ter luminosidade própria, podendo ser visto em uma sala escura, pois começa a emitir radiação na região do visível, onde seu comprimento de onda varia entre $400nm$ e $750nm$ [29]. Um bom exemplo para tal fenômeno é o carvão mineral, que na temperatura ambiente está emitindo radiação da região do infravermelho. Ao aquecê-lo, observa-se uma mudança em sua coloração, passando da cor preta ao rubro ou vermelho. Isso indica que está a uma temperatura alta o suficiente para que a radiação emitida se encontre na região do visível, sendo possível visualizar a olho nu.

Existe um corpo que emite espectros térmico de caráter universal. Esse corpo é chamado de corpo negro, ou seja, é um corpo físico idealizado que absorve toda a radiação eletromagnética incidente sobre ele. No entanto, quando este corpo está em equilíbrio térmico, se torna um emissor ideal, isto é, a radiação eletromagnética é emitida em todos os comprimentos de onda. Pode-se dizer que um corpo negro, além de ser um excelente absorvedor, também é um excelente emissor de radiação eletromagnética.

Para entender as características de um corpo idealizado (absorve e emite radiação eletromagnética), seguiremos um estudo, onde introduziremos os cálculos para obter a quantidade de radiação emitida por eles em equilíbrio térmico.

Sendo assim, iremos supor que haja radiação eletromagnética em equilíbrio térmico dentro de um caixa de volume V (Fig.2.4), do qual as paredes estão a uma temperatura absoluta T .

Figura 2.4: Representação esquemática de um corpo negro.



Fonte: Modificado [28].

Dado que estamos lidando com radiação eletromagnética, o campo elétrico \vec{E} satisfaz a equação de onda

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (2.3)$$

Nesta situação iremos negligenciar os efeitos das paredes da caixa, então a função de onda $\vec{E}(\vec{r}, t)$ da partícula é então descrita pela solução da onda plana na forma

$$E = A e^{i(\vec{k}\vec{r} - wt)} = E(\vec{r}) e^{-iwt}, \quad (2.4)$$

com propagação da onda na direção especificada pelo vetor de onda \vec{k} , que tem amplitude constante A e frequência angular w . Supondo que a caixa tenha comprimento L , sendo $L \gg \lambda$ e imaginando que as ondas estejam saltando para frente e para trás dentro dela, a função de onda ψ deve satisfazer certas condições de contorno. O campo elétrico da onda eletromagnética deve ser zero nas paredes da caixa, ou seja, negligenciamos a presença de qualquer parede da caixa. Logo a função de onda deve satisfazer as condições

$$\begin{cases} \psi(x + L_x, y, z) = \psi(x, y, z) \\ \psi(x, y + L_y, z) = \psi(x, y, z) \\ \psi(x, y, z + L_z) = \psi(x, y, z) \end{cases} \quad (2.5)$$

O fato de considerarmos a função de onda a mesma em qualquer um dos paralelepípedos não deve afetar a física de interesse no volume em consideração se suas dimensões forem grandes em comparação com o comprimento de onda de de Broglie λ . Logo, podemos escrever a Equação de onda (2.3), em termos das componentes do vetor de onda \vec{k}

$$\psi = e^{i\vec{k}\vec{r}} = e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)}, \quad (2.6)$$

substituindo na Equação (2.5) temos

$$\begin{aligned} k_x(x + L_x) &= k_x x + 2\pi n_x \\ k_x x + k_x L_x &= k_x x + 2\pi n_x \\ k_x &= \frac{2\pi n_x}{L_x}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Analogamente,

$$k_y = \frac{2\pi n_y}{L_y}, \quad k_z = \frac{2\pi n_z}{L_z}.$$

Sendo n_x, n_y, n_z qualquer conjunto de inteiros. O vetor de onda \vec{k} satisfaz a seguinte condição

$$k = \frac{w}{c}, \quad k \equiv |\vec{k}| = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2).$$

No entanto, estamos interessados nos valores positivos de n_x, n_y, n_z , logo iremos considerar apenas $\frac{1}{8}$ da esfera de raio a do diagrama tridimensional. O volume de uma casca esférica de raio a e espessura da é $4\pi a^2 da$ e, portanto, o número de modos no octante é

$$\rho_k dk = \frac{1}{8} 4\pi a^2 da. \quad (2.8)$$

sabendo que o comprimento de onda é $\lambda = \frac{2L}{a}$ e sendo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ o módulo do vetor de onda do modo de oscilação, então $k = \frac{\pi a}{L}$, logo

$$\begin{aligned}\rho_k dk &= \frac{1}{8} 4\pi \left(\frac{Lk}{\pi}\right)^2 \frac{L}{\pi} dk \\ &= \frac{L^3 k^2}{2\pi^2} dk,\end{aligned}$$

como $V = L^3$, temos que

$$\rho_k dk = \frac{V}{2\pi^2} k^2 dk. \quad (2.9)$$

Optando pela transformação da Equação (2.9) em termos da frequência angular, admitimos que o módulo do vetor de onda seja $k = \frac{2\pi w}{2\pi c}$, assim

$$\begin{aligned}\rho_k dk &= \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2\pi w}{2\pi c}\right)^2 \frac{2\pi}{2\pi c} dw \\ &= \frac{V}{2} \frac{8\pi w^2}{(2\pi c)^3} dw\end{aligned} \quad (2.10)$$

Para deduzir o número de onda por unidade de volume no intervalo de $[w, w + dw]$, multiplicamos a expressão por 2, pois uma onda eletromagnética pode estar em dois estados distintos de polarização, logo

$$\rho_k dk = \frac{8\pi w^2}{(2\pi c)^3} dw. \quad (2.11)$$

Para cada grau de liberdade, concedemos $\frac{1}{2}kT$ de energia. Isso ocorre, quando esperamos tempo suficiente para que se permita a troca de energia entre os modos independentes das oscilações. Dessa forma, a densidade de energia de radiação por unidade do intervalo da frequência angular por unidade de volume é dada por

$$u(w, T)dw = \bar{E}n(w)dw, \quad (2.12)$$

onde $n(w)dw$ é o número de onda por unidade de volume. Inserindo a Equação (2.11) em (2.12), obtemos

$$u(w, T)dw = \bar{E} \frac{8\pi w^2}{(2\pi c)^3} dw, \quad (2.13)$$

como a energia média de um oscilador é $\bar{E} = k_B T$, logo

$$u(w, T)dw = k_B T \frac{8\pi w^2}{(2\pi c)^3} dw, \quad (2.14)$$

que é conhecida como a Lei de Rayleigh-Jeans. No entanto, este resultado é ruim! A densidade de energia de radiação diverge em altas frequências, ou seja,

$$\int_0^\infty k_B T \frac{8\pi w^2}{(2\pi c)^3} dw \rightarrow \infty$$

Catástrofe Ultravioleta

A fórmula de Rayleigh-Jeans não explica todo o comportamento da radiação do corpo negro. Foi então que Max Planck sugeriu que um oscilador harmônico não podia ter qualquer energia, mas somente em múltiplos integrantes de uma energia quantizada $\epsilon = \hbar\omega = \hbar ck$. Lembrando que estes osciladores estão em equilíbrio térmico em qualquer temperatura T .

Utilizando a distribuição de Boltzmann para determinar a ocupação esperada dos modos em equilíbrio térmico, a probabilidade que um único modo tenha energia $\epsilon_n = n\hbar\omega$ é dada usando o fator de Boltzmann, onde

$$p(n) = \frac{e^{-\frac{E_n}{k_B T}}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{E_n}{k_B T}}}. \quad (2.15)$$

Sendo assim a energia média do oscilador será

$$\begin{aligned} \bar{E}_w &= \sum_{n=0}^{\infty} E_n p(n) = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n\hbar\omega e^{-\frac{n\hbar\omega}{k_B T}}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{n\hbar\omega}{k_B T}}} \\ &= \hbar\omega \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n e^{-\frac{n\hbar\omega}{k_B T}}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{n\hbar\omega}{k_B T}}} \\ &= \epsilon \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n e^{-\beta n\epsilon}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta n\epsilon}}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

onde $\beta = \frac{1}{k_B T}$.

Nesta situação fótons (pacote de onda que transporta uma quantidade fixa de energia $E = h\nu$, sendo h a constante de Planck e ν a frequência) são continuamente absorvidos e reemitidos pelas paredes da caixa sendo o número total de fótons não fixos, mas depende da temperatura T das paredes [28].

O estado s de cada fóton pode ser especificado pela magnitude e direção de seu momento e pela direção de polarização do seu campo elétrico. O campo de radiação existente em equilíbrio térmico dentro da caixa é completamente descrito se soubermos o número médio n_s do fóton de cada estado possível.

Considerando então o caso de temperatura arbitrária T e calculando para vários casos de interesse o número médio \bar{n}_s da partícula no estado s

$$\bar{n}_s = \frac{\sum_{n_1, n_2, \dots} n_s e^{-\beta(n_1\epsilon_1 + n_2\epsilon_2 + \dots + n_s\epsilon_s + \dots)}}{\sum_{n_1, n_2, \dots} e^{-\beta(n_1\epsilon_1 + n_2\epsilon_2 + \dots + n_s\epsilon_s + \dots)}} \quad (2.17)$$

Observa-se que \bar{n}_s é o segundo termo da Equação (2.16). Para facilitar o entendimento e os cálculos este termo será calculado separadamente. Então, somando primeiramente todos os possíveis valores de n_s e usando a propriedade multiplicativa da função exponencial, temos

$$\bar{n}_s = \frac{\sum_{n_s} n_s e^{-\beta n_s \epsilon_s} \sum_{n_1, n_2, \dots}^{(s)} e^{-\beta(n_1\epsilon_1 + n_2\epsilon_2 + \dots)}}{\sum_{n_s} e^{-\beta n_s \epsilon_s} \sum_{n_1, n_2, \dots}^{(s)} e^{-\beta(n_1\epsilon_1 + n_2\epsilon_2 + \dots)}} \quad (2.18)$$

A estatística de BE (Bose-Einstein) são partículas indistinguíveis, de modo que a mera especificação dos números (n_1, n_2, n_3, \dots) é suficiente para especificar o estado do gás. Neste caso, por exemplo, quando consideramos partículas de fótons dentro de uma caixa de volume V , uma vez que os fótons podem ser prontamente absorvidos e emitidos

pelas paredes. O número (n_1, n_2, n_3, \dots) assume aqui todos os valores de $n_r = 0, 1, 2, \dots$ para cada r , sem qualquer restrição adicional, então a soma do numerador e denominador são iguais e se cancelam, logo

$$\bar{n}_s = \frac{\sum_{n_s} n_s e^{-\beta n_s \epsilon_s}}{\sum_{n_s} e^{-\beta n_s \epsilon_s}}. \quad (2.19)$$

Temos que

$$\bar{n}_s = \frac{\left(\frac{-1}{\beta}\right) \left(\frac{\partial}{\partial \epsilon_s}\right) \sum_{n_s} e^{-\beta n_s \epsilon_s}}{\sum_{n_s} e^{-\beta n_s \epsilon_s}}. \quad (2.20)$$

Como estamos tratando de estatística de fótons, temos que a função partição (grandeza que descreve as propriedades estatísticas de um sistema em equilíbrio termodinâmico) é dada por

$$Z = \sum_R e^{-\beta(n_1 \epsilon_1 + n_2 \epsilon_2 + \dots)}, \quad (2.21)$$

lembrando que o somatório é sobre todos os valores de $n_s = 0, 1, 2, \dots$ para cada s . Então, há a possibilidade de escrever a Equação (2.20) em termos da função partição, que ficaria como

$$\bar{n}_s = \frac{1}{Z} \left[\left(\frac{-1}{\beta}\right) \left(\frac{\partial}{\partial \epsilon_s}\right) Z \right], \quad (2.22)$$

reescrevendo a expressão acima, obtemos

$$\bar{n}_s = -\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \ln Z, \quad (2.23)$$

ou

$$\bar{n}_s = -\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \ln \left(\sum e^{-\beta n_s \epsilon_s} \right) \quad (2.24)$$

Série Geométrica

A série geométrica

$$\sum_{n=1}^{\infty} ar^{n-1} = a + ar + ar^2 + \dots,$$

é convergente se $|r| < 1$ e sua soma é

$$\sum_{n=1}^{\infty} ar^{n-1} = \frac{a}{a-r}.$$

Se $|r| \geq 1$, a série geométrica é divergente.

Logo, escrevendo o somatório da Equação (2.24) como uma série geométrica temos

$$\begin{aligned} \sum_{n_s=0}^{\infty} e^{-\beta n_s \epsilon_s} &= 1 + e^{-\beta n_s \epsilon_s} + e^{-2\beta n_s \epsilon_s} + \dots \\ &= \frac{1}{1 - e^{-\beta n_s \epsilon_s}}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Retornando a Equação (2.24), obtemos então

$$\begin{aligned}
 \bar{n}_s &= -\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \ln \left(\frac{1}{1 - e^{-\beta n_s \epsilon_s}} \right) \\
 &= -\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \left[\ln 1 - \ln(1 - e^{-\beta n_s \epsilon_s}) \right] \\
 &= \frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \ln \left(1 - e^{-\beta n_s \epsilon_s} \right) \\
 &= \frac{1}{\beta} \left[\frac{1}{1 - e^{-\beta \epsilon_s}} \left(-e^{-\beta \epsilon_s} \right) (-\beta) \right]
 \end{aligned}$$

Assim,

$$\bar{n}_s = \frac{e^{-\beta \epsilon_s}}{1 - e^{-\beta \epsilon_s}} = \frac{1}{e^{\beta \epsilon_s} - 1}. \quad (2.26)$$

Aplicando a Equação (2.26) em (2.16), obtemos

$$\bar{E}_w = \frac{\epsilon_s}{e^{\beta \epsilon_s} - 1}, \quad (2.27)$$

que é a energia média do oscilador.

Temos que $\bar{u}(w; T)dw$ denota a energia média por unidade de tempo (isto é, a densidade de energia média) dos fótons em ambas direções de polarização no intervalo de frequência entre w e $w + dw$, igualmente mostrada na Equação (2.12). Logo, cada fóton deste tipo tem uma energia $\epsilon_s = \hbar w$ e obtém-se

$$\begin{aligned}
 \bar{u}(w; T)dw &= \frac{8\pi\hbar}{(2\pi c)^3} \frac{w^3 dw}{e^{\beta \hbar w} - 1} \\
 &= \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \frac{w^3 dw}{e^{\beta \hbar w} - 1},
 \end{aligned} \quad (2.28)$$

esta Equação (2.28) é conhecido como a distribuição de Planck.

Observamos na Equação acima, um parâmetro adimensional significativo, ao qual iremos reescrever da seguinte forma,

$$\eta \equiv \beta \hbar w = \frac{\hbar w}{k_B T} \quad (2.29)$$

que é a proporção de energia do fóton por energia térmica. Sendo assim, pode-se escrever a densidade de energia média em função desse parâmetro como

$$\begin{aligned}
 \bar{u}(w; T)dw &= \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \left(\frac{k_B T \eta}{\hbar} \right)^3 \frac{d \left(\frac{k_B T \eta}{\hbar} \right)}{e^\eta - 1} \\
 &= \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \left(\frac{k_B T}{\hbar} \right)^4 \frac{\eta^3 d\eta}{e^\eta - 1}.
 \end{aligned} \quad (2.30)$$

Pode-se também calcular a densidade de energia total, a qual integra-se a Equação (2.30) sobre todas as frequências, logo

$$\begin{aligned}
\bar{u}_0(T) &= \int_0^\infty \bar{u}(w, T) dw \\
&= \int_0^\infty \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \left(\frac{k_B T}{\hbar} \right)^4 \frac{\eta^3 d\eta}{e^\eta - 1} \\
&= \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \left(\frac{k_B T}{\hbar} \right)^4 \int_0^\infty \frac{\eta^3 d\eta}{e^\eta - 1}
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Para facilitar a visualização, a integral da Equação (2.31) será calculada separadamente. Pode-se avaliar a integral expandindo-a em uma série. Escreve-se a seguir

$$\frac{x^3}{e^x - 1} \cdot \frac{e^{-x}}{e^{-x}} = \frac{e^{-x}}{1 - e^{-x}} = e^{-x} x^3 (1 + e^{-x} + e^{-2x} + \dots) \tag{2.32}$$

Série Maclaurin

A série Maclaurin é dada por

$$\frac{1}{1 - y^n} = \sum_{n=0}^{\infty} y^n = 1 + y + y^2 + y^3 + \dots$$

Através da série de Maclaurin, $y = e^{-x}$, então obtém-se a seguinte expressão

$$\frac{1}{1 - e^{-x}} = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-xn} = (1 + e^{-x} + e^{-2x} + \dots). \tag{2.33}$$

Retornando a Equação (2.32), obtém-se:

$$\begin{aligned}
\frac{x^3}{e^x - 1} &= e^{-x} x^3 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-xn} \\
&= \sum_{n=1}^{\infty} e^{-xn} x^3.
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Logo, a integral é reescrita como:

$$I = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^\infty e^{-xn} x^3 dx, \tag{2.35}$$

fazendo uma substituição simples, onde $\zeta = nx$, $d\zeta = ndx$, então

$$I = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^\infty e^{-\zeta} \left(\frac{\zeta}{n} \right)^3 \frac{1}{n} d\zeta \tag{2.36}$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^\infty \frac{e^{-\zeta} \zeta^3}{n^4} d\zeta \tag{2.37}$$

Função Gamma

A função Gamma é definida como

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx.$$

Se n for um inteiro positivo, então

$$\Gamma(n) = (n-1)!.$$

A relação geral leva à

$$\Gamma(n) = (n-1)\Gamma(n-1).$$

Reescrevendo a Equação (2.37) e utilizando a definição da função Gamma descrita anteriormente, obtém-se

$$I = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \int_0^{\infty} e^{-\zeta} \zeta^3 d\zeta, \quad (2.38)$$

observando o expoente de ζ na integral, com a definição da função gama, tem-se que $n = 4$ e assim,

$$I = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \Gamma(4). \quad (2.39)$$

Como n é um número inteiro positivo, então $\Gamma(4) = (4-1)! = 6$. Assim,

$$I = 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \quad (2.40)$$

Esta série converge rapidamente e pode-se facilmente ser avaliada numericamente. O valor exato pode ser encontrado no modo direto por integração de contorno no plano complexo. A soma da Equação (2.40) sugere uma soma dos resíduos. Então, para avaliar esta soma, temos a função $(tg\pi z)^{-1}$, que tem polos simples em todos os valores da integral. Logo

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} &= \frac{1}{2i} \int_C \frac{dz}{z^4 tg\pi z} \\ 2i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} &= \frac{1}{2} \int_C \frac{dz}{z^4 tg\pi z}. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Expandindo o integrando em potência de z sobre $z = 0$, apenas termos envolvendo z^{-1} contribuem para a integral, enquanto as outras potências de z não contribuem. Então,

$$\frac{1}{z^4 tg\pi z} = \frac{1}{z^4 \left[\pi z + \frac{1}{3} \pi^3 z^3 + \frac{2}{15} \pi^5 z^5 + \dots \right]} = \frac{-\pi^3}{45} \frac{1}{z} + \dots \quad (2.42)$$

Retornando a Equação (2.41), obtém-se

$$\begin{aligned}
2i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} &= \frac{1}{2} \int_C \frac{-\pi^3}{45} \frac{1}{z} dz \\
&= \frac{1}{2} (2\pi i) \left(\frac{-\pi^3}{45} \right) \\
&= 2i \left(\frac{\pi^4}{90} \right) \\
\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} &= \frac{\pi^4}{90}, \tag{2.43}
\end{aligned}$$

logo, a Equação (2.40) é dado por

$$I = 6 \cdot \frac{\pi^4}{90} = \frac{\pi^4}{15}. \tag{2.44}$$

Portanto, a expressão explícita para a densidade de energia total é da forma

$$\bar{u}_0(T) = \frac{(k_B T)^4 \pi^2}{\hbar^3 c^3} \frac{\pi^2}{15}, \tag{2.45}$$

Como trata-se de um corpo negro idealizado (uma caixa com paredes em equilíbrio térmico (Fig.2.4)), pode-se fazer um furo nesta caixa, onde haverá um fluxo de energia escapando desta extremidade, por unidade de área e por unidade de tempo, logo

$$\phi = \langle c_{\perp} \rangle \cdot \frac{E}{V}, \tag{2.46}$$

sendo $\frac{E}{V}$ a densidade de energia de radiação total. Sendo assim, todos os fótons têm velocidade c , e a média da componente da velocidade perpendicular ao buraco pode ser calculada como [30],

$$\langle c_{\perp} \rangle = c \times \frac{1}{4\pi} \int_0^{\infty} 2\pi \sin\theta \cos\theta d\theta = \frac{c}{4}, \tag{2.47}$$

logo

$$\phi = \frac{c}{4} \frac{E}{V} = \frac{c}{4} \cdot \bar{u}_0(T) = \frac{\pi^2 k_B^4 T^4}{60 \hbar^3 c^2}. \tag{2.48}$$

Este resultado é conhecido como a lei de Stefan-Boltzmann para radiação do corpo negro $\phi = \sigma T^4$, e

$$\sigma = \frac{\pi^2 k_B^4}{60 \hbar^3 c^2} \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4, \tag{2.49}$$

onde k_B é a constante de Boltzmann, \hbar é a constante de Planck sobre 2π e c é a velocidade da luz no vácuo.

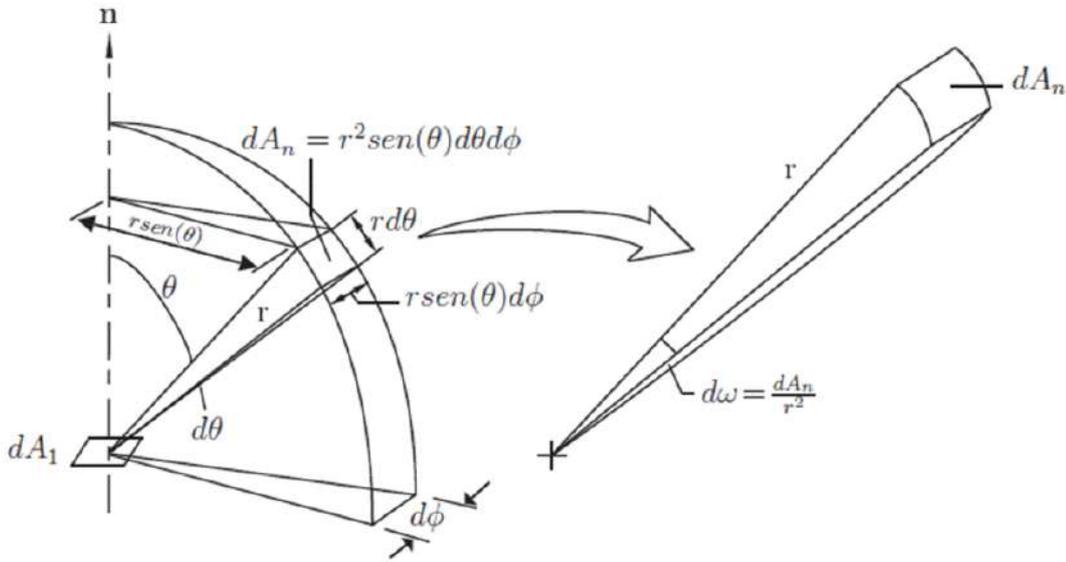
2.2.1 Radiância

Em radiometria, a radiância L_T ($\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}$) é definida como quantidade de radiação eletromagnética por unidade de área, por unidade de tempo, por unidade de ângulo sólido emitido, refletido, transmitido ou recebido. Já a radiância espectral $L_{T,w}$ é definida como

a radiância por unidade de frequência ν ($W/m^2 \cdot sr \cdot Hz$) ou comprimento de onda λ ($W/m^2 \cdot sr \cdot nm$), dependendo se o espectro é considerado uma função da frequência ou do comprimento de onda.

Calcular a radiância é algo muito útil, pois indica o quanto da potência emitida, refletida, transmitida ou recebida por uma superfície será captado por um sistema óptico, ao qual se encontra em um ângulo de visão especificado. Sendo assim, este ângulo de visão é conhecido como ângulo sólido, que é definido como a medida da quantidade do campo de visão de algum ponto particular, que um determinado objeto cobre.

Figura 2.5: Ângulo sólido entre dA_n e um ponto de dA_1 pelo sistema de coordenadas esféricas.



Fonte: Incropera [31].

A área dA_1 emite radiação em uma determinada direção. Essa direção pode ser definida pelos ângulos de zênite e azimutal, representados respectivamente por (θ, ϕ) . De acordo com a Figura (2.5) o ângulo sólido é definido por $d\omega = \frac{dA_n}{r^2}$, no entanto, para que não haja confusão com a nomenclatura, faremos $d\omega = d\Omega$, logo

$$d\Omega = \frac{dA_n}{r^2} = \frac{r^2 \text{sen}(\theta) d\theta d\phi}{r^2} = \text{sen}(\theta) d\theta d\phi. \quad (2.50)$$

Supondo que a área dA_1 seja uma superfície opaca e difusa, sua radiação é emitida igualmente em todas as direções sobre o hemisfério hipotético. Logo, o ângulo sólido neste caso pode ser obtido através da integral da Equação (2.50),

$$\begin{aligned} \int d\Omega &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \text{sen}(\theta) d\theta d\phi \\ \Omega &= 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \text{sen}(\theta) d\theta = 2\pi, \end{aligned} \quad (2.51)$$

onde sua unidade é escrita em *esferorradiano* (sr).

- **Radiância Espectral do Corpo Negro** ($L_{b,\Omega,\lambda}$ ou $L_{b,\Omega,w}$): A seguir iremos determinar o cálculo da radiância espectral, que se escreve como:

$$L_{b,\Omega,w} = \frac{dQ}{dA_1 \cos(\theta) d\Omega dw}, \quad (2.52)$$

usando o resultado da Equação (2.50), obtemos

$$L_{b,\Omega,w} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi = \frac{dQ}{dA_1 dw} = dq_w, \quad (2.53)$$

A Equação (2.53), se refere ao fluxo diferencial de radiação espectral. Então

$$\begin{aligned} q_w &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_{b,\Omega,w} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi \\ &= 2\pi L_{b,\Omega,w} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \\ &= \pi L_{b,\Omega,w}, \end{aligned} \quad (2.54)$$

como o fluxo de energia é definido por $\frac{c}{4}\bar{u}$, então

$$\begin{aligned} L_{b,\Omega,w} &= \frac{c}{4}\bar{u} \\ &= \frac{c}{4} \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \frac{w^3}{e^{\beta\hbar w} - 1} \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$= \frac{\hbar w^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{e^{\beta\hbar w} - 1}. \quad (2.56)$$

A Equação (2.56) é conhecida como a radiância espectral do corpo negro em função da frequência angular.

- **Radiância** ($L_{b,\Omega}$):

Para calcular a radiância do corpo negro, basta integrar a Equação (2.56) sobre todas as frequências angulares. Sendo assim,

$$\begin{aligned} L_{b,\Omega} &= \int_0^\infty \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \frac{w^3}{e^{\beta\hbar w} - 1} \\ &= \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \left(\frac{k_B T}{\hbar} \right)^4 \int_0^\infty \frac{\eta^3 d\eta}{e^\eta - 1}, \end{aligned} \quad (2.57)$$

utilizando o resultado da Equação (2.44), obtém-se

$$\begin{aligned} L_{b,\Omega} &= \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \left(\frac{k_B T}{\hbar} \right)^4 \frac{\pi^4}{15} \\ &= \frac{\pi^2 k_B^4 T^4}{60 \hbar^3 c^2}, \end{aligned} \quad (2.58)$$

onde $\hbar = 1.054 \times 10^{-34} J \cdot s$, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ e $c = 2.99 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$.

2.2.2 Radiância do Corpo Real

Como visto anteriormente, o corpo real não se comporta como um corpo negro, pois não há absorção completa da radiação incidida sobre ele. Há algumas propostas para se entender esses corpos, como por exemplo, o conceito de corpos cinza. Esses objetos são corpos idealizados que absorvem parcialmente a radiação eletromagnética incidente [6], mas ainda retêm propriedades como independência da absorptividade e emissividade do comprimento de onda [32], as vezes também chamados de pseudo-corpos cinza [33], quando apresentam a absorptividade e emissividade constante para certa faixa de comprimento de onda e temperatura. Corpos reais, por outro lado, têm emissividade que depende de fatores como material, rugosidade superficial, oxidação ou corrosão da superfície, ângulo de visão, temperatura e comprimento de onda [32].

Uma maneira de modelar o comportamento para materiais reais é considerar que a absorptividade incorpora as propriedades desconsideradas em um corpo negro. Assim, a absorptividade depende de vários fatores assim como da frequência (ou comprimento de onda) e da temperatura T .

Logo, pode-se modelar a radiância espectral emitida por um corpo real (r) como:

$$L_{r,w,T} = a(w, T) \frac{\hbar w^3}{4\pi^2 c^2 e^{\beta\hbar w} - 1}, \quad (2.59)$$

onde w é a frequência angular. Como habitualmente os instrumentos de medida captam a radiação em um intervalo de frequências $[w_1, w_2]$ ou comprimentos de onda $[\lambda_1, \lambda_2]$. Assim a radiância total entre λ_1 e λ_2 , ou w_1 e w_2 é:

$$L_{r,T} = \int_{w_1}^{w_2} a(w, T) \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \frac{w^3 dw}{e^{\beta\hbar w} - 1} \quad (2.60)$$

Esse modelo de corpos reais multiplica a absorptividade pela função de Planck. A absorptividade a pode ser estimada para vários materiais e considerando a radiação eletromagnética na região do infravermelho, $a \approx 0.98$ para substâncias como o *lampblack* (material produzido pela combustão incompleta de produtos de petróleo pesados, como alcatrão FCC, alcatrão de carvão, alcatrão de craqueamento de etileno ou matéria vegetal), por outro lado, $a \approx 0.01$ para metais como ouro com uma superfície bem polida.

Considerando agora a emissão de radiação por um corpo real, o termo absorptividade será substituído pela emissividade. O valor de emissividade varia entre 0 e 1, sendo 1 apenas para o corpo negro, o qual é um perfeito radiador. Uma forma de se obter a emissividade é calcular a razão entre a radiância de um corpo real e a radiação térmica de um corpo negro e um corpo real a uma mesma temperatura T :

$$\epsilon = \frac{L_{r,T}}{L_{b,T}}. \quad (2.61)$$

onde $L_{b,T}$ é a radiância de corpo negro entre as mesmas frequências w_1 e w_2 , ou seja:

$$L_{b,T} = \int_{w_1}^{w_2} \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \frac{w^3 dw}{e^{\beta\hbar w} - 1} \quad (2.62)$$

Issam Mudawar e Chang-Da Wen [9, 10, 11] desenvolveram alguns estudos para determinar a emissividade característica de materiais com superfícies rugosas. Em seu artigo [9], eles mostraram a dependência do comprimento de onda, da temperatura e da rugosidade superficial para várias ligas de alumínio. Percebe-se a variedade de comportamentos, dependendo do modelo de emissividade adotado. Com isso conclui-se que há dificuldade em se obter o valor "correto" de deste parâmetro, e daí a dificuldade de relacioná-lo com a rugosidade superficial em particular. Destaca-se que com essa dificuldade é compreensível a dificuldade de se obter a temperatura correta de determinado material, sem considerar outras questões relevantes.

A radiância captada por um detector, como o de uma câmera térmica por exemplo, quando apontada para uma amostra de um material real, possui várias componentes:

$$L_{r,T}^{captada} = L_{r,T}^{emitida} + L_{r,T}^{refletida} + L_{r,T}^{espalhada}, \quad (2.63)$$

onde $L_{r,T}^{emitida}$ é a que realmente nos interessa. $L_{r,T}^{refletida}$ é a radiância refletida pela superfície da amostra, cuja origem são outros corpos emitindo radiação. Por último, temos $L_{r,T}^{espalhada}$ que é devida ao espalhamento de radiação pela atmosfera e absorção por H_2O , CO_2 , partículas suspensas como poeira e etc [9]. Obviamente, para as medidas procuram-se condições tais que se possam desprezar as componentes $L_{r,T}^{refletida}$ e $L_{r,T}^{espalhada}$ da radiação. Para isso montagens cada vez mais apropriadas, realizadas em laboratório, ambiente com controle de temperatura, umidade, e pouca (ou idealmente nenhuma poeira) e ainda sistemas para melhor isolar as amostras, a fim de desprezamos $L_{r,T}^{refletida}$ e $L_{r,T}^{espalhada}$.

A câmera térmica tem um detector na faixa de comprimento de onda de $3 - 5\mu m$ e através dela é possível medir a radiância $L_{r,T}^{captada}$. Desta forma pode-se estimar a emissividade do material. A fim de avaliarmos $L_{r,T}^{captada}$, medimos a mesma oriunda de uma de nossas amostras em uma dada temperatura T . A fim de se obter o valor $L_{b,T}$ foi feita uma simulação na linguagem de programação C , para que fosse possível estimar o valor de emissividade medida pela câmera e verificar se o valor de radiância está coerente com o esperado.

Através da Equação (2.61) vê-se que emissividade pode ser estimada a partir da radiação de um corpo negro e um corpo real. Logo, tendo tais valores da radiância do corpo negro (calculado) e a do corpo real (medido pela câmera) a uma temperatura de $303K$, encontra-se o valor de emissividade de $0,03908$.

Comparando com o resultado teórico vemos uma proximidade dos valores, já que a emissividade do alumínio rugoso tabelado é aproximadamente $0,04 - 0,06$ [34], sendo assim, encontrou-se um valor bem satisfatório. Desta forma, a câmera térmica tem a possibilidade de calcular a emissividade do material.

Capítulo 3

Material e Métodos

Neste Capítulo serão abordadas as etapas realizadas para medir a variação da radiância das amostras de alumínio, além do procedimento de preparação da superfície necessária para a realização das medidas de rugosidade e montagem estrutural dos experimentos.

3.1 Material

3.1.1 Amostras de alumínio para o experimento

As amostras utilizadas para análise no experimento são de alumínio comercial a qual foram dispostas em dois conjuntos.

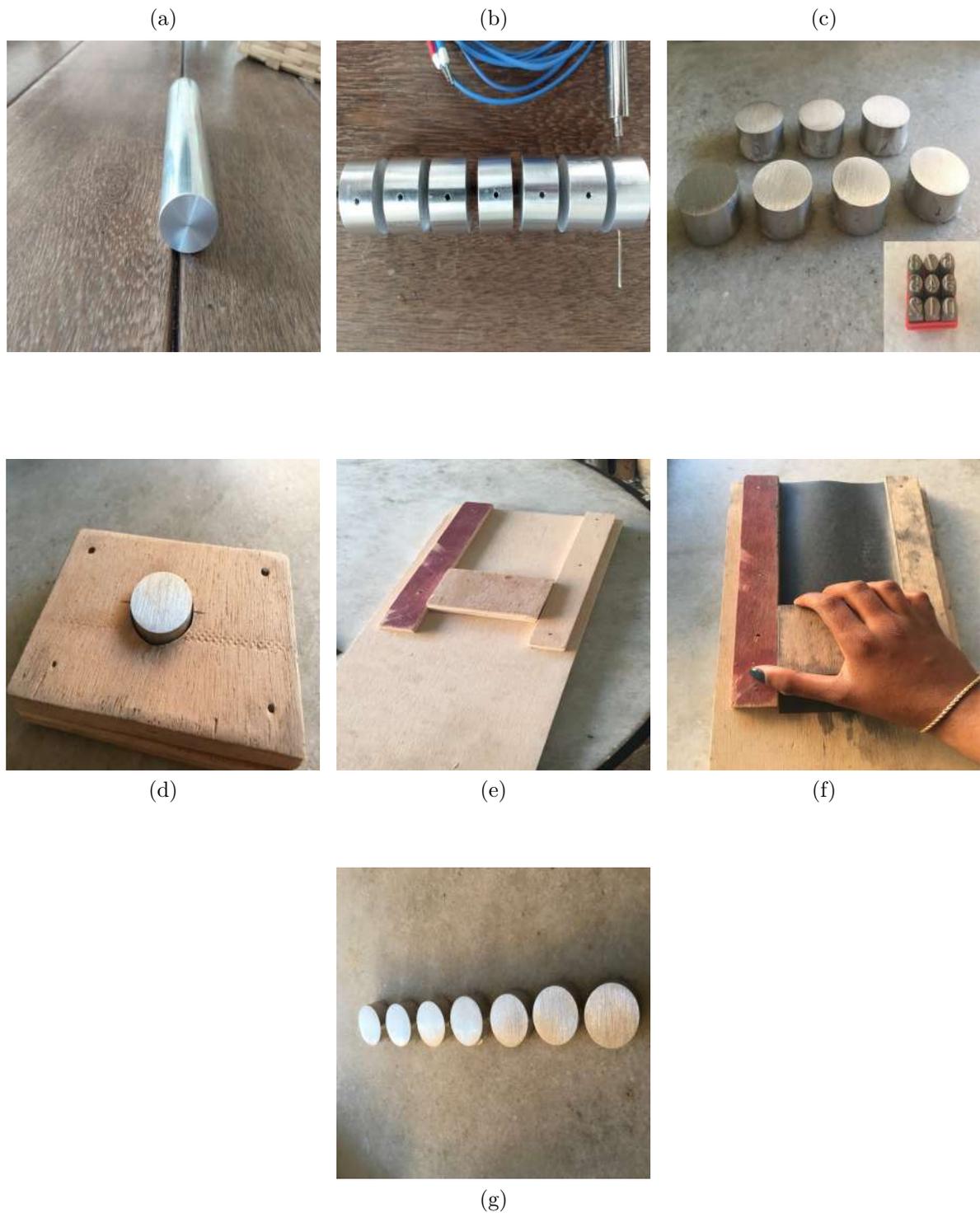
O primeiro conjunto (chamaremos de conjunto de amostras 1), como podem ser visto na Fig.3.1 são compostas por seis amostras de dimensões $(38,14 \pm 0,02)mm$ de diâmetro e $(14,88 \pm 0,02)mm$ de espessura que foram preparadas manualmente utilizando lixas de diferentes granulometrias, sendo elas 100, 150, 220, 320, 400, 500, 600, 1200 mesh (número de abertura por polegada, ou seja, quanto maior o mesh, maior o número de aberturas e mais fino será o grão), o processo foi realizado da seguinte forma: todas as peças foram lixadas com a lixa de maior granulometria 100 mesh, e uma delas foi separada e nomeada de 100. As amostras restantes foram lixadas com uma lixa de menor granulometria 150 mesh, novamente uma delas foi retirada do conjunto e nomeada de 150. As demais amostras restantes foram lixadas com a lixa de 220 mesh e uma delas foi retirada e nomeada 220. O processo foi repetido até que obtivéssemos todas as oito amostras, sendo a última delas lixada com a lixa de menor granulometria e nomeada por 1200.

Figura 3.1: Amostras de alumínio comercial com diferentes rugosidades de superfícies.



O segundo conjunto (chamaremos de conjunto de amostras 2), como pode ser visto em Fig.(3.2 - item a) são compostas por sete amostras de dimensões $(25,5 \pm 0,02)$ mm de diâmetro e $(13,90 \pm 0,02)$ mm de espessura. Foi feita uma furação à 90° na lateral com broca de $\phi 1/16''$ a $6mm$ da base de apoio, faceando a base paralela à base a ser lixada. Na lateral perpendicular da furação foi feito o processo de tipagem (processo ao qual marca a superfície metálica utilizando um punção numérico feito de aço SAE 4140, exercendo uma força gradativa para a tal [35]), visando uma melhor identificação das peças, onde foi enumerada de 1 a 7. As superfícies das amostras foram preparadas manualmente, análoga ao processo feito ao conjunto de amostras 1, onde foram utilizadas lixas de diferentes granulometrias, sendo elas de 320, 600, 800, 1200, 1500, 2000, 2500 mesh, de acordo com a seguinte forma: inicialmente todas as peças foram lixadas com a lixa de maior granulometria que foi a de 320 mesh, uma delas foi separada e nomeada por 1. As demais amostras restantes foram lixadas com a lixa de granulometria 600 mesh e novamente uma foi retirada e nomeada por 2. Esse processo foi efetuado até que a última lixa de menor granulometria (2500 mesh) fosse utilizada e nomeada por 7.

Figura 3.2: Processo completo da preparação das amostras de alumínio. (a) barra maciça de alumínio com 25,5mm de diâmetro ao qual foram cortadas em 7 pedaços de 13,90mm de espessura; (b) furação a 90° na lateral das amostras com diâmetro de $\phi 1/16''$ a 6mm da base de apoio; (c) processo de tipagem, utilizando punção numérico de aço SAE 4140 na lateral perpendicular a amostra; (d) suporte de madeira com furação central de 25,5mm para fixar a amostra no processo de lixamento; (e) base de madeira que garante um movimento retilíneo, garantido que as ranhuras causadas pelas lixas estejam sempre em uma única direção; (f) processo de desbaste da superfície das amostras com lixa manual unidirecional; (g) amostra finalizadas após todo o processo.



Os dois conjuntos de amostras obedeceram o mesmo padrão de lixamento, ou seja, as amostras foram lixadas respeitando apenas uma direção. Após o processo de lixamento dos conjuntos de amostras, elas foram submetidas a um tratamento ao qual remove-se toda a sua oleosidade e impurezas. Além disso, as amostras tiveram suas rugosidades (R_a) medidas no microscópio confocal LEICA ®DCM3D disponibilizado no Laboratório Multiusuários de Caracterização de Materiais (LMCM) do ICEx-Volta Redonda, como foi descrito da seção 2.1.

3.1.2 Circuito de aquecimento e resfriamento

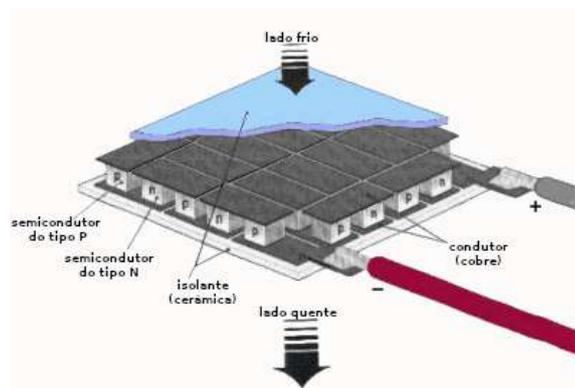
Para o controle de temperatura das amostras de alumínio preparadas conforme descrição na Seção 3.1.1, utilizou-se diferentes materiais e equipamentos, que foram as bolsas térmicas aquecidas e resfriadas, a chapa aquecedora e por fim um circuito eletrônico com uma placa e/ou pastilha Peltier, juntamente com o arduíno Nano 3D, ao qual se fez presente para automatizar o processo.

O efeito Peltier é um fenômeno ao qual a diferença de potencial aplicada em um termopar causa uma diferença de temperatura entre as junções dos diferentes materiais, ou seja, se uma tensão é aplicada a um dispositivo termoelétrico, o calor é transferido de um lado para o outro, o que cria uma diferença de temperatura. Esse efeito pode ser utilizado para gerar eletricidade, medir ou alterar a temperatura de objetos [36].

A combinação mais comum de materiais nos termopares de elementos Peltier são os semicondutores de Telureto de bismuto (Bi_2Te_3). Geralmente as pastilhas Peltier possuem uma matriz de cubos ou paletes feitos de semicondutores, cada um dos quais estão em contato com os radiadores no lado quente e frio das pastilhas Peltier. Esses cubos são "dopados", ou seja, impurezas extras são adicionadas para que haja mais ou menos elétrons livres em cada cubo. Os cubos com elétrons livres extras são conhecidos como semicondutores do tipo N (carregam principalmente cargas negativas), enquanto os com poucos elétrons livres são semicondutores do tipo P (carregam principalmente cargas positivas). Os pares de cubos semicondutores P e N são configurados e conectados em uma matriz de modo que tenham uma conexão elétrica em série, mas uma conexão térmica paralela.

Quando uma corrente é aplicada ao sistema, a forma como ela flui através dos semicondutores induz uma diferença de temperatura e faz com que um dos lados do Peltier se aqueça e o outro esfrie, como pode ser visto na Fig. (3.3).

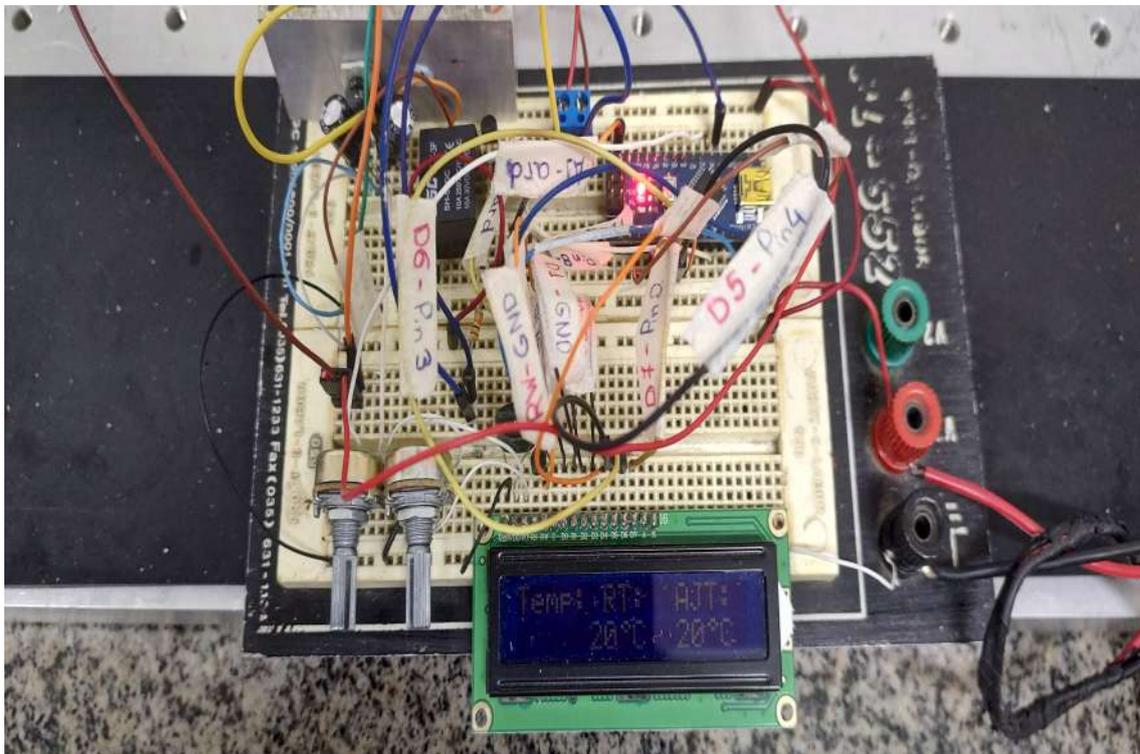
Figura 3.3: Funcionamento e composição da pastilha Peltier.



Fonte: [37]

Com intuito de tentar controlar a temperatura das amostras, fez-se um circuito eletrônico (Fig. 3.4) capaz de monitorar e ajustar através de um display LCD e uma programação em arduíno a temperatura que deseja trabalhar. A programação feita no arduíno permite definir a faixa de temperatura que a pastilha Peltier deverá trabalhar de acordo com o processo, ou seja, pode-se definir uma temperatura entre -30 à 70°C . Sensores de temperatura foram utilizados para que tivesse precisão na aferição da temperatura da pastilha Peltier, sendo assim, foi colocado um termistor NTC de $10\text{k}\Omega$, fixado no lado frio da pastilha Peltier medindo sua temperatura real e comparando com o valor ajustado pelo circuito através do potenciômetro $B50K$, assim, quando os valores de temperaturas se igualam, a corrente do circuito é cortada, fazendo com que o campo eletromagnético seja interrompido e o contato do relé volta a sua posição original. Após a corrente do circuito ser cortada, a pastilha Peltier será desenergizada, onde sua temperatura irá buscar o equilíbrio térmico com o meio externo. Sendo assim, se definirmos uma temperatura de 20°C por exemplo, o circuito irá energizar, acionando o cooler e a pastilha Peltier. Após um determinado tempo, a temperatura de ajuste será igual a temperatura real da pastilha Peltier. Isso fará que o circuito desenergize e a temperatura volte a subir, logo em seguida o arduíno entende essa mudança e retorna a energização do circuito. Portanto, isso garante que a temperatura irá se manter de acordo com a escolha do usuário.

Figura 3.4: Circuito eletrônico montado em uma placa protoboard, com display que é utilizado para monitorar e ajustar a temperatura desejada de trabalho.



3.1.3 Chapa aquecedora e outros equipamentos

Para o processo de aquecimento das amostras, foi utilizado uma chapa aquecedora vitrocerâmica da marca JUNG®, modelo CV200AP01, que possui uma superfície plana sem porosidade aparente e que pode aquecer amostras rapidamente sem sofrer oxidação significativa. Além disso a chapa consegue atingir uma temperatura máxima de 500°C

e possui um painel digital para ajuste e programação da temperatura, o que permite selecioná-la da maneira mais adequada ao trabalho. Neste painel programável, é possível criar uma curva de aquecimento em função do tempo ou até mesmo manter a temperatura fixa por um determinado tempo. A Figura (3.5), mostra a chapa aquecedora.

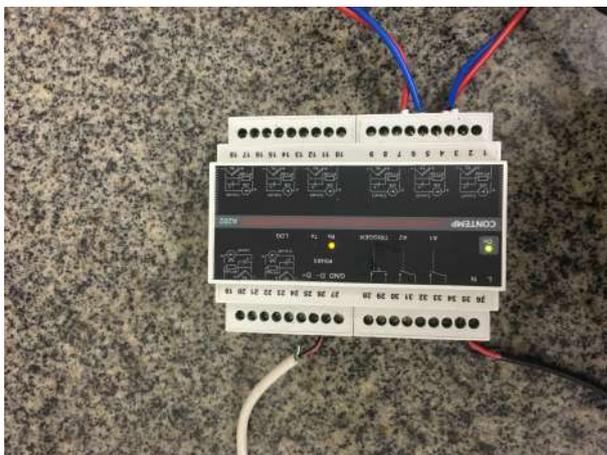
Figura 3.5: Chapa aquecedora da marca JUNG®, modelo CV200AP01 utilizada para aquecer as amostras de alumínio comercial.



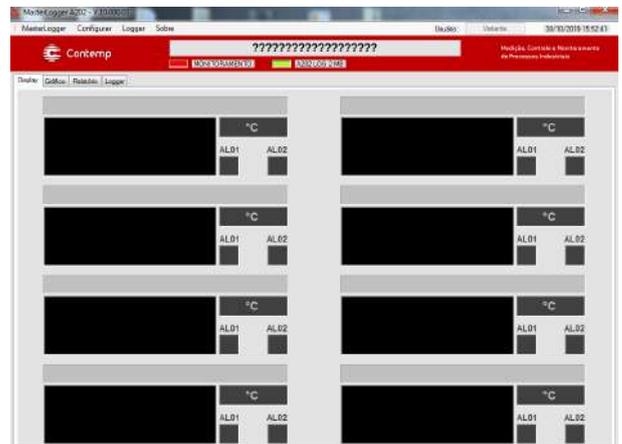
Além da chapa aquecedora, também utilizamos termopares do tipo K, para aferir a temperatura das amostras e do ambiente durante todo o processo de medição. Os termopares do tipo K possuem diâmetro igual a 1mm e permite medições de temperaturas na faixa de -100°C à 1200°C . Eles possuem fios condutores que foram interligados a um aquisitor de dados (Datalogger A202), que possibilita o registro e monitoramento das variáveis analógicas em um computador em tempo real, através do software Masterlogger®.

Figura 3.6: Equipamento de medição de temperatura.

(a) Aquisitor de dados.



(b) Tela principal do software Masterlogger.



3.2 Métodos

Nesta Seção apresenta-se o método experimental utilizado para realizar as medições e obtenção dos resultados deste trabalho. Além disso, são ilustradas as técnicas aplicadas para a análise das superfícies estudadas, como no caso das amostras de alumínio, utilizando o microscópio confocal e a utilização da câmera térmica para obtenção da radiância emitida por um material, que se deu através do financiamento FINEP, para a compra da mesma.

3.2.1 Microscópio Confocal

Para um melhor conhecimento sobre as superfícies das amostras utilizadas nos experimentos, foi necessário aprender a usar o Microscópio Confocal Interferométrico Leica DCM 3D, apresentado na Figura 3.7, disponibilizado no Laboratório de Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCM) do ICEX, na UFF.

Este equipamento consiste em um sistema Leica DCM 3D com tecnologia dual core que foi concebido para avaliação rápida e não invasiva de micro e nano estruturas de superfícies técnicas, em várias configurações. O DCM 3D combina tecnologia confocal e interferometria para medições em alta velocidade e alta resolução de até $0,1\text{nm}$. E a tecnologia confocal de micro-visualização, sem peças móveis, ou seja, não há movimento da amostra, mede uma diversidade de materiais e fornece imagens confocais e de campo claro simultaneamente [38].

Figura 3.7: Autora no LMCM operando o Microscópio Confocal.

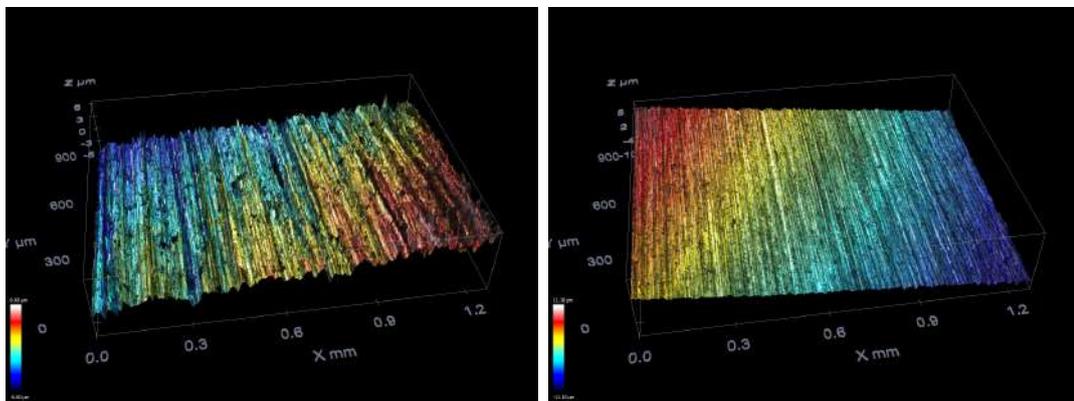


A análise topográfica das amostras a diversas rugosidades foi realizada utilizando o microscópio confocal. Seus resultados são mostrados na Fig. 3.8a e apresenta uma infinidade de picos e vales sobre sua superfície. No entanto, em alguns pontos observa-se alguns vales mais acentuados, que está representado com um tom mais escuro, isto decorre pela forma como as amostras foram preparadas (como descrito na Seção 3.1.1) e também pelo fato da lixa de maior granulometria (lixa 320 Mesh) ser utilizada. Mesmo que o processo seja susceptível a falhas humanas em seu manuseio, pode-se observar na Figura 3.8b um aspecto um pouco mais uniforme se comparado com a Figura 3.8a. Isso ocorre, pois a amostra 7 ($R_a = 0.312372\mu\text{m}$) foi lixada por todas as lixas anteriores (como descrito na Seção 3.1.1) e a última lixa foi a de menor granulometria (lixa 2500 Mesh).

Figura 3.8: Imagens topográficas das amostras de maior e menor rugosidade.

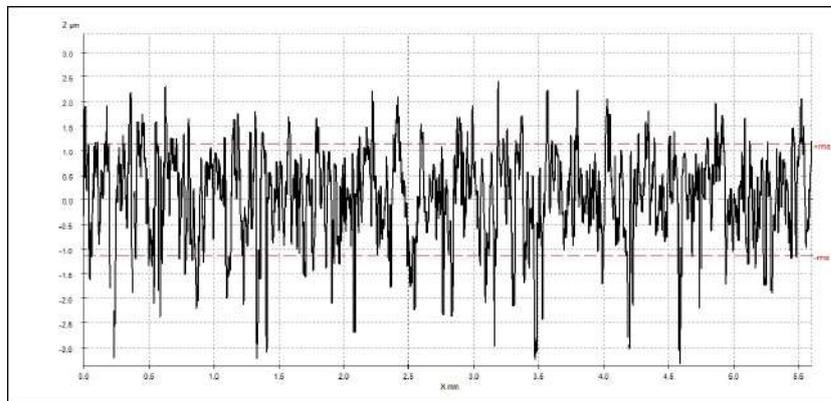
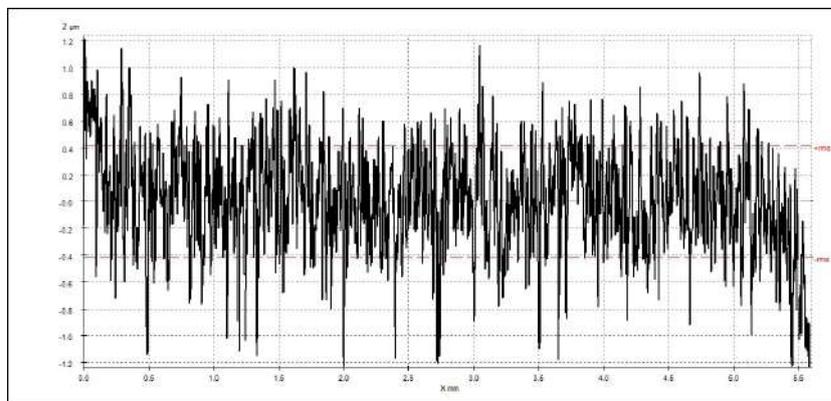
(a) Amostra 1 ($R_a = 0.790176\mu\text{m}$).

(b) Amostra 7 ($R_a = 0.312372\mu\text{m}$).



Além das medidas topográficas, também foi feita a medição com base no método do levantamento de perfil da superfície das amostras, como pode ser vistas nas Figuras 3.9a e 3.9b com maior e menor rugosidade respectivamente. Estas medições foram feitas com o objetivo de conhecer melhor o perfil de superfície das amostras em questão, lembrando que a ABNT [25] estabelece a medição da rugosidade pelo cálculo do levantamento de perfil das amostras.

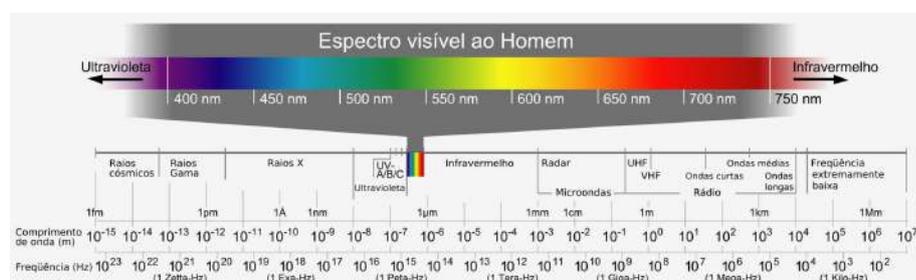
Figura 3.9: Imagens do perfil de superfícies das amostras de maior e menor rugosidade.

(a) Amostra 1 ($R_a = 0.790176\mu m$).(b) Amostra 7 ($R_a = 0.312372\mu m$).

3.2.2 Câmera térmica

Antes de entrarmos no assunto sobre as câmeras térmicas e suas funcionalidades, é necessário conhecer um pouco sobre radiação eletromagnética. Todos os objetos cuja temperatura T seja maior que o zero absoluto, emitem energia na forma de radiação eletromagnética, que é caracterizada pelo seu comprimento de onda (como pode ser observado na Figura 3.10).

Figura 3.10: Espectro Eletromagnético.



Fonte: [39].

O espectro de luz visível é o segmento do espectro eletromagnético que o olho humano consegue ver. Normalmente o olho médio humano pode detectar comprimentos de onda

na faixa de $380nm$ à $700nm$. Já o espectro eletromagnético na região do infravermelho (IR) ou luz IR, não é detectável aos olhos humanos, uma vez que seu comprimento é de $\lambda \geq 750nm$.

No mundo infravermelho, com a utilização de uma câmera térmica não é necessário a presença de iluminação externa, a imagem da câmera capta a radiação emitida e não uma imagem da temperatura do objeto. As câmeras térmicas foram desenvolvidas a partir de sistemas de captação de imagens por infravermelho com alto desempenho para aplicações aéreas.

Existem no geral, dois tipos de câmeras térmicas de infravermelho, que são as câmeras refrigeradas e a não refrigeradas, então para determinadas aplicações é necessário considerar as especificações técnicas, como sensibilidade e resolução [40].

A maioria das câmeras térmicas refrigeradas no mercado atualmente, utilizam um detector de Antimoneto de Índio (InSb) e operam para cobrir a banda infravermelha de ondas médias (MWIR) em torno de $3 - 5\mu m$, mas podem ser programadas para permitir imagens na banda do infravermelho de onda longo (LWIR) do espectro [40]. Elas trabalham com a detecção de fótons de energia infravermelha que atravessam através da óptica. Tais fótons são posteriormente convertidos em elétrons, que por sua vez são acondicionados em um capacitor de integração. Após o tempo de integração, a carga é lida numa contagem digital e é atribuída a cor ou escala de tons de cinza, sendo assim, apresentada como uma imagem visível [41]. A câmeras térmica também possuem um sensor de imagem que está integrado em um resfriador criogênico, que tem como função reduzir a temperatura do sensor para valores criogênicos que geralmente são em torno de $-200^{\circ}C$. Essa redução faz com que se reduza os ruídos induzidos termicamente a um nível abaixo do sinal do local que está sendo fotografada [42].

Já as câmeras térmicas não refrigeradas possuem um detector de microbolômetro, que é um sensor térmico que gera uma mudança da resistência quando aquecidos ou resfriados [41]. Os microbolômetros são tipos de bolômetros basicamente termômetros de resistência, dispostos a responder à radiação. Diferentemente das câmeras térmica resfriadas, elas trabalham na banda do infravermelho de onda longo (LWIR) em torno de $7 - 14\mu m$, com essas condições, o sistema fornece melhor penetração em condições ambientais precárias, tais como poeira, fumaça e neblina.

A câmera térmica utilizada neste estudo é refrigerada a Hélio, faz uso do avançado circuito integrado de leitura de 4 canais, que é acoplado a um detector de Antimoneto de Índio (InSb) para cobrir a banda infravermelha de ondas médias (MWIR). Ela é refrigerada com uma temperatura de operação $< 80K$ e atinge a tal em aproximadamente 7 minutos [43]. É a escolha ideal para eventos térmicos de alta velocidade e alvos em movimento rápido, pois o tempo de integração típicos para objetos entre -20 e $350^{\circ}C$ variam cerca de $6ms$ a $50\mu s$ o que nos garantiu melhores precisões nas medidas de radiação [44].

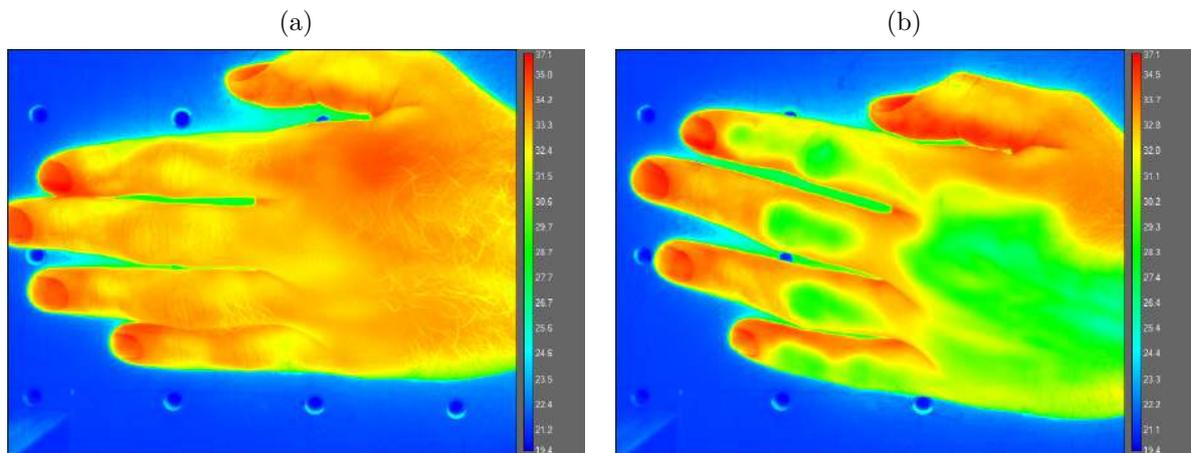
Os sistemas de captura de imagens termográficas detectam a quantidade de energia térmica, em geral na região do infravermelho (calor) do espectro eletromagnético emitida pelas pessoas, objetos e materiais [43]. Com as câmeras térmicas, o operador pode "enxergar" na escuridão total, em condições climáticas adversas e através de poluentes aéreos como fumaça e neblina.

A quantidade de radiação emitida pelos objetos estão diretamente relacionada com a temperatura que eles se encontram, ou seja, quanto maior sua temperatura, maior será sua energia e a radiação emitida por ele. Todos os corpos e objetos emitem radiação, no entanto, as pessoas por exemplo, estão emitindo radiação na região do infravermelho, e com o auxílio das câmeras térmicas pode-se ver mais facilmente a distinção de temperatura

do corpo.

Na Figura 3.11 observa-se a imagem feita pela câmera térmica e é visto claramente uma distinção de cores. As cores representam uma escala de temperatura, onde a cor vermelha é mais quente (com $\approx 37,51^\circ C$) e o azul escuro mais frio (com $\approx 19,4^\circ C$). Pode-se observar que as imagens 3.11a e 3.11b têm comportamentos distintos. Isso se dá pelo fato de que a Figura 3.11b o indivíduo manteve a mão durante poucos minutos em uma superfície fria, logo vemos que aparece tons em azul e verde, que possuem temperatura de aproximadamente $24,4$ e $27,4^\circ C$ respectivamente.

Figura 3.11: Exemplo de radiação através de uma imagem térmica, mostrando os pontos de maiores e menores temperaturas.



Através da radiação infravermelha emitida pelos objetos e com o auxílio da câmera térmica é capaz de medir suas respectivas radiação e emissividade em diversas aplicações. No caso da temperatura, a câmera térmica não pode medi-lá, ela mede o efeito da temperatura e realiza alguns cálculos matemáticos relacionados a um processo de calibração e então relata um valor de temperatura, e conhecendo também a emissividade do material pode relatar a temperatura real onde sensores convencionais não podem ser utilizados, principalmente em casos em que os objetos estejam em movimento ou quando medições sem contato são necessárias em função de contaminação ou condições de riscos, além de casos em que as distâncias sejam longas, ou ainda, em situações nas quais a temperatura de um determinado lugar seja alta o suficiente para danificar termopares ou outros sensores de contato.

Para medir a temperatura real de um objeto, juntamente com a câmera térmica é necessário inserir a emissividade de sua superfície e a temperatura aparente refletida (quantidade de radiação proveniente do entorno que é refletida do objeto para dentro da câmera). Tendo em vista a utilização da emissividade para ter uma medida mais precisa da temperatura de um corpo, as câmeras térmicas também são capazes de medir tal constante. A emissividade é definida como a capacidade de um objeto emitir radiação infravermelha, ou seja, a razão entre a radiação de um corpo ($L_{r,T}$) numa dada temperatura e a radiação de um corpo negro ($L_{b,T}$) na mesma temperatura. Sua equação é definida como:

$$\epsilon = \frac{L_{r,T}}{L_{b,T}}. \quad (3.1)$$

O valor de emissividade dos materiais à mesma temperatura varia entre 0 e 1. Um corpo negro ideal, por exemplo, tem sua emissividade igual a 1, sendo ele um radiador perfeito e este valor utilizado como parâmetro de calibração para outros materiais.

Neste estudo, através da câmera térmica de alta frequência da marca FLIR®A6753sc [43] (Figura 3.12), que é um equipamento capaz de capturar a radiação térmica na região do infravermelho e criar uma falsa imagem, permitindo "ver" os objetos devido à radiação emitida por eles, iremos medir a radiância de cada amostra citada na Seção anterior.

Figura 3.12: Câmera Termográfica FLIR®A6753sc



3.3 Experimento

Este estudo realizou diversos experimentos, a maioria deles no Instituto de Ciências Exatas (ICEEx) - UFF no Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCM) do ICEEx. Devido a pandemia da COVID-19, em 2021 e o impedimento de acesso ao campus durante este período, foi possível levar parte dos equipamentos ao anexo A, no qual desenvolvemos parte dos estudos de radiância das diferentes amostras de alumínio comercial.

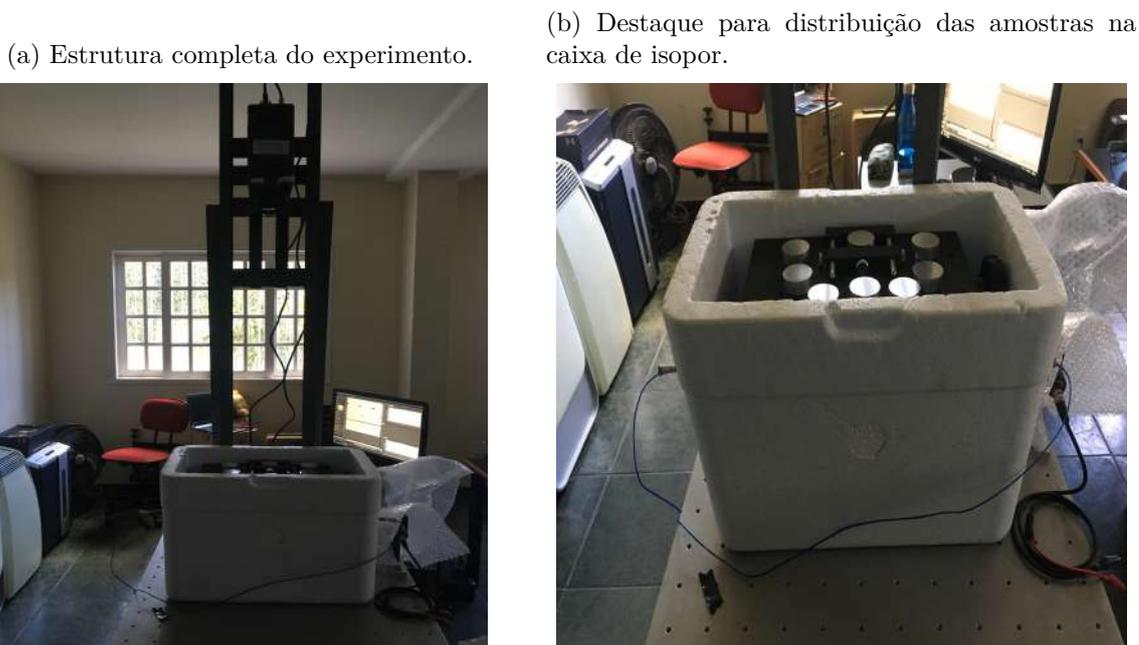
3.3.1 Experimento com bolsas térmicas

No experimento mostrado na Figura 3.13a, dispomos de uma mesa óptica com perfurações para parafuso M6, uma estrutura metálica para fixação da câmera térmica e uma caixa de isopor utilizada para minimizar fontes externas de calor.

No interior da caixa de isopor inseriu-se a mesa elevatória, onde se foi necessário para ajustar a altura com relação a superfície das amostras e a lente da câmera térmica. Na sua superfície acoplamos uma aparato, para garantir que todas as amostras estejam na mesma posição.

Com o intuito de alterar a temperatura das amostras dentro da caixa de isopor, utilizamos bolsas térmicas que permitem que sejam aquecidas e resfriadas. O procedimento foi efetuado em duas etapas, a primeira referente ao resfriamento das amostras e a segunda aquecendo-as. No primeiro processo, utilizamos de um refrigerador convencional (freezer

Figura 3.13: Montagem do experimento utilizando bolsas térmicas.



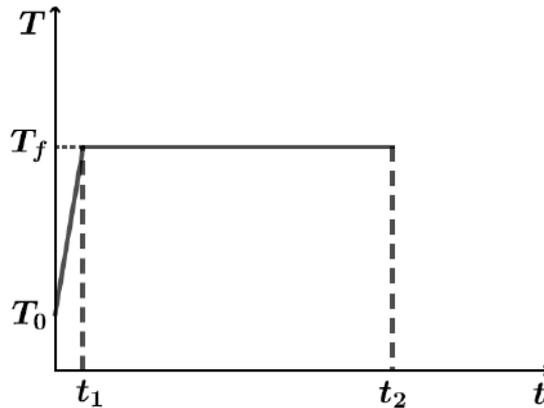
de geladeira), onde as bolsas térmicas ficaram por volta de 24 horas. Após este período à colocamos dentro da caixa de isopor, abaixo da mesa elevatória e fechamos a tampa da caixa, sendo necessário aguardar 15 minutos para que a temperatura dentro da mesma entrasse em equilíbrio térmico. A temperatura dentro da caixa foi medida através de dois termopares do tipo K, inseridos nas duas laterais da caixa, como pode ser visto na figura 3.13b.

Neste procedimento, por ser utilizados bolsas térmicas e elas estarem em constante troca de calor com o meio externo, pode-se observar uma queda exponencial da temperatura, o que faz com que as amostras não permaneçam a uma certa temperatura T por algum tempo. Logo, modificamos a estrutura do procedimento, afim de garantir uma melhor estabilidade de temperatura para as amostras, a qual será descrita na Seção seguinte.

3.3.2 Experimento com chapa aquecedora

A montagem experimental realizada com a chapa aquecedora segue o mesmo setup mostrado na imagem 3.13a, alterando apenas a maneira com que as amostras são aquecidas. A chapa aquecedora foi programada seguindo a curva mostrada na Figura 3.14, onde T_0 é a temperatura ambiente e T_f é a temperatura final. Para o experimento em questão foi considerado $t_1 = 1$ minuto e $t_2 = 30$ minutos, o que significa que a chapa levou 1 minuto para atingir a temperatura máxima t_f e logo manteve-se a esta temperatura por 30 minutos. Este processo foi feito para garantir que a temperatura fique estabilizada. Desta forma estimamos um determinado tempo de 23 minutos, após atingir a temperatura máxima desejada, assim criamos um padrão uniforme sobre todas as medidas de radiação das amostras de alumínio.

Figura 3.14: Programa de aquecimento da chapa (temperatura \times tempo).



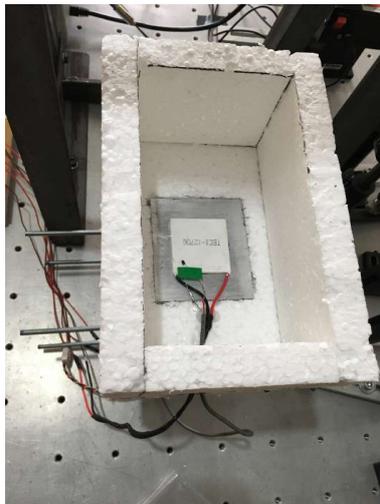
Fonte: [7]

3.3.3 Experimento com circuito eletrônico e placa Peltier

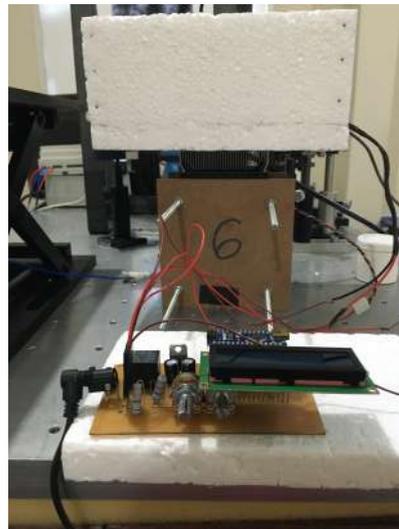
No sistema criado com a caixa de isopor, integramos na sua base inferior um dissipador de calor juntamente com um cooler, ao qual fica voltado para fora da caixa. Na sua parte interna foi acoplado uma placa Peltier de dimensão $40 \times 40\text{mm}$, faceando com a superfície do dissipador de calor, como pode ser visto na Figura 3.15a. As amostras foram fixadas sobre a placa Peltier, que por sua vez foi interligada em um circuito eletrônico (como descrito na seção 3.1.2), sendo possível selecionar a temperatura de trabalho desejada. Na parte superior da caixa de isopor foi feito um furo centralizada com o mesmo diâmetro da amostra, garantindo que apenas sua superfície esteja à vista da câmera térmica, podendo então medir suas respectivas radiâncias.

Figura 3.15: Montagem experimental com circuito eletrônico, Arduino e placa Peltier.

(a) Vista interna da caixa de isopor, com a pastilha Peltier.



(b) Circuito eletrônico e montagem da caixa de isopor.



Seguindo o mesmo esquema experimental, analisamos o efeito da emissividade das amostras em função de suas rugosidades. Como visto na seção 3.2.2, a emissividade

é uma propriedade importante no campo da teoria do infravermelho a qual descreve o quão bem um material emite radiação infravermelha comparando com um corpo negro no mesmo comprimento de onda, ângulo e temperatura. A câmera infravermelha não mede a temperatura diretamente. A temperatura real pode ser exibida pela câmera térmica após uma calibração específica que exige o conhecimento da emissividade do material cuja temperatura se quer conhecer.

Os valores de emissividade de alguns materiais estão tabelados [45] (encontre-se em algumas referências bibliográficas) e sendo assim, sabemos que o alumínio tem um valor de emissividade muito baixo, então a radiação total que chega na câmera infravermelha, pode ser emitido, transmitido e refletido, porém como as amostras são maciças não será considerado a parte da radiação transmitida e refletida.

Sendo assim, se fez necessário ajustar/modificar componentes importantes. Sabendo que a baixa emissividade pode afetar medições feitas com a câmera infravermelha a maneiras de minimizar tais efeitos, como reduzir a refletividade da superfície, através da aplicação de um revestimento ou "tornar" uma superfície áspera, o que melhora a precisão das medidas. Para então reduzir a refletividade, inserimos uma folha de papel alumínio amassada ao lado da amostra e uma fita 3M que irá representar um corpo negro a qual sabemos o valor de sua emissividade definida. A folha de papel alumínio amassada tem baixa emissividade, por volta de 0,4, que significa que apenas 40% da radiação é emitida e o restante será refletida.

A radiação refletida pelo papel amassado é intitulada como temperatura aparente refletida. Conhecendo tal temperatura será possível fazer um cálculo de emissividade através do software da câmera infravermelha. Estes ajustes dão uma maior precisão as medidas e faz com que a temperatura aparente relatada pela câmera infravermelha seja próxima da real (medida pelo termopar tipo K). As figuras a seguir demonstram a montagem realizada com as correções da radiação refletida pela amostra.

Figura 3.16: Experimento realizado com os ajustes da folha de papel alumínio amassado e fita 3M colada na lateral da amostra de alumínio comercial.



Foi feita uma última modificação na caixa de isopor que armazena os demais componentes. Pode-se observar na Figura 3.15a, que abaixo da placa Peltier tem uma superfície metálica. Essa superfície é o dissipador de calor da placa Peltier, feito de alumínio que é um excelente condutor de calor. Como a parte quente da placa Peltier está em contato

com o dissipador, ele esquenta. Logo, ambas as faces do Peltier estão voltadas para dentro do caixa, o que faz com que a temperatura tente entrar em equilíbrio térmico, durante todo o processo. Essa modificação se deu pelo fato de tentar minimizar as fontes de calor e emissões de radiação, fazendo com que não afete as medições de radiação através da câmara térmica.

As figuras a seguir mostram nitidamente como procedeu a modificação no interior da caixa de isolamento

Figura 3.17: Caixa de isopor com o dissipador de calor dentro do interior da mesma (antes do modificação).

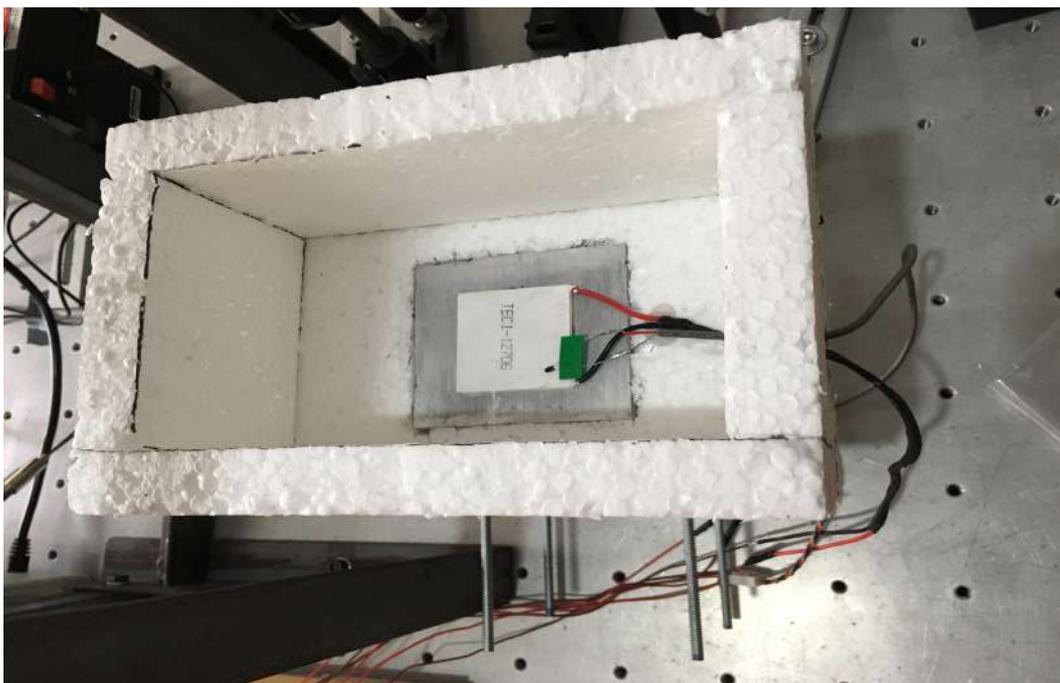


Figura 3.18: Caixa de isopor com o dissipador de calor fora do interior da mesma. Apenas a placa Peltier está voltada para dentro (depois da modificação).



Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão relatados os resultados do estudo sobre o efeito de uma superfície rugosa na radiância.

4.1 Medida de radiância nas amostras de alumínio utilizando bolsas térmicas

As amostras utilizados neste experimento foram devidamente polidas e suas respectivas rugosidades $R_a(\mu m)$ foram medidas através do microscópio confocal LEICA®DCM3D. As Tabelas a seguir exibem os valores de rugosidades medidos das amostras com dimensão $(38, 14 \pm 0, 02)mm$ de diâmetro e $(14, 88 \pm 0, 02)mm$ de espessura (conjunto de amostras 1). Para uma melhor visualização das amostras do primeiro conjunto plotados nos gráficos, as identificamos com diferentes cores, como pode ser visto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Tabela das rugosidades medidas através do microscópio confocal do conjunto de amostras 1.

Granulometria	Rugosidade $R_a(\mu m)$	Desvio Padrão $\sigma(\mu m)$	Cores
1200	0,319	0,004	preto
600	0,36	0,01	vermelho
500	0,4	0,2	verde
320	0,42	0,01	azul
150	0,74	0,01	ciano
220	1,5	0,1	magenta
100	2,64	0,06	amarelo

Dadas as rugosidades superficiais das amostras, medimos a radiância de cada uma delas. No entanto, utilizamos bolsas térmicas congeladas para variar temperatura das amostras em questão (processo descrito na Seção 3.3.1). Com as amostras posicionadas perpendicularmente à câmera térmica e através do software, obtém-se a radiância média de uma região de interesse de cada amostra.

O lixamento das amostras por ser um processo manual, não apresenta uma rugosidade uniforme em toda sua área, sendo assim, delimitamos uma região no centro de cada uma delas, a qual medimos sua rugosidade no microscópio confocal. Logo, também definimos esta mesma região centralizada no software da câmera térmica, no qual apresenta a forma de uma circunferência e será medido a radiância de cada amostra de alumínio comercial.

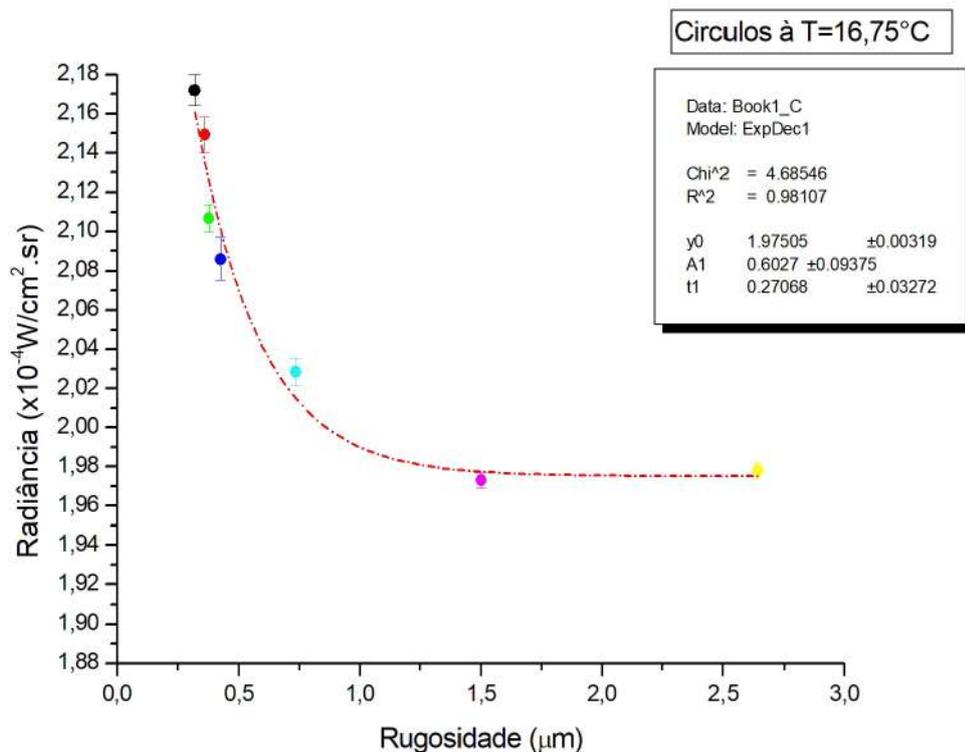
Num primeiro resultado, utilizando as bolsas térmicas congeladas, obtivemos uma temperatura média de $\approx 16,75^\circ\text{C}$ (medida pelos termopares), com isso obtemos os seguintes dados, mostrados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Dados da média das radiâncias ($\text{W}/\text{cm}^2.\text{sr}$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação.

$R_a(\mu\text{m})$	Radiância ($\times 10^{-4}\text{W}/\text{cm}^2.\text{sr}$)	Desvio Padrão $\sigma(\times 10^{-4}\mu\text{m})$
0,3192	2,172	0,008
0,3584	2,149	0,009
0,3756	2,107	0,007
0,4248	2,09	0,01
0,7358	2,029	0,007
1,5008	1,973	0,004
2,6416	1,978	0,004

Com os dados da Tabela 4.2, gera-se o gráfico da radiância em função da rugosidade,

Figura 4.1: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}\text{W}/\text{cm}^2.\text{sr}$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 16,75^\circ\text{C}$.



O gráfico apresentado na Figura 4.1, sugere que há um declínio no valor da radiância, quando a rugosidade da superfície do material aumenta. Cada ponto registrado no gráfico representa uma amostra, a qual identificada por uma cor específica, de acordo com a sua rugosidade. Os dados são mostrados com os respectivos erros captados pela câmera térmica. Sendo assim, pode-se observar que a amostra com a rugosidade superficial mais

alta ($R_a = 2,6413\mu m$), tem um baixo valor de radiância emitida, e a amostra de menor rugosidade superficial tem um maior valor de radiância emitida. Isso sugere que superfícies mais rugosas apresentam um maior número de espalhadores, fazendo com que apenas parte da radiância seja captada pela câmera térmica. Já para as amostras com superfícies mais lisas, o número de espalhadores é menor, fazendo com que grande parte da emissão de radiância se propague na direção da câmera térmica.

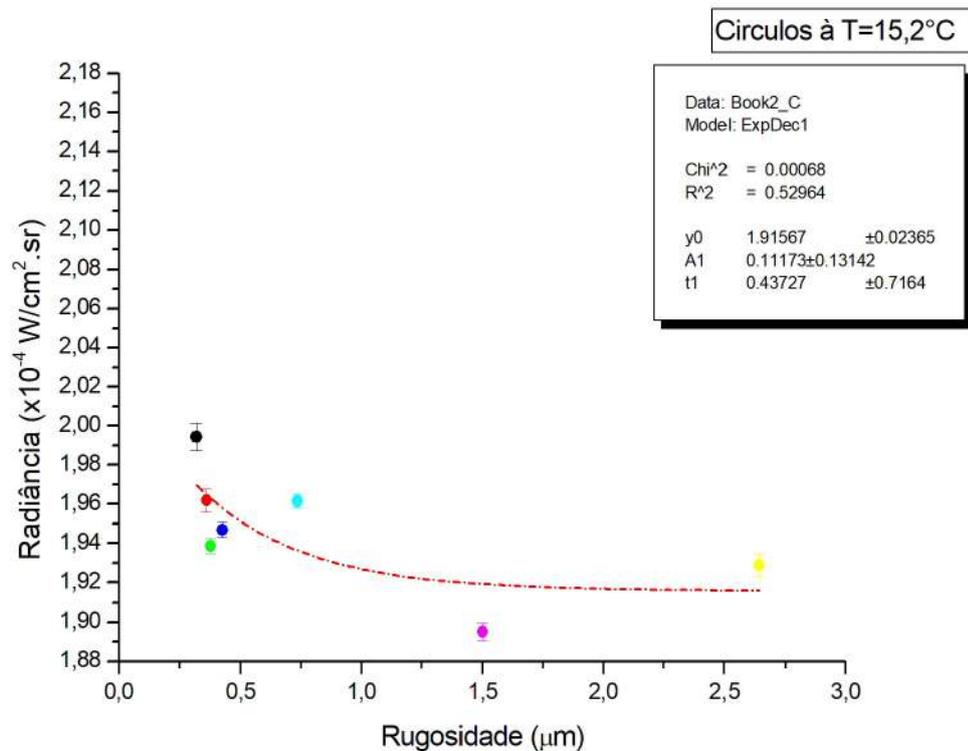
Sabemos que bolsas térmicas congeladas, expostas a uma temperatura ambiente T , tendem a perder calor para o ambiente. Essa perda ocorre rapidamente e pode-se ser observada com precisão pelos termopares. Observa-se um aumento gradual em sua temperatura. No entanto, após terminadas as primeiras medidas (vista na Tabela 4.2), fechamos a caixa de isopor novamente, aguardamos $15min$, retiramos a tampa e medimos os novos dados com o software da câmera térmica. Observou-se então, que a temperatura registradas pelos termopares era de $\approx 15,2^\circ C$, ao qual obtivemos os seguintes dados

Tabela 4.3: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,3192	1,994	0,007
0,3584	1,962	0,006
0,3756	1,939	0,004
0,4248	1,947	0,004
0,7358	1,961	0,004
1,5008	1,895	0,004
2,6416	1,93	0,01

Com os dados da tabela 4.3, gera-se o gráfico da radiância em função da rugosidade.

Figura 4.2: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2 \cdot sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 15,2^\circ C$.



No Gráfico 4.2, observa-se uma desordem nos resultados, comparado com o Gráfico 4.1. No entanto, vemos que as amostras de maior e menor rugosidade superficial, seguem a mesma tendência, maior e menor radiância captada pela câmera respectivamente. Um argumento para tal acontecido, seria a formação de gotículas de água na superfície das amostras (efeito de condensação), devido a temperatura estar baixa, e conseguimos observar através da imagem captada pelo software da câmera térmica. Mesmo tendo tal desordem, o gráfico apresenta uma tendência de queda com aumento da rugosidade.

De maneira análoga ao experimento feito com as bolsas térmicas congeladas, agora iremos repetir o processo aquecendo-as. As bolsas térmicas foram aquecidas em banho maria por um tempo de $30min$, em seguida foram depositadas abaixo da mesa elevatória, que encontrasse dentro da caixa de isopor. Todas as amostras foram colocadas sobre a superfície da mesa elevatória, a tampa da caixa de isopor foi fechada afim de obter o equilíbrio térmico e logo após uma a uma foi posicionada a frente da câmera térmica para efetuar a medição. Vale lembrar que todas as amostras se encontram na mesma posição em relação a sua direção de laminação e que cada símbolo representa uma determinada temperatura. Sendo assim obtivemos os seguintes resultados (ver Tabela 4.4):

Tabela 4.4: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 39^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,3192	2,36	0,03
0,3584	2,329	0,005
0,3756	2,316	0,005
0,4248	2,323	0,007
0,7358	2,34	0,01
1,5008	2,482	0,008
2,6416	2,50	0,02

Com esses resultados, construímos o seguinte gráfico:

Figura 4.3: Gráfico de radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 39^\circ C$.

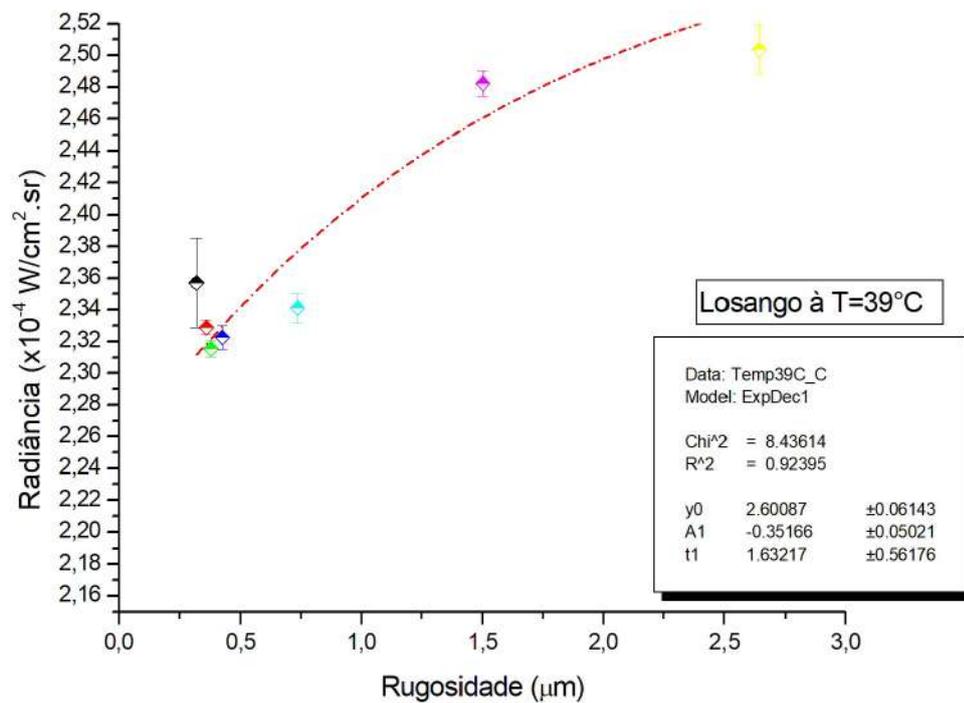


Tabela 4.5: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 37,95^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,3192	2,34	0,03
0,3584	2,301	0,007
0,3756	2,27	0,01
0,4248	2,35	0,01
0,7358	2,24	0,01
1,5008	2,302	0,004
2,6416	2,29	0,01

Com esses resultados, construímos o seguinte gráfico:

Figura 4.4: Gráfico de radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 37,95^\circ C$.

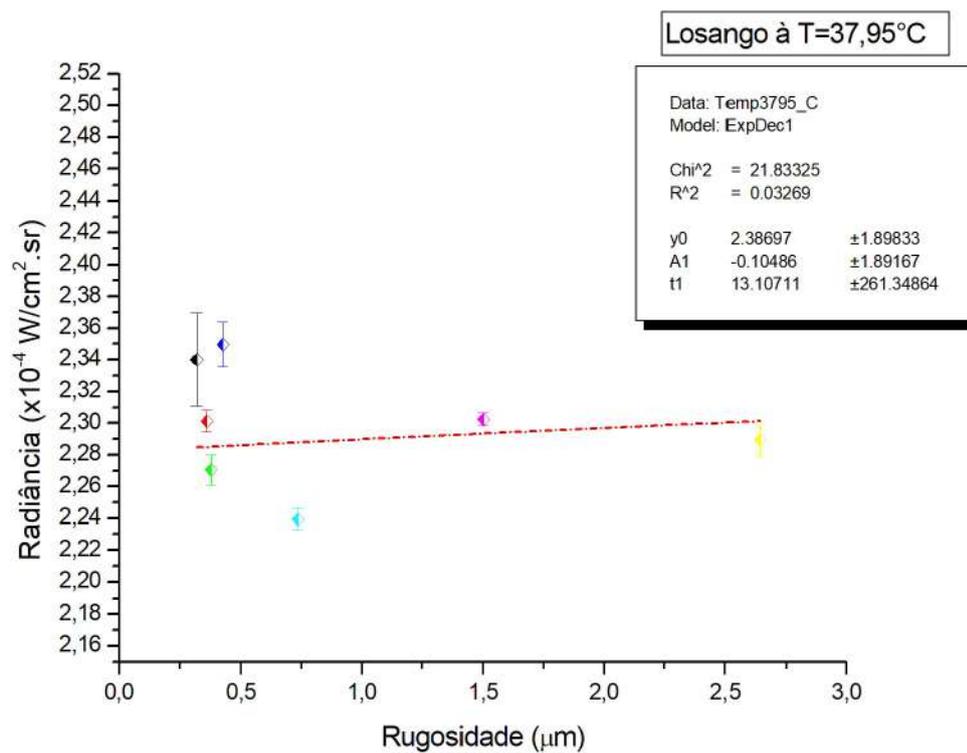


Tabela 4.6: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 33,9^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,3192	2,46	0,09
0,3584	2,405	0,007
0,3756	2,34	0,01
0,4248	2,32	0,01
0,7358	2,223	0,008
1,5008	2,248	0,004
2,6416	2,242	0,006

Com esses resultados, construímos o seguinte gráfico:

Figura 4.5: Gráfico de radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 33,9^\circ C$.

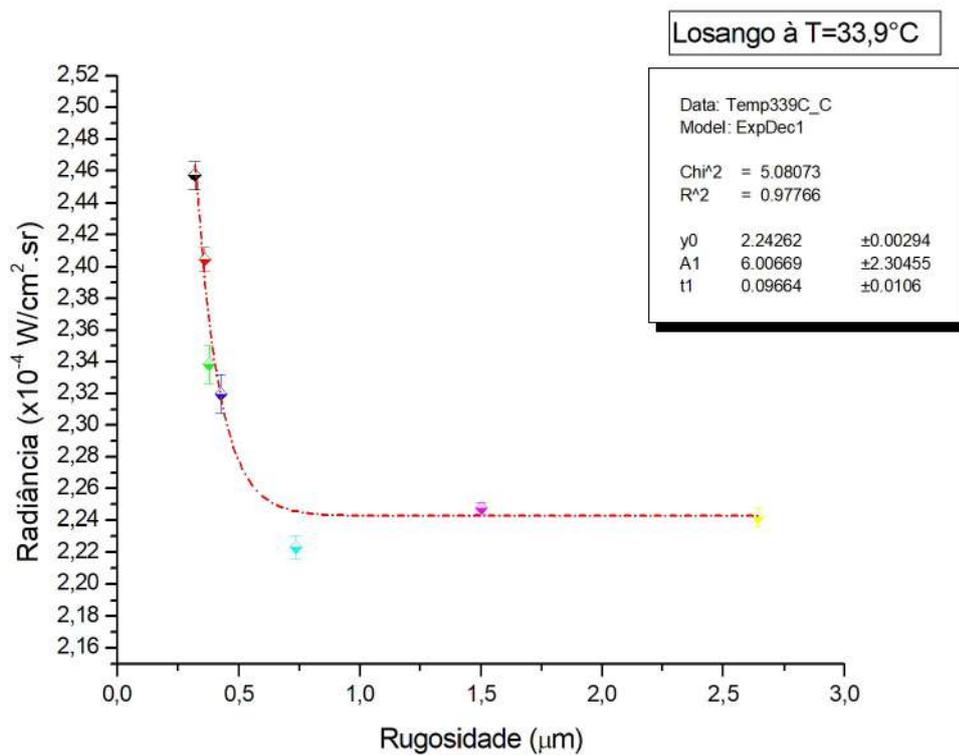


Tabela 4.7: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 31,85^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,3192	2,403	0,009
0,3584	2,318	0,008
0,3756	2,24	0,01
0,4248	2,26	0,01
0,7358	2,205	0,009
1,5008	2,189	0,004
2,6416	2,180	0,004

Com esses resultados, construímos o seguinte gráfico:

Figura 4.6: Gráfico de radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 31,85^\circ C$.

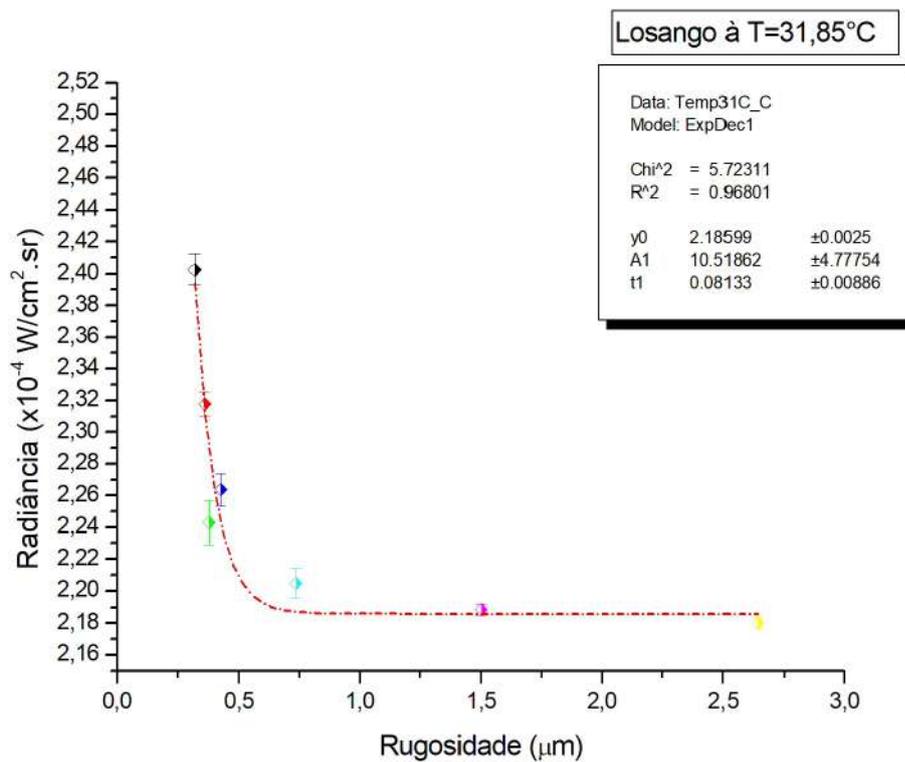
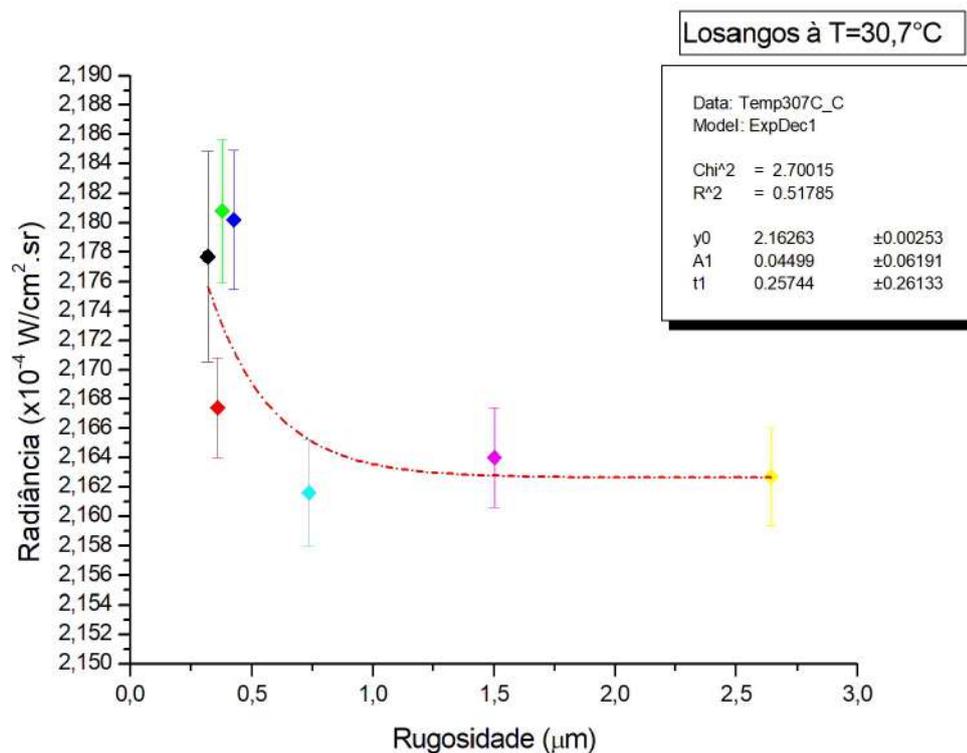


Tabela 4.8: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $\approx 30,7^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,3192	2,178	0,007
0,3584	2,167	0,003
0,3756	2,181	0,005
0,4248	2,180	0,005
0,7358	2,162	0,004
1,5008	2,164	0,003
2,6416	2,163	0,003

Com esses resultados, construímos o seguinte gráfico:

Figura 4.7: Gráfico de radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) à temperatura de $\approx 30,7^\circ C$.



Observa-se na sequência de gráficos acima, que a temperatura das amostras vai diminuindo. Isso se dá pelo fato de que as bolsas térmicas estão perdendo calor para o ambiente, o que analogamente acontece com as amostras de alumínio. O alumínio é um ótimo condutor, sendo assim sua temperatura cai rapidamente. Com relação a radiância medida pela câmera térmica, podemos observar no gráfico a temperatura de $\approx 39^\circ C$ a amostra com maior rugosidade tem seu valor de radiância mais alto do que as demais de rugosidade menor, o que vem a ser diferente dos resultados anteriores. A temperatura das amostras está acima da temperatura ambiente. Ainda não entendemos o motivo

desse comportamento do gráfico. Ou seja, a amostra com maior rugosidade esteja irradiando mais do que a de menor rugosidade. Os gráficos nas temperaturas de $\approx 37,95^{\circ}C$, $\approx 33,9^{\circ}C$ e $\approx 30,7^{\circ}C$, vemos uma tendência de queda da radiância em função da rugosidade, no entanto, pode observar que as duas últimas amostras tem um resultado um pouco mais elevado que as demais. Já no gráfico à temperatura de $\approx 31,85^{\circ}C$ vemos uma tendência de queda da radiância em função da rugosidade nitidamente, ou seja, as amostras com rugosidades menores tendem a emitir mais radiância na direção da câmera térmica e as com rugosidade maior tendem a ter mais espalhadores, chegando pouca radiância em sua direção, comportamento similar ao experimento com as bolsas térmicas congelados.

A temperatura dentro da caixa e das amostras caem exponencialmente, o que causa uma perda de calor muito rápida para o ambiente. A sequência que as amostras foram medidas pode ser um motivo para que a radiância tenha se elevado para rugosidades maiores. Após o tempo determinado para obter o equilíbrio térmico dentro da caixa de isopor, a mesma foi aberta, e uma a uma foi sendo posta na posição de medição. Para cada uma foi gasto o tempo de $1min$, sendo assim, entre a primeira e a última medida, se passaram $7min$, tempo suficiente para que a temperatura das amostras diminua e perca um pouco de precisão nas medidas. Esse tempo de medição pode ter sido o fator relevante para que os valores das duas amostras de maior rugosidade estejam discrepantes em 4 dos 5 gráficos apresentados.

Durante o experimento, foi possível observar algumas inconsistências para que a temperatura das amostras se mantivessem constantes em todo o processo de medição, mesmo assim, ainda conseguimos uma tendência de queda da radiância em função do aumento da rugosidade superficial.

4.2 Medida de radiância nas amostras de alumínio utilizando chapa aquecedora

Uma maneira de corrigir essa perda de calor e garantir uma melhor estabilidade da temperatura (como observamos na Seção anterior), foi trabalhar com uma chapa aquecedora (descrito na Seção 3.1.3) que possibilitou mantê-la por um determinado tempo.

Pensando em manter uma uniformidade em todas as medidas, estabelecemos um tempo a partir do instante que a temperatura desejada seja atingida, observou-se que para alcançar a temperatura de trabalho, se passou o tempo de aproximadamente 23 min, logo determinamos esse tempo para as demais amostras na chapa aquecedora. Para tal procedimento, seguimos três processos de configuração da chapa aquecedora que seguem descritos abaixo da mesma forma do esquema mostrado na Figura 3.14 :

1. Temperaturas de $100^{\circ}C$, $150^{\circ}C$ e $200^{\circ}C$ por $30min$ cada;
2. Temperaturas de $60^{\circ}C$ e $80^{\circ}C$ por $30min$ cada;
3. Temperaturas de $60^{\circ}C$ por $70min$;

O intuito de realizar esses processos na chapa aquecedora era de atingir uma temperatura maior ou igual a $39^{\circ}C$ obtida no experimento feito com as bolsas térmicas aquecidas (descrita na Seção 4.1). No entanto, as amostras não estavam atingindo tal temperatura, visto que havia uma perda de calor significativa para o ambiente. Então elevar a curva

de aquecimento a 100, 150 e 200°C, não satisfazia nosso objetivo. O mesmo ocorreu com o segundo processo de configuração da rampa de aquecimento da chapa aquecedora e a temperatura da amostra não aumentava após os 60°C. Sendo assim, optou-se por trabalhar com uma rampa de aquecimento de 60°C por um período de tempo maior e desta forma adquirimos os seguintes resultados:

Tabela 4.9: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação às temperaturas de 100, 150 e 200°C.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,3192	2,30	0,02
0,3584	2,41	0,01
0,3756	2,255	0,005
0,4248	2,28	0,01
0,7358	2,21	0,01
1,5008	2,565	0,01
2,6416	2,51	0,03

Com os dados obtidos na Tabela 4.9, pode-se construir o seguinte gráfico:

Figura 4.8: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração da chapa aquecedora nas temperaturas de 100, 150 e 200°C

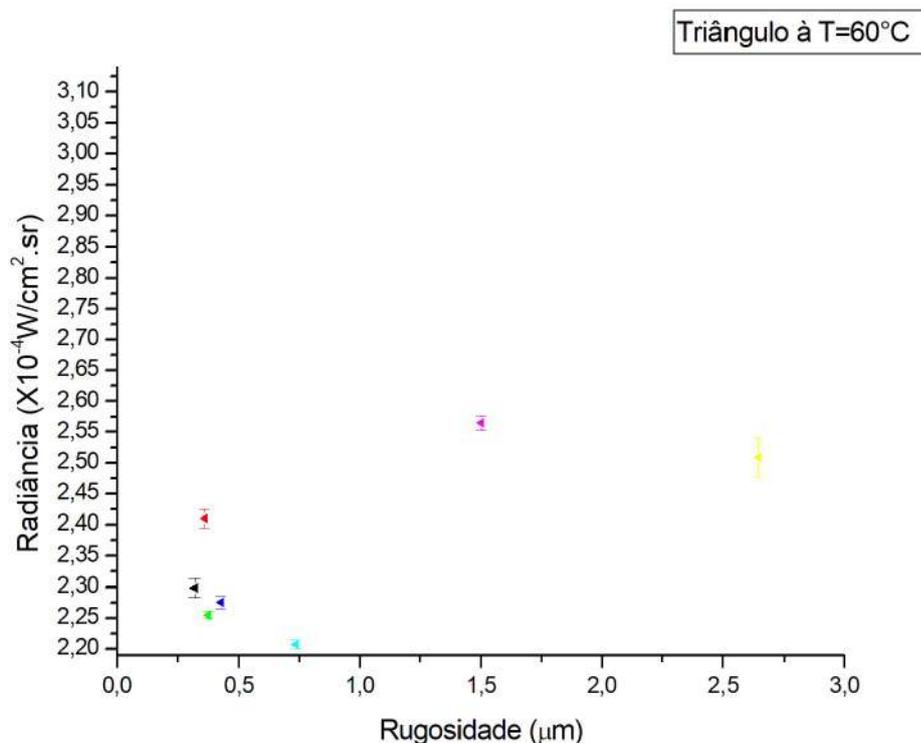


Tabela 4.10: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação às temperaturas de $60^\circ C$ e $80^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,3192	2,41	0,01
0,3584	2,54	0,01
0,3756	2,41	0,01
0,4248	2,48	0,02
0,7358	2,351	0,008
1,5008	3,13	0,02
2,6416	2,92	0,08

Com os dados obtidos na Tabela 4.10, pode-se construir o seguinte gráfico:

Figura 4.9: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração da chapa aquecedora nas temperaturas de 60 e $80^\circ C$.

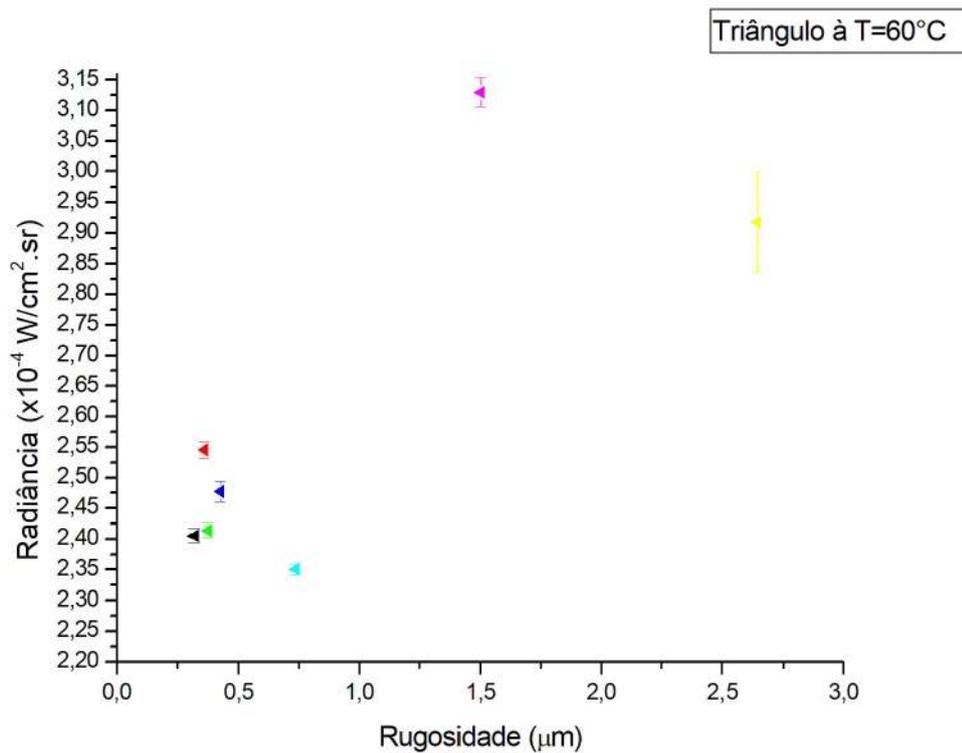
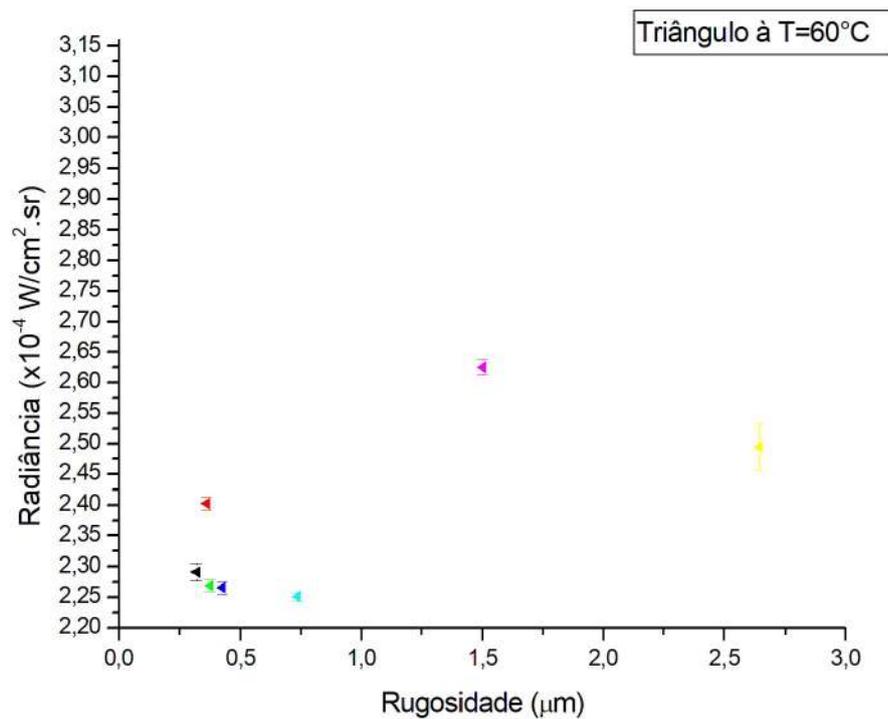


Tabela 4.11: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $60^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,3192	2,29	0,01
0,3584	2,40	0,01
0,3756	2,27	0,01
0,4248	2,27	0,01
0,7358	2,251	0,006
1,5008	2,62	0,01
2,6416	2,49	0,04

Com os dados obtidos na Tabela 4.11, pode-se construir o seguinte gráfico:

Figura 4.10: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração da chapa aquecedora nas temperaturas de $60^\circ C$.



Observando os gráficos obtidos nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, vemos que há uma desordem nos resultados. Novamente (como no experimento com as bolsas térmicas aquecidas) vemos que as duas amostras de maior rugosidade tendem a apresentar radiâncias maiores e as demais seguem a tendência de queda da mesma. Isso nos leva a pensar sobre alguns fatores, tais quais a falta de estabilidade na temperatura da amostra, ou seja, como a temperatura da amostra cai exponencialmente há uma grande perda de calor para o ambiente, o deslocamento da amostra entre a chapa aquecedora e a posição fixada à frente da câmera térmica, que foi realizada com a utilização de uma pinça e sobre a temperatura da amostra está mais alta do que a do ambiente.

Dentre as três configurações propostas para a chapa aquecedora, observou-se que as temperaturas aferidas pelos termopares permaneceram em torno de $60^{\circ}C$, ou seja, mesmo elevando a altas temperaturas as amostras perdem uma quantidade significativa de calor para o ambiente. Por exemplo, definindo a temperatura entre $100 - 200^{\circ}C$ não conseguimos estabilizá-la e as amostras se mantiveram no momento da medição a temperatura de $\approx 60^{\circ}C$.

Como a câmera térmica tem sensores sensíveis, optou-se por não colocar a chapa aquecedora em sua direção, sendo que ela também estaria emitindo radiação na região do infravermelho, causando uma interferência significativa nas medidas e pela distância de operação do procedimento está em torno de $94cm$ causaria um possível dano ao equipamento. Sendo assim, a retirada da amostra da chapa aquecedora até a posição desejada, levou a uma perda de calor expressiva com o ambiente, reduzindo sua temperatura consideravelmente. Um outro fator mencionado é a de formação de gotículas de água na superfície das amostras, devido a condensação, que é a fase onde ocorre a transformação da matéria, do estado gasoso para o líquido. Esse fenômeno também ocorre quando aquecemos um material a uma temperatura T , acima a do ambiente $\approx 25^{\circ}C$.

De acordo com os experimentos relatados nas Seções 4.1 e 4.2, pode-se analisar que em alguns casos temos uma perda de calor significativa com o ambiente e também pelo fato da temperatura decair exponencialmente. Tendo em vista tais acontecimentos se fez necessário modificar e melhorar o procedimento experimental, ajustando e eliminando as possíveis interferências. O nosso maior problema nos procedimentos mencionados, era em questão da estabilidade da temperatura e a aferição da temperatura exata das amostras, já que a câmera térmica não mede a temperatura. Desta forma, modificamos as amostras (como descrito na Seção 3.1.1) e criamos um circuito de controle de temperatura, garantindo ao procedimento uma melhor estabilidade nas temperaturas desejadas de trabalho. De qualquer forma, precisamos ainda refazer e analisar amostras com temperaturas maiores que a do meio ambiente.

4.3 Medida de radiância nas amostras de alumínio utilizando circuito eletrônico

As amostras utilizadas neste procedimento foram adaptadas, a qual nos referimos como conjunto de amostras 2 e possui dimensões $(25,5 \pm 0,02)mm$ de diâmetro e $(13,90 \pm 0,02)mm$ de espessura. Elas foram preparadas como descrito na Seção 3.1.1. Analogamente ao feito para o conjunto de amostra 1 (amostras com dimensões maiores), estabelecemos cores distintas para destacar as diferentes rugosidades das amostras, como pode ser visto na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Tabela das rugosidades medidas através do microscópio confocal do conjunto de amostras 2.

Granulometria	Rugosidade $R_a(\mu m)$	Desvio Padrão $\sigma(\mu m)$	Cores
1500	0,283	0,006	lilás
2500	0,312	0,007	vinho
2000	0,325	0,008	verde oliva
1200	0,35	0,02	ciano escuro
800	0,57	0,03	azul royal
600	0,77	0,04	laranja
320	0,8	0,4	violeta

Com os dados da Tabela 4.12 foi realizado alguns procedimento para caracterizar o efeitos que a temperatura e rugosidade das superfícies causam na radiância emitida pelo alumínio. Os processos foram:

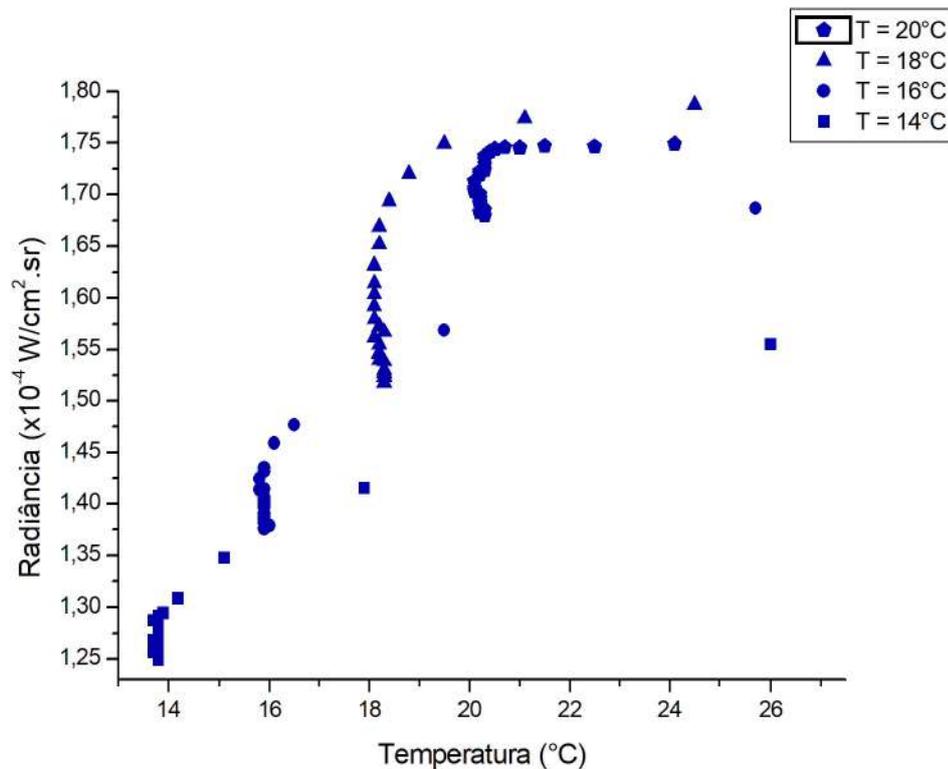
- Analisar o comportamento da radiância e a invariabilidade da temperatura (com a utilização do circuito com placa Peltier) no decorrer de $25min$;
- Ajustar a precisão da captura dos dados da câmera térmica com auxílio do papel alumínio amassado e com fita 3M;
- Modificar a caixa de e verificar se houve alterações nos resultados.

Ambos serão discutidos com mais rigor nas subseções subsequentes.

4.3.1 Análise do comportamento da radiância e a invariabilidade da temperatura das amostras no decorrer de 25 minutos

Um efeito bastante observado e questionado foi como a radiância e temperatura das amostras se comporta durante um determinado tempo. Com relação a temperatura este estudo foi realizado afim de monitorar seu funcionamento, ou seja, verificar se o programa (Arduíno) para o circuito com a placa Peltier irá manter a temperatura de trabalho desejada. Visando esta análise, procedemos o experimento durante $25min$, coletando os dados a cada $1min$ e mantendo a temperatura em $14^{\circ}C$, $16^{\circ}C$, $18^{\circ}C$ e $20^{\circ}C$, respectivamente. Este processo foi realizado para cada umas das 7 amostras. Logo obtivemos o seguinte resultado:

Figura 4.11: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela temperatura ($^{\circ}C$) da amostra de rugosidade $R_a = 0.790176\mu m$.



O gráfico da Figura 4.11 mostra o comportamento da radiância em função da temperatura durante o processo de $25min$. Para melhor compreendê-lo, observaremos os resultados do gráfico do lado direito para esquerdo. Inicialmente o circuito está desligado e os termopares estão medindo a temperatura ambiente das amostras. Assim que o circuito é ligado e setado na temperatura desejada, por exemplo a $14^{\circ}C$, o termopar vai registrando esse decaimento e a cada $1min$ a radiância vai sendo medida. Então podemos ver que, no início do processo (temperatura de $14^{\circ}C$), o termopar mede o valor de $26^{\circ}C$ e com o passar do tempo de $\approx 4min$, a temperatura já começa a estabilizar, variando $0.1^{\circ}C$ e vemos também que a radiância varia entre 1.25 e $1.30 \times 10^{-4}W/cm^2.sr$. O mesmo comportamento acontece para as demais temperaturas e verificamos que a radiância aumenta com o aumento da temperatura, o que faz sentido na teoria, sabendo que corpos aquecidos tendem a emitir mais radiação. Esta análise foi realizada para as demais amostras e ambas tiveram o mesmo comportamento visto no gráfico da Fig. 4.11.

Este estudo nos mostra que o circuito eletrônico com a placa Peltier atendeu aos nossos questionamentos sobre a estabilização da temperatura para as medidas de radiância, dando um controle mais preciso e eficaz, o que não ocorreu nos procedimentos descritos na subseções 4.1 e 4.2.

Seguindo este experimento com o tempo de $25min$, realizamos a análise dos dados com relação a radiância média pela rugosidade, onde fizemos a média dos 10 valores com a temperatura estável. Logo, obtivemos os seguintes resultados:

Tabela 4.13: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $14^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,28319	1,718	0,004
0,312372	1,73	0,01
0,325488	1,77	0,02
0,351298	1,817	0,006
0,567368	1,517	0,004
0,768282	1,331	0,006
0,790176	1,26	0,02

Com os dados, plotamos os gráficos da radiância em função da rugosidade de todas as amostras à temperatura de $14^\circ C$.

Figura 4.12: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $14^\circ C$.

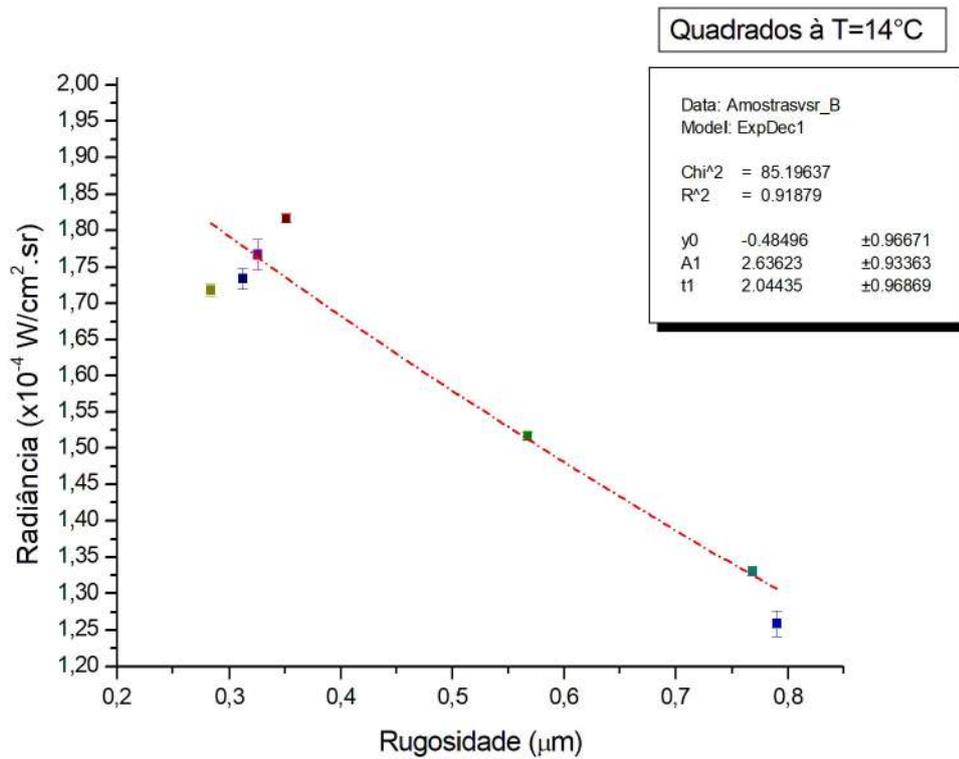


Tabela 4.14: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $16^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,28319	1,983	0,006
0,312372	1,74	0,01
0,325488	1,72	0,02
0,351298	1,83	0,01
0,567368	1,420	0,006
0,768282	1,416	0,006
0,790176	1,35	0,01

Com os dados, plotamos os gráficos da radiância em função da rugosidade de todas as amostras à temperatura de $16^\circ C$.

Figura 4.13: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $16^\circ C$.

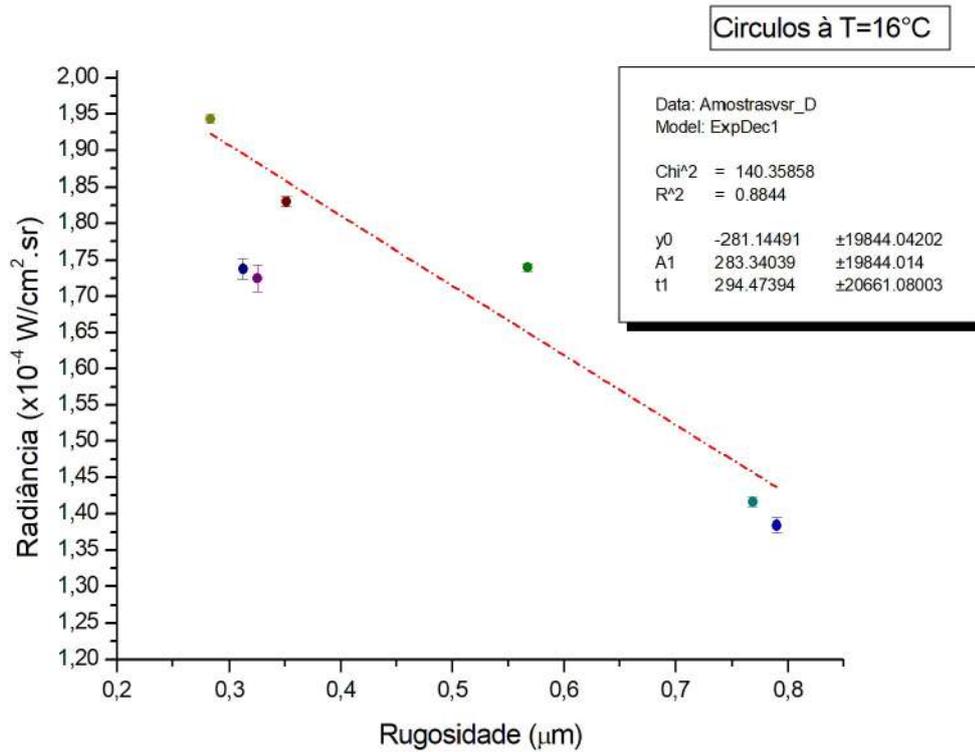


Tabela 4.15: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $18^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,28319	1,9631	0,0064
0,312372	1,741	0,014
0,325488	1,89	0,03
0,351298	1,78	0,01
0,567368	1,56	0,01
0,768282	1,557	0,005
0,790176	1,529	0,005

Com os dados, plotamos os gráficos da radiância em função da rugosidade de todas as amostras à temperatura de $18^\circ C$.

Figura 4.14: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $18^\circ C$.

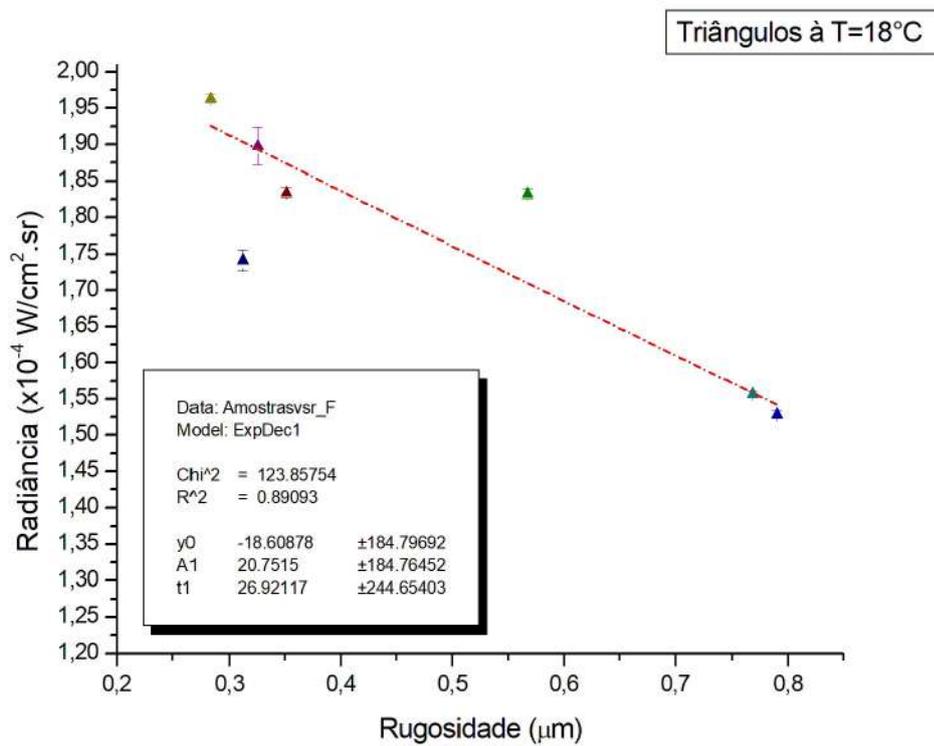
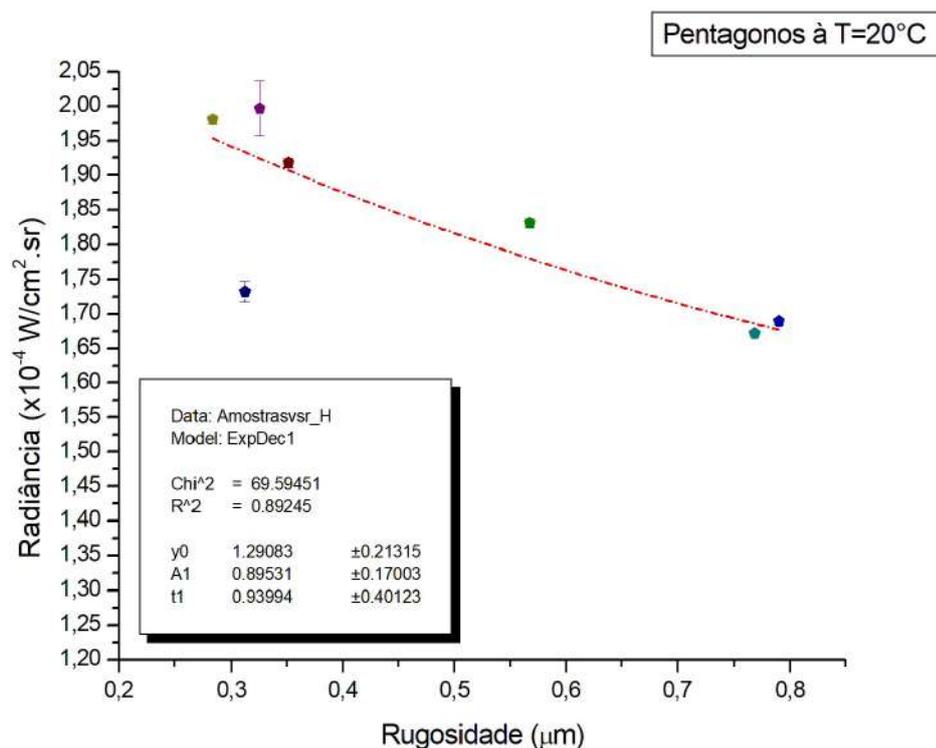


Tabela 4.16: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $20^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,28319	1,980	0,006
0,312372	1,73	0,01
0,325488	1,99	0,04
0,351298	1,907	0,006
0,567368	1,802	0,007
0,768282	1,672	0,004
0,790176	1,689	0,005

Com os dados, plotamos os gráficos da radiância em função da rugosidade de todas as amostras à temperatura de $20^\circ C$.

Figura 4.15: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $20^\circ C$.



Vemos uma tendência de queda da radiância em função da rugosidade nos gráficos mostrados nas figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15.

Comparando com os resultados obtidos nos experimentos da bolsa térmica e da chapa aquecedor, a qual podemos observar uma tendência de decaimento exponencial, os gráficos das Figuras 4.12-4.15, apresentam um decaimento linear. No entanto, atentamos a rugosidade das amostras do conjunto dois que vai até $R_a = 0.790176\mu m$ e para o conjunto de amostra um vai até $R_a = 2.6416\mu m$, onde percebesse o resultado similar a região inicial dos gráficos plotados nos experimentos preliminares.

Um fator importante a ser considerado é o deslocamento vertical dos dados, sugerindo que tanto a radiância emitida pelas amostras quanto suas rugosidades são sensíveis a variação de temperatura aplicada a elas.

4.3.2 Análise do comportamento da radiância com o ajuste do papel alumínio amassado e da fita isolante 3M

Sabemos que o alumínio reflete muito na região do infravermelho. Sua emissividade teórica é de aproximadamente 0.28 para alumínio rugoso e 0.04 – 0.06 para o polido. Isso indica que cerca de 28% e 4% – 6% da radiância são emitidas respectivamente, o restante é refletido. Alguns estudos feitos da câmera térmica Flir [34], levou a um ajuste (como mencionado na Seção 3.3.3) que agiu como uma correção para a parte refletida do alumínio, que foi a utilização de um papel alumínio amassado, que também possui emissividade muito baixa e uma fita isolante 3M, a qual temos sua emissividade é dada como 1, sendo considerado um corpo negro ideal. Para essa procedimento optou-se por trabalhar com as temperaturas de 10, 14, 18 e 20°C. Desta forma, fez-se a correção para todas as amostra e obtivemos os seguintes resultados:

Tabela 4.17: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de 10°C.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,28319	1,6045	0,007
0,312372	1,64	0,02
0,325488	1,554	0,005
0,351298	1,61	0,01
0,567368	1,628	0,005
0,768282	1,562	0,007
0,790176	1,580	0,007

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.16: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2 \cdot sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 10 e com ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado e fita isolante 3M.

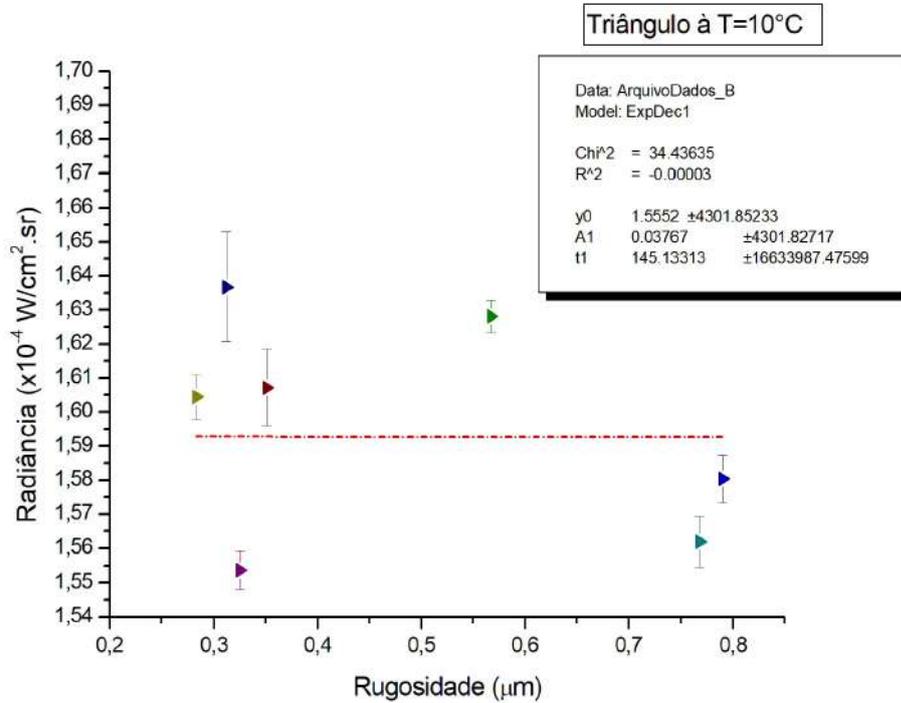


Tabela 4.18: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2 \cdot sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $14^\circ C$.

$R_a (\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2 \cdot sr$)	$\sigma (\times 10^{-4} \mu m)$
0,28319	1,625	0,007
0,312372	1,66	0,02
0,325488	1,63	0,01
0,351298	1,65	0,01
0,567368	1,649	0,004
0,768282	1,613	0,006
0,790176	1,631	0,006

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.17: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 14 e com ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado e fita isolante 3M.

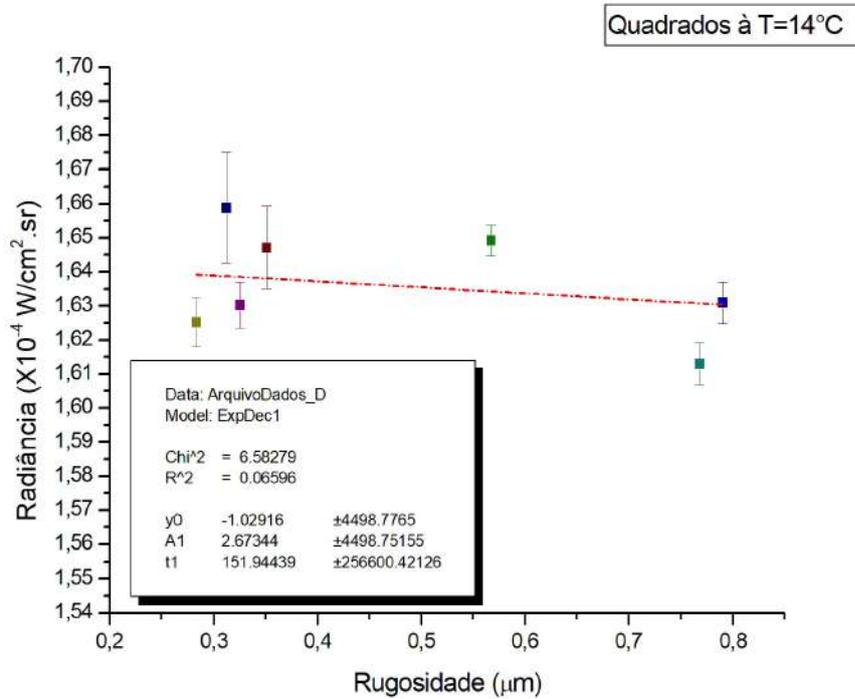


Tabela 4.19: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $18^{\circ}C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,28319	1,635	0,007
0,312372	1,69	0,07
0,325488	1,646	0,008
0,351298	1,66	0,01
0,567368	1,673	0,004
0,768282	1,651	0,005
0,790176	1,651	0,007

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.18: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 18 e com ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado e fita isolante 3M.

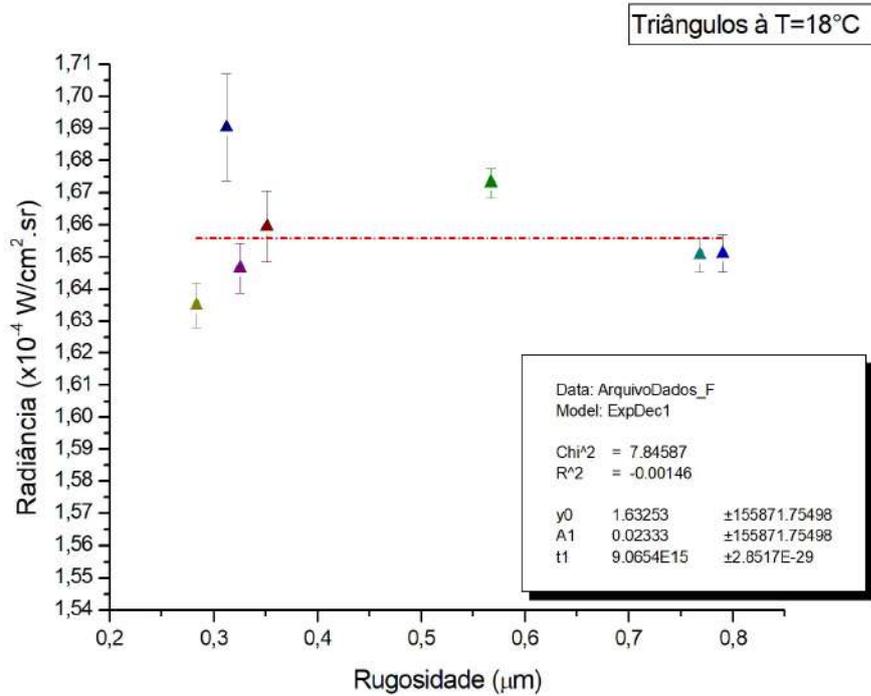
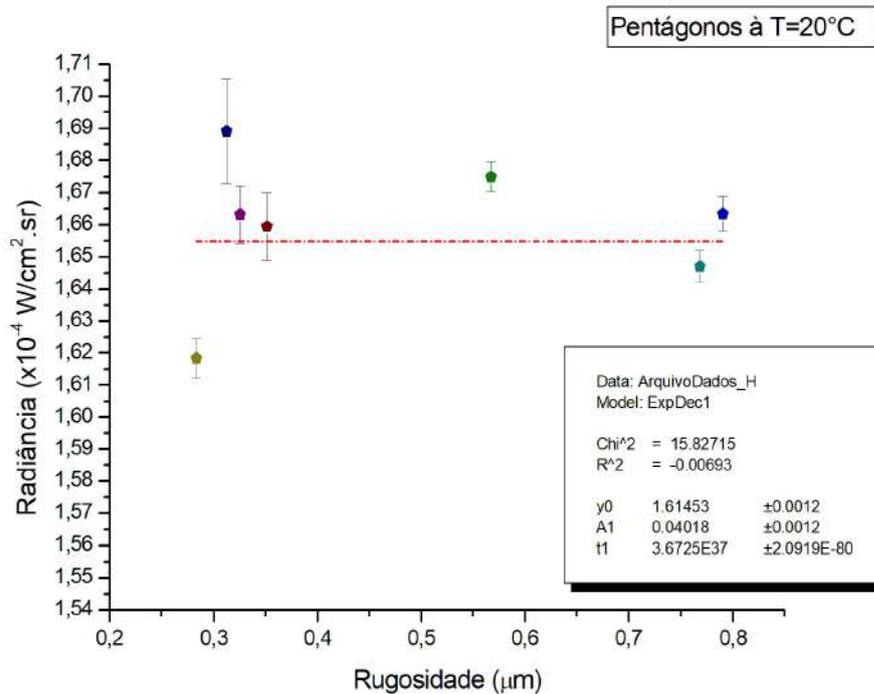


Tabela 4.20: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $20^{\circ}C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,28319	1,618	0,006
0,312372	1,69	0,02
0,325488	1,66	0,01
0,351298	1,66	0,01
0,567368	1,675	0,005
0,768282	1,647	0,005
0,790176	1,663	0,005

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

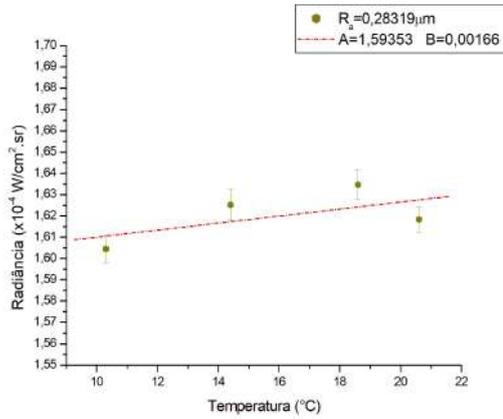
Figura 4.19: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2 \cdot sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de 20 e com ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado e fita isolante 3M.



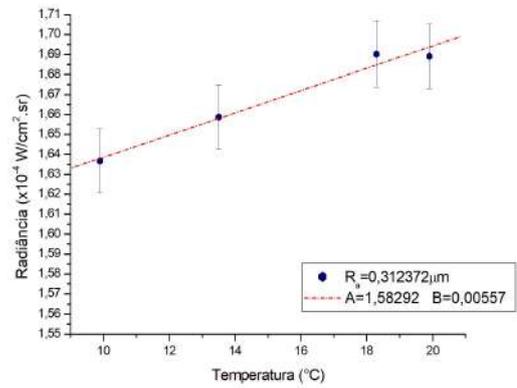
Podemos novamente observar uma tendência de queda da radiância com o aumento da rugosidade. No entanto, existem alguns pontos bem discrepantes ao longo do gráfico. Na primeira figura (Fig.4.16) setamos a temperatura de $10^{\circ}C$, porém pudemos atentar a formação de gotículas de água na superfície das amostras, vista na imagem exibida pela câmera térmica. As amostras com baixa rugosidade tiveram sua radiância afeta drasticamente pela formação de gotículas de água em sua superfície, porém mesmo com esse fenômeno acontecendo, vemos uma queda da radiância em função da rugosidade, exceto pela amostra de rugosidade $0.325488\mu m$. Vale lembrar que o processo de lixamento das amostras é totalmente manual, então sua superfície não é regular, o que pode acarretar em um acúmulo de água mais acentuado. Para as demais temperaturas há um melhor agrupamento dos resultados, mas os valores de radiância varia muito de uma amostra para outra. Nota-se que no eixo das radiâncias que ela aumenta com relação ao aumento da temperatura, isso é coerente com que espera-se, já que aumentar a temperatura de um material ele tenderá a emitir mais energia. Isso pode ser observado de uma melhor maneira, através dos gráficos de radiância pela temperatura de cada amostra.

Figura 4.20: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2 \cdot sr$) pela temperatura ($^{\circ}C$) de cada amostra de alumínio. Variando a temperatura em 10, 14, 18 e 20 $^{\circ}C$.

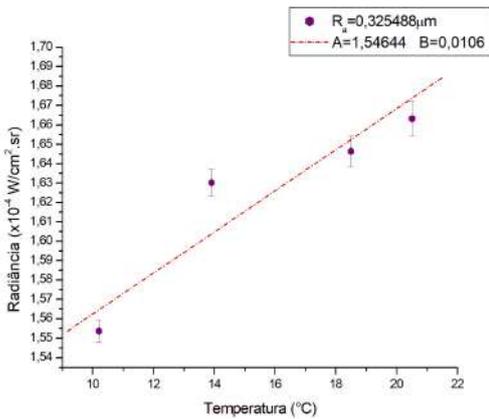
(a) $R_a = 0,28319\mu m$



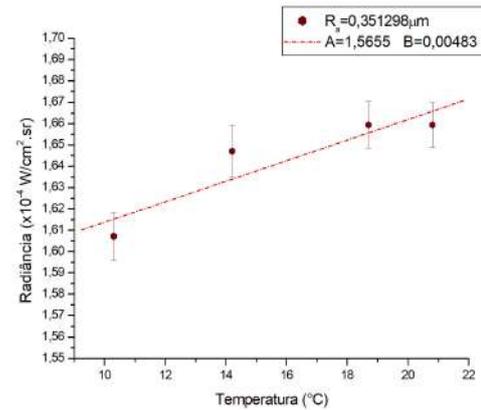
(b) $R_a = 0,312372\mu m$



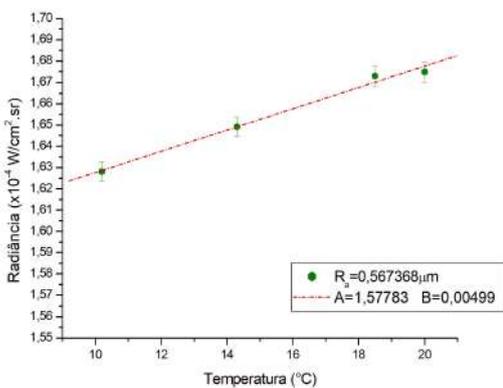
(c) $R_a = 0,325488\mu m$



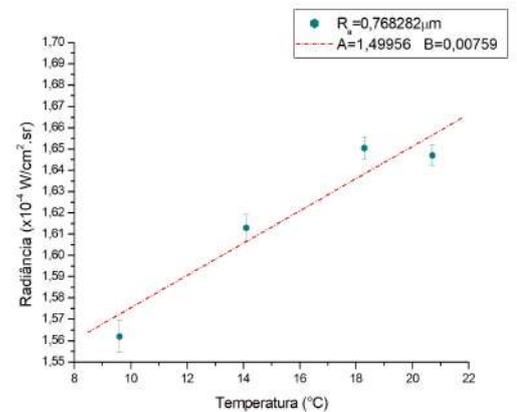
(d) $R_a = 0,351298\mu m$

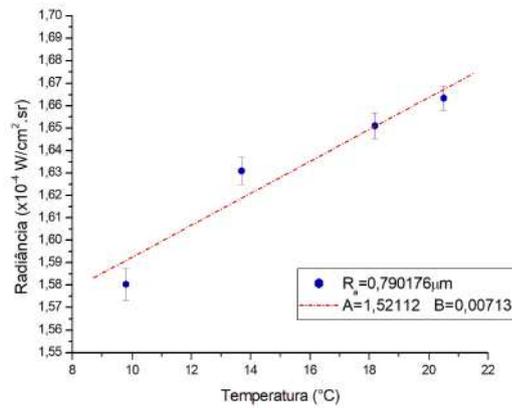


(e) $R_a = 0,567368\mu m$



(f) $R_a = 0,768282\mu m$



(g) $R_a = 0,790176 \mu m$

4.3.3 Análise do comportamento da radiância modificando o layout da caixa de isolamento

Como descrito na Seção 3.3.3 o layout da caixa de isopor foi modificado, pois agora somente a superfície da placa Peltier se encontra dentro da mesma. Com o retorno da atividades presenciais ao campus da universidade, foram produzidas duas novas amostras com rugosidades maiores, sendo seu processo análogo ao realizado com as demais amostras. As lixas utilizadas para o processo foram as de granulometria 40 e 120 mesh, e suas rugosidades medidas no microscópio confocal é de $2.5588 \mu m$ e 0.9934 respectivamente. Essas amostras tiveram suas radiâncias medidas.

Essa modificação na caixa de isopor diminui o tempo para as amostras chegarem a temperatura desejada para o trabalho. Sendo assim, optou-se por operar nas temperaturas de 14 , 16 , 18 e $20^\circ C$, que possibilitou não mais observar tal formação de gotículas de água na superfície das amostras. Logo, refizemos as medidas para os dois conjuntos de amostras e agora sem o ajuste do papel alumínio amassado. A seguir será mostrado os resultados da radiância em função da rugosidade para cada conjunto de amostra respectivamente.

Para o conjunto de amostras um (amostras com dimensões maiores Fig. 3.1), gerou-se os seguintes resultados para diferentes temperaturas:

Tabela 4.21: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $14^\circ C$.

$R_a (\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma (\times 10^{-4} \mu m)$
0,3584	1,634	0,005
0,3726	1,660	0,003
0,4248	1,657	0,004
0,7348	1,645	0,004
1,5008	1,593	0,002
2,6416	1,563	0,004

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.21: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $14^{\circ}C$, do conjunto de amostra 1 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.

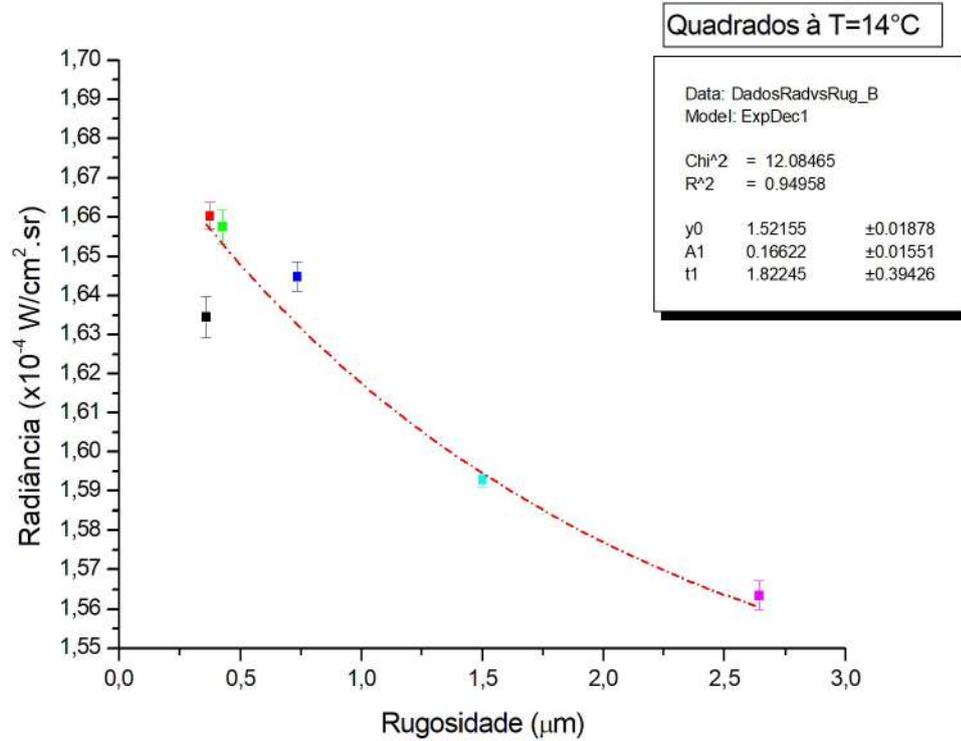


Tabela 4.22: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $16^{\circ}C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,3584	1,656	0,004
0,3726	1,662	0,003
0,4248	1,649	0,012
0,7348	1,633	0,004
1,5008	1,572	0,006
2,6416	1,586	0,003

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.22: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2 \cdot sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $16^\circ C$, do conjunto de amostra 1 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.

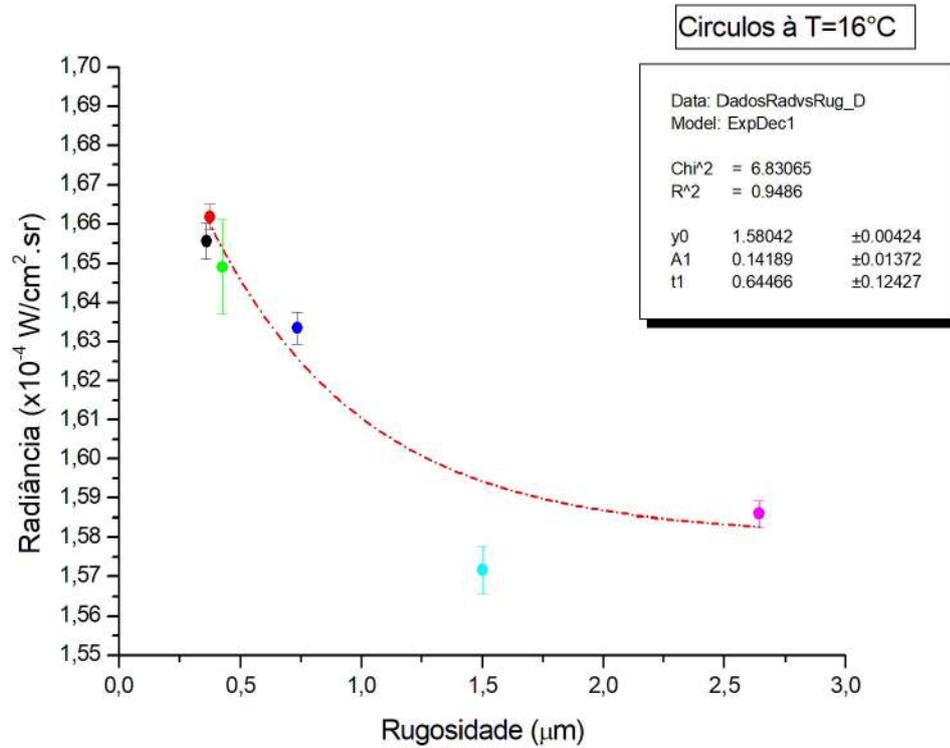


Tabela 4.23: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2 \cdot sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $18^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2 \cdot sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,3584	1,639	0,005
0,3726	1,655	0,003
0,4248	1,67	0,01
0,7348	1,643	0,004
1,5008	1,606	0,005
2,6416	1,584	0,003

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.23: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $18^\circ C$, do conjunto de amostra 1 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.

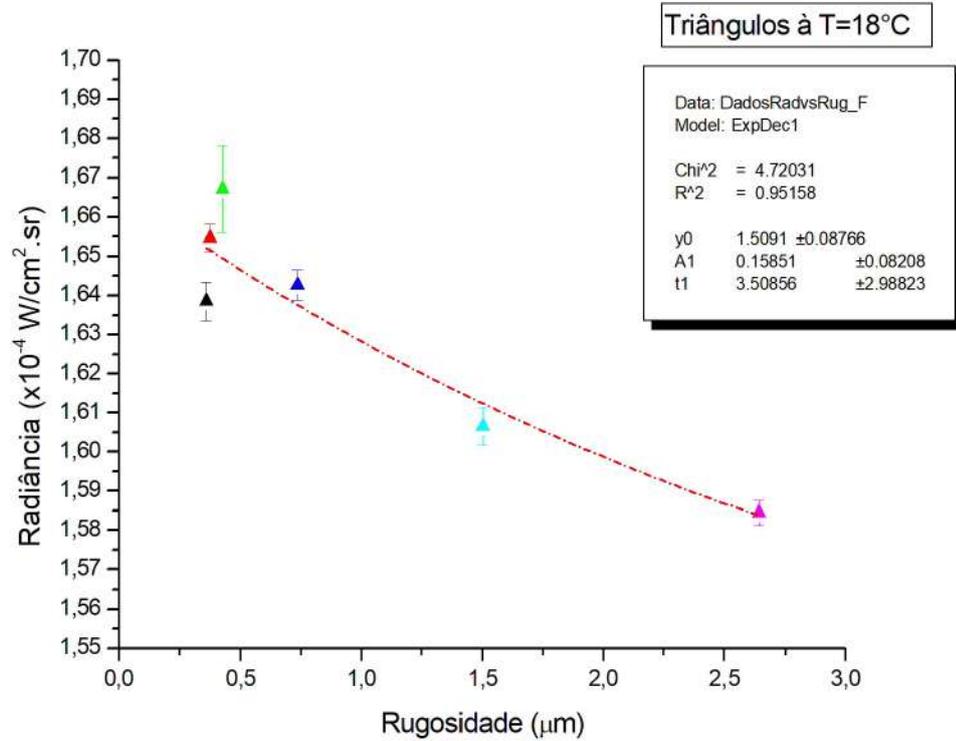
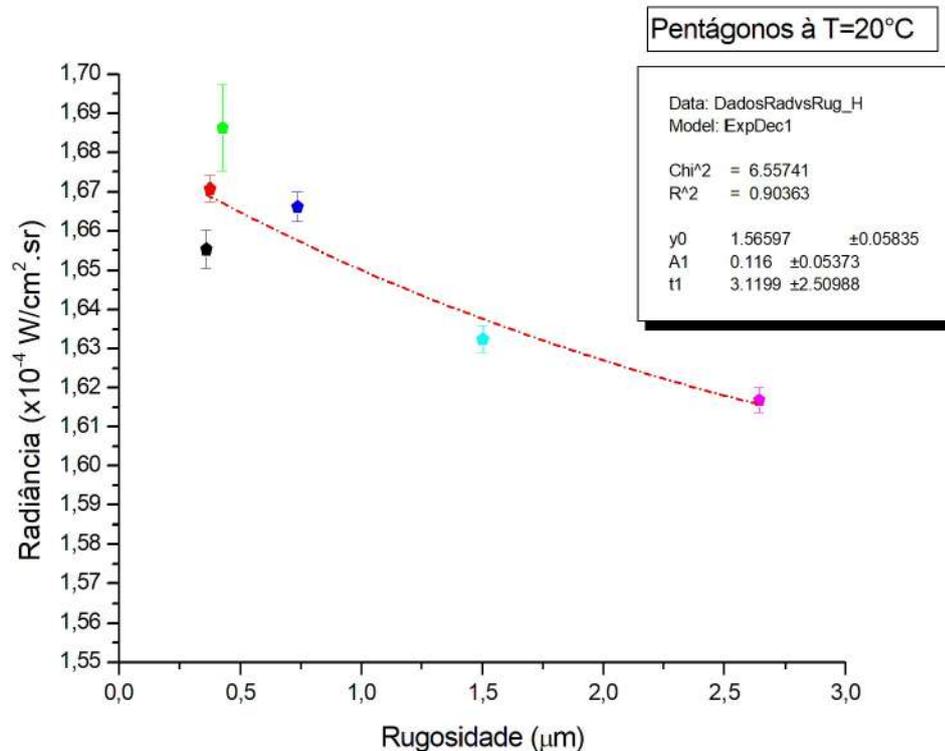


Tabela 4.24: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $20^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,3584	1,655	0,005
0,3726	1,671	0,003
0,4248	1,69	0,01
0,7348	1,666	0,004
1,5008	1,632	0,003
2,6416	1,617	0,003

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.24: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier na temperatura de $20^{\circ}C$, do conjunto de amostra 1 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.



Observa-se nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 que há um decaimento exponencial na radiância em função da rugosidade. Note que agora a amostra mais rugosa tem $R_a = 2.6416\mu m$. Trabalhamos neste experimento com temperaturas mais baixas entre 14 e $20^{\circ}C$. Então, fazendo uma comparação com os resultados obtidos no experimento com bolsas térmicas congeladas (Figuras 4.1 e 4.2), nos atentamos ao eixo y (radiância), nota-se que a radiância para tal experimento varia de 1.88 à $2.19 \times 10^{-4}W/cm^2.sr$. Já no experimento com a utilização da placa Peltier (Figuras 4.21-4.24) a radiância varia entre 1.55 à $1.70 \times 10^{-4}W/cm^2.sr$. Isso ocorre devido a temperatura externa do ambiente, que para o primeiro caso foi feito no anexo A com temperatura de aproximadamente $27^{\circ}C$ e no segundo no laboratório com temperatura próxima a $23^{\circ}C$. A câmara térmica é muito sensível na captura da radiação infravermelha, logo a temperatura do ambiente influencia diretamente na medida de radiância.

Já para o conjunto de amostras dois (amostras com dimensões menores, como visto na Fig.3.2) ao qual acrescentou-se mais duas com rugosidades altas, obtivemos os seguintes resultados:

Tabela 4.25: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $14^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,28319	1,63	0,01
0,312372	1,62	0,01
0,325488	1,62	0,01
0,351298	1,593	0,006
0,567368	1,62	0,01
0,768282	1,585	0,006
0,790176	1,61	0,01
0,9934	1,55	0,01
2,5588	1,518	0,003

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.25: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier nas temperaturas de $14^\circ C$, do conjunto de amostra 2 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.

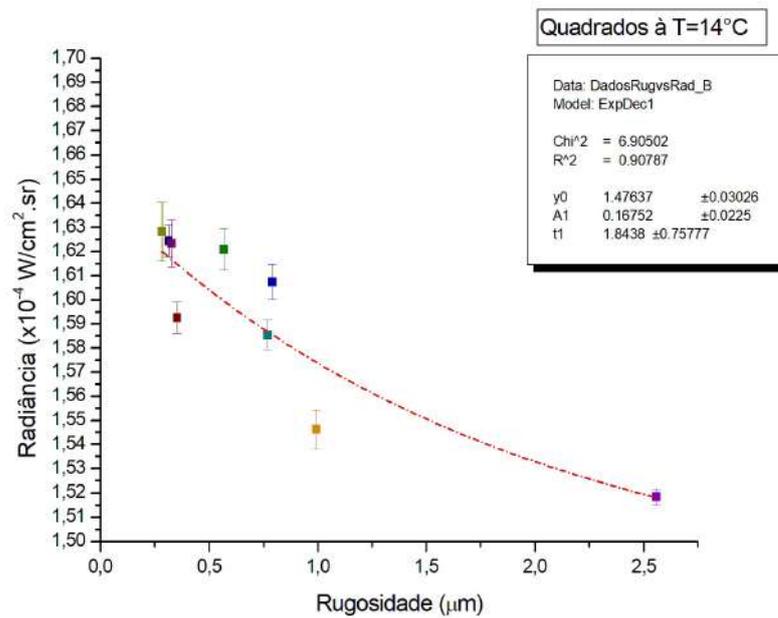


Tabela 4.26: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $16^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,28319	1,625	0,013
0,312372	1,631	0,007
0,325488	1,63	0,01
0,351298	1,614	0,006
0,567368	1,65	0,01
0,768282	1,612	0,006
0,790176	1,634	0,007
0,9934	1,561	0,006
2,5588	1,533	0,003

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.26: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier nas temperaturas de $16^\circ C$, do conjunto de amostra 2 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.

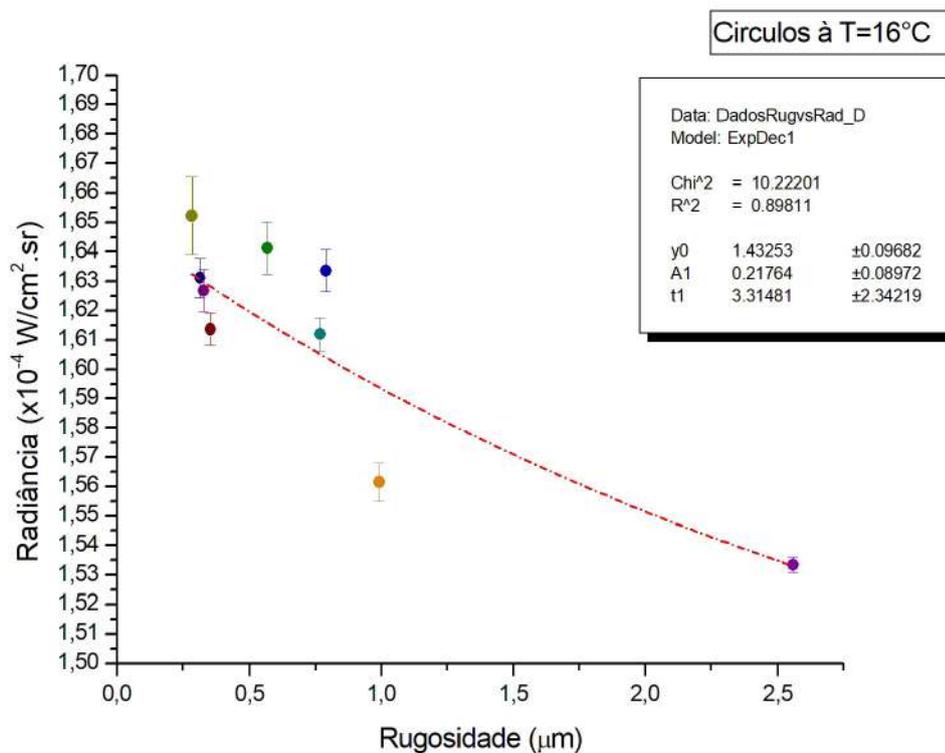


Tabela 4.27: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $18^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4}\mu m)$
0,28319	1,68	0,01
0,312372	1,69	0,01
0,325488	1,64	0,01
0,351298	1,636	0,004
0,567368	1,65	0,01
0,768282	1,635	0,005
0,790176	1,653	0,007
0,9934	1,57	0,01
2,5588	1,530	0,002

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.27: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier nas temperaturas de $18^\circ C$, do conjunto de amostra 2 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.

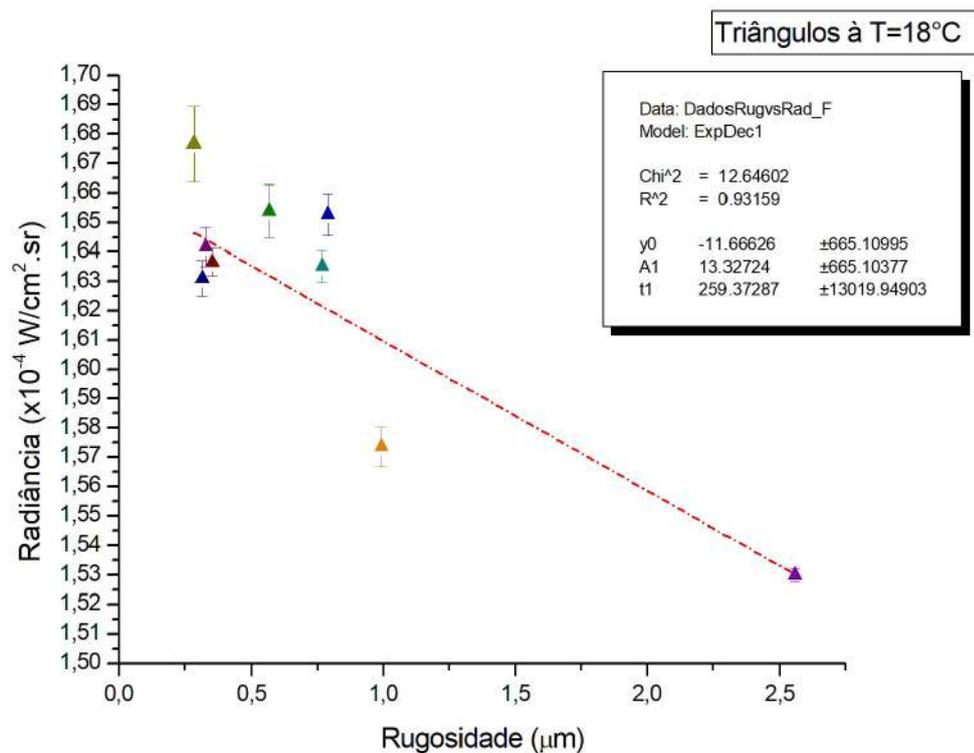
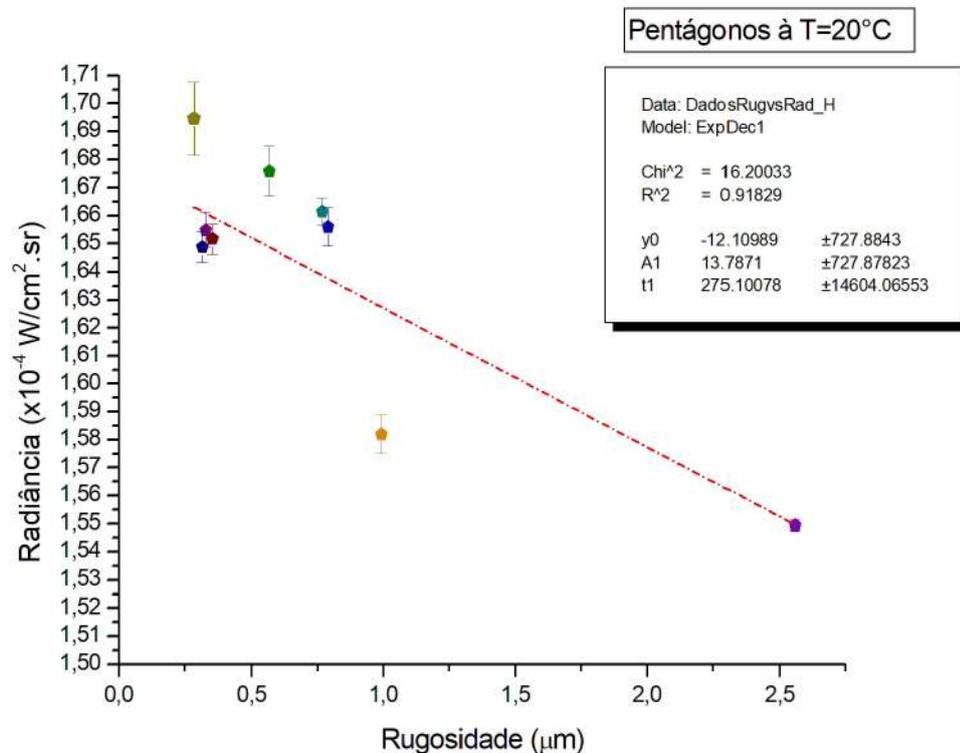


Tabela 4.28: Dados da média das radiâncias ($W/cm^2.sr$), medidas nas diferentes amostras, com diferentes rugosidades e todas efetuadas na mesma posição de laminação à temperatura de $20^\circ C$.

$R_a(\mu m)$	Radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$)	$\sigma(\times 10^{-4} \mu m)$
0,28319	1,69	0,01
0,312372	1,649	0,005
0,325488	1,655	0,006
0,351298	1,652	0,005
0,567368	1,67	0,01
0,768282	1,661	0,005
0,790176	1,66	0,01
0,9934	1,58	0,01
2,5588	1,549	0,002

Com os dados, plotamos o gráfico da radiância em função da rugosidade de todas as amostras.

Figura 4.28: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4} W/cm^2.sr$) pela rugosidade (μm) com configuração do circuito eletrônico com placa Peltier nas temperaturas de $20^\circ C$, do conjunto de amostra 2 e sem ajuste da temperatura aparente refletida pelo papel alumínio amassado.



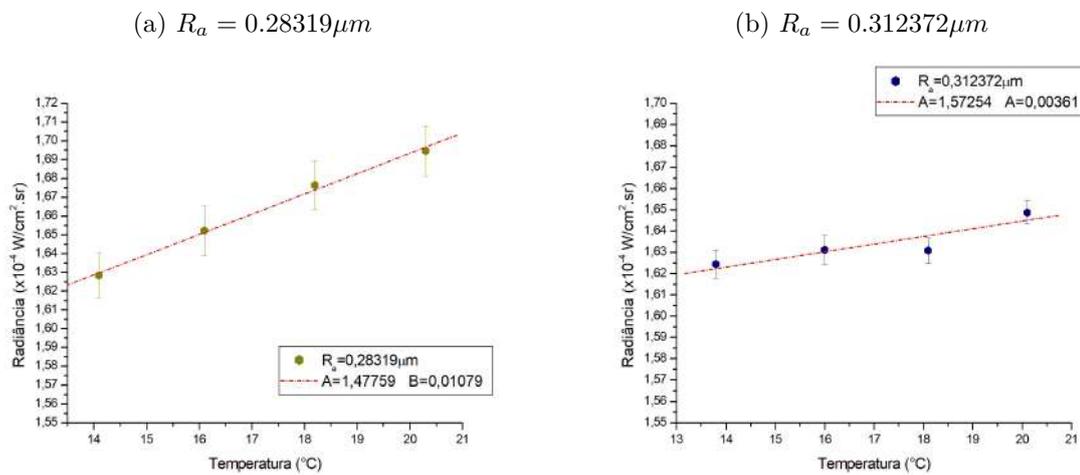
Os gráficos feito com o conjunto de amostra 2 e as amostras adicionais, utilizando a caixa de isopor adaptada, teve como resultado um decaimento exponencial. Comparando com os gráficos do conjunto de amostra 1, agora é possível ver uma tendência similar entre elas, isso ocorre pelo fato dos valores de rugosidades estarem mais próximos uns dos outros. Os valores de radiância para as duas amostras de menos rugosidade estão

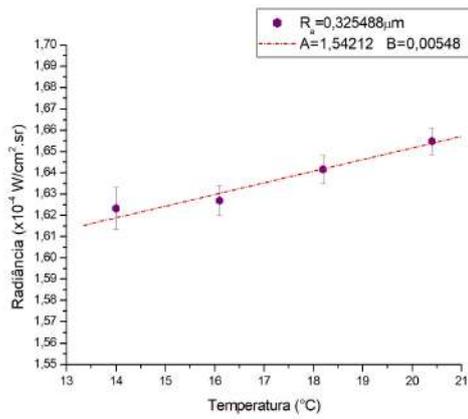
com valores abaixo do que havíamos encontrado nos resultados utilizando a correção da temperatura aparente refletida. Esses resultados são coerentes com o esperado, já que amostras com maior rugosidade superficial, tendem a ter mais espalhadores, fazendo com que chegue uma menor quantidade de radiância na direção da câmera térmica.

Observando o eixo y dos gráficos das Figuras 4.25-4.28, vemos que com o aumento da temperatura a um deslocamento para cima da radiância emitida pelas amostras. Isso faz sentido se pensar que quando um corpo é aquecido ele irá emitir mais radiação. Comparando os resultados obtidos na Figura 4.17 com os da 4.25 à temperatura de $14^{\circ}C$, vemos que os valores da radiância para a amostra $R_a = 0.28319\mu m$ é de $1.6253 \times 10^{-4}W/cm^2.sr$ para o experimento com o ajuste da temperatura aparente refletida do papel alumínio amassado e com a superfície do dissipador de calor visível na caixa e de $1.6284 \times 10^{-4}W/cm^2.sr$ para o experimento sem o ajuste e com a superfície do dissipador de calor fora da caixa. Nota-se que teve uma variação de 0.0031, o que não foi muito grande. Os dados para o segundo experimento, teve uma resposta melhor com o aumento da temperatura o que nos faz considerar que a caixa de isolamento de fontes de calor externas foram eficazes.

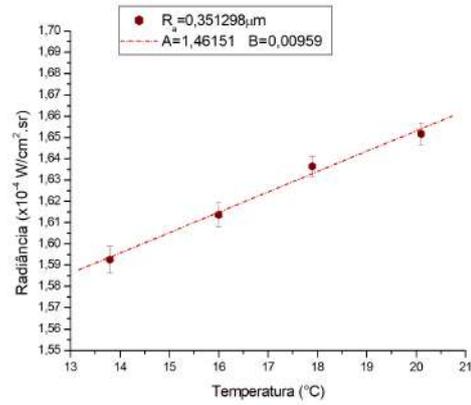
Para todas as temperaturas de 14, 16, 18 e $20^{\circ}C$ os valores de radiância varia em $1.5185 - 1.5494 \times 10^{-4}W/cm^2.sr$ na amostra de rugosidade $R_a = 2.5588\mu m$ e $1.5463 - 1.5820 \times 10^{-4}W/cm^2.sr$ para a amostra de rugosidade $0.9934\mu m$ o que informa que a um aumento na radiância com o aumento da temperatura e pode ser visto nos gráficos da Figura 4.29.

Figura 4.29: Gráfico da radiância ($\times 10^{-4}W/cm^2.sr$) pela temperatura ($^{\circ}C$) de cada amostra de alumínio com caixa de isolamento de fontes calor externas modificada. Variando a temperatura em 14, 16, 18 e $20^{\circ}C$.

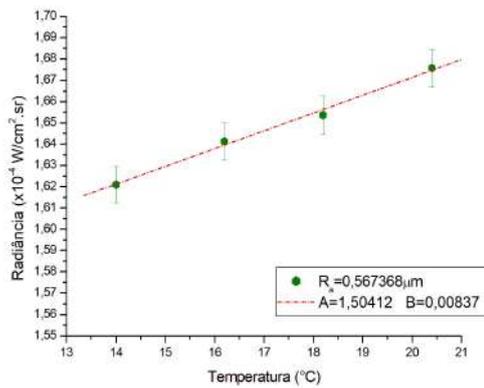




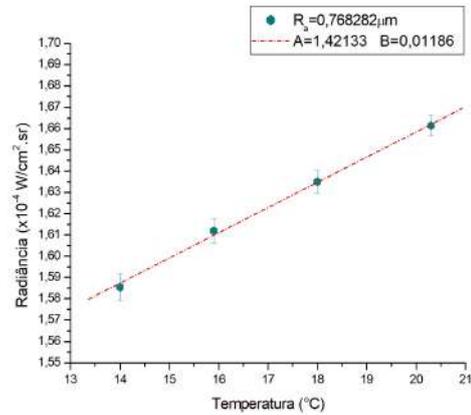
(c) $R_a = 0.325488\mu m$



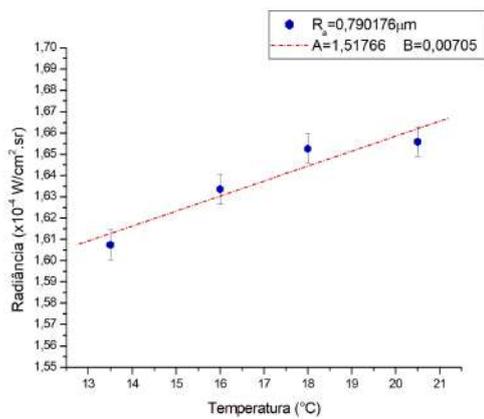
(d) $R_a = 0.351298\mu m$



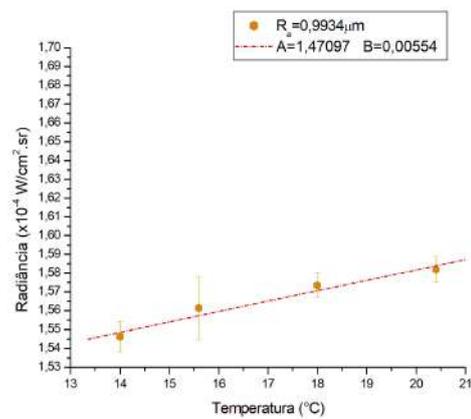
(e) $R_a = 0.567368\mu m$



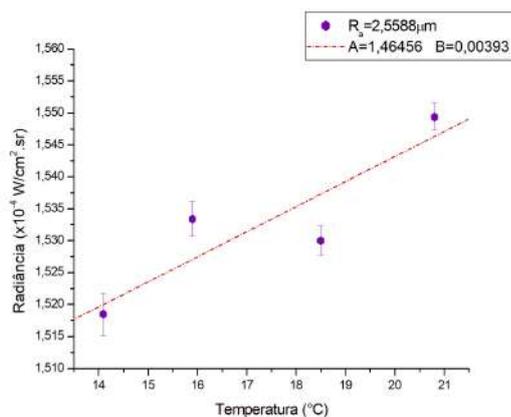
(f) $R_a = 0.768282\mu m$



(g) $R_a = 0.790176\mu m$



(h) $R_a = 0.9934\mu m$



(i) $R_a = 2,5588 \mu\text{m}$

Os resultados exibidos mostram claramente que radiância captada é sensível a rugosidade da superfície das amostras, assim como sua temperatura. Desta forma é possível vislumbrar um procedimento para medida indireta da rugosidade.

Conclusão

Neste trabalho foi usada uma câmera térmica de alta frequência da marca FLIR®A6753sc, para detectar a radiância de superfícies metálicas com rugosidades distintas a uma temperatura T determinada e constante. Além disso, foi analisado o efeito da variação de temperatura na radiância emitida pelas superfícies das amostras. Foram realizados três processos de montagens experimentais a fim de obter resultados mais confiáveis possíveis, tais como a utilização de bolsas térmicas para resfriar e aquecer as amostras, a chapa aquecedora e o circuito eletrônico com a pastilha Peltier controlado por um Arduíno, ambos foram criados e modificados para obter estabilidade em suas temperaturas.

Devido a pandemia do COVID-19 e o fechamento do campus, que limitou o acesso ao laboratório, houve a possibilidade de deslocar alguns equipamentos ao Anexo A. Os experimentos realizados no Anexo A e no laboratório constataram a influência da temperatura do ambiente nas medidas. Deste modo, atentou-se que os valores de radiância das amostras se elevaram a medida que subiu a temperatura.

Igualmente, observou-se que há uma tendência de redução da radiância à medida que a rugosidade das superfícies metálicas aumentam. As adaptações foram bastante relevantes para o aprimoramento da técnica e pôde perceber o quão sensível e preciso é o funcionamento da câmera térmica. Finalmente, é possível perceber que pode-se propor uma prova de princípio para medida da rugosidade ou detecção de variação de rugosidade, uma vez que mostrou-se que a radiância captada da superfície depende de sua rugosidade. Obviamente é preciso aperfeiçoar o processo. Destaca-se nesta direção, a melhoria do isolamento térmico da amostra, um melhor controle de temperatura e umidade dentro de uma câmara termicamente isolada. Idealmente, a melhoria do preparo das amostras também é desejada, já que nossas amostras foram lixadas manualmente. Entretanto o objetivo principal do trabalho foi realizado, pois verificou-se a relação entre rugosidade e radiância captada da superfície rugosa de amostras de alumínio comercial. Para a continuidade do estudo, prevê-se utilização de outros metais e o aperfeiçoamento do experimento já destacado.

Bibliografia

- [1] A Santoro e AC Albanese. “EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE ENERGIA DA LEI DA EQUIPARTIÇÃO À QUANTIZAÇÃO”. Tese de dout. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Presbiteriana Mackenzie, 1995.
- [2] GS Ranganath. “Black-body radiation”. Em: *Resonance* 13.2 (2008), pp. 115–133.
- [3] Laura Catarina Seco Antunes. “Radiação de corpo negro: lei de Stefan-Boltzmann, lei do deslocamento de Wien”. Tese de dout. Dissertação apresentada à Universidade da Beira Interior, 2012.
- [4] Nelson Studart. “A invenção do conceito de quantum de energia segundo Planck”. Em: *Revista Brasileira de Ensino de Física* 22.4 (2000), pp. 523–535.
- [5] Luiz Davidovich. “Os quanta de luz e a ótica quântica”. Em: *Revista Brasileira de Ensino de Física* 37 (2015), pp. 4205–1.
- [6] Yosuke Mizuyama. *Understanding Classical Gray Body Radiation Theory*. URL: <https://www.comsol.com/blogs/understanding-classical-gray-body-radiation-theory/#:~:text=A%5C%20gray%5C%20body%5C%20is%5C%20an,emissivity%5C%20of%5C%20the%5C%20gray%5C%20body..>
- [7] MRB Dias et al. “Effect of temperature on digital images of speckle patterns generated by a metallic rough surface”. Em: *Optics & Laser Technology* 113 (2019), pp. 27–34.
- [8] Ian Faccio. “Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte”. Em: *Escola Politécnica-2003* (2002).
- [9] Chang-Da Wen e Issam Mudawar. “Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models”. Em: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47.17-18 (2004), pp. 3591–3605.
- [10] Chang-Da Wen e Issam Mudawar. “Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models”. Em: *International journal of heat and mass transfer* 48.7 (2005), pp. 1316–1329.
- [11] Chang-Da Wen e Issam Mudawar. “Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys”. Em: *International journal of heat and mass transfer* 49.23-24 (2006), pp. 4279–4289.
- [12] E Brodu et al. “Influence of roughness and composition on the total emissivity of tungsten, rhenium and tungsten–25% rhenium alloy at high temperature”. Em: *Journal of alloys and compounds* 585 (2014), pp. 510–517.

- [13] Peng Wang et al. “Effects of the temperature and roughness on the metal emissivity”. Em: *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*. IEEE, 2015, pp. 6197–6200.
- [14] Joseph W Goodman. “Some fundamental properties of speckle”. Em: *JOSA* 66.11 (1976), pp. 1145–1150.
- [15] Marcella Mateus de Mello et al. “EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE INTENSIDADE DO LASER NOS PADRÕES DE SPECKLE DE SUPERFÍCIES METÁLICAS”. Em: *ABM week 2016* (2016).
- [16] Ribeiro Barros Dias. “Análise de superfícies metálicas via padrões de speckle”. Tese de dout. Tese apresentada à Universidade Federal Fluminense, 2019.
- [17] RD Corrêa et al. “FRACTAL DIMENSION DETERMINATION FOR DIGITAL SPECKLE PATTERNS IN ROUGHNESS CONTROL OF METALLIC SURFACES”. Em: *ABCM* (2013).
- [18] Ulf A Persson. “Roughness measurement of machined surfaces by means of the speckle technique in the visible and infrared regions”. Em: *Optical Engineering* 32.12 (1993), pp. 3327–3332.
- [19] V Trivedi et al. “Optical temperature sensor using speckle field”. Em: *Sensors and Actuators A: Physical* 216 (2014), pp. 312–317.
- [20] (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG). *DIN 4768 Determination of Surface Roughness Ra, Rz, R Max, With Electric Stylus Instruments*. 1990.
- [21] Marcello Henrique Marques Passos. “Padrões de Speckles produzidos por vórtices óticos e sua aplicação na medida de rugosidade”. Tese de dout. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal Fluminense, 2016.
- [22] JB Meireles et al. “Effect of metallic surface roughness on the speckle pattern formation at diffraction plane”. Em: *Optics and Lasers in Engineering* 50.12 (2012), pp. 1731–1734.
- [23] AL Sampaio et al. “Hurst exponent determination for digital speckle patterns in roughness control of metallic surfaces”. Em: *Optics and Lasers in Engineering* 49.1 (2011), pp. 32–35.
- [24] HC Soares et al. “Tsallis threshold analysis of digital speckle patterns generated by rough surfaces”. Em: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 432 (2015), pp. 1–8.
- [25] NBRISO ABNT. “4287. Especificações geométricas do produto (GPS)-Rugosidade: Método do perfil-Termos, definições e parâmetros da rugosidade”. Em: *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (2002).
- [26] Fernando Matari. *Parâmetros de rugosidade*. "http://www.grima.ufsc.br/capp/rugosidade/aula19_ParametrosDeRugosidade.pdf". URL: http://www.grima.ufsc.br/capp/rugosidade/aula19_ParametrosDeRugosidade.pdf.
- [27] MAHR GMBH. *Perthometer*. Surface Texture Parameters, "http://lab.fs.uni-lj.si/lat/uploads/metrologija/o_hrapavosti_Mahr_publicacija.pdf". URL: http://lab.fs.uni-lj.si/lat/uploads/metrologija/o_hrapavosti_Mahr_publicacija.pdf.
- [28] Frederick Reif. *Fundamentals of statistical and thermal physics*. Waveland Press, 2009.

- [29] Robert EISBERG e Robert Resnick. “Física Quântica, Editora Campos”. Em: *Rio de Janeiro* (1988).
- [30] Mehran Kardar. *Statistical physics of particles*. Cambridge University Press, 2007.
- [31] Frank P Incropera et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Vol. 6. Wiley New York, 1996.
- [32] Gunther Mohr et al. “Experimental Determination of the Emissivity of Powder Layers and Bulk Material in Laser Powder Bed Fusion Using Infrared Thermography and Thermocouples”. Em: *Metals* 10.11 (2020). ISSN: 2075-4701. DOI: [10.3390/met10111546](https://doi.org/10.3390/met10111546). URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/11/1546>.
- [33] T. Inagaki e Y. Okamoto. “Surface Temperature Measurement Using Infrared Radiometer by Applying a Pseudo-Gray-Body Approximation: Estimation of Radiative Property for Metal Surface”. Em: *Journal of Heat Transfer* 118.1 (fev. de 1996), pp. 73–78. ISSN: 0022-1481. DOI: [10.1115/1.2824070](https://doi.org/10.1115/1.2824070). eprint: https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/article-pdf/118/1/73/5607291/73_1.pdf. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2824070>.
- [34] Instrumart. *FLIR Emissivity Webinar*. Webinar, "https://www.youtube.com/watch?v=Seu97i_OnFE". URL: https://www.youtube.com/watch?v=Seu97i_OnFE.
- [35] Fábio Junkes Corrêa e Lírio Schaeffer. “Estudo do processo de punção por punção com ângulo convexo assistido por simulação numérica”. Em: *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração* 10.3 (2013), pp. 215–223.
- [36] Luis C KAKIMOTO. *Efeito Peltier-Seebeck: gerando eletricidade por diferença de temperatura*. 2013.
- [37] Altair Olivo Santin Andre Rui Poletti de Oliveira Ismael Augusto Leismann. *Cooler Peltier Microcontrolado*. "<https://www.ppgia.pucpr.br/~santin/ee/2007/1s/3/>". URL: <https://www.ppgia.pucpr.br/~santin/ee/2007/1s/3/>.
- [38] Leica. *Microscópio Confocal*. "<https://www.leica-microsystems.com/pt/produtos/microscopios-confocais/>". URL: <https://www.leica-microsystems.com/pt/produtos/microscopios-confocais/>.
- [39] Ionildo José Sanches. “Sobreposição de imagens de termografia e ressonância magnética: uma nova modalidade de imagem médica tridimensional”. Tese de dout. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.
- [40] Opgal staff writers. *Intro to IR (Part 2): Cooled vs. uncooled thermal cameras, sensitivity, resolution and frame rate*. "<https://www.opgal.com/blog/thermal-cameras/intro-to-ir-part-2-cooled-vs-uncooled-cameras-sensitivity-resolution-frame-rate/>". URL: <https://www.opgal.com/blog/thermal-cameras/intro-to-ir-part-2-cooled-vs-uncooled-cameras-sensitivity-resolution-frame-rate/>.
- [41] TELEDYNE FLIR. *Câmera ópticas de detecção de gás refrigeradas versus não refrigeradas*. "<https://www.flir.com.br/discover/industrial/cooled-vs-uncooled-optical-gas-imaging-cameras/>". 2020. URL: <https://www.flir.com.br/discover/industrial/cooled-vs-uncooled-optical-gas-imaging-cameras/>.
- [42] TELEDYNE FLIR. *Refrigeradas ou não refrigeradas*. "<https://www.flir.com.br/discover/rd-science/cooled-or-uncooled/>". URL: <https://www.flir.com.br/discover/rd-science/cooled-or-uncooled/>.

-
- [43] FLIR. *Manual de Instrução da Câmera Termográfica da marca FLIR*. "https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_034/RND_034_US.pdf". URL: https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_034/RND_034_US.pdf.
- [44] TELEDYNE FLIR. *Câmeras Termográficas de Alta Velocidade - a Necessidade de Velocidade*. "<https://www.flir.com.br/discover/rd-science/high-speed-thermal-cameras--the-need-for-speed/>". URL: <https://www.flir.com.br/discover/rd-science/high-speed-thermal-cameras--the-need-for-speed/>.
- [45] Contemp. *Tabela de emissividade dos materiais*. "https://contemp.com.br/wp-content/uploads/2010/12/tabela_de_emissividade____.pdf". URL: https://contemp.com.br/wp-content/uploads/2010/12/tabela_de_emissividade____.pdf.