CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO RUGOSIDADE NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM JUNTAS COLADAS

Paula Vieira de Mello

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Prof. Orientador: Ricardo Alexandre Amar Aguiar
Coorientador: Juliana Primo Basílio de Souza

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO RUGOSIDADE NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM JUNTAS COLADAS

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Paula Vieira de Mello

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (orientador)

_____

Prof. Juliana Primo Basílio de Souza (co-orientadora)

_____

Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ)

_____

Prof. João Marciano Laredo dos Reis (Universidade Federal Fluminense – UFF)

Rio de Janeiro

Dezembro de 2016

DEDICATÓRIA

“Dedico essa dissertação aos meus pais, Gilmar e Patrícia Mello, e a minha avó, Marina Vieira, com todo meu amor e gratidão por tudo o que fizeram e fazem por mim.

Espero ser merecedora do esforço dedicado por vocês em todos os aspectos, tanto da minha vida pessoal quanto da profissional.

Obrigada por tudo!”

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus que, certamente, iluminou meu caminho e minha mente durante esses anos de estudo e me deu forças para chegar ao fim desta caminhada.

À minha família, pela capacidade de acreditar e investir sempre em mim, e que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da vida.

Aos amigos, pelo incentivo e apoio constantes. Agradeço aqui, em especial, ao amigo Jorge Netto, que com toda paciência e dedicação me acompanhou ao longo de todo o desenvolvimento experimental deste trabalho, perdendo horas do dia - e de vários dias - no laboratório ao meu lado até que conseguíssemos produzir bons resultados para serem utilizados, e esteve sempre a postos para me socorrer com minhas dúvidas até a última semana de trabalho. Você tem um papel superimportante nesta produção! E às amigas Rachel Pereira e Érica Malcher, pela ajuda e dicas com a formatação final do texto, além do apoio de sempre e das palavras de incentivo, que revigoraram minhas forças para continuar.

Agradeço aos meus professores e orientadores, Ricardo Aguiar e Juliana Basílio, por terem aceitado entrar nesse desafio comigo, por terem acreditado na minha capacidade de desenvolver um bom trabalho, e por toda paciência e incentivo na orientação, tornando possível a conclusão desta Dissertação.

RESUMO

INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO RUGOSIDADE NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM JUNTAS COLADAS

Paula Vieira de Mello

Orientadores:

Ricardo Alexandre Amar Aguiar

Juliana Primo Basílio de Souza

Resumo da Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

A resistência térmica de contato (RTC) é formada através do contato mecânico de superfícies rugosas e é bastante aplicável quando se trata de transporte de calor, tal como no gerenciamento térmico de dispositivos eletrônicos. Uma elevada RTC é um fator importante para a causa do acúmulo de calor e aumento de temperatura (especialmente para os casos de alto fluxo de calor) em dispositivos eletrônicos, o que não é benéfico para o desempenho operacional dos dispositivos. Portanto, é crucial estudar maneiras de se reduzir a RTC na interface dos materiais.

No caso específico de juntas coladas, o adesivo tende a preencher os vazios entre os substratos, mas não completamente. Este processo depende, evidentemente, da viscosidade do adesivo utilizado, assim como da rugosidade das superfícies unidas. Este trabalho apresenta um método experimental para avaliar a resistência térmica de contato em juntas coladas. Foi avaliada a RTC nas juntas preparadas com três diferentes graus de tratamento superficial, produzindo assim três graus de rugosidade. Cada conjunto foi aquecido e a transferência de calor através das juntas foi observada por termopares e termografia infravermelha (TIV). Um modelo analítico e um modelo de elementos finitos (FEM) foram ajustados com base nos dados experimentais, produzindo resultados suficientes para a avaliação da influência da rugosidade na transferência de calor através das juntas coladas.

Após as análises, ficou concluído que, para um acabamento superficial mais rugoso, a resistência térmica de contato na interface colada do material apresenta um valor maior; seguida do acabamento com rugosidade intermediária e por último de rugosidade bem baixa. Ou seja, uma superfície mais lisa consegue dissipar mais calor quando colocada em

contato com outra do que uma superfície mais rugosa. Concluindo assim que o acabamento superficial de fato influencia na transferência de calor através das juntas, quando duas superfícies são unidas pelo processo de colagem.

Palavras-Chave: Rugosidade. Condução. Adesivo. Resistência térmica de contato.

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

ABSTRACT

INFLUENCE OF ROUGHNESS IN THE HEAT TRANSFER IN BONDED JOINTS

Paula Vieira de Mello

Advisors:

Ricardo Alexandre Amar Aguiar

Juliana Primo Basílio de Souza

Abstract of dissertation submitted to Post Graduate Program in Mechanical Engineering and Materials Technology - Centro Federal de EducaçãoTecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ - as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Mechanical Engineering and Materials Technology.

Thermal contact resistance (TCR) is formed by mechanical contact of rough surfaces and is highly applicable in plenty of heat transport chains, such as thermal management of electronic devices. High TCR is an important factor of causing heat accumulation and high temperature rise (especially for the cases of high heat flux) in electronic devices, which is unbeneficial to the operational performance of devices. Therefore, it is crucial to investigate approaches of reducing the TCR at interface.

In the specific case of bonded joints, the adhesive tends to fill the space between the substrates, but not completely. This process obviously depends on the viscosity of the adhesive used, also the roughness of the joined surfaces. This dissertation presents an experimental method for evaluating the thermal contact resistance in bonded joints. This study evaluated the TCR in joints prepared with for three different degrees of superficial treatment, producing three degrees of roughness. Each joint was heated and the heat transfer through the joint was observed by thermocouples and infrared thermography (IRT). An analytical model and finite element model (FEM) was adjusted by the experimental data that produced results to evaluate the influence of the roughness in heat transfer through bonded joints.

After the analysis, it was concluded that, for a rougher surface finish, the thermal contact resistance at the bonded interface of the material presents a higher value; followed by the finish with intermediate roughness and last of very low roughness. That is, a smoother surface can dissipate more heat when placed in contact with another than a more rugged

surface. Concludingthat thesuperficial treatment in fact influences in the transfer of heat through the joints whentwo surfaces are joined by the bonding process.

Keywords: Roughness. Conduction. Adhesive. Thermal contact resistance.

Rio de Janeiro

Dezembro de 2016

Lista de Símbolos

α: difusividade térmica (m²/s)

β: coeficiente de expansão térmica do fluido (K^{-1})

A: área superficial (m^2)

g: aceleração da gravidade (m/s²)

h: Constante de convecção

$\bar{h}$:coeficiente de convecção

k : coeficiente de condutividade térmica (W/m)K

L: espessura (m)

Nu: número de Nusselt

P: perímetro da placa (m)

q": fluxo de calor (W/m²)

Ra: Número de Rayleigh

Rtc": Resistência térmica de contato ($\frac{m^2K}{W}$)

R_{total} : Resistência térmica total presente no conjunto

$R"_{conv}$: Resistência de convecção natural ($\frac{m^2K}{W}$)

T : Temperatura (K)

v: velocidade mássica média (m²/s)

Lista de Subscritos

∞: fluido ou ambiente (ºC)

1: superfície ou meio

2: superfície ou meio

f: filme

s: superfície

Lista de Figuras

Figura II. 1 (a) Formula geral do anel de epóxi e (b) Reação química geral para epóxi (Brewster, 2002) 8
Figura II. 2 - Interligação pluridisciplinar para melhor entendimento da “ciência da adesão” (Louro et al., 2011) 9
Figura II. 3 - Diferença entre rugosidade e porosidade (Osanai, 2011). 11
Figura II. 4 - Evolução da resistência à ruptura em função da rugosidade (Quaresimin & Ricotta, 2006) 12
Figura II. 5 - Carga de ruptura de juntas coladas em função da espessura do adesivo (Monteiro, 1995) 13
Figura II. 6 - Carga de ruptura em função do tipo de ranhura no substrato (Da Silva et al., 2010) 15
Figura II. 7 - Transferência de calor entre corpos a diferentes temperaturas (Imagem retirada da internet: http://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Calor3.php) 19
Figura II. 8 - Transmissão de calor por condução em meio sólido (Ordenes et al., 2008) 19
Figura II. 9 - Queda de temperatura devido à resistência térmica de contato (Cordeiro, 2014) 21
Figura II. 10 - Condutância entre faces e analogia com a resistência elétrica (Cordeiro, 2014) 22
Figura II. 11 - Transferência de calor por convecção (Ordenes et al., 2008) 23
Figura II. 12 - Formação da corrente de convecção (Hernandez, 2014) 24
Figura II. 13 - Espectro visível e dos infravermelhos (Imagem retirada da internet: http://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2007/12/espectro-visivel-da-luz.jpg) 27
Figura II. 14 - Emissividade de um corpo (Neto J. , 2014)..... 28
Figura II. 15 Emissividade espectral de alguns metais: cobre (1); ferro(2); alumínio(3); prata(4) (Barreira, 2004) 29
Figura II. 16 - Emissividade de alguns não-metais: água(1); terra(2); plástico(3) (Barreira, 2004) 29
Figura II. 17 - Termografia em uma distribuição de linha de transmissão (Santos, 2006) 29
Figura III. 1 - Amostra de aço 1020 jateada 30
Figura III. 2 - Amostra de aço 1020 sendo lixada com lixa 100 31
Figura III. 3 - Processo de polimento da amostra de aço 1020 32
Figura III. 4 - Diferentes acabamentos superficiais para amostras de aço 1020..... 32
Figura III. 5 - Rugosímetro portátil..... 33
Figura III. 6 - Massa epóxi utilizada para colagem das amostras de aço..... 34
Figura III. 7 - Processo de colagem 35
Figura III. 8 - Processo de cura do adesivo..... 35
Figura III. 9 - Aparato para isolamento térmico das amostras 36
Figura III. 10 - Montagem experimental para análise de temperatura com termopar – amostra com caixa isolante..... 38
Figura III. 11 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço jateada, isolada termicamente 39
Figura III. 12 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço lixada, isolada termicamente..... 39
Figura III. 13 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço polida, isolada termicamente. 40

Figura III. 14 - Montagem experimental para análise de temperatura com termopar – amostra com convecção. 40
Figura III. 15 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço jateada, sem isolamento térmico 41
Figura III. 16 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço lixada, sem isolamento térmico 42
Figura III. 17 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço polida, sem isolamento térmico. 42
Figura III. 18 - Montagem experimental para análise de temperatura com câmera termográfica 43
Figura III. 19 - Imagens da câmera termográfica – Amostra com caixa isolante: início, meio e fim, respectivamente. 44
Figura III. 20 - Imagens da câmera termográfica – Amostra sem caixa isolante: início, meio e fim, respectivamente. 44
Figura III. 21 - Validação do ensaio termográfico – Comparação dos métodos 45
Figura III. 22 - Variação da temperatura com o tempo, na superfície superior da primeira peça – simulando condição de peça única –, para as 3 amostras de aço, obtida através da imagem com a câmera termográfica 47
Figura IV. 1 -Caso 1 – Equipamento-Aço jateado-Ar (Cordeiro, 2014) 48
Figura IV. 2 - Analogia elétrica do caso 1 – Equipamento-Aço jateado-Ar (Cordeiro, 2014). 49
Figura IV. 3 - Caso 2 – Equipamento-Aço jateado-Adesivo-Aço jateado-Ar(Cordeiro, 2014) 54
Figura IV. 4 - Analogia elétrica do caso 2 – Equipamento-Aço jateado-Adesivo-Aço jateado-Ar(Cordeiro, 2014) 55
Figura IV. 5 - Gráfico demonstrativo da variação do fluxo de calor emitido pela placa térmica com o aumento da temperatura. 58
Figura IV. 6 – Gráfico ilustrativo da variação da RTC com a temperatura, para o grupo de amostras com convecção 60
Figura IV. 7 - Analogia elétrica para o experimento isolado termicamente: Equipamento-Aço-Adesivo-Aço 62
Figura IV. 8 - Gráfico demonstrativo da variação da RTC com a temperatura, para o grupo de amostras isoladas termicamente. 65
Figura V. 1 - Análise de convergência para uma malha plana com tamanho do elemento igual a 4t 67
Figura V. 2 - Gráfico Txt para a simulação de malha plana com tamanho de elemento igual a 4t 68
Figura V. 3 - Análise de convergência para uma malha plana com tamanho do elemento igual a4t multiplicado a um fator K=0.5 68
Figura V. 4 - -Gráfico Txt para a simulação de malha plana com tamanho do elemento igual a 4t multiplicado a um fator K=0.5 69
Figura V. 5 - Curva temperatura x tempo para o grupo de amostras isoladas termicamente, obtidas através da simulação pelo programa computacional ANSYS Mechanical APDL 16.0. 70
Figura V. 6 - Fluxo de calor que atravessa a peça, para o grupo de amostras isoladas termicamente, obtidas através da simulação pelo programa computacional ANSYS Mechanical APDL 16.0 70
Figura V. 7 - Gráfico comparativo entre os resultados do experimento prático e numérico, para o modelo de amostra isolada termicamente. 71

Lista de Tabelas

Tabela II. 1- Histórico do Desenvolvimento dos Adesivos (Osanai, 2011)..... 5
Tabela III. 1- Medições dos parâmetros de rugosidade..... 33
Tabela III. 2 - Comparação entre os métodos de medição de temperatura por termopar e termografia 46
Tabela III. 3 - Temperaturas obtidas para as três amostras de aço, na superfície superior da primeira peça, através da imagem com a câmera termográfica 47
Tabela IV. 1 - Temperaturas, em °C, a serem utilizadas no cálculo do Caso 1 50
Tabela IV. 2 - Valores encontrados para RTC entre placa e peça..... 53
Tabela IV. 3 - Temperaturas, em ºC, a serem utilizadas no cálculo do Caso 2 56
Tabela IV. 4 - Valores encontrados para RTC na junta colada de cada amostra, para o experimento não isolado termicamente 59
Tabela IV. 5 - Valores de temperatura na saída de cada peça, encontrados através do experimento com o termopar 63
Tabela IV. 6 - Valores encontrados para RTC na junta colada de cada amostra, para o experimento isolado termicamente 64
Tabela V. 1 - Valores da temperatura obtidos com o modelo prático e numérico para os respectivos instantes, para a amostra isolada termicamente. 72

SUMÁRIO

I. Introdução 1

Capítulo II. Fundamentação Teórica 4

II.1 Adesivos estruturais 4

II.2 Histórico 4

II.3 Características 5

II.4 Classificação 6

II.5 Adesivos Epóxi 7

II.6 Adesão 9

II.7 Conceito de adesão e interface 9

II.8 Teorias da adesão 10

II.9 Processo de Colagem 11

II.10 Fatores que influenciam na resistência de juntas coladas 11

II.10.1 Rugosidade 11

II.10.2 Espessura do adesivo 12

II.10.3 Temperatura e pressão decolagem 14

II.10.4 Tratamento Superficial 14

II.10.5 Condições ambientais 15

II.10.6 Pré-tratamento e preparação das superfícies 16

II.11 Transferência de Calor 18

II.11.1 Condução 19

II.11.2 Convecção 23

II.11.3 Radiação 26

II.12 Termografia 27

II.12.1 Fatores externos que influenciam na medição da termografia 27

Capítulo III. Procedimento Experimental 30

III.1 Materiais 30

III.2 Preparação dos Corpos de Prova 30

III.3 Medição da Rugosidade 32

III.4 Aplicação da massa epóxi nas amostras de aço 34

III.5 Preparação e montagem do aparato 35

III.6 Medição via termopares 36

III.7 Validação por análise termográfica 43
Capítulo IV.Modelo Analítico 48
IV.1 Experimento com convecção (sem a caixa isolante) 48
IV.1.1 Caso 1 – Amostra única 48
IV.1.2 Caso 2 – Amostras unidas por adesivo 53
IV.2 Experimento isolado termicamente (sem convecção) 61
Capítulo V. Modelo Numérico 66
V.1 Modelagem numérica para o grupo deamostrasisoladastermicamente 69
V.2 Resultados: Modelo Numérico versus Experimento 71
Capítulo VI. Conclusões 73
VI. 1 Trabalhos Futuros 73
Referências Bibliográficas 74
Apêndice I 78
Apêndice II 84

I. Introdução

É comum existirem, em diversas aplicações na engenharia, situações em que se faz necessário o conhecimento da distribuição de temperatura no interior de dois corpos em contato e a quantidade de calor trocada entre eles. Observa-se que, quando são submetidos a um fluxo de calor, há um salto aparente de temperatura na sua interface, que tem sua origem nas irregularidades das superfícies dos materiais (Filho, 2000). A relação entre a queda de temperatura na interface e o fluxo de calor que passa através dela, permite definir uma grandeza chamada de Resistência Térmica de Contato (RTC).

O estudo da RTC começou a ganhar uma grande importância a partir dos anos 50 na área de transferência de energia. Atualmente, o interesse na determinação da RTC tem recebido cada vez mais atenção, tendo em vista que, em algumas áreas, como a microeletrônica, por exemplo, ela tem um papel extremamente importante na dissipação de calor. O grande número de pesquisas sobre a RTC está ligado ao desenvolvimento de vários setores da atividade tecnológica, como na indústria aeroespacial, nos propulsores nucleares, nos motores de automóveis, na microeletrônica, entre outros.

A existência de uma resistência de contato se deve, principalmente, aos efeitos da rugosidade da superfície. Uma observação mais aproximada mostrará que há apenas determinados pontos de contato direto entre as peças, os quais se entremeiam com falhas que são, na maioria dos casos, preenchidas com ar. Desta forma, a transferência de calor se dará tanto pela condução de calor através da área de contato real, quanto pela condução e/ou radiação através dos interstícios (Incropera *et al*., 2008).

No caso específico de juntas coladas, o adesivo tende a preencher o espaço entre os substratos, porém não completamente. Esse processo vai depender não somente da viscosidade do adesivo usado (ou de sua molhabilidade), como também da rugosidade das superfícies unidas. Tendo em vista que a rugosidade é um aspecto de relevância significativa para a adesão, existe uma correlação entre a rugosidade das superfícies e a resistência da junta. Além disso, esse parâmetro geométrico também tem relação direta com a resistência térmica de contato entre o substrato e o adesivo, formadores da junta colada.Verifica-se na literatura que o aumento dos níveis de rugosidade das superfícies dos substratos, até determinado ponto – chamado de ‘rugosidade ótima’ – de forma preliminar aos processos de colagem adesiva, promove o aumento da resistência das juntas coladas.

Neste trabalho foi desenvolvido um método experimental de avaliação da resistência térmica de contato em juntas metálicas coladas, tendo como parâmetro de estudo a variação da rugosidade e sua consequente influência na transferência de calor através dessas juntas. A partir

dos dados experimentais foram desenvolvidos um modelo teórico analítico e um modelo numérico que pudesse relacionar a rugosidade e a capacidade de troca térmica através da junta.

.

I.1 Motivação

A utilização de juntas coladas em substituição aos tradicionais processos de junção mecânica e processos de soldagem vem se tornando uma realidade cada vez maior na indústria. No entanto, a grande maioria das análises realizadas para este tipo de junta visa avaliar sua resistência quanto a esforços mecânicos. A motivação deste trabalho é apresentar uma avaliação da junta colada em relação à sua resistência térmica e observando de que maneira a rugosidade de uma superfície pode influenciar esta resistência, quando duas superfícies são postas em contato. Tornando-o assim uma fonte de informação sobre a importância e relevância do acabamento superficial em materiais que serão unidos mecanicamente por adesivos estruturais.

I.2 Objetivo

Nesta dissertação, objetiva-se analisar a influência do acabamento superficial de uma peça, por meio do parâmetro geométrico denominado rugosidade, associado à transferência de calor, na determinação da resistência térmica de contato de juntas coladas. Para isso, serão analisadas três peças de mesmo material, porém com diferentes rugosidades (baixa, média e alta), a fim de se obter uma comparação entre os resultados e, desta forma, comprovar a importância do bom acabamento superficial.

I.3 Organização do Trabalho

A presente dissertação está dividida em seis capítulos. Neste primeiro, apresenta-se uma descrição geral sobre o assunto, a motivação para o tema e os principais objetivos do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada a Fundamentação Teórica acerca do tema, a fim de se conhecerem as bases aplicadas ao trabalho, bem como alguns dos trabalhos já desenvolvidos e que podem ser tomados como referência.

No capítulo 3, será descrita a metodologia Experimental, bem como o comportamento térmico observado para a junta e os resultados e dados de entrada que servirão de base para os capítulos de modelagem analítica e numérica.

O capítulo 4 é dedicado ao Modelo Analítico, desenvolvido a partir de premissas básicas de transferência de calor, que, juntamente com os dados experimentais apresentados no capítulo anterior, permite estimar a RTC e, consequentemente, sua relação com a rugosidade aplicada às superfícies coladas.

O capítulo 5 descreve o Modelo Numérico, desde sua concepção e validação até o resultado obtido para o comportamento térmico e distribuição de temperatura ao longo das peças.

A conclusão e as possibilidades de continuação deste estudo em trabalhos futuros são descritos no capítulo 6.

Capítulo II. Fundamentação Teórica

II.1 Adesivos estruturais

A norma ANSI/ASTM D907 (2015) define adesivo como *"uma substância capaz de unir materiais através da fixação de suas superfícies"*. Portanto, ao se inserir um material adesivo entre duas superfícies sobrepostas, estas serão aderidas pela ação do mesmo, dando-se assim o processo de junção destes materiais.

Nos dias atuais, diversas áreas da indústria já utilizam amplamente as juntas coladas, as quais representam uma alternativa aos tradicionais processos de fixação, como soldagem, rebitagem e aparafusamento.Vantagens como resistência, rigidez, versatilidade, durabilidade, peso reduzido, alta resistência à corrosão e à fadiga, aliadas à não necessidade de processos de usinagem ou alterações metalúrgicas, além de apresentarem custos de manutenção significantemente reduzidos, tornam esta técnica um grande destaque no design e manutenção de equipamentos (Osanai, 2011).

Desta forma, os processos de colagem representam uma maneira simples e eficiente de junção mecânica sem a necessidade da inserção de concentradores de tensão na estrutura, tais como orifícios usinados ou pontos de solda (Fonseca & da Silva, 2010).

II.2 Histórico

A ciência dos adesivos, assim chamada, surge com o intuito de estudar o desenvolvimento de novos adesivos baseados em resinas sintéticas e outros materiais com melhores propriedades e maior reprodutibilidade. A primeira resina a ser utilizada para colagem, em 1910, foi a de fenolformaldeído, obtida através da reação de condensação entre o fenol e o formaldeído. Essas resinas são resistentes e frágeis e possuem alta resistência ao calor. São usadas, em especial, para a execução das juntas de madeira, porém a necessidade de adesivos mais apropriados para a colagem de metais estimulou a descoberta dos adesivos de borracha sintética (Shields, 1971; Esteves, 1990).

O aparecimento das resinas sintéticas, em torno dos anos 40, foi o que tornou possível o desenvolvimento de adesivos mais resistentes, mais duradouros e versáteis na colagem de superfícies, que antes não se colariam (Osanai, 2011). A Tabela II. 1 mostra, cronologicamente, o histórico do desenvolvimento dos adesivos.

Tabela II. 1- Histórico do Desenvolvimento dos Adesivos (Osanai, 2011)

ANO	ADESIVO
1910	Fenol-formaldeído
1930	Uréia-formaldeído
1940	Vitrilo-fenólico Nitrilo-fenólico Acrílico Poliuretana
1950	Epóxi Cianoacrilatos Anaeróbicos
1960	Poliamida Polibenzimidazol Poliquinoxalina
1970	Segunda geração de acrílicos

Com o desenvolvimento tecnológico dos adesivos, também se faz necessário o desenvolvimento dos equipamentos e técnicas de colagem, além dos métodos de cálculo de resistência mecânica e térmica, dada a sua grande importância na união de juntas em diversas aplicações.

II.3 Características

Sabe-se que os adesivos utilizados em projetos mecânicos são, por natureza, materiais poliméricos. O polímero é uma cadeia longa de átomos unidos entre si por ligações covalentes. A sua produção acontece através de um processo designado polimerização, no qual as moléculas do monômero reagem quimicamente para formar cadeias lineares ou uma rede tridimensional de cadeias de polímeros (Osanai, 2011).

Estas cadeias possuem como principal característica uma ligação química forte e direcional ao longo de seu comprimento, porém, lateralmente, são unidas por ligações de Van der Waals (ligações fracas) ou, ocasionalmente, por ligações de hidrogênio. À molécula formada por apenas um monômero é dado o nome de homopolímero. Já a utilização de diferentes monômeros

na formação de moléculas resulta aos chamados copolímeros, os quais se caracterizam, normalmente pelo alcance de melhores propriedades.

Os adesivos sintéticos resultam, então, das reações de polimerização entre monômeros, as quais dependendo da sua estrutura, reatividade e proporção na mistura originam polímeros de cadeias macromoleculares lineares ou em rede tridimensional.

Estas reações contam ainda com outros componentes denominados agentes de cura (ou endurecedores), catalisadores e solventes que, após a reação de cura, tornam o sistema bastante complexo. Ainda é possível, para os mesmos parâmetros anteriores, variar as condições de temperatura, pressão e tempo de cura, levando à obtenção de estruturas diferentes que, consequentemente, apresentam propriedades distintas.

II.4 Classificação

Conforme o que foi descrito anteriormente, a grande variedade de estruturas possíveis dentro do espectro polimérico torna muito difícil uma classificação que inclua todos os tipos de adesivos. Porém, em geral, os adesivos são divididos em duas famílias e classificados como termofixos (ou termorrígidos) e termoplásticos.

Os adesivos termofixos apresentam um alto módulo de rigidez quando comparados aos termoplásticos e possuem um bom grau de resistência ao aquecimento e ao ataque químico (Cotter, 1974; Scheneber, 2003). Esse tipo de adesivo é ativado pela aplicação de calor, por meio de catalisadores ou pela combinação de ambos, ocorrendo, assim, a formação de ligações cruzadas por meio de calor, pressão, radiação ou outro tipo de energia. Resinas fenólicas, epóxi e poliéster são exemplos de termofixos, sendo as duas primeiras mais utilizadas em adesivos.

Os adesivos termoplásticos são caracterizados pela sua alta viscosidade a uma dada temperatura, podendo ser conformados e moldados. Os adesivos do tipo “solvente” são considerados termoplásticos. Além desses, as resinas acrílicas, celulósicas, vinílicas e poliamidas também são bons exemplos.

Os adesivos podem ainda ser classificados de acordo com a sua aplicação: adesivos para metais, madeira, vinilo, referem-se ao tipo de substrato para o qual são mais bem adaptados. Do mesmo modo, adesivos resistentes aos ácidos, ao calor e ao meio ambiente indicam os meios para os quais são mais indicados. Adicionalmente, os adesivos podem também ser classificados de acordo com sua origem, estrutura molecular, composição química, modo de apresentação e de aplicação, condições de cura, estabilidade e como estruturais ou não estruturais.

Existem ainda cinco grandes famílias de adesivos estruturais: anaeróbicos, acrílicos, epóxi, cianocrilatos e poliuretanos.

II.5 Adesivos Epóxi

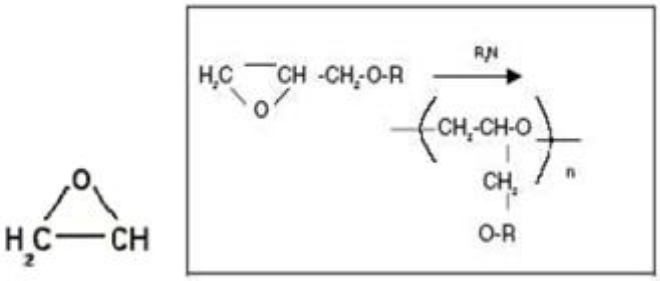
Sua exploração comercial teve início na década de 30, pela I.G. Farbenindustrie (Miles & Briston, 1975). Trata-se de termofixos em forma de líquido viscoso ou sólidos quebradiços que, devido à sua alta resistência mecânica e fácil aplicação, costumam ser os mais utilizados na colagem de metais, além de apresentarem a maior diversidade de aplicações e poderem ser utilizados em diversos tipos de materiais. O processo de colagem com estes tipos de adesivo dispensa a aplicação de pressão, sendo necessário somente o posicionamento da peça.

O adesivo epóxi tem como principais vantagens:

- Boa resistência mecânica, térmica e química;
- Excelente dureza;
- Ótima adesão a metais;
- Possibilidade de cura rápida ou lenta, em diversas faixas de temperatura;
- Alto índice de retração e capilaridade durante a cura;
- Boas propriedades de molhabilidade sobre o aderente.

Podem ser comercializados tanto como um único componente, quanto como componentes separados (geralmente dois). No caso de um único componente, a resina e o endurecedor já vêm misturados e apresentam-se em forma de líquido, gel, barra, filme ou pastilha. Apresentam melhores propriedades e maior durabilidade quando comparados aos de dois ou mais componentes e sua cura é realizada em temperaturas acima de 120ºC. Já para o caso de componentes separados, o endurecedor deverá ser adicionado posteriormente à resina. Podem apresentar-se na forma de pasta, gel ou líquido e sua cura é realizada a baixas temperaturas. Suas propriedades vão depender do tipo de endurecedor utilizado.

O termo epóxi vem do grego “EP” (sobre ou entre) e do inglês “OXI” (oxigênio), significando um átomo de oxigênio entre carbonos. Em um sentido geral, refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. O grupo epóxi mais simples é aquele formado por um anel de três elementos (Figura II. 1). Em seu processo de cura, ocorre primeiramente um processo inicial termicamente ativado no qual, para iniciar a reação química de cura, um catalisador reage com um endurecedor para formar uma união química (Brewster, 2002).



(a) (b)

Figura II. 1 (a) Formula geral do anel de epóxi e (b) Reação química geral para epóxi (Brewster, 2002)

Alguns termos também são importantes serem conhecidos para melhor compreensão do processo de cura das resinas epóxis.

- **a.** Tempo de uso: também conhecido como “potlife”, é o tempo decorrido desde o início da mistura até atingir um aumento de viscosidade considerável, a ponto de não ser mais possível a sua aplicação no dispositivo. Quanto menor a reatividade do sistema, maior é seu tempo de uso.
- **b.** Tempo de gelatinação: também chamado de “tempo gel” ou “gel time”, é o tempo decorrido a partir da mistura até que o sistema adquira consistência entre líquido altamente viscoso e sólido. Quanto maior a reatividade do sistema, mais curto será a faixa do “gel time”. O “gel time” será sempre maior que o “potlife”.
- **c.** Ciclo completo de cura: dividido em dois tempos – endurecimento e cura total –, é o tempo total necessário para o sistema atingir as resistências mecânicas e térmicas exigidas.
- **d.** Endurecimento: trata-se do período necessário, a partir da aplicação, para que os sistemas envolvidos adquiram estabilidade, ou seja, propriedades mecânicas suficientes para suportar os esforços que sofrerão posteriormente durante as etapas de fabricação da estrutura.
- **e.** Tempo de cura: a partir da aplicação, é o tempo decorrido até que sejam atingidas as máximas resistências mecânicas e térmicas, isto é, o tempo ideal que se deve aguardar antes de submeter a junta adesivada às exigências de trabalho.

Em trabalho realizadopor Prolongo *et. al* (2014) e por Jiwon Kim (2012) foi comprovado que resinas epóxi reforçadas com nanofolhas de grafeno (PNB) têm suas características térmicas

bastante melhoradas. A adição de PNB induz a um aumento da temperatura de transição vítrea e do módulo de armazenamento referenciados para a matriz de termoendurecimento, além de provocar um acentuado aumento da difusividade térmica (cerca de 300%) e da condutividade elétrica. Também aumenta o grau de molhabilidade do adesivo e induz a uma alteração do mecanismo de falha das articulações.

II.6 Adesão

As ligações adesivas são um tema pluridisciplinar que necessita do conhecimento de diferentes áreas. Para a melhor compreensão de toda a "ciência da adesão", é necessário recorrer às ciências primárias como a física, química e mecânica, que, por sua vez se interligam, dando origem às disciplinas de ciência das superfícies, materiais poliméricos e projeto de junta. Cada uma destas áreas contribui de forma muito significativa na "ciência da adesão" e na forma como esta é aplicada na indústria (Figura II. 2). É essencial estabelecer esta interligação de modo a garantir o sucesso da adesão e o total conhecimento do processo (Louro *et al.*, 2011).



Figura II. 2 - Interligação pluridisciplinar para melhor entendimento da "ciência da adesão" (Louro et al., 2011)

II.7 Conceito de adesão e interface

O termo adesão é geralmente usado para se referir à adesão entre substâncias, sendo portanto uma manifestação de forças atrativas entre os átomos e/ou superfícies. Em outras palavras, a adesão existe quando uma quantidade mensurável de trabalho mecânico se faz necessária para separar duas superfícies de diferentes composições químicas ou formas.

As moléculas na superfície de um líquido ou de um sólido são influenciadas por forças moleculares desbalanceadas, possuindo, portanto, energia adicional em contraste com as moléculas no interior do líquido ou sólido. Esta energia livre adicional localizada na superfície, ou

na interface entre duas fases condensadas é conhecida como tensão superficial. Importantes aplicações tecnológicas dos materiais requerem que os mesmos sejam aderentes a outras substâncias e têm influência preponderante em muitas aplicações práticas, como adesão e molhabilidade de sólidos por líquidos. Para medir a modificação superficial ocorrida em materiais, alguns parâmetros são utilizados na caracterização, como por exemplo, o ângulo de contato, a força de adesão e estimativas de energia livre de superfície (Neto & Pardini, 2006).

II.8 Teorias da adesão

Diferentes teorias servem como modelo para tentar descrever o mecanismo de adesão, levando em consideração a microestrutura dos materiais envolvidos nesse processo. A seguir, serão descritas sucintamente as principais delas.

A Teoria da Interdifusão fala da ligação de duas superfícies através da interdifusão de átomos ou moléculas presentes nas interfaces, que pode ser promovida pela presença de solventes. Neste caso, a adesão dependerá do entrelaçamento molecular, do número de moléculas envolvidas e da resistência da ligação molecular (Osanai, 2011), e a quantidade de difusão dependerá da conformação molecular, dos constituintes envolvidos e da facilidade de movimento molecular.

Além disso, a diferença de carga eletrostática entre os constituintes na interface pode também contribuir para a adesão, devido à força de atração entre as cargas. Este fenômeno é chamado de Teoria da Atração Eletrostática. Embora esta atração possa não ter uma contribuição significativa à resistência da interface – que, por sua vez, dependerá da densidade da carga -, pode ser importante quando a superfície de uma fibra é tratada como agente de ligação.

Outra teoria importante é a da Ligação Química, sendo a mais antiga e mais conhecida entre todas. Ela defende que a adesão ocorre através de ligações primárias (iônicas/covalentes) e/ou, através de forças secundárias intermoleculares e que a resistência adesiva dependerá do número e tipo de ligações.

E, por último, a Teoria do Interbloqueamento Mecânico, que envolve o ancoramento através de ligações mecânicas na interface. Este tipo de interface tem a resistência à tensão transversal aumentada, desde que haja um grande número de reentrâncias, na forma de porosidade, na superfície do reforço,enquanto que a resistência ao cisalhamento é aumentada de maneira significativa quanto maior for o grau de rugosidade de sua superfície, conforme mostrado na Figura II. 3.

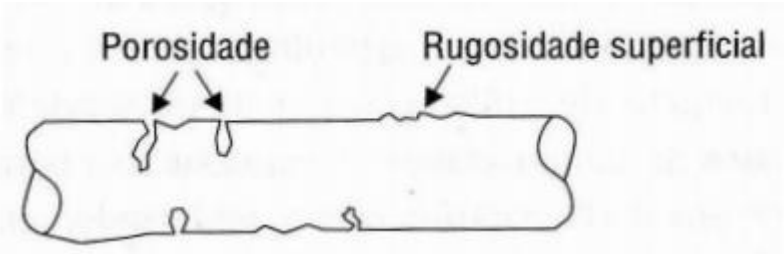


Figura II. 3 - Diferença entre rugosidade e porosidade (Osanai, 2011).

II.9 Processo de Colagem

O processo de colagem inicia-se com o espalhamento do adesivo sobre a superfície do substrato, iniciando as fases de movimento, e finaliza-se com a sua solidificação, formando o ancoramento ou ganchos entre duas superfícies coladas. O grau de adesão depende da intensidade de cada elo, ou seja, dos aderentes, do adesivo e das interfaces (Schultz & Nardin, 1994)

Segundo o trabalho de Quaresimin & Ricotta (2006), a primeira condição para que se estabeleça uma ligação adesiva é que o adesivo, que deve ser líquido no momento da aplicação, molhe o substrato, isto é, espalhe-se espontaneamente sobre ele.

II.10 Fatores que influenciam na resistência de juntas coladas

A previsão da resistência de juntas coladas é ainda um fator controverso, já que envolve muitos fatores de difícil quantificação: como o comprimento do overlap, o escoamento do substrato, a plasticidade do adesivo e a espessura do adesivo (Goyal & Jhonson, 2008) . Além disso, o cálculo da durabilidade é ainda mais complexo e também um desafio no projeto de juntas coladas.

Em Quaresimin & Ricotta (2006), o autor classifica os fatores que influenciam na resistência de uma junta colada da seguinte forma: características mecânicas dos substratos e do adesivo, geometria da junta, tratamento superficial, solicitações externas e condições ambientais.

A seguir, serão descritos os principais deles e os mais importantes para este trabalho.

II.10.1 Rugosidade

No mecanismo de ancoragem, a presença de asperezas ou de poros permite a infiltração natural do adesivo. A rugosidade favorece um aumento da área de contato entre os dois materiais e um aumento das ligações da interface (Cunha, 2012). A rugosidade é o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma

superfície. Essa desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos (Agostinho *et al.*, 1995).

No entanto, existe uma rugosidade ótima que proporciona a máxima resistência da junta (conforme mostra a Figura II. 4.b). Abaixo dessa rugosidade, por exemplo, em uma superfície lisa, conforme mostrada na Figura II. 4.a), a colagem pode ser defeituosa, pois o adesivo não encontra nenhum ponto de ancoragem, o que dificulta sua adesão; assim como, acima dela, em uma superfície muito rugosa, conforme mostrado na Figura II. 4.c), o adesivo não penetra o suficiente nas cavidades.

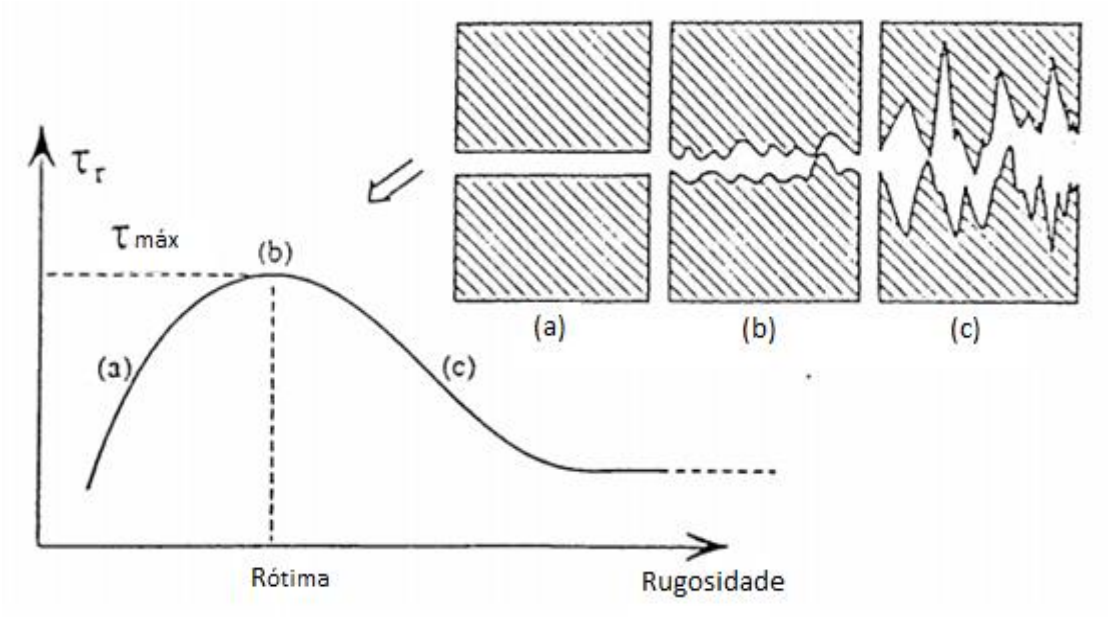


Figura II. 4 - Evolução da resistência à ruptura em função da rugosidade (Quaresimin & Ricotta, 2006)

II.10.2 Espessura do adesivo

A espessura da camada adesiva é uma característica funcionalmente importante na resistência das juntas coladas. O seu efeito é ainda mais acentuado na colagem com adesivos de alta performance (Monteiro, 1995).

Deve-se ter o cuidado de não confeccionar juntas com espessuras de adesivo muito pequenas, pois a adesão pode não ser eficiente e sua resistência decresce rapidamente. No entanto, o aumento demasiado da espessura do adesivo introduz defeitos de difícil ou impossível remediação, como, por exemplo, as chamadas bolhas de ar e microtrincas; reduzindo também a resistência da junta.

Experiências mostram que a resistência de uma junta aumenta com uma espessura menor do adesivo e, por isso, muitos argumentos foram propostos na literatura para explicar a influência da espessura.

Ascione (2009) atribui a diminuição da resistência da junta com o aumento da espessura ao fato de que espessuras maiores contêm mais defeitos, isto é, vazios e microtrincas, do que juntas com espessuras menores, enquanto Grant *et al.*(1989), explica a influência da espessura do adesivo com o momento fletor: uma junta sob tração, a tensão normal longitudinal e o momento criam uma deformação plástica nas bordas dooverlap, causando a falha do adesivo. A tensão longitudinal - originada da carga aplicada - junto com a tensão normal devido ao momentosobrepõem-se. Assim, para atingir o mesmo nível de tensão com o aumento do momento, a tensão, devido ao carregamento, tem que diminuir. E no caso de aumentar a espessura do adesivo, aumenta-se a tensão devido ao momento e a tensão normal longitudinal permanece constante, visto que a força aplicada aos substratos não é alterada e, consequentemente, a resistência da junta é reduzida.

O modelo de Goland e Reissner (1944) e a introdução da tensão de descascamento também surgem como uma forma de explicar esse efeito da espessura. A tensão de descascamento é a gerada pelo momento proveniente da distância entre os substratos. Com o aumento da espessura da camada adesiva, aumenta-se a tensão de descascamento, como pode ser observado na Figura II. 5..

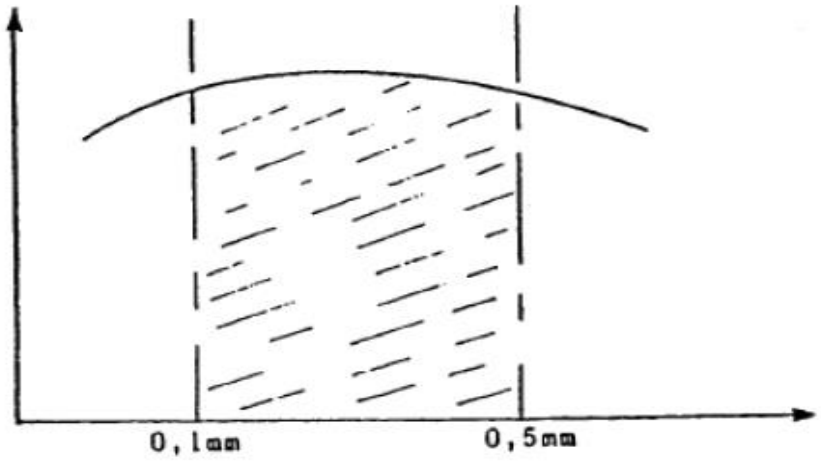


Figura II. 5 - Carga de ruptura de juntas coladas em função da espessura do adesivo (Monteiro, 1995)

II.10.3 Temperatura e pressão decolagem

A temperatura de colagem é outro fator importante para a qualidade da colagem. A temperatura controla o tempo de cura e a viscosidade, que, diretamente afetam a capacidade do adesivo espalhar-se e ser absorvido. Cada tipo de adesivo apresenta uma temperatura ideal de boa adesão, na qual a capacidade de absorção do adesivo é aumentada.

A pressão influencia na penetração do adesivo no substrato. Pressões muito altas podem gerar uma movimentação excessiva do adesivo, fazendo com que ele transborde para fora da junta colada, enquanto que pressões muito baixas podem diminuir a penetração do adesivo (Tienne, 2006).

II.10.4 Tratamento Superficial

A aplicação de diferentes tratamentos superficiais, como jateamento, lixamento, ranhuras e tratamentos químicos são considerados por alguns autores como fatores principais na obtenção de juntas adesivas resistentes. Entretanto, o tema ainda é controverso e não há ainda um parâmetro de melhor tratamento para o alcance de uma maior resistência, mas sim melhores tratamentos para situações específicas de adesivo e substrato.

Da Silva (2009) realizou um estudo sobre a influência de tratamentos químicos e mecânicos na resistência de juntas, utilizandodiferentes adesivos, através de ensaios experimentais, concluindo que seus efeitos foram desprezíveis. Já em Pereira *et al.*(2010), é realizada uma análise inversa: foram feitos ensaios de tração com adesivos apenas do tipo epóxi, porém para diferentes tratamentos superficiais do substrato e, através dos resultados, concluiu-se que a resistência ao cisalhamento dos corpos de prova aumenta com a diminuição da rugosidade superficial, até o ponto de rugosidade ótima, conforme já citado no primeiro tópico desta seção.

Segundo Goyal e Jhonson (2008), com a utilizaçãodo método de Taguchi para otimização dos ensaios, o efeito dos tratamentos mecânico e químico se mostrou inferior aos efeitos geométricos, como os parâmetros comprimento do overlap e espessuras do substrato e camada adesiva.

Em Da Silva *et al*. (2010) é feita a análise da influência de ranhuras na preparação de superfícies coladas. Os resultados obtidos mostram que estas inclusões e sua forma de distribuição possuem uma grande influência na superfície colada, conforme pode ser visualizado na Figura II. 6.

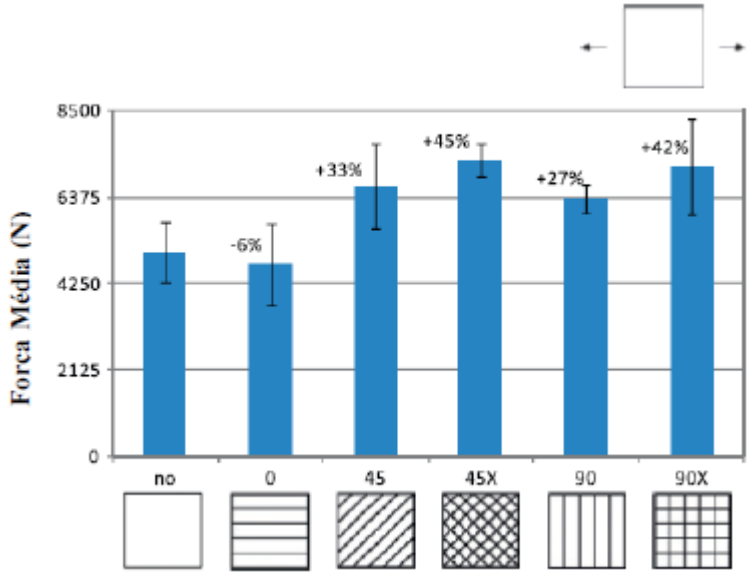


Figura II. 6 - Carga de ruptura em função do tipo de ranhura no substrato (Da Silva *et al*., 2010)

II.10.5 Condições ambientais

a. Temperatura

A interferência dos fatores ambientais na resistência das juntas adesivas dependerá, basicamente, do tempo de exposição a que estas estarão submetidas. Em longo prazo, substratos, adesivos e produtos colados deterioram a uma taxa determinada pelos níveis de temperatura, umidade, tensão e, em alguns exemplos, por concentrações de certas substâncias químicas.

As juntas podem estar expostas a condições extremas de temperatura, sendo este um dos fatores que mais interfere no bom desempenho dos adesivos estruturais, visto que altera as suas propriedades mecânicas. Quando sujeitos a temperaturas elevadas, os materiais poliméricos degradam-se. Se a exposição for por um período curto de tempo, o primeiro efeito manifesta-se por um aumento da mobilidade molecular levando o adesivo a apresentar uma maior tenacidade e uma menor resistência mecânica. No entanto, se a exposição for prolongada, podem desencadear-se fenômenos de oxidação e pirólise do adesivo e começam a manifestarem-se alterações químicas e/ou físicas (Louro *et al.*, 2011).

A oxidação térmica tem efeitos consideráveis na estabilidade das juntas adesivas uma vez que inicia um processo de seccionamento da cadeia molecular, havendo uma perda de peso molecular, diminuição de resistência, capacidade de alongamento e tenacidade.

Muitos adesivos sintéticos degradam-se rapidamente quando expostos a altas temperaturas. Para aumentar esta resistência, um adesivo deve apresentar características

específicas, tais como um elevado ponto de fusão ou de amolecimento e resistência à oxidação. Os adesivos termoendurecíveis têm ponto de fusão a uma temperatura muito elevada. Nestes materiais, a resistência à oxidação e a pirólise são os principais fatores a serem levados em consideração.

b. Umidade

A água é a substância que gera os maiores problemas à durabilidade de uma junta adesiva (Kinloch, 2012). É fortemente polar e muitos materiais poliméricos são permeáveis a ela. A sua presença em uma ligação pode influenciar o adesivo e, nos casos em que o substrato é permeável, alterar as propriedades do próprio substrato.

A água que entra na junta degrada as propriedades mecânicas do adesivo, as propriedades de adesão da interface, causa alterações dimensionais, como o inchamento, cria tensões que provocam fissuração, baixa a temperatura de transição vítrea do adesivo e pode levar à hidrólise do próprio adesivo. Alguns dos processos que podem ocorrer são reversíveis e acompanhados pela recuperação da resistência, quando a água é retirada; outras são irreversíveis e a recuperação da resistência é, nestes casos, impossível.

Monteiro (1995) enfatizou a forte influência da umidade na perda de resistência de juntas coladas. Em consequência, Kalnis (1997) realizou ensaios com diferentes tratamentos superficiais, mostrando acentuadas perdas de adesão com o aumento da umidade e Taib (2006) estudou os efeitos da umidade em juntas coladas com adesivo epóxi, através de envelhecimento das amostras em meios com umidade controlada, encontrando perdas relativamente baixas de resistência de 15% com umidade relativa de 85% à temperatura de 63°C.

II.10.6 Pré-tratamento e preparação das superfícies

Para a ligação de dois componentes ser perfeita, é necessário que se realizem previamente certas operações (Louro *et al.*, 2011). A primeira consiste em obter uma superfície apropriada, ou seja, uma área sem corpos estranhos (poeiras, água, gordura) que seriam obstáculos à aproximação dos dois materiais. A segunda baseia-se em aplicar o adesivo tendo em atenção alguns princípios básicos:

- Uma vez que os materiais têm grande resistência, é o adesivo, que se liga às rugosidades da superfície aderente, sendo necessário que possua uma boa fluidez.
- Ao unir as duas superfícies, deve-se evitar a formação de bolhas de ar, aumentando os pontos de contato entre os dois componentes.

O pré-tratamento correto das superfícies é necessário para que ocorra uma ótima adesão e o substrato possa envolver as seguintes operações: desengorduramento, abrasão mecânica, ionização das superfícies e aplicação de primários (Louro *et al.*, 2011).

a. Desengorduramento das superfícies

Para uma melhor união possível do adesivo, é exigida a remoção completa de óleo, massa, poeira e outros resíduos das superfícies. Os solventes que evaporam sem resíduos são adequados para isso. No caso das superfícies de ferro fundido de cor acinzentada, é necessária a limpeza mecânica adicional para remover o grafite da área superficial.

b. Abrasão Mecânica

As superfícies metálicas manchadas são frequentemente cobertas de óxido que não pode ser removido pelo desengorduramento. Nesses casos, o pré-tratamento das superfícies pode ser efetuado por meio de lixamento ou com uma escova provida de cerdas metálicas.

O lixamento promove uma boa rugosidade superficial. Nesse caso, é importante utilizar uma lixa com aspereza adequada. Por exemplo, para o alumínio, o grão da lixa deve estar compreendido entre 300 a 600. Trata-se de um grão ultrafino. Para o aço recomenda-se uma lixa com grão 100, ou seja, uma lixa com grão fino. Peças muito sujas devem ser desengorduradas antes do tratamento mecânico para garantir que os abrasivos utilizados na lixa não venham contaminar as superfícies que devem ser limpas.

c. Ionização da superfície

O pré-tratamento das superfícies muda a sua polaridade e a energia. Dependendo do material, da geometria da peça de trabalho, da sequência da produção e do número de peças, a ionização pode ser efetuada por chama, pelo processo corona ou por plasma de baixa pressão.

d. Aplicação de Primários

Primários são revestimentos aplicados à superfície antes da aplicação de um adesivo; para melhorar o desempenho da adesão.

Uma vantagem importante dos primários, comparados aos outros métodos de pré-tratamento de ionização, consiste na sua forma simples de utilização. Ele é vaporizado ou pincelado sobre os substratos com uma camada tão fina quanto possível. Após um breve período de secagem (10 a 60 s), o adesivo é aplicado normalmente.

O tempo máximo permitido entre o tratamento superficial e a aplicação do adesivo depende de como a superfície vai se alterar no meio-ambiente da oficina e da adesão dos produtos formados à superfície. Por exemplo, após contato da superfície de cobre com o ambiente, forma-se rapidamente um óxido que é muito fracamente ligado à superfície. Por outro lado, no caso dos alumínios, o óxido formado tem muito boa adesão com o metal base e não causa grandes problemas. Algumas superfícies poliméricas perdem a sua eficácia muito rapidamente devido à grande "atividade" superficial das moléculas do polímero. De uma maneira geral, os metais têm uma pequena vida de armazenamento e devem ser usados o mais rapidamente possível após a preparação da superfície.

Segundo trabalho realizado por Louro *et al.*(2011), caso seja necessário um armazenamento prolongado, pode-se resolver o problema de três formas:

1. Colocar as partes num recipiente de ambiente controlado;
2. Usar uma proteção "mecânica", constituindo um filme (em geral polímero) na superfície;
3. Revestir as partes a colar com um primário após a preparação da superfície.

O primário protege a superfície tratada e interage depois com o adesivo. Muitos primários são vendidos em conjunto com o adesivo para esse efeito. Alguns também aumentam a resistência à corrosão e continuam a proteger a superfície quando posta em serviço.

II.11 Transferência de Calor

Em (Silva, 2006), transferência de calor (ou somente calor) é definido como a energia em trânsito, capaz de cruzar a fronteira de um sistema devido a uma diferença de temperatura, ouseja, sempre que existir diferença de temperatura em um meio, ou entre meios, ocorrerá transferência de calor. A Figura II. 7 exemplifica esse processo: se dois corpos a diferentes temperaturas são colocados em contato direto, ocorrerá uma transferência de calor do corpo de temperatura mais elevada para o corpo de menor temperatura, até que haja equivalência de temperatura entre eles. Quando isto acontece, diz-se que o sistema atingiu o equilíbrio térmico.

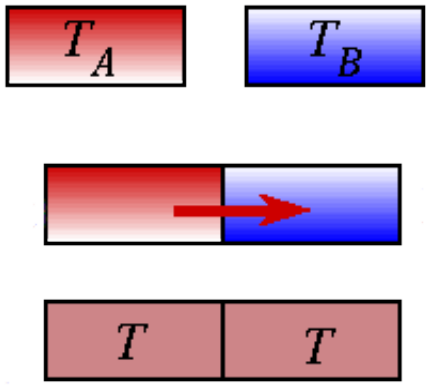


Figura II. 7 - Transferência de calor entre corpos a diferentes temperaturas (Imagem retirada da internet: http://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Calor3.php)

Existem três diferentes processos de transmissão de calor, também chamados de mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. A seguir, cada um desses processos será descrito de forma mais detalhada.

II.11.1 Condução

A transferência de calor por condução consiste na transferência de energia térmica entre as partículas que compõem o sistema. Essas partículas que formam o sistema recebem energia e, desta forma, passam a agitar-se com maior intensidade. Essa agitação transfere-se de partícula para partícula até que se propague por toda a extremidade do sistema, ou seja, este tipo de transferência de calor ocorre de átomo para átomo, em virtude de um gradiente de temperatura, de acordo com o demonstrado na Figura II. 8.

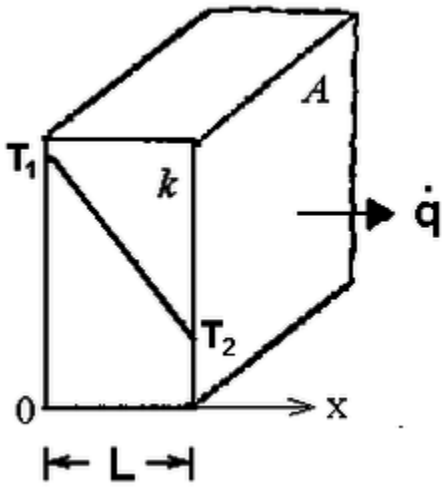


Figura II. 8 - Transmissão de calor por condução em meio sólido (Ordenes *et al*., 2008)

A transferência de calor por condução em uma parede plana obedece à Lei de Fourier, conforme indicado na Equação 1.

$$q^{"} = -K\frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1)$$

Onde:

$q^{"}$: fluxo de calor (W/m²)

K: constante de condutividade térmica ($\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}\mathrm{K}$)

II.11.1.1 Resistência Térmica de Contato (RTC)

Quando duas superfícies condutoras são postas em contato uma com a outra e submetidas a um fluxo de calor, uma resistência térmica relativamente elevada de temperatura é encontrada na região de contato, fazendocom que haja um degrau de temperatura na interface dos materiais. Essa resistência é denominada resistência térmica de contato (RTC) e surge quando os dois materiais não são ajustados perfeitamente, aprisionando uma camada composta.

O exame de uma área da zona de contato mostra que os corpos sólidos se tocam somente no pico da superfície e que o espaço entre eles é ocupadopor um fluido ou pelo vácuo (Quaresimin & Ricotta, 2006). A existência de uma resistência de contato se deve, principalmente, aos efeitos da rugosidade da superfície. Pontos de contato se entremeiam com falhas que são, na maioria dos casos, preenchidas com ar, conforme se pode observar na Figura II. 9. A transferência de calor é, portanto, devido à condução de calor através da área de contato real e à condução e/ou radiação através dos interstícios (Incropera *et al.*, 2008).

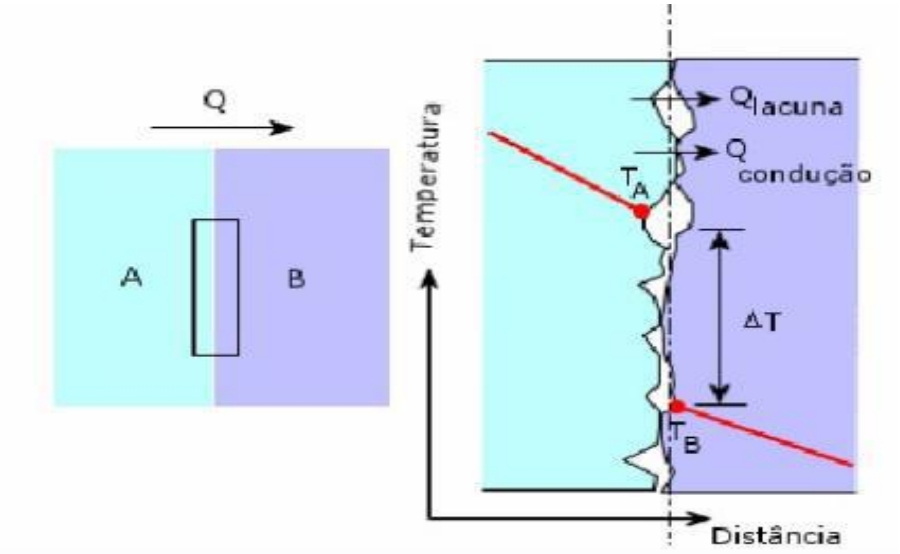


Figura II. 9 - Queda de temperatura devido à resistência térmica de contato (Cordeiro, 2014)

Ao longo dos anos, diversos trabalhos foram realizados com o objetivo de se determinar a RTC em diferentes tipos de juntas. No trabalho de Gaynes *et al.*(1995) foi avaliada a resistência de contato para adesivos isotrópicos eletricamente condutivos. Já em Yeh & Lin (2003), o estudo experimental da resistência térmica de contato foi realizado para contatos metálicos em juntas aparafusadas, analisando três tipos de interfaces diferentes: Al / Al, Cu / Al e contatos S / Al.

Em Merril & Garimella (2011), foi feita a medição e predição da resistência térmica de contato para juntas revestidas, através dos métodos experimental e numérico. Foram utilizados três substratos (cobre, latão e alumínio) com três revestimentos (prata, níquel e estanho), para uma grande variedade de espessuras de revestimento, rugosidade do substrato e carga de contato. O modelo determina a área efetiva de contato e o número de contato de asperezas de uma articulação; a resistência é determinada através de cada aspereza de contato individual.

O trabalho realizado por Zheng *et al.*(2013), propõe um modelo melhorado para a RTC em contatos sólido/sólido mecanicamente prensados, com colagem intersticial, o qual considera tanto as deformações elásticas quanto as plásticas. Este modelo de RTC melhorada, com base na análise da transferência de calor através das juntas coladas, mostra que a resistência térmica conjunta, RTJ, é modelada como a soma da RTC e a resistência do material de colagem. O modelo indica que a RTJ depende da área de ligação, espessura da linha de ligação,condutividade térmica do material de ligação, pressão aplicada inicialmente, rugosidade da superfície e da resistência térmica dos contatos nus.

Existem diferentes formas de se reduzir a resistência de contato entre duas superfícies; uma delas é com a redução da rugosidade superficial, ou seja, ao aumentar a área dos pontos de

contato entre as paredes – esse mesmo efeito também pode ser conseguido ao se aumentar a pressão de junção. Outra forma é com a utilização de um fluido com elevada condutividade térmica para preencher o espaço entre as falhas ou o uso de materiais intersticiais (metais macios e graxas térmicas) ou de juntas (resinas epóxi, soldas ricas em chumbo, ligas de ouro e estanho) entre as paredes.

A resistência térmica de contato pode ser determinada de três formas: método experimental, método misto (análise experimental e análise numérica) e método teórico. Este trabalho busca realizar a demonstração pelométodo misto erealizar uma comparação dos resultados. Será analisada a influência dos diferentes tipos de rugosidade na resistência térmica de contato de duas peças metálicas unidas por uma resina epóxi.

A análise pelo método experimental busca determinar a temperatura na interface das peças, através da medição direta das temperaturas superficiais. Já o método misto consiste na comparação das curvas experimentais de resfriamento da amostra com as curvas teóricas de resfriamento da mesma, calculadas para valores arbitrários da RTC. O valor procurado corresponderá a apenas uma das curvas teóricas, mais especificamente àquela que mais se aproxima da curva experimental.

Para o cálculo teórico, sempreque existir uma resistência térmica de contato, é necessário que apareça uma condutância h_C entre as faces. Esta é posta em série com o meio condutor, em ambos os lados, conforme mostra a Figura II. 10, que, além de demonstrar a variação da temperatura ao longo da superfície entre dois materiais, também faz uma analogia com a resistência elétrica relativa ao problema.

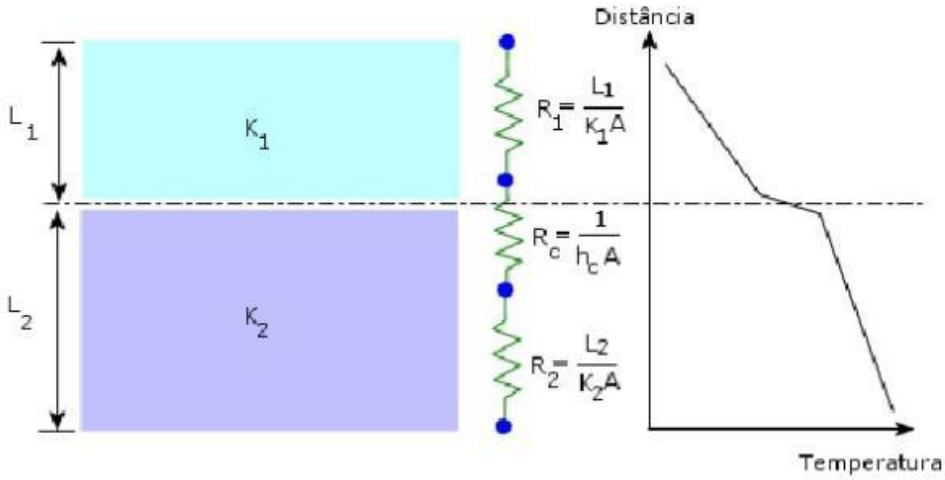


Figura II. 10 - Condutância entre faces e analogia com a resistência elétrica (Cordeiro, 2014)

Para uma área de superfície unitária, a resistência térmica de contato é definida pela Equação 2 :

$$Rtc = \frac{T_1 - T_2}{q"} \quad (2)$$

Onde :

T_1 : Temperatura na superfície1 da interface

T_2 : Temperatura no superficie 2 da interface

$q"$: Fluxo de calor

II.11.2 Convecção

A transferência de calor por convecção é a forma de transferência de calor comum para os gases e líquidos. Ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície quando os dois se encontram a diferentes temperaturas, conforme indicado na Figura II. 11.

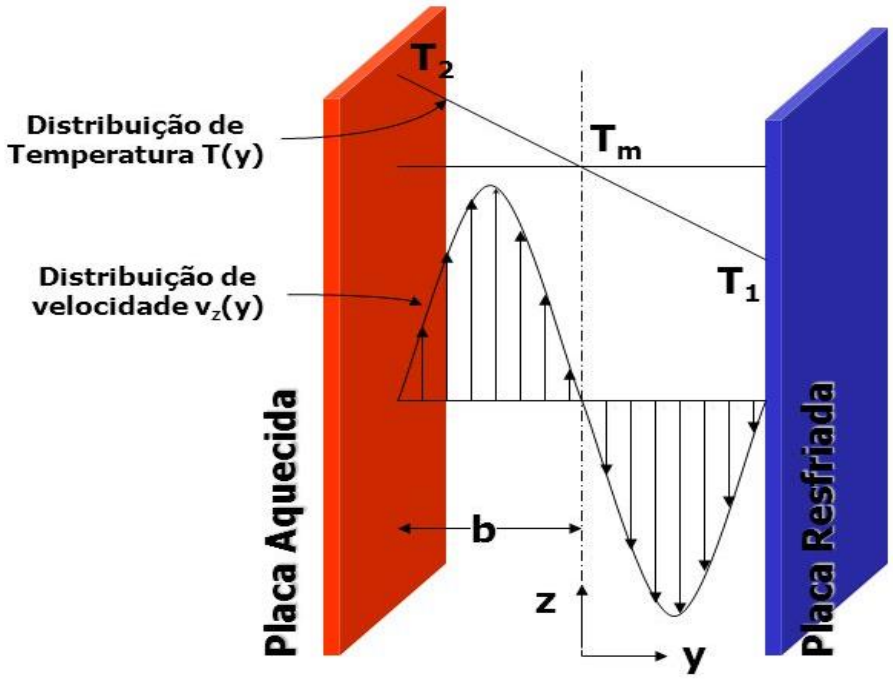


Figura II. 11 - Transferência de calor por convecção (Ordenes *et al.,* 2008)

A transferência acontece tanto pelo movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido. Ela pode ser natural (também chamada de livre), na qual o movimento do fluido é dado somente por diferenças de densidade, que ocorrem devido aosgradientes de

temperatura; ou forçada, no qual o movimento do fluido é gerado por uma fonte externa (bomba, ventilador, dispositivo de sucção, entre outros).

Uma forma simples de se explicar o mecanismo de convecção natural é imaginar a situação de uma água sendo posta para ferver em um fogão (Figura II. 12). Aparte que está próxima ao fogo será a primeira a aquecer. Quando isso ocorre, sofre expansão e fica menos densa que a água da superfície, deslocando-se para cima, enquanto a parte mais fria e densa move-se para baixo. Esse ciclo repete-se várias vezes formando a chamada corrente de convecção, que é ocasionada pela diferença entre as densidades. A parte aquecida entra em contato inúmeras vezes com a parte fria até que o calor seja transferido para todo o líquido, aquecendo-o igualmente.



Figura II. 12 - Formação da corrente de convecção (Hernandez, 2014)

Considerando que a temperatura da superfície é maior que a do fluido, o fluxo de calor pode ser definido pela lei de Newton, representada na Equação 3:

$$q" = h(T_s - T_\infty) \tag{3}$$

Onde:

$q"$: Fluxo de calor convectivo

h: Constante de convecção

T_s: Temperatura da superfície (ºC)

T_∞: Temperatura do fluido (ºC)

II.11.2.1 Convecção Natural

Nos casos de convecção natural, a troca de calor acontece entre um sólido (superfície plana) e um fluido (ar), mas o movimento do fluido não é forçado externamente por bombas, ventiladores mecânicos ou vento, conforme ocorre na convecção forçada. As situações de convecção natural são originadas por duas forças: o peso próprio do fluido (campo gravitacional) e as forças devidas ao gradiente de densidade de massa no fluido relacionado com sua variação de temperatura (Ordenes *et al.*, 2008).

Na transmissão de calor por convecção, existe um grupo de parâmetros adimensionais que descrevem o processo na camada limite. Sendo assim, um deles é o número de Grashof, representativo da relação entre a força de empuxo e as forças viscosas no fluído (Ordenes *et al.*, 2008), conforme Equação 4.

$$Gr = \frac{(g\beta(T_S - T_\infty)L^3)}{v^2} \tag{4}$$

Onde:

g: aceleração da gravidade (m/s²)

β: coeficiente de expansão térmica do fluido (K^{-1})

T_s: temperatura da superfície (ºC)

T_∞: temperatura ambiente (ºC)

L: espessura (m)

v: velocidade mássica média (m²/s)

É usual correlacionar sua ocorrência em termos de número de Rayleigh, que é o produto dos números de Grashof e Prandtl (Incropera *et al.*, 2008). Para placas planas, o número de Rayleigh crítico é expresso pela Equação 5.

$$Ra = \frac{(g\beta(T_S - T_\infty)L^3)}{v\alpha} \tag{5}$$

Onde:

α: difusividade térmica (m²/s)

Sendo o comprimento característico definido pela Equação 6.

$$L = \frac{A}{P} \tag{6}$$

Sendo:

A: área superficial (m^2)

P: perímetro da placa (m)

O cálculo do coeficiente convectivo para a convecção natural depende do coeficiente de expansão térmica do fluido, β, que a partir de uma aproximação para os gases perfeitos, pode ser calculado pela Equação 7.

$$\beta = \frac{1}{T_f} \tag{7}$$

Onde T_f: temperatura de filme (K)

Para placas horizontais com a troca de calor na superfície superior**,** usa-se a Equação 8 como forma de encontrar o número de Nusselt, que proporciona uma medida da transferência convectiva de calor na superfície:

$$Nu = 0{,}54Ra^{1/4} (10^5 \leq Ra \leq 10^7) \tag{8}$$

Sendo:

Ra: Número de Rayleigh

Por fim, tem-se o coeficiente de convecção associado às faces, sendo representado pela Equação 9.

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}k}{L} \tag{9}$$

Onde k : coeficiente de condutividade térmica (W/m)K

II.11.3 Radiação

A radiaçãotérmica, também conhecida como irradiação, é uma forma de transferência de calor que ocorre por meio de ondas eletromagnéticas. Como essas ondas podem propagar-se no vácuo, não é necessário que haja contato entre os corpos para existir transferência de calor. Todos os corpos emitem radiações térmicas que são proporcionais à sua temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a quantidade de calor que o objeto irradia (Hernandez, 2014).

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, a radiação emitida pelo corpo de prova será percebida pela câmera termográfica, que fará a imagem da variação de temperatura na peça através dessas ondas, conforme será explicado mais à frente.

II.12 Termografia

A termografia é uma técnica de ensaio não destrutivo que se baseia no mapeamento térmico para obtenção de regiões danificadas ou defeituosas do objeto, dentre outras aplicações. O ensaio termográfico mede as perturbações do fluxo de calor, gerado interna ou externamente pelos objetos estudados. Esta perturbação do meio produz um desvio na distribuição da temperatura superficial da peça captada através da câmera termográfica, gerando uma imagem.

A transferência de calor por radiação é primordial para a medição da temperatura através da termografia infravermelha, que detecta a radiação proveniente do objeto sob inspeção, mais especificamente a radiação infravermelha (Figura II. 13). O aparelho usado para a análise termográfica visual é uma câmera infravermelha, a qual através das ondas infravermelhas, capta a radiação emitida pelos corpos; estas variações de temperatura são convertidas em imagens coloridas, nas quais cada cor corresponde a uma determinada temperatura.

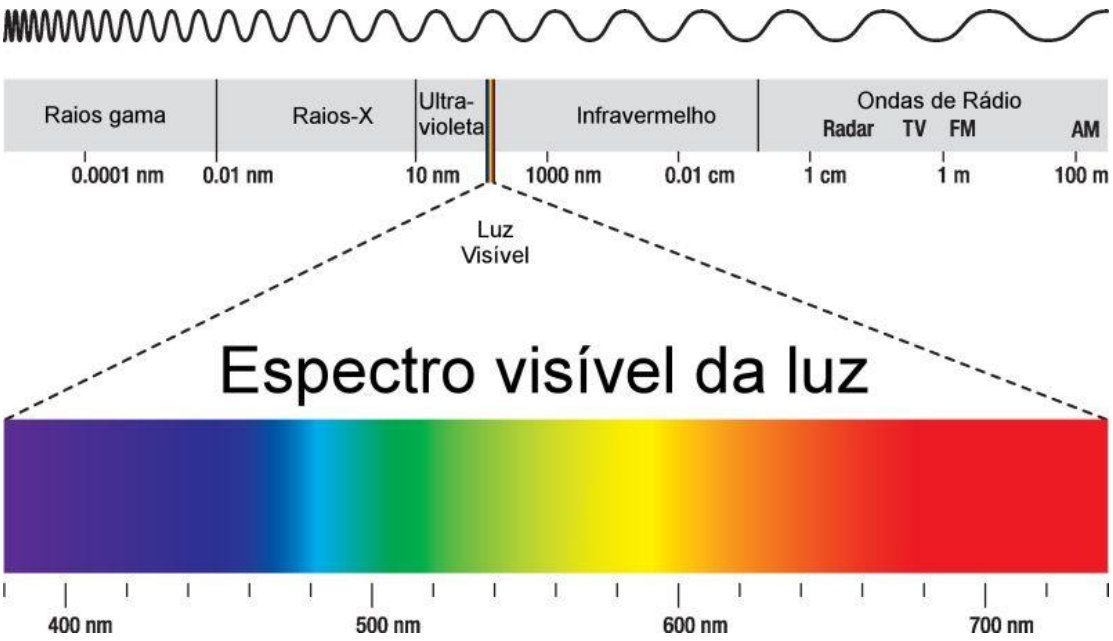


Figura II. 13 - Espectro visível e dos infravermelhos (Imagem retirada da internet: http://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2007/12/espectro-visivel-da-luz.jpg)

II.12.1 Fatores externos que influenciam na medição da termografia

Segundo (Barreira, 2004), por mais simples que pareça este ensaio não destrutivo, a análise dos resultados pode ser complicada e até conduzir a conclusões erradas se certos cuidados não forem tomados antes e durante a realização do ensaio. De acordo com o autor, é possível confundir defeitos da peça analisada com irregularidades na temperatura superficial, devido a alguns fatores externos como:

- condições térmicas do objeto e do meio em que se encontra, antes e durante o ensaio;
- presença de fontes externas (sombra, reflexão, superfícies com diferentes acabamentos);
- condições de medição (emissividade temperatura do ar, distância entre a câmera e o objeto, ângulo de observação).

A emissividade pode ser definida pela razão entre a energia radiante emitida por uma superfície real e a energia emitida pelo corpo negro. Mediante isso a capacidade de emissão dos corpos reais tem valor $0<\varepsilon<1$.

A Figura II. 14 demonstra a emissividade como uma propriedade de superfície que determina a capacidade dessa superfície em emitir radiação. Os valores de emissividade vão de zero (refletor perfeito) a um (emissor perfeito - corpo negro).

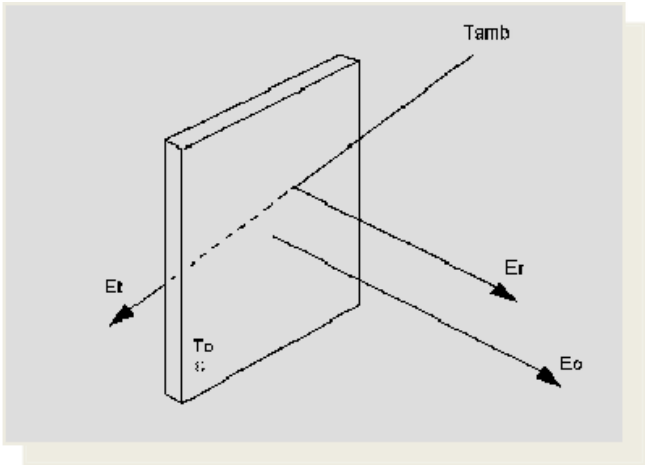


Figura II. 14 - Emissividade de um corpo (Neto, 2014)

Onde:

E_r: Energia refletida pelo corpo

E_0: Energia emitida pelo corpo

E_t: Energia transferida para o corpo

Fatores como a qualidade da superfície, o comprimento de onda, o formato do objeto, a temperatura, o ângulo de visão, além da presença de sujeira, oxidação e corrosão, fazem com que o valor da emissividade varie (Epperly *et al.*, 1997). A Figura II. 15 apresenta a variação da emissividade espectral de alguns metais em relação ao comprimento de onda, mostrando que,

quanto maior for este comprimento,a emissividade tende a diminuir. Já para o casodos não-metais, a mesma tende a aumentar, apesar de apresentar uma forma aleatória (Figura II.16).

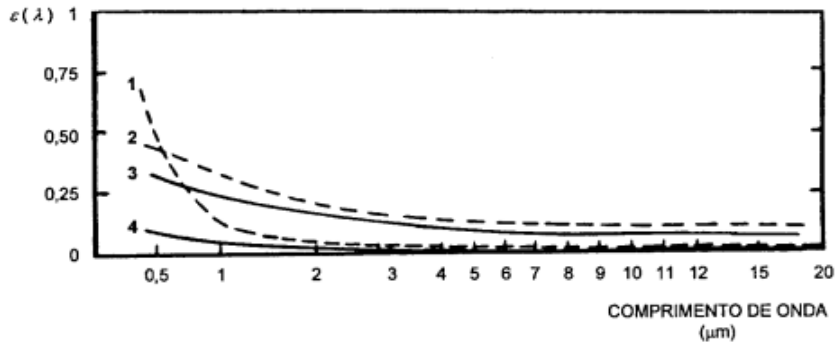


Figura II. 15 Emissividade espectral de alguns metais: cobre (1); ferro(2); alumínio(3); prata(4) (Barreira, 2004)

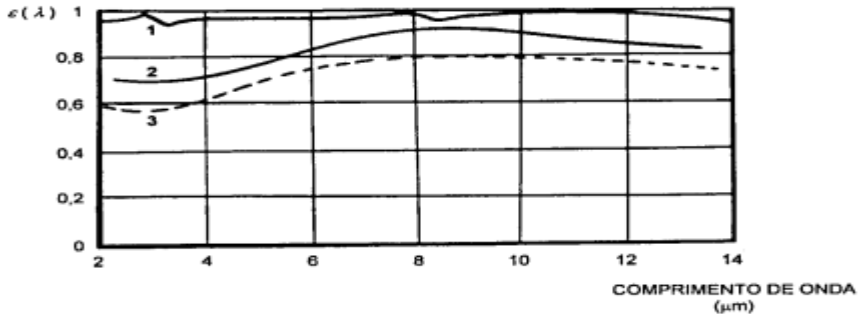


Figura II. 16 - Emissividade de alguns não-metais: água(1); terra(2); plástico(3) (Barreira, 2004)

Como os Termovisores não medem diretamente a temperatura, mas a radiação, as leituras de temperatura fornecidas por estes tornam-se muito dependentes dessa propriedade, como mostra a Figura II. 17.

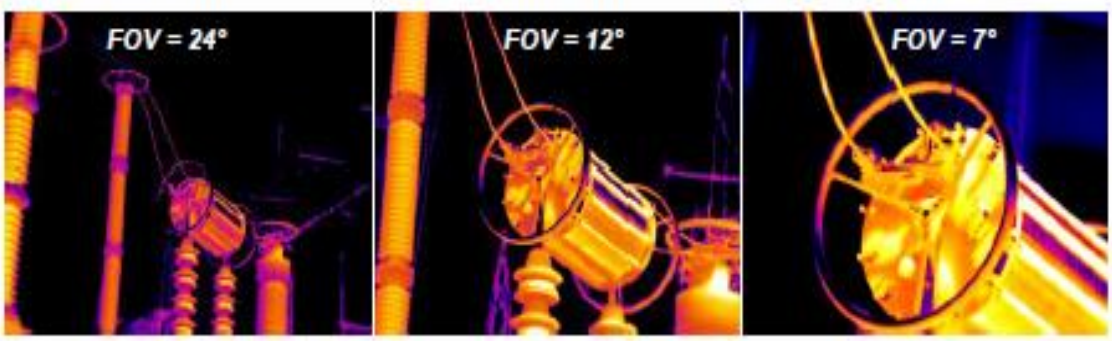


Figura II. 17 - Termografia em uma distribuição de linha de transmissão (Santos, 2006)

Capítulo III. Procedimento Experimental

III.1 Materiais

Para a realização do experimento, foram utilizados os seguintes materiais:

- Seis amostras de aço 1020, de dimensões 100 x 50 x 20 mm;
- Máquina polidora - modelo aropol 2V (Arotec – Brasil)
- Rugosímetro - modelo rugosurf 10 (TESA–Brasil);
- Massa epóxi bi componente – Polimetálico 2040 HTS (Polinova – Brasil);
- Aparato com madeira MDF e lã de vidro;
- Forno com controlador PID (JUNG – Brasil)
- Placa aquecedora - Modelo C-MAG HP 7 (IKA – China);
- Dois termopares do tipo K (ECIL – Brasil)
- Câmera termográfica FLIR A-320 IR (FLIR – USA)

III.2 Preparação dos Corpos de Prova

Inicialmente, todas as seis amostras de aço 1020 com espessura de 20 mm, largura de 50mm e comprimento de 100mm, sofreram um jateamento superficial com granalha do tipo G40, como forma de encontrar uma mesma superfície externa entre elas, para, quando em contato com a placa térmica, a transferência de calor da placa para o corpo de prova se dê da mesma maneira para as três amostras.

O jateamento teve como objetivo proporcionar à peça uma superfície com alta rugosidade, impedindo que houvesse reflexos durante a filmagem com a câmera termográfica; além de resultar numa amostra limpa, com a retirada total dos óxidos e carepas de laminação, a superfície do metal ficou conforme mostrado pela Figura III. 1.

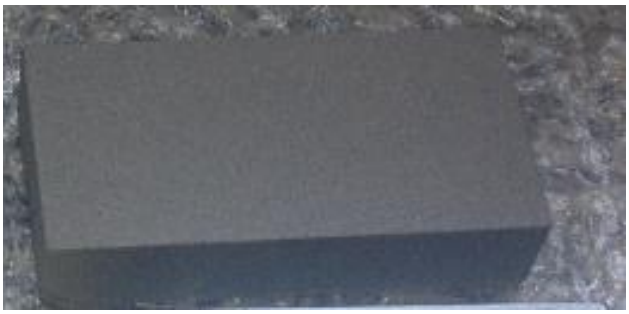


Figura III. 1 - Amostra de aço 1020 jateada

Entretanto, com o objetivo de proporcionar três superfícies de análise distintas, duas das amostras sofreram lixamento em apenas uma de suas superfícies (que será colada), através do método manual, com a utilização de uma lixa 100, de forma a reduzir a rugosidade, conforme mostrado na Figura III. 2.

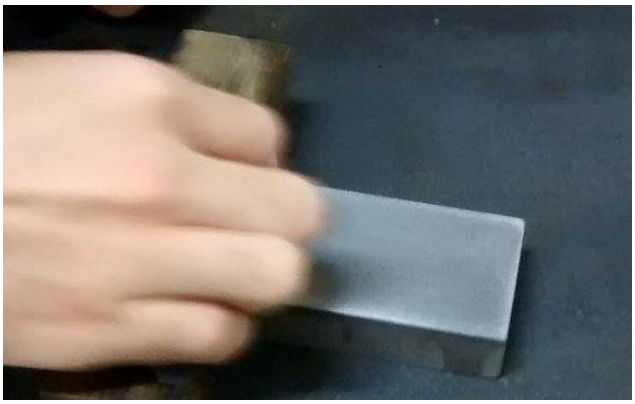


Figura III. 2 - Amostra de aço 1020 sendo lixada com lixa 100

Por último, outras duas peças passaram pelo processo de polimento (também apenas na superfície que será colada), de forma a se obter uma rugosidade ainda menor, quase mínima, para posterior observação do comportamento da resistência térmica de contato nos diferentes acabamentos.

Esse processo também consistiu no lixamento manual, com a utilização de 6 lixas metalográficas (de números 100 a 600) em ordem crescente – do grão mais grosseiro ao mais fino. Ao final do lixamento manual, passou-se para a máquina de polimento, onde as mesmas foram polidas com pastas de diamante de 6µm, 3µm e 1µm – até atingir o melhor acabamento –, e o resultado foi uma superfície espelhada, com poquíssima rugosidade, conforme mostrado na Figura III. 3.

A Figura III. 4 apresenta o resultado final das três peças lado a lado.



Figura III. 3 - Processo de polimento da amostra de aço 1020



Figura III. 4 - Diferentes acabamentos superficiais para amostras de aço 1020

III.3 Medição da Rugosidade

Após a preparação das superfícies dos corpos de prova, foi realizada a verificação do valor da rugosidade nos três tipos de acabamento superficial, para confirmar se de fato haviauma diferença relevante entre eles, validando, assim, as amostras como ideais para a realização do experimento.

Foram realizadas três medições em cada peça, em pontos e direções diferentes, e tomou-se como resultado a média dessas três medidas.

A Figura III. 5 mostra o rugosímetro utilizado (modelo rugosurf 10 da marca TESA–Brasil) e o ensaio na amostra lixada. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela III. 1 abaixo, sendo:

- comprimento de ensaio utilizado: 2.5mm;
- número de *Cut-off*: 5.



Figura III. 5 - Rugosímetro portátil

Tabela III. 1- Medições dos parâmetros de rugosidade

	Placa Jateada				**Placa Lixada**				**Placa Polida**			
	1ªmed (µm)	2ªmed (µm)	3ªmed (µm)	**Média (µm)**	1ªmed (µm)	2ªmed (µm)	3ªmed (µm)	**Média** (µm)	1ªmed (µm)	2ªmed (µm)	3ªmed (µm)	**Média** (µm)
Ra	2,31	2,97	2,83	**2,70**	0,64	0,54	0,65	**0,61**	0,04	0,06	0,04	**0,05**
Rq	2,71	3,79	3,42	**3,31**	0,79	0,70	0,89	**0,79**	0,06	0,07	0,05	**0,06**
Rt	14,68	20,81	15,93	**17,14**	5,64	4,84	6,35	**5,61**	0,40	0,52	0,35	**0,42**
Rz	10,02	15,43	13,17	**12,87**	3,76	3,55	4,43	**3,91**	0,31	0,39	0,28	**0,33**
Rc	6,99	8,99	7,89	**7,96**	1,77	1,46	1,97	**1,73**	0,10	0,12	0,11	**0,11**
Rsm	83,00	92,00	82,00	**85,67**	29,00	36,00	40,00	**35,00**	9,00	13,00	10,00	**10,67**

Onde:

Ra: rugosidade média ou aritmética, determinada em função da linha média do perfil de rugosidade.

Rq: rugosidade quadrática média. Este parâmetro acentua o efeito dos valores do perfil que se afastam da média.

Rt: rugosidade máxima, definido como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso da medição

Rz: corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de medição, independente dos valores de rugosidade parcial

Rc: valor médio aritmético das amplitudes de todos os picos e vales.

Rsm: largura média de um elemento do perfil

O parâmetro utilizado para comparação das rugosidades foi o Ra, ou seja, a rugosidade média do perfil. Os resultados corresponderam ao esperado: a amostra jateada, apresentou a maior rugosidade (2,70µm), a amostra lixada apresentou um valor de rugosidade intermediário (0,61µm) e a polida apresentou a menor rugosidade (0,05µm); com diferenças significativas entre as três. Desta forma obtiveram-se três acabamentos superficiais diferentes e suficientes para dar segmento ao experimento a fim de posterior comparação da influência da rugosidade na resistência térmica de contato de juntas coladas.

III.4 Aplicação da massa epóxi nas amostras de aço

Foi aplicada sobre as superfícies das amostras a massa epóxi, preparada conforme instrução do fabricante (Figura III. 6). As amostras foram coladas duas a duas, conforme seus acabamentos superficiais (polida, lixada e jateada). Duas placas de aço, com espessura de 0,75mm, foram utilizadas como gabarito para garantir a espessura de adesivo (Figura III.7).



Figura III. 6 - Massa epóxi utilizada para colagem das amostras de aço



Figura III. 7 - Processo de colagem

A seguir, as amostras seguiram para o forno a 100ºC (Figura III. 8), onde ficaram durante 24h, respeitando o tempo de cura do adesivo indicado pelo fabricante. O forno utilizado foi da marca JUNG, modelo 1813, com controlador PID, que atinge temperatura máxima de 1300°C



Figura III. 8 - Processo de cura do adesivo

III.5 Preparação e montagem do aparato

Ao longo do desenvolvimento experimental foram feitos dois tipos de análises: a primeira considerando o corpo de prova posicionado sobre a fonte térmica e em contato com o ar ambiente, havendo assim a troca de calor por convecção natural entre a peça e o meio. A segunda análise

será feita de forma a evitar a perda de calor da peça para o meio, para isto, foi necessária a construção de um aparato com função de isolante térmico.

O material escolhido foram placas de madeira MDF, com 3mm de espessura, compostas por uma mistura de fibras de madeira com resina. As placas foram montadas de maneira a se formar uma caixa com abertura em apenas uma de suas laterais (onde será posicionada a câmera para filmagem termográfica). Em seu interior, a caixa foi recoberta com lã de vidro (Figura III. 9), que, devido suas propriedades, é um dos mais tradicionais isolantes térmicos utilizados. Além de sua baixíssima condutividade térmica, não atacadas superfícies com as quais está em contato.

O aparato foi construído de forma que a peça se encaixe perfeitamente em seu interior, a fim de não sobrar espaços para que exista a troca de calor por convecção.

O acúmulo de calor no interior da caixa fará com que se alcance a temperatura ideal na superfície superior em um intervalo de tempo menor que o modelo aberto, fazendo assim com que a resistência térmica de contato para esse grupo de amostras, tenda a zero mais rapidamente que o grupo de amostras não isolado; porém em nada vai alterar o valor do fluxo de calor que atravessa a peça, já que a placa térmica utilizada emitirá calor a temperatura constante e igual em todos os casos, e a superfície inferior da peça, em contato com a placa, é igual para todas as amostras.



Figura III. 9 - Aparato para isolamento térmico das amostras

III.6 Medição via termopares

O modelo experimental tem como objetivo uma comparação da influência do parâmetro rugosidade na resistência térmica de contato de juntas coladas. Para a obtenção desta resistência através do método experimental, é essencialmente importante a determinação das temperaturas na interface das juntas coladas, baseadas na medição direta das temperaturas das superfícies superiores e inferiores.

Para isso, as três amostras de aço com diferentes rugosidades, citadas anteriormente, unidas com adesivo de base epóxi, foram encaixadas no aparato construído como isolante térmico e colocadas sobre uma fonte de calor, com a superfície inferior apoiada na placa, que emite calor de maneira constante durante um determinado período de tempo. Termopares foram fixados na superfície superior da amostra, em pontos diferentes, a uma profundidade de 0,004m, a fim de medir a variação da temperatura de saída com o tempo.

Foi utilizada uma fonte térmica, do modelo C-MAG HP 7, da marca IKA, com temperatura de entrada fixada em 70°C. O termopar escolhido foi do tipo K da marca ECIL, que apresenta baixo custo e de fácil utilização. A faixa de leitura deste sensor varia de -100 °C a 300 °C, e tem um erro de aproximadamente 2°C. A temperatura do ambiente onde foi realizado o experimento foi mantida durante todo o tempo, variando entre 28 a 30ºC.

Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados (HBM Spider 8) e utilizou-se também o software de medição Catman da HBM. Em todos os experimentos usou-se uma taxa de aquisição de 50 Hz.

A Figura III. 10 a, b, c, a seguir, mostram a montagem do experimento.

Cada amostra foi observada isoladamente durante 1 hora e 10 minutos (4200 segundos), tempo necessário para que a temperatura na superfície superior estabilizasse e se igualasse à inferior. Neste momento, considera-se que o sistema encontra-se em equilíbrio térmico, facilitando a posterior análise analítica.

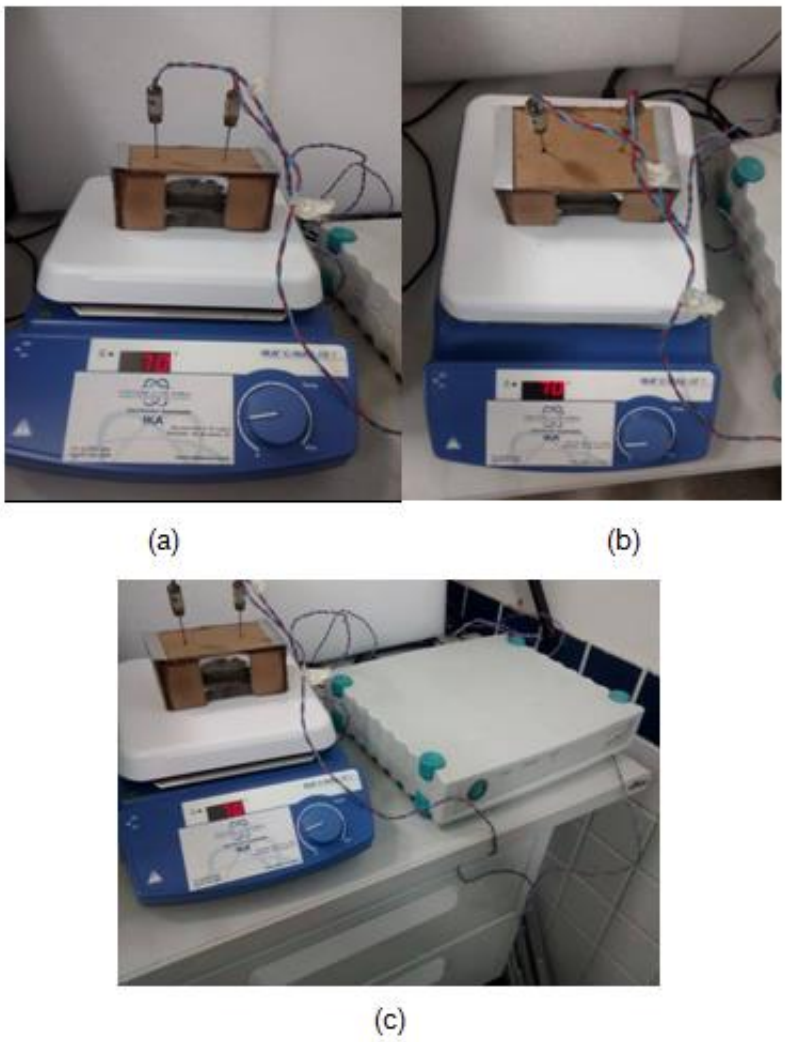


Figura III. 10 - Montagem experimental para análise de temperatura com termopar – amostra com caixa isolante

A seguir são apresentadas as curvas obtidas através dos termopares - conectados na superfície superior de cada uma das amostras-, que demonstram o comportamento da temperatura ao longo do tempo para o conjunto de amostras isoladas termicamente (Figuras III. 11, III. 12 e III. 13).

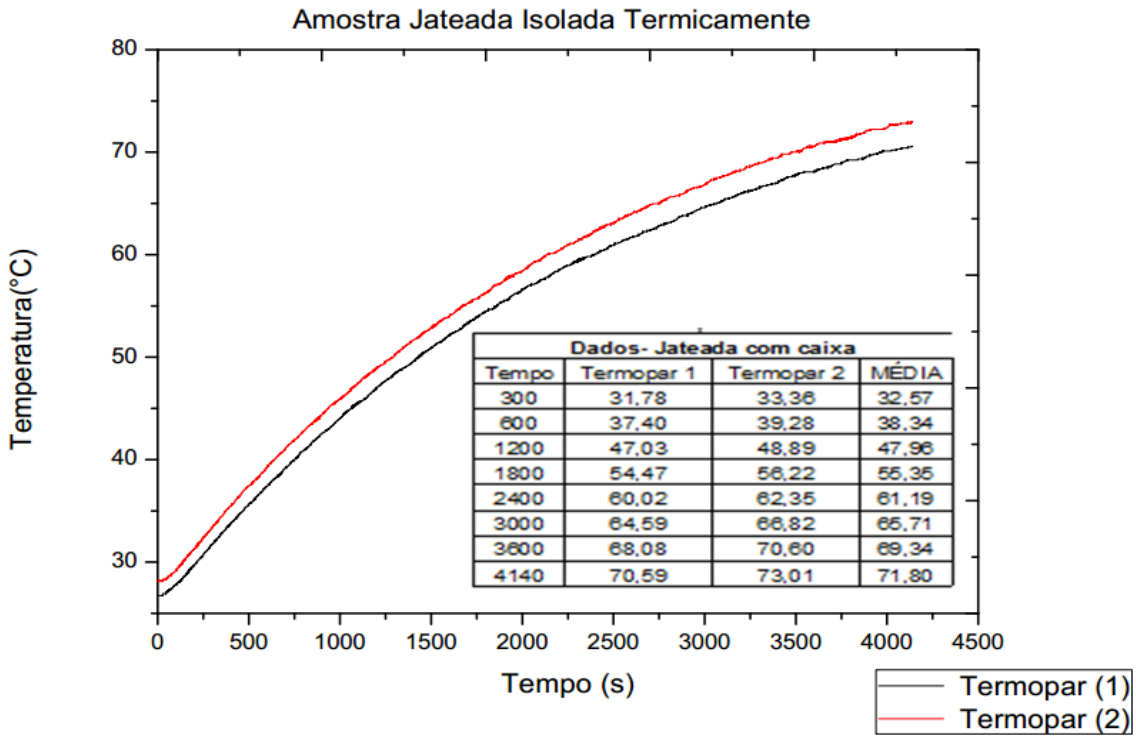


Figura III. 11 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço jateada, isolada termicamente

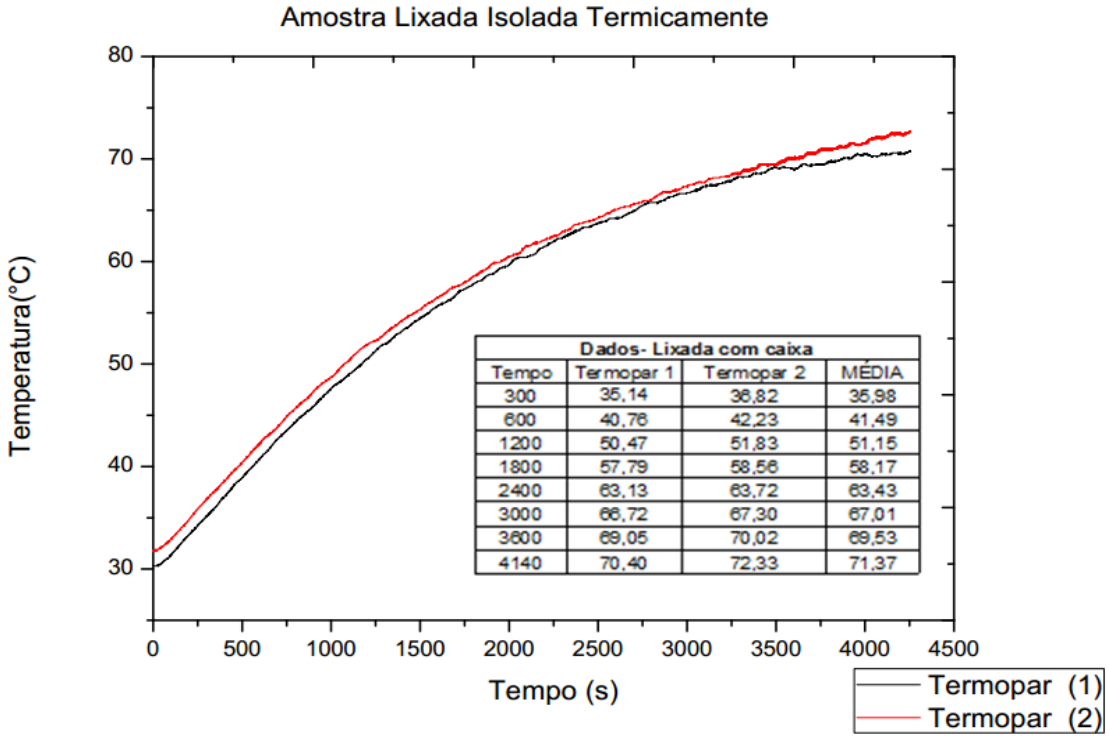


Figura III. 12 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço lixada, isolada termicamente

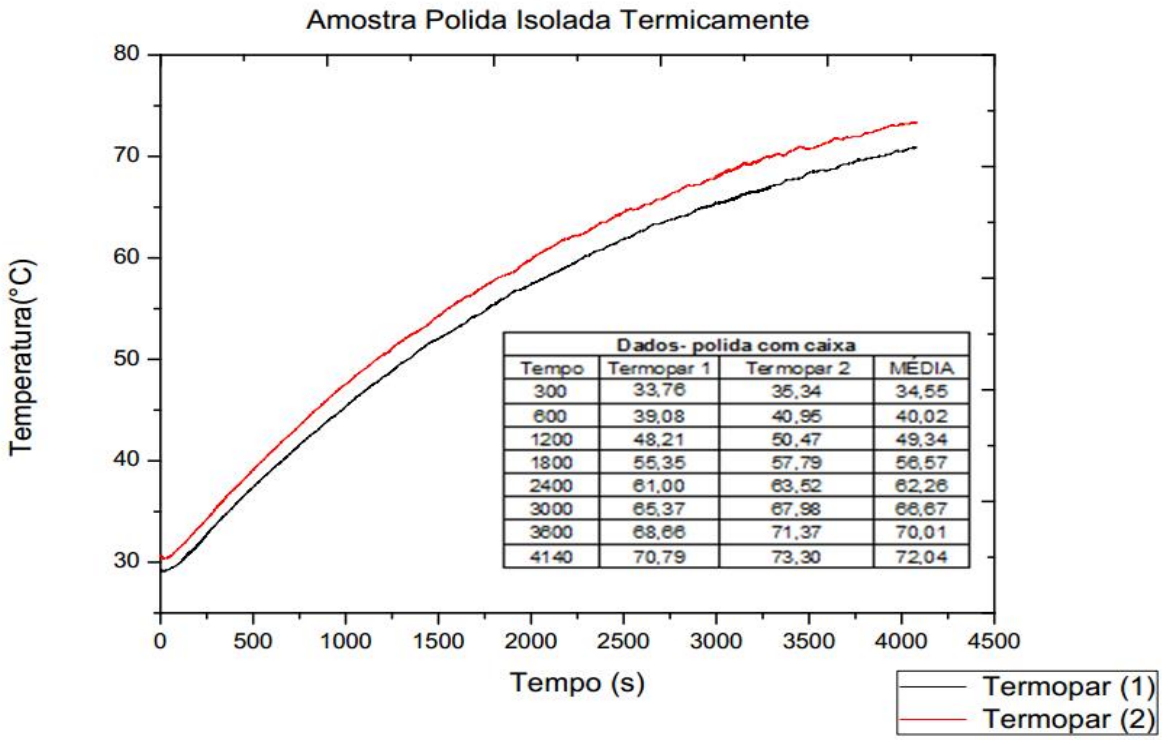


Figura III. 13 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço polida, isolada termicamente.

Logo após, foi feita a mesma análise, agora para a amostra sem a caixa isolante. A Figura III. 14 mostra a montagem experimental para este caso.

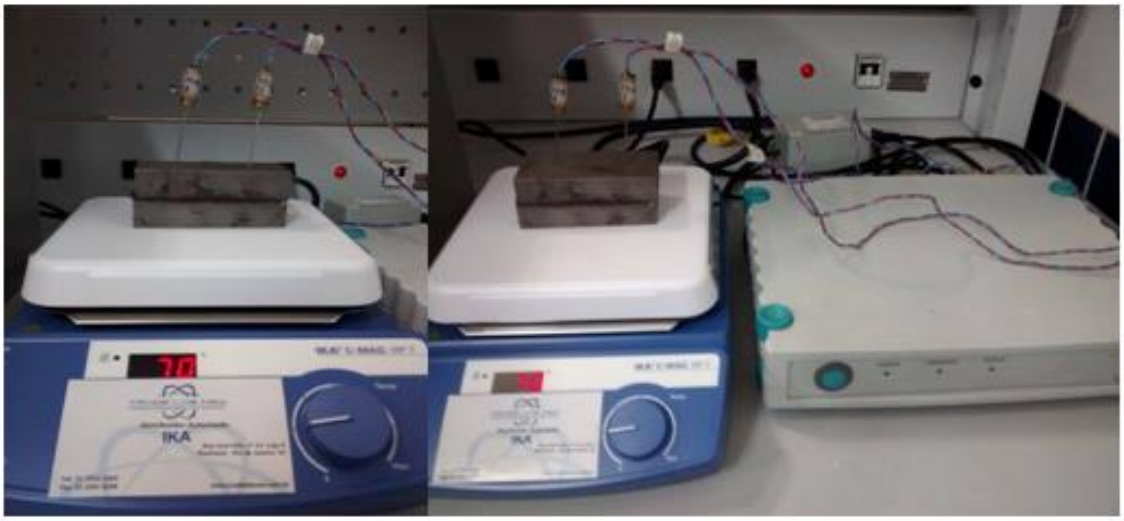
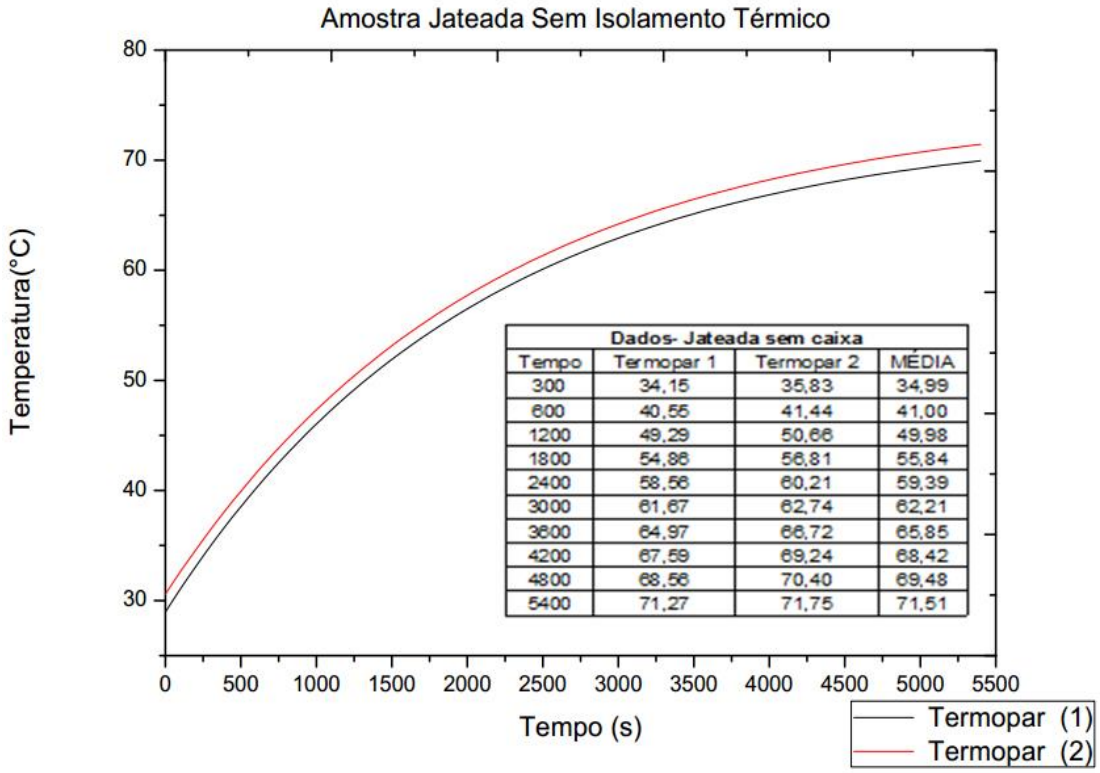


Figura III. 14 - Montagem experimental para análise de temperatura com termopar – amostra com convecção.

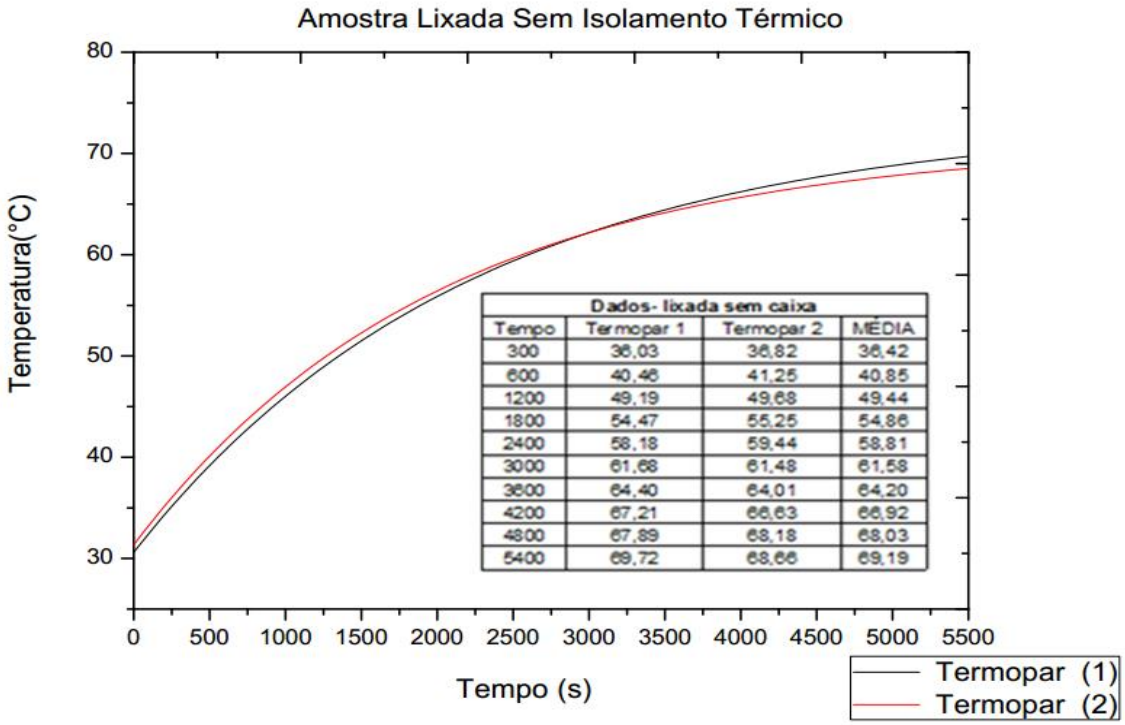
Quando se retira o aparato de isolamento térmico, a peça passa a perder calor mais rapidamente para o meio e, consequentemente, demora mais tempo até que a temperatura na superfície superior se estabilize e se crie a condição de equilíbrio térmico. Portanto, para este tipo de ensaio, considerando as mesmas condições, foi necessário um tempo de observação de uma 1h e 30min (5400 seg.) até que houvesse a estabilização da temperatura.

As curvas representadas nas Figuras III. 15, III. 16 e III. 17 foram obtidas através dos termopares conectados na superfície superior de cada uma das amostras, e demonstram o comportamento da variação da temperatura ao longo do tempo para o conjunto de amostras sem isolamento térmico, durante o período de 1 hora e 30 minutos (5400 segundos), juntamente com as respectivas tabelas, para cada uma das peças.



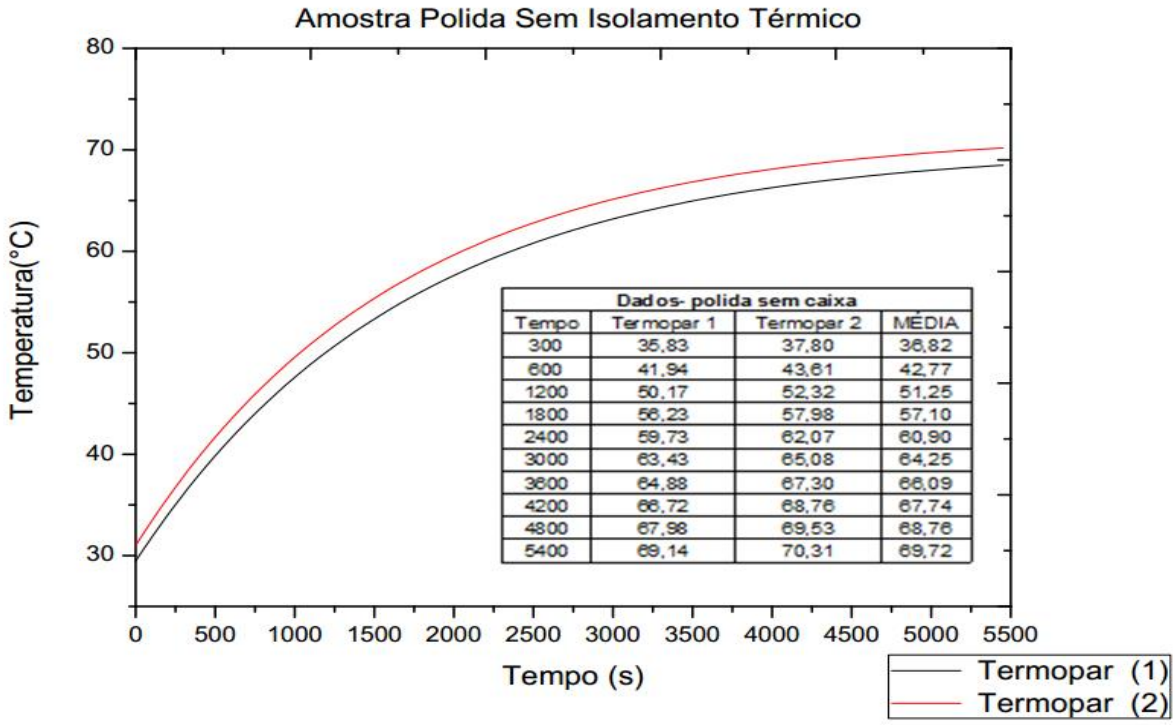
Dados- Jateada sem caixa			
Tempo	Termopar 1	Termopar 2	MÉDIA
300	34,15	35,83	34,99
600	40,55	41,44	41,00
1200	49,29	50,66	49,98
1800	54,86	56,81	55,84
2400	58,56	60,21	59,39
3000	61,67	62,74	62,21
3600	64,97	66,72	65,85
4200	67,59	69,24	68,42
4800	68,56	70,40	69,48
5400	71,27	71,75	71,51

Figura III. 15 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço jateada, sem isolamento térmico



Dados- lixada sem caixa			
Tempo	Termopar 1	Termopar 2	MÉDIA
300	36,03	36,82	36,42
600	40,46	41,25	40,85
1200	49,19	49,68	49,44
1800	54,47	55,25	54,86
2400	58,18	59,44	58,81
3000	61,68	61,48	61,58
3600	64,40	64,01	64,20
4200	67,21	66,63	66,92
4800	67,89	68,18	68,03
5400	69,72	68,66	69,19

Figura III. 16 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço lixada, sem isolamento térmico



Dados- polida sem caixa			
Tempo	Termopar 1	Termopar 2	MÉDIA
300	35,83	37,80	36,82
600	41,94	43,61	42,77
1200	50,17	52,32	51,25
1800	56,23	57,98	57,10
2400	59,73	62,07	60,90
3000	63,43	65,08	64,25
3600	64,88	67,30	66,09
4200	66,72	68,76	67,74
4800	67,98	69,53	68,76
5400	69,14	70,31	69,72

Figura III. 17 - Comportamento da temperatura ao longo do tempo para a amostra de aço polida, sem isolamento térmico.

Os valores das temperaturas encontrados ao longo do experimento com o termopar serão utilizados para o posterior cálculo analítico, na intenção de se achar o valor da RTC na junta colada, além de serem primordiais para a calibração da câmera termográfica e do modelo numérico.

III.7 Validação por análise termográfica

Dando prosseguimento, foi realizada uma análise termográfica das amostras, usando-se uma câmera do tipo FLIR A-320 IR, com o objetivo de se conhecer o perfil de temperatura atuante na peça.

Como já citado anteriormente, a câmera utilizada para a análise termográfica visual é do tipo infravermelha, que capta a radiação proveniente dos corpos de prova através das ondas infravermelhas e converte as variações de temperatura em imagens coloridas; cada cor corresponde a uma determinada temperatura.

Objetiva-se, através desta análise, ter uma ideia visual do momento e do lugar em que ocorre a resistência térmica de contato na amostra e, além disso, obter a temperatura que ocorre na junta colada, para posterior cálculo analítico que mostrará o valor da RTC para cada rugosidade.

A Figura III. 18 mostra a montagem do experimento; posiciona-se a câmera termográfica de frente para a amostra e a imagem gerada é enviada em tempo real para o computador. Para este ensaio, o ambiente mantido é de 28ºC, e todas as luzes apagadas, a fim de que não aconteça nenhuma interferência nos resultados.



Figura III. 18 - Montagem experimental para análise de temperatura com câmera termográfica

O tempo de observação com a câmera infravermelha foi exatamente o mesmo tempo de observação da análise com o termopar, ou seja, 4200 segundos para cada amostra isolada termicamente e 5400 segundos para cada amostra sem isolamento térmico (tempo suficiente para a estabilização da temperatura).

A sequência de imagens a seguir (Figura III. 19 e Figura III. 20) mostrará as fotos obtidas através da câmera no início do experimento (t=5s), durante– no momento em que fica mais evidente a resistência térmica de contato (t=1400s para a amostra isolada e t=1800 para a amostra com convecção) – e ao final (t=4200s para a amostra isoladae t=5400s para a amostra com convecção), para o modelo isolado e não isolado.

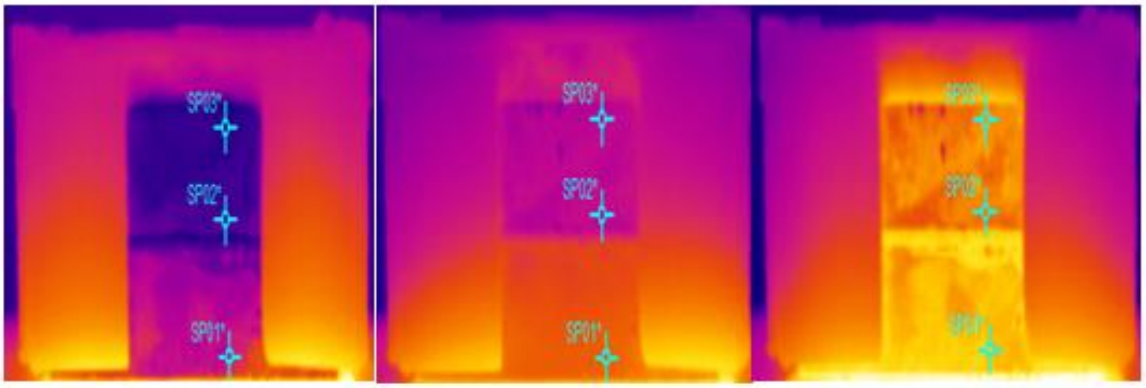


Figura III. 19 - Imagens da câmera termográfica – Amostra com caixa isolante: início (t=5s), meio (t=1400s) e fim (t=4200s), respectivamente.

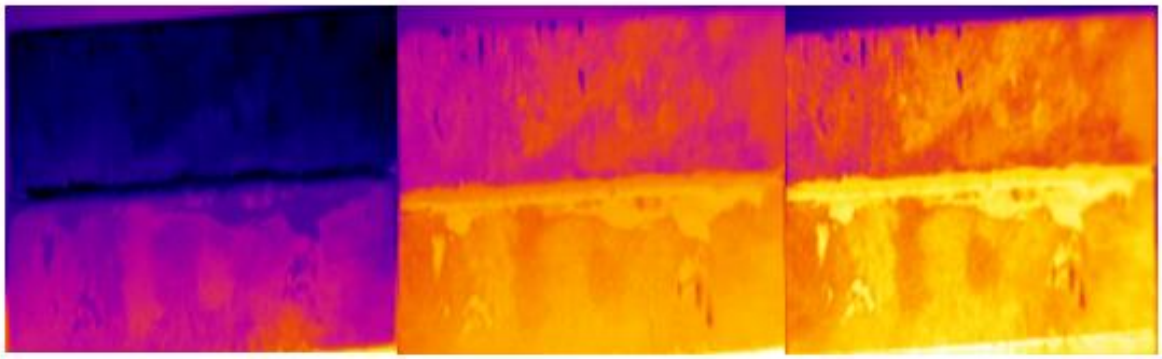


Figura III. 20 - Imagens da câmera termográfica – Amostra sem caixa isolante: início (t=5s), meio (t=1800s) e fim (t=5400s), respectivamente.

Além das imagens, o método de análise por termografia também fornece um gráfico temperatura versus tempo para qualquer ponto ou região escolhido da peça, desta forma, podemos tirar algumas das temperaturas necessárias para o cálculo analítico.

Para a validação por análise termográfica, foi feita uma comparação entre os dois métodos: termopar e termografia. A Figura III. 21 representa a validação para a amostra jateada com caixa isolante. Nas imagens geradas pela câmera, os pontos foram posicionados exatamente no mesmo lugar onde esteve posicionado o termopar, e com isso pôde-se comparar a variação da temperatura obtida por cada método e ajustar os parâmetros da câmera (emissividade, distância, entre outros) de forma a deixar a curva de temperatura o mais próximo possível da curva do termopar.

A curva utilizada para o termopar foi uma média das outras duas curvas encontradas anteriormente.

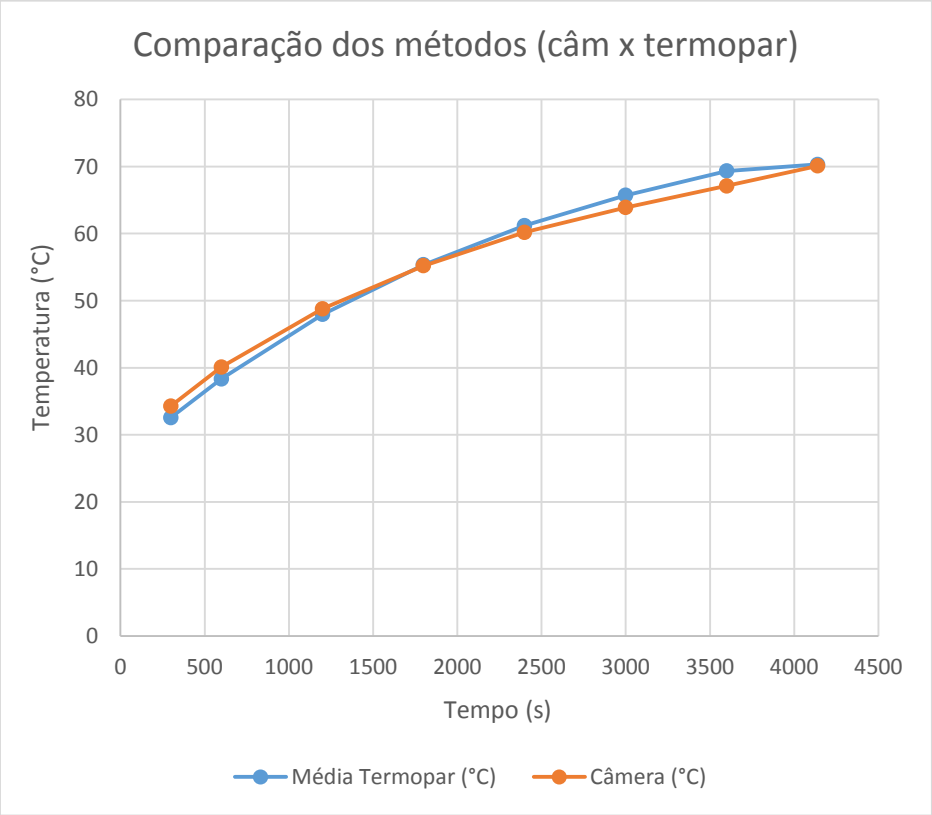


Figura III. 21 - Validação do ensaio termográfico – Comparação dos métodos

Tabela III. 2 - Comparação entre os métodos de medição de temperatura por termopar e termografia

Dados - Jateada com caixa					
Tempo (s)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Média Termopar (°C)	Câmera (°C)	Erro
300	31,78	33,36	32,57	34,30	2%
600	37,40	39,28	38,34	40,10	2%
1200	47,03	48,89	47,96	48,80	1%
1800	54,47	56,22	55,35	55,20	0%
2400	60,02	62,35	61,19	60,20	-1%
3000	64,59	66,82	65,71	63,90	-2%
3600	68,08	70,60	69,34	67,10	-2%
4140	69,59	71,01	70,30	70,10	0%

Conforme pode ser observado pela Tabela III. 2 acima, o erro associado aos dois métodos é, em geral, muito baixo, não ultrapassando 2%, que se enquadra à faixa de erro esperado do termopar, informado pelo fabricante; estando as temperaturas bem próximas para ambos os métodos. Portanto, pode-se considerar válido o ensaio termográfico.

Após a validação foi possível então realizar a medição da temperatura na superfície superior da primeira amostra, imediatamente antes do adesivo, pois esta será necessária para o cálculo da RTC entre a placa e a peça.

A Figura III. 22 mostra o comportamento da variação desta temperatura nas três amostras de aço, na superfície superior da primeira peça, obtida através da imagem com a câmera termográfica, seguido da Tabela III. 3, com o valor das temperaturas para os respectivos instantes.

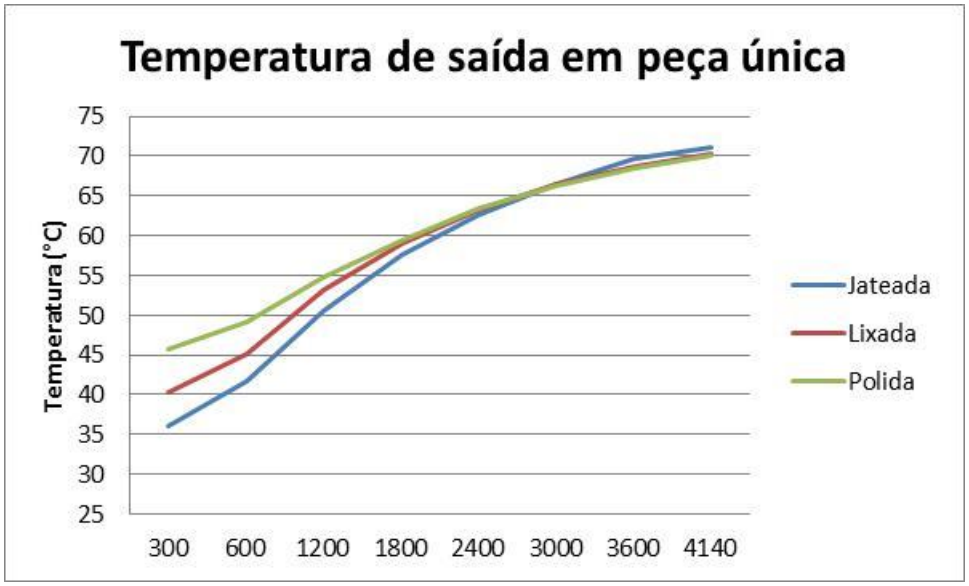


Figura III. 22 - Variação da temperatura com o tempo, na superfície superior da primeira peça – simulando condição de peça única –, para as 3 amostras de aço, obtida através da imagem com a câmera termográfica

Tabela III. 3 - Temperaturas obtidas para as três amostras de aço, na superfície superior da primeira peça, através da imagem com a câmera termográfica

	Jateada	Lixada	Polida
Tempo	Temp.°C (Cam)	Temp.°C (Cam)	Temp.°C (Cam)
300	36,1	40,2	45,7
600	41,7	45,2	49,2
1200	50,6	53,2	54,8
1800	57,5	59	59,5
2400	62,7	63,2	63,4
3000	66,4	66,4	66,2
3600	69,6	68,7	68,4
4140	71	70,2	70

Capítulo IV.Modelo Analítico

IV.1 Experimento com convecção (sem a caixa isolante)

O modelo analítico utilizado terá como base o modelo realizado no trabalho de Cordeiro (2014). Antes da formulação dos cálculos que indicarão o valor da Resistência Térmica de Contato para cada amostra, é apresentada, uma analogia entre o circuito térmico e umcircuito elétrico, como forma defacilitar avisualizaçãodo problema e montagemdas equações necessárias.

Foi necessário separar a análise em dois casos: o caso 1, simulando a presença de apenas uma peça e a fonte térmica, de forma a descobrir a resistência térmica de contato atuante entre a peça e a placa, e utilizá-la, posteriormente, no caso 2 – fonte térmica e amostras coladas – para enfim descobrir o valor da resistência térmica de contato na junta colada.

IV.1.1 Caso 1 – Amostra única

A Figura IV. 1 representa o caso 1 com a esquematização do problema placa aquecedora - aço jateado. Conforme foi dito anteriormente, todas as amostras passaram antes por um processo de jateamento e apenas a superfície a ser colada foi modificada, tem-se então que a superfície em contato com a placa aquecedora é a mesma em todos os casos. Portanto, o modelo do caso 1 terá um único resultado, que servirá para todas as amostras.



Figura IV. 1 -Caso 1 – Equipamento-Aço jateado-Ar (Cordeiro, 2014)

Onde:

T_P: Temperatura da placa (ou fonte térmica)

T_1:Temperatura na amostra de aço jateado base inferior

T_2: Temperatura na amostra de aço jateado base superior, obtida através da câmera termográfica

T_∞: Temperatura ambiente, no local do experimento

A Figura IV. 2 ilustra uma analogia à resistência elétrica, possibilitando um melhor entendimento das variáveis presentes.

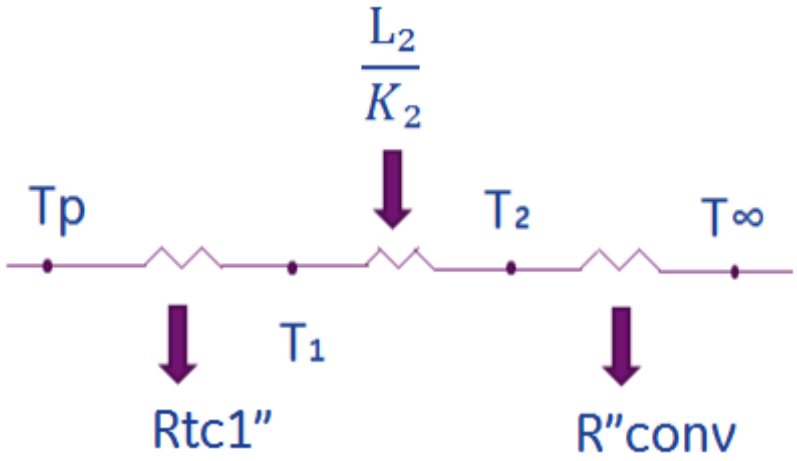


Figura IV. 2 - Analogia elétrica do caso 1 – Equipamento-Aço jateado-Ar (Cordeiro, 2014)

Onde:

Rtc_1'': Resistência térmica de contato entre a placa aquecedora e a amostra de aço jateado por unidade de área de transferência de calor ($\frac{m^2K}{W}$)

$\frac{L_2}{K_2}$: Resistência de condução do açojateado por unidade de área ($\frac{m^2K}{W}$)

R''_{conv}: Resistência de convecção natural ($\frac{m^2K}{W}$)

Conforme dito anteriormente, a primeira incógnita a ser descoberta será a resistência térmica de contato entre a placa aquecedora e a superfície inferior da peça, chamada aqui de Rtc_1". Para isso, é necessário conhecer a temperatura na superfície superior da peça. Esta será obtida através da câmera termográfica e, como todas as amostras têm a superfície inferior iguais (jateada), o resultado da Rtc_1" será o mesmo para todos os casos; então, a temperatura a ser considerada para os cálculos será uma média das temperaturas encontradas para as três amostras.

A Tabela IV. 1 a seguir, seleciona as temperaturas a serem utilizadas para posterior cálculo, nos instantes de 1200, 2400 e 3600 segundos, com base nas imagens obtidas através da câmera termográfica.

Tabela IV. 1 - Temperaturas, em °C, a serem utilizadas no cálculo do Caso 1

Temp. na superfície superior primeira peça (ºC), obtida através da câmera termográfica			
Amostras	Tempos		
	1200s	2400s	3600s
Aço jateado	50,6	62,7	68,6
Aço lixado	53,2	63,2	67,7
Aço polido	54,8	63,4	67,4
Média	**52,9**	**63,1**	**67,9**

É necessário encontrar o valor da resistência térmica de contato entre a placa e a peça, conforme para posteriormente encontrar o valor da RTC na junta colada. A metodologia de cálculo para esse primeiro caso é apresentada a seguir.

Os cálculos apresentados a partir de agora serão apenas para o instante de 1200 segundos, considerando que para todas as outras amostras, em qualquer dos instantes, o cálculo será exatamente o mesmo, alterando somente o valor da temperatura o valor da temperatura respectiva para cada amostra.

Primeiramente se faz necessário o cálculo da temperatura de filme, que representa a temperatura de um fluido em uma superfície interna de um aquecedor. A mesma é encontrada através da média da temperatura da superfície superior da peça jateada (T_2) e a temperatura de corrente livre (T∞). Sendo a última medida e conservada a 28°C durante todos os experimentos, como forma de minimizar os erros e manter o ambiente experimental igual para todos os casos estudados; e a primeira obtida através da câmera termográfica como uma média das 3 amostras, conforme dito anteriormente.

A temperatura de filme pode ser encontrada utilizando a Equação 10, que segue:

$$T_f = \frac{T_2 + T_\infty}{2} \tag{10}$$

Onde:

T_∞ = 28ºC

T_2 = 52,87°C

$$T_f = \frac{52{,}87 + 28}{2} = 40{,}43°C + 273 = 313{,}43\ K$$

As propriedades da temperatura de filme (T_f = 313,43K) foram encontradas através da interpolação dos valores encontrados na tabela de propriedades termofísicas de gases na pressão atmosférica para o ar atmosférico (Incropera *et al.*, 2008), e estão mostradas abaixo:

- ρ = 1,104$\mathrm{Kg/m^3}$
- C_P= 1,007$\frac{\mathrm{KJ}}{\mathrm{KG}}.\mathrm{K}$
- μ = 1,909 x $10^{-5}\mathrm{N\ s/m^2}$
- υ = 1,724x $10^{-5}\mathrm{m^2/s}$
- k = 0,0273$\mathrm{(W/m)K}$
- α = 2,449 x $10^{-5}\mathrm{m^2\ /s}$
- Pr = 0,705

O cálculo do coeficiente convectivo para a convecção natural, β, é dependente do coeficiente de expansão térmica do fluído, que, utilizando uma aproximação para os gases perfeitos, é calculado através da Equação 11:

$$\beta = \frac{1}{T_f} \tag{11}$$

Portanto:

β = $\frac{1}{313,43} = 0,00319$

A transição da camada limite da convecção natural depende da grandeza relativa das forças do empuxo e das forças viscosas no fluido. É usual correlacionar sua ocorrência em termos de número de Rayleigh, que é o produto dos números de Grashof e Prandtl. Para placas, o número de Rayleigh crítico é expresso pela Equação 12:

$$\mathrm{Ra} = \frac{(\mathrm{g\beta(T_2 - T_\infty)L^3})}{\mathrm{\nu\alpha}} \tag{12}$$

O comprimento característico é definido por:

$$\mathrm{L = A/P}$$

Onde A é a área superficial e P o perímetro da amostra de aço polida.

Para este caso:

A=0.005 m^3

P= 0.3m

L=0.005/0.3 = 0.017 m^2

Com isto, pode-se, portanto, encontrar o valor de Ra:

$$\mathrm{Ra} = \frac{(9.81 \text{ x } 3.19 \text{ x } 10^{-3} \text{ x } (52{,}87 - 27)0.017^3)}{1.724\text{x}10^{-5} \text{ x } 2.449\text{x}10^{-5}} = 9.056 \text{ x}10^3$$

Para placas horizontais com a troca de calor na superfície superior**,** usa-se a Equação 13como forma de encontrar o número de Nusselt, que proporciona uma medida da transferência convectiva de calor na superfície:

$$Nu = 0{,}54Ra^{1/4} \tag{13}$$

Desta forma:

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 0{,}54 \text{ x } (9{,}056x10^3)^{1/4} = 5{,}27$$

O coeficiente de convecção associado às faces é definido pela Equação 14 e, portanto, igual a:

$$\bar{\mathrm{h}} = \frac{\overline{\mathrm{Nu}}\,\mathrm{k}}{\mathrm{L}} \tag{14}$$

$$\bar{\mathrm{h}} = \frac{5.27 \text{ x } 2.73 \text{ x } 10^{-2}}{0.02} = 7{,}19 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}.\mathrm{k}$$

Por fim, pode-se encontrar o fluxo de calor através da Equação15:

$$\mathrm{q}'' = \bar{\mathrm{h}}\,(\mathrm{T}_2 - \mathrm{T}_\infty) \tag{15}$$

$$\mathrm{q}'' = 7{,}19\,(52{,}87 - 28) = 178{,}77\ \mathrm{W/m}^2$$

Com base na analogia elétrica apresentada naFigura IV. 2, pode-se encontrar então, através da Equação 16, o valor da temperatura na base inferior da amostra - T_1-, e,

consequentemente, a Rtc1” pela Equação 17, que corresponde ao valor da resistência térmica de contato entre a placa e a amostra de aço jateado.

$$q'' = \frac{(T_1 - T_2)}{R''cond} = \frac{(T_1 - T_2)}{L/K} \quad (16)$$

$$178{,}77 = \frac{(T_1 - 52{,}87)}{0.02/60{,}5}$$

$$T_1 = 52{,}93$$

Portanto:

$$Rtc1" = \frac{T_p - T_1}{q''} \quad (17)$$

$$Rtc1" = \frac{70 - 52{,}93}{178{,}77} = 0.096 \ \frac{WK}{m^2}.$$

A Tabela IV. 2 relaciona os resultados encontrados para a RTC entre placa/peça para cada um dos instantes pré-determinados:

Tabela IV. 2 - Valores encontrados para RTC entre placa e peça

	Valor da RTC entre placa e peça		
	Tempo		
	1200s	2400s	3600s
Rtc1"	0,096	0,025	0,006

Conclui-se que, quanto maior o tempo em que o calor é transferido da placa aquecedora para a peça – ou seja, quanto mais próximo se chega do equilíbrio térmico – menor é a resistência térmica de contato, já que as temperaturas tendem a se igualar, fazendo com que a RTC, consequentemente, tenda a zero. Com isso, os resultados coerentes comprovam que o modelo analítico utilizado funciona corretamente.

IV.1.2 Caso 2 – Amostras unidas por adesivo

A Figura IV. 3 apresenta o caso 2, que representa o experimento prático, onde as amostras coladas são postas sobre a placa aquecedora. Para esta figura em específico, está sendo representado o caso das amostras jateadas, porém o mesmo modelo servirá também para as amostras lixadas e polidas.

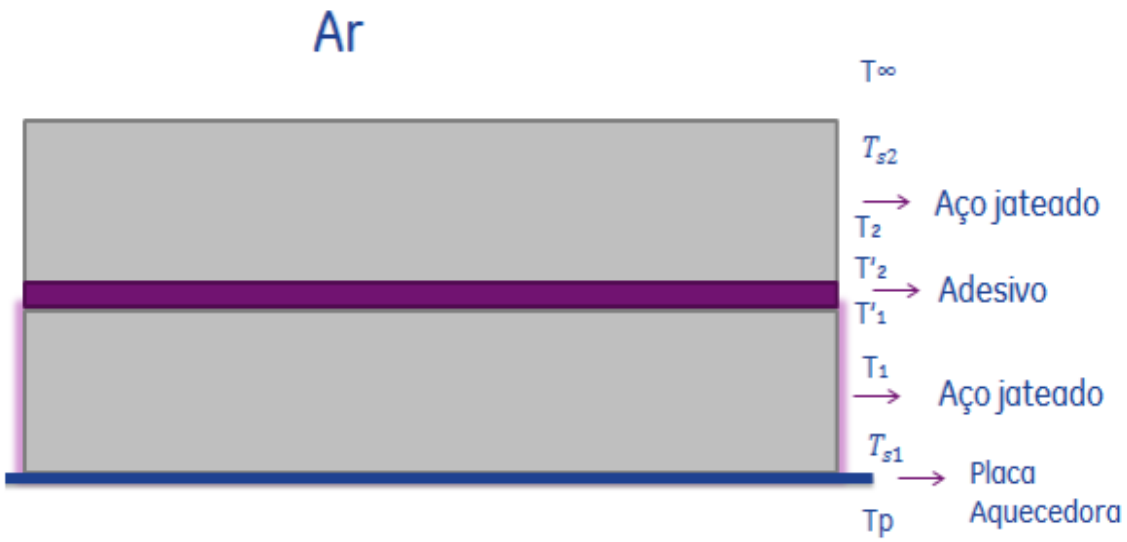


Figura IV. 3 - Caso 2 – Equipamento-Aço jateado-Adesivo-Aço jateado-Ar (Cordeiro, 2014)

Sendo:

T_P: Temperatura da Placa

T_{s1}: Temperatura na primeira placa de aço jateado base inferior

T_1: Temperatura na primeira placa de aço jateado base superior

T'_1:Temperatura no adesivo base inferior

T'_2: Temperatura no adesivo base superior

T_2: Temperatura na segunda placa de aço jateado base inferior

T_{s2}: Temperatura na segunda placa de aço jateado base superior - Medida pelo termopar

T_∞: Temperatura no local do experimento

De maneira semelhante ao que foi feito no caso anterior, a Figura IV. 4 ilustra uma analogia à resistência elétrica, possibilitando um melhor entendimento das variáveis presentes.

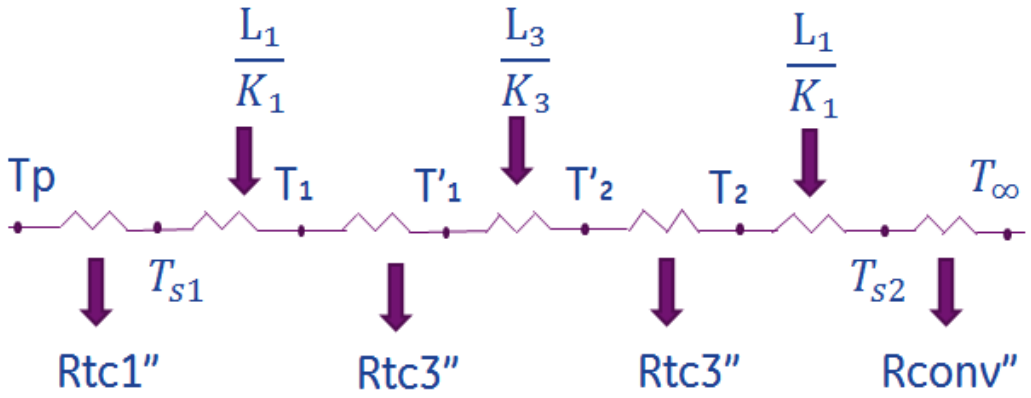


Figura IV. 4 - Analogia elétrica do caso 2 – Equipamento-Aço jateado-Adesivo-Aço jateado-Ar (Cordeiro, 2014)

Onde:

Rtc_1'':Resistência térmica de contato entre a placa aquecedora e a amostra de aço jateadopor unidade de área de transferência de calor ($\frac{m^2K}{W}$)

$\frac{L_1}{K_1}$: Resistência de condução do aço jateado por unidade de área ($\frac{m^2K}{W}$)

Rtc_3'': Resistência térmica de contato entre a amostra de aço jateado e o adesivo por unidade de área de transferência de calor ($\frac{m^2K}{W}$)

$\frac{L_3}{K_3}$: Resistência de condução do adesivo por unidade de área ($\frac{m^2K}{W}$)

R''_{conv}: Resistência de convecção natural ($\frac{m^2K}{W}$)

Tendo agora conhecido o valor da RTC entre a placa e a peça, pode-se entãocalcular finalmente o valor da RTC na junta colada de cada amostra, que é o objetivo deste trabalho. Para isso, é necessário conhecer o valor da temperatura na superfície superior da amostra colada, que foi obtida através da utilização do termopar.

A Tabela IV. 3 indica os valores médios de temperatura que serão utilizados durante os cálculos, para cada amostra e em cada um dos instantes selecionados no item anterior.

Tabela IV. 3 - Temperaturas, em ºC, a serem utilizadas no cálculo do Caso 2

Média das temperaturas (°C) fornecidas pelo termoparna superf. superior das amostras coladas			
Amostras	Tempos (s)		
	1200	2400	3600
Aço jateado	49,98	59,39	65,85
Aço lixado	49,44	58,81	64,2
Aço polido	51,25	60,9	66,09

Assim como nos cálculos do Caso 1, os cálculos apresentados a partir de agora são apenas para a amostra de aço jateada no instante de 1200 segundos, considerando que, para todas as outras amostras, em qualquer dos instantes, o cálculo será exatamente o mesmo, alterando somente o valor da temperatura para cada amostra e substituindo o valor da $\mathrm{Rtc1}$" para o respectivo instante.

Seguindo a mesma linha de desenvolvimento que foi previamente realizada para o caso 1, o caso 2 será baseado nas mesmas expressões matemáticas.

Sendo assim:

$$\mathrm{T_f} = \frac{49{,}98 + 28}{2} = 38.98^{\circ}\mathrm{C} = 311{,}98\mathrm{K}$$

As propriedades da temperatura de filme ($\mathrm{T_f} = 311{,}98\mathrm{K}$) foram encontradas através da interpolação dos valores encontrados na tabela de propriedades termofísicas de gases na pressão atmosférica para o ar atmosférico(Incropera et al., 2008).

$\rho = 1.1107\ \mathrm{Kg/m^3}$

$\mathrm{Cp} = 1.0074 \frac{\mathrm{KJ}}{\mathrm{KG}}.\mathrm{K}$

$\mu = 1.902 \times 10^{-5}\ \mathrm{N\ s/m^2}$

$\mathrm{v} = 1.709 \times 10^{-5} \mathrm{m^2}\ /\mathrm{s}$

$\mathrm{k} = 2.718 \times 10^{-2}\ (\mathrm{W/m})\mathrm{K}$

$\alpha = 2.427 \times 10^{-5} \mathrm{m^2}\ /\mathrm{s}$

Pr = 0.705

Sendo, portanto, o valor do coeficiente de expansão térmica:

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{311{,}98} = 3.20 \text{ x } 10^{-3} K^{-1}$$

O comprimento característico será o mesmo apresentado anteriormente, já que o tamanho das amostras de aço são os mesmos. Portanto:

$L = A/P$=0.005/0.3 = 0.017 m^2

Desta forma, pode-se encontrar o valor de Ra:

$$Ra = \frac{(9.81 \text{ x } 3.20 \text{ x } 10^{-3} \text{ x } (49{,}98 - 27) 0.017^3)}{1.711 x 10^{-5} \text{ x } 2.429 x 10^{-5}} = 7{,}69 \text{ x } 10^3$$

Sendo o número de Nusselt igual a:

$$\overline{Nu} = 0{,}54 \text{ x } (8{,}18 x 10^3)^{1/4} = 5{,}05$$

E o coeficiente de convecção associado às faces:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}\, k}{L} = \frac{5{,}05 \text{ x } 2.719 \text{ x } 10^{-2}}{0.04075} = 3{,}375 \frac{W}{m^2}.k$$

Onde L aqui significa a espessura total da amostra, ou seja, duas peças de 20mm mais 0,75mm de espessura de adesivo, totalizando uma amostra com espessura igual a 40,75mm.

Por fim, torna-se possível encontrar o fluxo de calor:

$$q'' = 3{,}375 \ (49{,}98 - 28 \ ) = 74{,}17 \ W/m^2$$

Abaixo apresenta-se o gráfico correlacionando o fluxo de calor emitido pela placa térmica com a temperatura (Figura IV. 5). O comportamento da curva comprova que, com o aumento da temperatura, o fluxo aumenta de maneira constante e linear, e se comporta da mesma maneira para os três grupos de amostra. O resultado de R^2 bem próximo a 1, confirma o ajustamento da regressão linear aos dados observados e que mais de 99% da variável dependente consegue ser explicada pelos regressores presentes neste modelo.

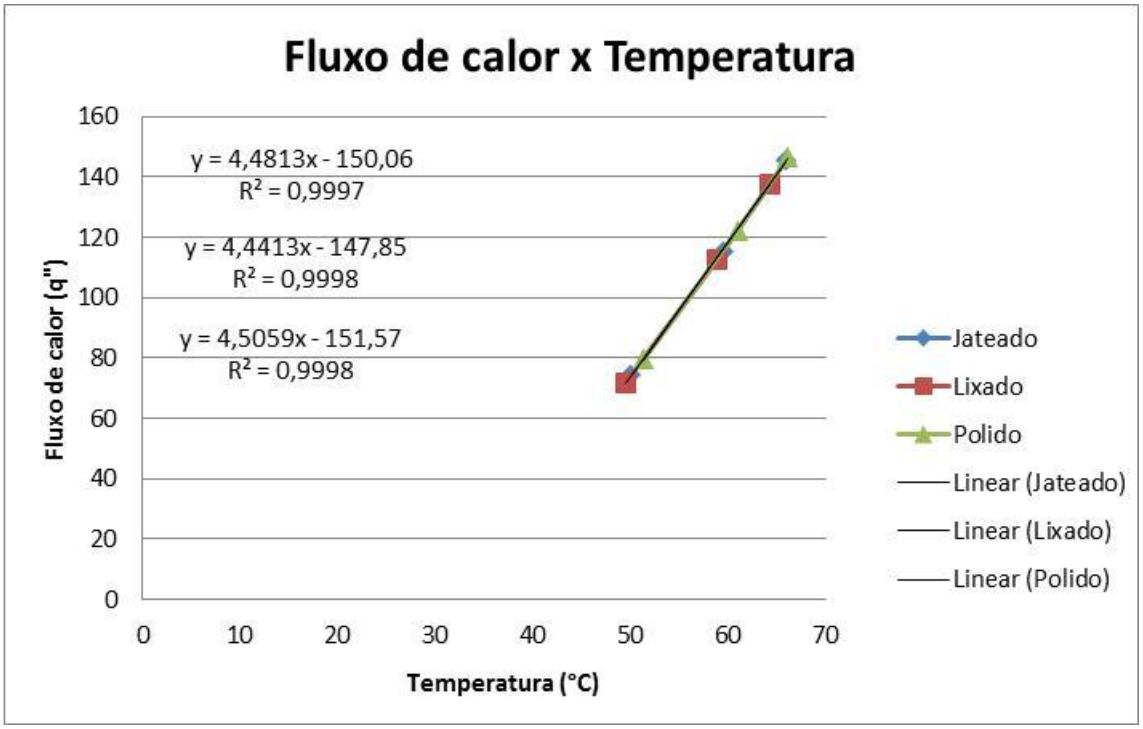


Figura IV. 5 - Gráfico demonstrativo da variação do fluxo de calor emitido pela placa térmica com o aumento da temperatura

Desta forma, pode-se, portanto, encontrar a temperatura T_2 na base inferior da segunda amostra de aço jateado através da Equação 16, explicitada anteriormente; e a temperatura T_1 na base superior da primeira amostra pela Equação 18:

$$74{,}17 = \frac{(T_2 - 49{,}98)}{0.02/60{,}5}$$

$$T_2 = 50{,}01°C$$

$$T_p - T_1 = q''(Rtc1'' + \frac{L_1}{K_1}) \qquad (18)$$

$$70 - T_1 = 74{,}17\left(0.096 + \frac{0.02}{60{,}5}\right)$$

$$T_1 = 62{,}89°C$$

Pela analogia elétrica, sabe-se que o somatório das resistências é o resultado da divisão entre a diferença das temperaturas das superfícies coladas e o fluxo de calor através dela, como mostrado na Equação 19:

$$\sum R'' = \frac{\Delta T}{q''} \tag{19}$$

Portanto, substituindo na equação, consegue-se chegar à resistência térmica de contato na junta colada:

$$2Rtc3'' + \frac{L_3}{K_3} = \frac{(T_1 - T_2)}{q''}$$

$$2Rtc3'' + \frac{0.00075}{0.302} = \frac{(62{,}89 - 50{,}01)}{74{,}17}$$

$$Rtc3'' = 0.086 \frac{WK}{m^2}.$$

A Tabela IV. 4 relaciona os resultados da RTC na junta colada, obtidos para cada amostra com convecçãonos instantes pré-determinados.

Tabela IV. 4 - Valores encontrados para RTC na junta colada de cada amostra, para o experimento não isolado termicamente

Valor da Rtc nas juntas coladas			
Amostras	**Tempo**		
	1200s	2400s	3600s
Aço jateado	0,086	0,032	0,01
Aço lixado	0,094	0,036	0,016
Aço polido	0,069	0,023	0,009

A Figura IV. 6 mostra o gráfico que correlaciona a variação da RTC, para as três amostras, com a temperatura, de forma a facilitar a comparação visual. Foi criada uma linha de tendência linear sobre cada curva e o resultado do R^2 próximo a 1 para todos os casos, comprova o ajustamento do modelo em relação aos valores observados.

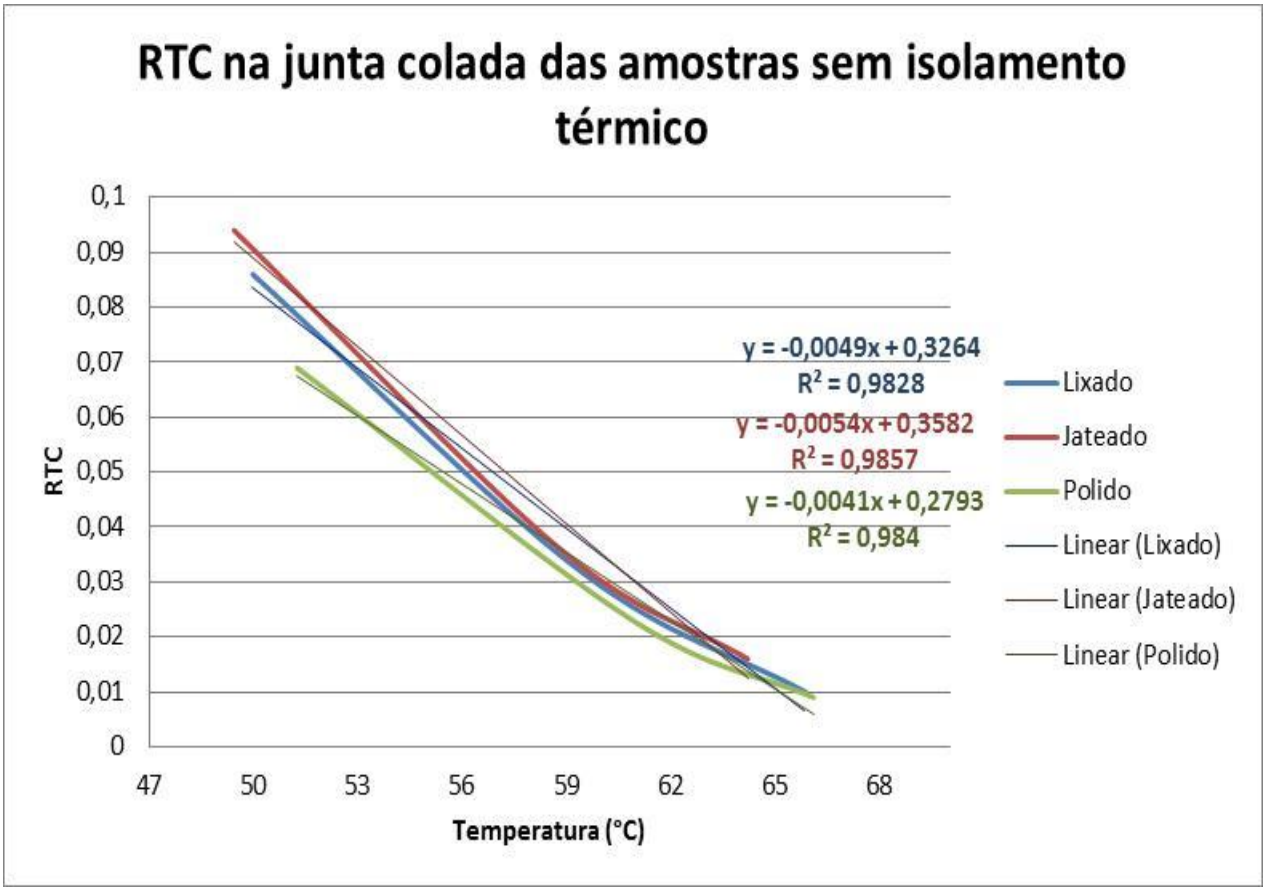


Figura IV. 6 – Gráfico ilustrativo da variação da RTC com a temperatura, para o grupo de amostras com convecção

Os resultados obtidos, com base na linha de tendência encontrada para cada curva, demonstram uma resistência térmica de contato ligeiramente maior na peça com a junta jateada, seguida da lixada e menor na polida. Significando que, para um acabamento superficial com rugosidade maior, a resistência ao fluxo de calor na interface de contato é maior, permitindo que o calor passe mais lentamente de uma peça para outra; enquanto que um acabamento superficial com rugosidade quase mínima – como no caso da peça polida – faz com que a resistência térmica seja bem menor, deixando que o calor seja transferido de uma peça para outra mais rapidamente.

Cabe ressaltar que, apesar dos resultados demonstrados terem sido apenas para três instantes de tempo (1200, 2400 e 3600s), foi feita também a simulação para instantes aleatórios e, em todos os casos, o valor da RTC encontrada coincindia com a curva apresentada. Portanto, os três pontos demonstrados foram considerados válidos e suficientes para demonstrar o comportamento da variação da RTC com a temperatura.

Além disso, o comportamento da resistência térmica de contato encontrado condiz com a imagem visualizada através da câmera termográfica, onde nos instantes iniciais do experimento, o

fluxo de calor fica retido na peça inferior, significando que há ali uma alta resistência, até determinado instante onde a resistência começa a diminuir, permitindo que o fluxo atravesse de uma peça para outra. Portanto, conforme a temperatura vai atingindo o equilíbrio térmico, a RTC tende a zero, até que não exista mais.

IV.2 Experimento isolado termicamente (sem convecção)

O método analítico apresentado a seguir será referente ao segundo grupo de experimentos, onde as amostras foram colocadas sob uma caixa isolante, de forma que não houvesse troca de calor com o meio externo e, neste caso, a transmissão de calor por convecção deve ser desprezada, sendo a condução a única forma de troca de calor presente.

Portanto, para este segundo caso, podemos considerar que o fluxo de calor que passa da placa térmica para a peça é exatamente o mesmo do encontrado no caso anterior, pois, como já foi explicado anteriormente, a base da peça em contato com a placa térmica é igual para todas as amostras e o fluxo de calor emitido pela placa é constante ao longo de todos os experimentos. Desta forma, também pode ser utilizado, neste modelo, o mesmo valor da RTC entre placa e peça encontrado anteriormente; visto que esta depende apenas do fluxo que atravessa a peça e da temperatura da placa e da base da peça, que não se altera nos dois grupos de amostras.

Apenas o que diferencia um grupo do outro é que, com o isolamento térmico, haverá um acúmulo de calor no interior da peça, fazendo com que se atinja o equilíbrio térmico em um período de tempo mais curto e, com isso, a RTC na junta colada tenderá a zero mais rapidamente.

A Figura IV. 7 a seguir apresenta a analogia elétrica para o experimento isolado termicamente, diferenciando-se do modelo anterior por não levar em consideração a perda de calor por convecção; considerando aqui apenas as resistências por condução.

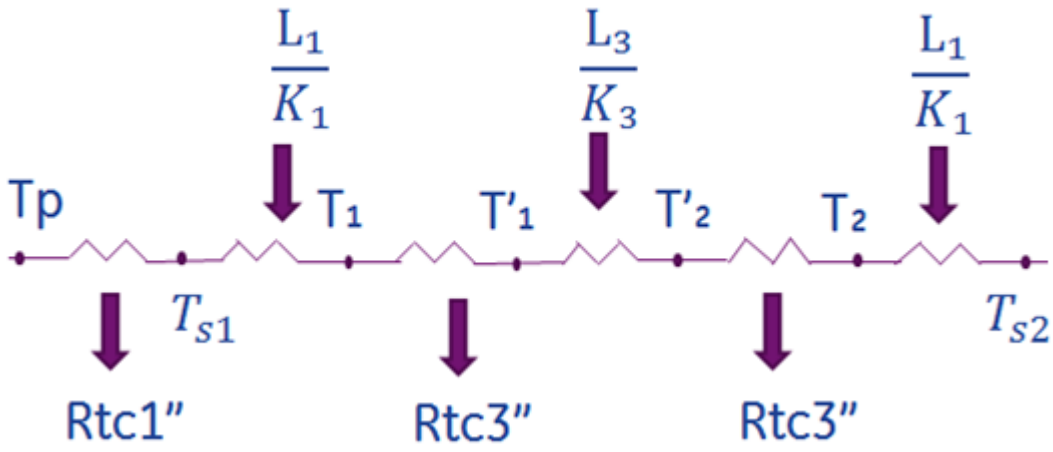


Figura IV. 7 - Analogia elétrica para o experimento isolado termicamente: Equipamento-Aço-Adesivo-Aço

Sendo:

T_P: Temperatura da Placa

Rtc_1":Resistência térmica de contato entre a placa aquecedora e a amostra de aço por unidade de área de transferência de calor ($\frac{m^2K}{W}$)

T_{s1}: Temperatura na primeira placa de aço, base inferior

$\frac{L_1}{K_1}$: Resistência de condução do aço por unidade de área ($\frac{m^2K}{W}$)

T_1: Temperatura na primeira placa de aço, base superior

Rtc_3": Resistência térmica de contato entre a amostra de aço e o adesivo por unidade de área de transferência de calor ($\frac{m^2K}{W}$)

T'_1:Temperatura no adesivo base inferio

$\frac{L_3}{K_3}$: Resistência de condução do adesivo por unidade de área ($\frac{m^2K}{W}$)

T'_2: Temperatura no adesivo base superior

T_2: Temperatura na segunda placa de aço, base inferior

T_{s2}: Temperatura na segunda placa de aço, base superior - Medida pelo termopar

Tem-se então a Equação 20 para o cálculo da R_{total}:

$$R_{total} = \frac{T_p - T_{s2}}{q"} \quad (20)$$

Onde:

R_{total} = Resistência térmica total presente no conjunto

$q"$= fluxo de calor que atravessa o conjunto

Assim como, a resistência total também pode ser expressa pela Equação 21:

$$R_{total} = \mathrm{Rtc_1}" + \frac{\mathrm{L_1}}{\mathrm{K_1}} + \mathrm{Rtc_3}" + \frac{\mathrm{L_3}}{\mathrm{K_3}} + \mathrm{Rtc_3}" + \frac{\mathrm{L_1}}{\mathrm{K_1}} \quad (21)$$

$$R_{total} = \mathrm{Rtc_1}" + 2\,\frac{\mathrm{L_1}}{\mathrm{K_1}} + 2\mathrm{Rtc_3}" + \frac{\mathrm{L_3}}{\mathrm{K_3}}$$

Já tendo conhecido todos os valores das variáveis necessárias para o cálculo, pode-se então descobrir o valor da resistência térmica de contato na junta colada das amostras isoladas termicamente.

A Tabela IV. 5 abaixo mostra os valores de temperatura encontrados com o termopar na saída do conjunto, para os instantes de 1200, 2400 e 3600 segundos, que serão utilizados para os cálculos.

Tabela IV. 5 - Valores de temperatura na saída de cada peça, encontrados através do experimento com o termopar

	Temperaturas T(t) ºc		
t	Jateada	Lixada	Polida
1200	47,96	51,15	49,34
2400	61,18	63,42	62,25
3600	68,08	68,85	68,66

Assim como foi feito nos cálculos anteriores, os cálculos apresentados a partir de agora serão apenas para a amostra de aço jateada, no instante de 1200 segundos; visto que, para todas as outras amostras o cálculo é exatamente o mesmo, alterando apenas o valor da temperatura encontrada pelo termopar. Além disso, como foi provado que o fluxo de calor atua de maneira constante para todas as amostras, pode-se utilizar para estes cálculos o mesmo valor do fluxo encontrado anteriormente.

Tem-se então que:

$$R_{total} = \frac{T_P - T_{s2}}{q"}$$

$$R_{total} = \frac{70-47,96}{74,19} = 0,2971$$

Com isso torna-se possível a obtenção da RTC na junta colada:

$$R_{total} = \mathrm{Rtc_1}'' + 2\,\frac{\mathrm{L_1}}{\mathrm{K_1}} + 2\mathrm{Rtc_3}'' + \frac{\mathrm{L_3}}{\mathrm{K_3}}$$

$$2\mathrm{Rtc_3}'' = R_{total} - \left(2\,\frac{\mathrm{L_1}}{\mathrm{K_1}} + \frac{\mathrm{L_3}}{\mathrm{K_3}}\right)$$

$$\mathrm{Rtc_3}'' = \frac{R_{total} - \left(2\,\frac{\mathrm{L_1}}{\mathrm{K_1}} + \frac{\mathrm{L_3}}{\mathrm{K_3}}\right)}{2}$$

$$\mathrm{Rtc_3}'' = \frac{0,2971 - \left(2\,\frac{0,02}{60,5} + \frac{0,00075}{0,302}\right)}{2} = 0,0990$$

A Tabela IV. 6 abaixo relaciona os resultados da RTC na junta colada, obtidos para cada amostra isolada termicamente, nos instantes pré-determinados.

Tabela IV. 6 - Valores encontrados para RTC na junta colada de cada amostra, para o experimento isolado termicamente

	RTC na junta colada		
t	Jateada	Lixada	Polida
1200	0,0990	0,0815	0,0803
2400	0,0241	0,0151	0,0176
3600	0,0025	0,0001	0,0005

O gráfico ilustrado na Figura IV. 8 correlaciona a variação da RTC na junta coladacom a temperatura, para as três amostras isoladas termicamente, de forma a facilitar uma comparação visual. Assim como no caso anterior, foi criada uma linha de tendência linear sobre cada curva e o resultado do R^2 muito próximo a um, para todos os casos, comprova o ajustamento do modelo em relação aos valores observados.

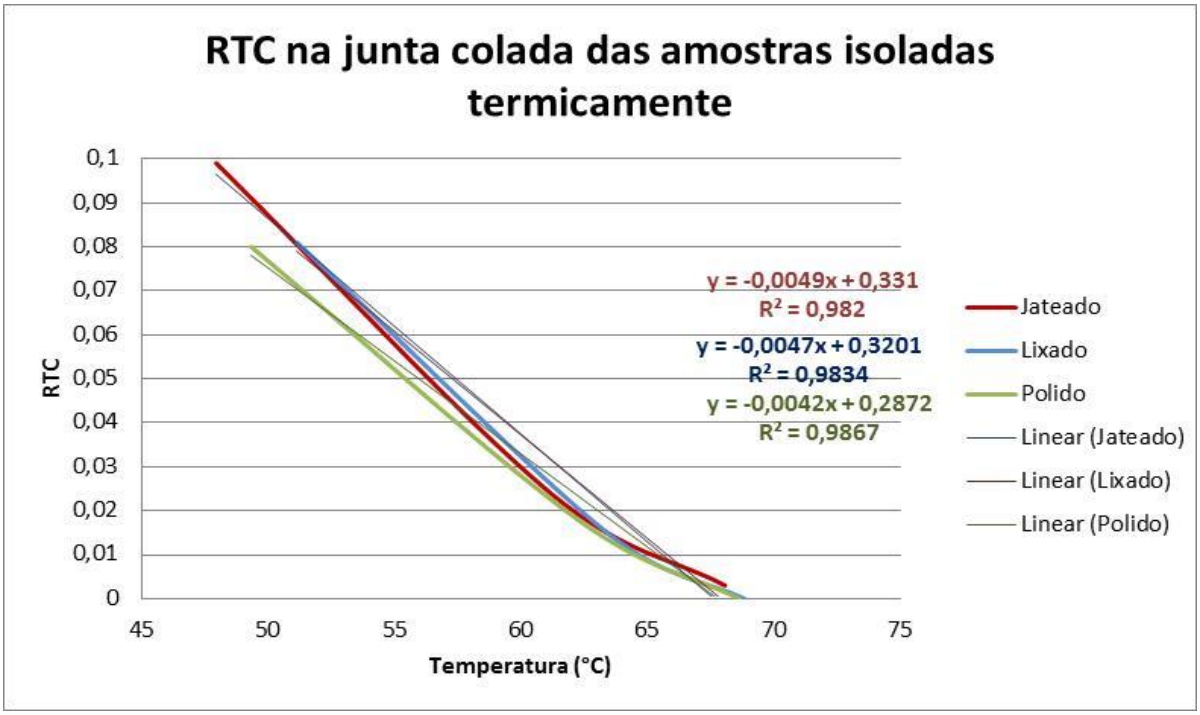


Figura IV. 8 - Gráfico demonstrativo da variação da RTC com a temperatura, para o grupo de amostras isoladas termicamente.

Com os resultados obtidos graficamente e com os valores encontrados na regressão linear, é visível o comportamento bem semelhante ao obtido no caso anterior, com a amostra jateada apresentando um valor de RTC ligeiramente maior que as demais, seguido da lixada e por último a polida. O que condiz com as análises descritas nas literaturas, que a rugosidade exerce influência significativa na transmissão de calor entre superfícies coladas.

Assim como foi feito no caso anterior, a validação dos resultados foi feita com a simulação do valor da RTC para instantes aleatórios (além dos definidos anteriormente) e confirmando se os valores condiziam com a curva encontrada.

Além disso, os resultadosda RTC encontrados para as amostras isoladas e não isoladas termicamente foram bem próximos, confirmando o que foi dito anteriormente, que realizar a análise da peça criando-se um isolamento térmico, de forma a impedir que esta perca calor para o meio, apenas faz com que se atinja o equilíbrio térmico em um período de tempo mais curto, porém, em nada altera o valor da resistência térmica de contato na junta colada, visto que o fluxo de calor que passa por esta, emitido pela fonte térmica, é constante para todos os experimentos.

Capítulo V. Modelo Numérico

A modelagem numérica é uma alternativa aos métodos experimentais e analíticos, quando se tem um grupo muito grande a ser analisado. Com uma boa modelagem numéricaé possível reproduzir com erros bem pequenos os resultados obtidos experimentalmente, tornando-se possível utilizar esta modelagem em outros trabalhos, bastando para isso alguns ajustesnos parâmetros do modelo para que se obtenha bons resultados.

A modelagem numérica realizada (Apêndice I) é ainda um modelo introdutório, que precisa de mais estudos para de fato simular a diferença entre o comportamento das três amostras, não sendo possível ainda, simular a diferença das rugosidades.

A modelagem numérica terá o objetivo de simular a saída de temperatura nas peças, com base na média dos resultados obtidos para o grupo de amostras durante o experimento. Inicialmente a modelagem é realizada empregando o valor da condutividade térmica informado pelo fabricante da cola, ou seja, 0,302 W/mK, a fim de se obter uma curva de temperatura para posterior aproximação com o modelo real.

O fato deste valor ser muito pequeno indica que a cola é um isolante e, portanto, apenas uma pequena parcela do calor será capaz de atravessar da peça inferior para a superior. Na prática, acontece que as peças não são perfeitamente lisas esuas rugosidades permitem que as peças toquem umas nas outras em determinados pontos. Isto possibilitará, então, maior condução de calor entre as mesmas. Conclui-se que, a segunda parte da modelagem numérica tem o objetivo de obter o valor mais aproximado da condutividade térmica que realmente está ocorrendo para as diferentes rugosidades. Para tanto, tem que se fazer uma aproximação da curva encontrada anteriormente (com o valor da condutividade térmica real da cola) com a curva experimental, para cada um dos casos.

O método numérico utilizado para a simulação destes experimentos foi o método de elementos finitos, através do programa computacional ANSYS Mechanical APDL 16.0. A peça foi plotada fixando a temperatura da base em 70°C, a temperatura ambiente em 28°C e o tempo de variação da temperatura foi correspondente ao experimento realizado. As variações de temperatura serão analisadas em dois pontos na superfície com profundidade de 4mm, que representam os dois pontos onde foram fixados os termopares na análise experimental.

Além disso, foram utilizados os seguintes parâmetros para modelagem do aço:

- Coeficiente de condutividade térmica (K) = 60,5 W/mK
- Massa específica (ρ) = 7860 kg/m^3
- Calor específico (C) = 486 J/kgK

E os mesmos parâmetros para a modelagem do adesivo, de acordo com as informações obtidas diretamente pelo fabricante:

- Coeficiente de condutividade térmica (K) = 0,302 W/mK
- Massa específica (ρ) = 6558 kg/m^3
- Massa específica (ρ) = 6558 kg/m^3

As dimensões da peça são exatamente iguais às peças reais, sendo duas peças de aço de 100x50x20mm e o adesivo com espessura de 0,75mm entre as duas peças.

Na modelagem numérica com a caixa isolante foi considerado um coeficiente convectivo igual a 0, pois mesmo que haja uma pequena troca de calor devido à abertura na frente da caixa – onde foi posicionada a câmera –, esta será pequena, podendo ser desconsiderada.

Primeiramente, foi necessário realizar uma análise de convergência de malha a fim de verificar se, para uma malha mais refinada, existia significativa diferença na variação da temperatura.

Para análise de convergência foram feitas simulações considerando o modelo isolado termicamente. Primeiramente foi usada uma malha plana com tamanho do elemento igual a 4t, ou seja, quatro vezes a espessura da cola (0,75mm), e utilizando-se o K real da cola (Figura V. 1). Com esta malha obteve-se os resultados apresentados na Figura V. 2.

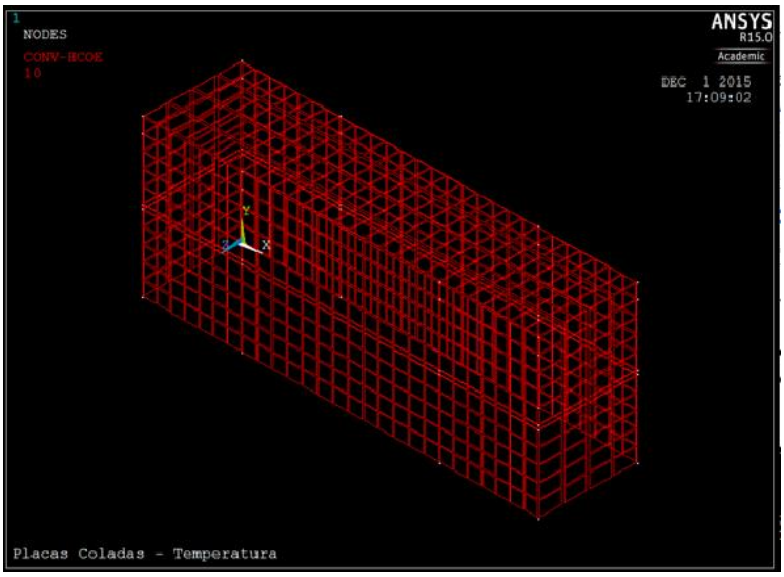
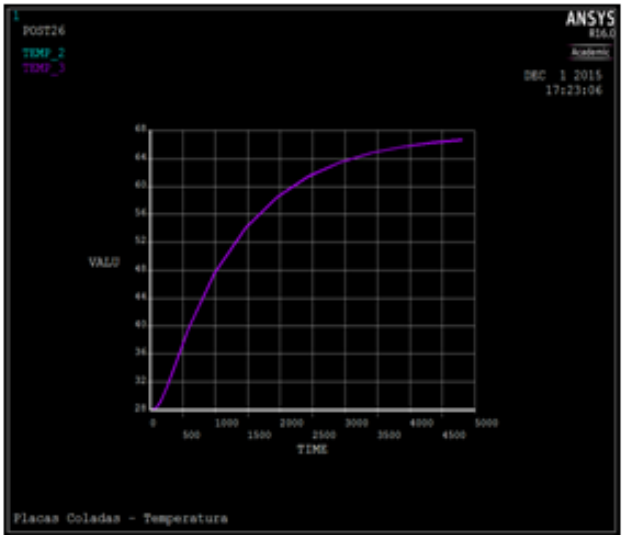


Figura V. 1 - Análise de convergência para uma malha plana com tamanho do elemento igual a 4t.



TIME	NSOL TEMP TEMP_2	NSOL TEMP TEMP_3
48.000	28.0954	28.0954
96.000	28.4017	28.4017
144.00	28.9764	28.9764
192.00	29.8085	29.8085
245.39	30.9815	30.9815
357.87	33.9213	33.9213
585.16	39.7064	39.7064
991.30	47.6345	47.6345
1471.3	54.0975	54.0975
1951.3	58.4784	58.4784
2431.3	61.4332	61.4332
2911.3	63.4233	63.4233
3391.3	64.7631	64.7631
3871.3	65.6650	65.6650
4351.3	66.2720	66.2720
4800.0	66.6623	66.6623

Figura V. 2 - Gráfico Txt para a simulação de malha plana com tamanho de elemento igual a 4t.

Na segunda análise foi utilizada uma malha plana com tamanho do elemento aproximadamente igual a igual a 4t multiplicado por um fator K=0,5, ou seja,uma malha bem mais refinada (Figura V. 3). Para esta análise, os resultados para a variação da temperatura são apresentados na Figura V. 4.

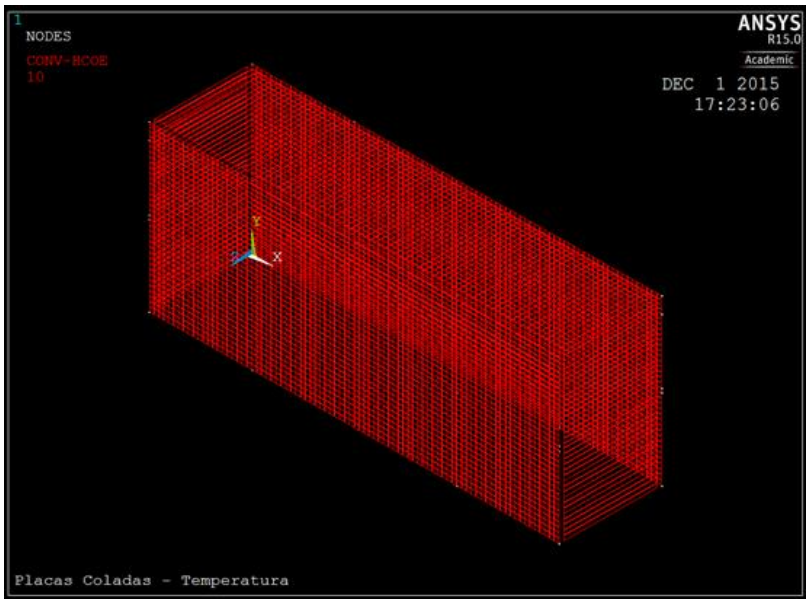
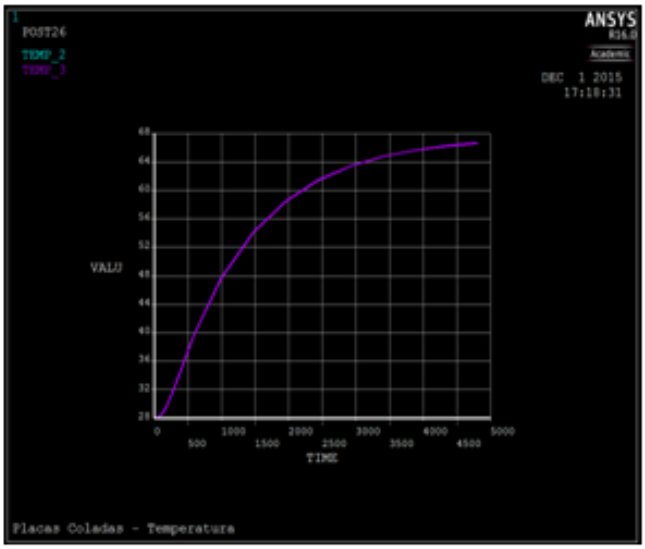


Figura V. 3-Análise de convergência para uma malha plana com tamanho do elemento igual a 4t multiplicado por um fator K=0,5.



TIME	NSOL TEMP TEMP_2	NSOL TEMP TEMP_3
48.000	28.0934	28.0934
96.000	28.3984	28.3984
144.00	28.9734	28.9734
192.00	29.8067	29.8067
245.38	30.9807	30.9807
357.96	33.9243	33.9243
585.43	39.7133	39.7133
991.67	47.6408	47.6408
1471.7	54.1017	54.1017
1951.7	58.4812	58.4812
2431.7	61.4350	61.4350
2911.7	63.4245	63.4245
3391.7	64.7639	64.7639
3871.7	65.6655	65.6655
4351.7	66.2723	66.2723
4800.0	66.6623	66.6623

Figura V. 4-Gráfico Txt para a simulação de malha plana com tamanho do elemento igual a 4t multiplicado por um fator K=0,5.

Observa-se que as curvas são muito próximas para os dois tipos de malhas estudados. Foi utilizada neste estudo a malha mais refinada.

V.1Modelagem numérica para o grupo deamostrasisoladastermicamente

Conforme já foi falado anteriormente, para a modelagem da amostra isolada, foi considerado um coeficiente convectivo igual a 0, significando que não há troca de calor por convecção da peça com o meio. Então, utilizando os parâmetros e condições de contorno mencionadas anteriormente, o resultado obtido para a saída da temperatura é em torno dos 66ºC, como mostrado no gráfico anterior. Porém, no experimento, uma média da temperatura de saída das três amostras com diferentes rugosidades, mostra um resultado em torno de 69,5°C.

Para a aproximação da curva do modelo numérico com a curva real, podemos concluir que no ponto de contato entre peça e cola, a resistência térmica passa a ser um somatório da condutividade térmica da cola com a resistência térmica de contato nas juntas coladas. Portanto, alterando na programação o valor da condutividade térmica da cola de 0,302 para 0,409 W/mK, obtém-se a curva de temperatura mostrada na Figura V. 5.

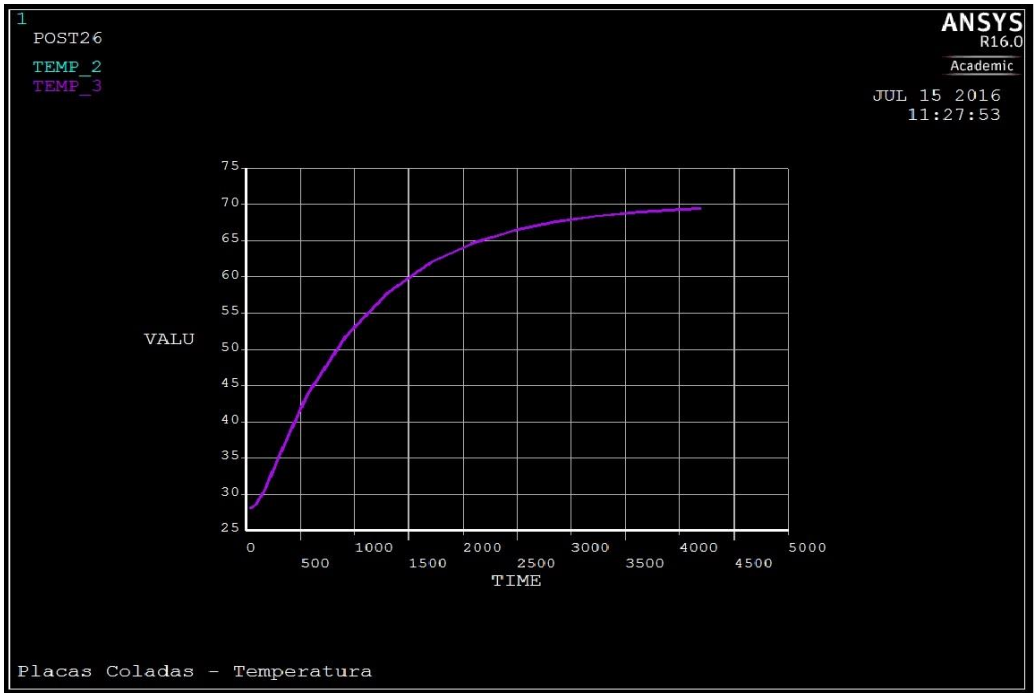


Figura V. 5 - Curva temperatura x tempo para o grupo de amostras isoladas termicamente, obtidas através da simulação pelo programa computacional ANSYS Mechanical APDL 16.0.

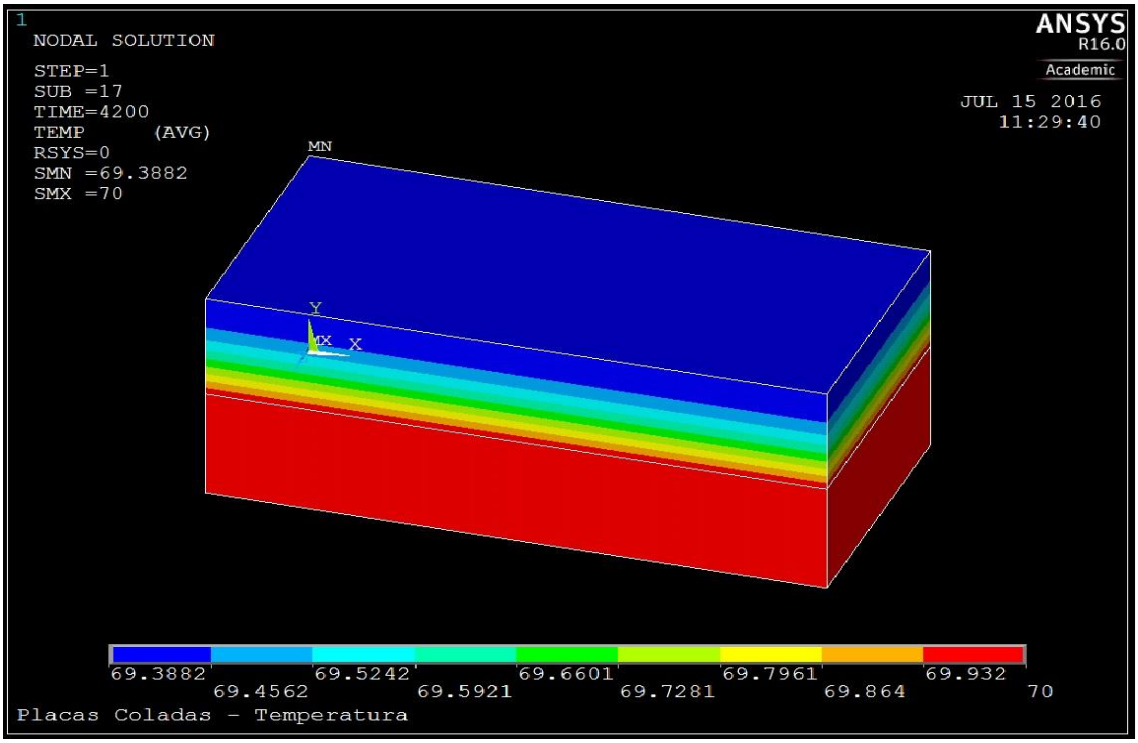


Figura V. 6 - Fluxo de calor que atravessa a peça, para o grupo de amostras isoladas termicamente, obtidas através da simulação pelo programa computacional ANSYS Mechanical APDL 16.0.

O fluxo de calor através das peças fica melhor representado pela Figura V. 6, onde é possível visualizar claramente a RTC na junta colada, visto que, imediatamente antes dela, o fluxo de calor flui livremente; após encontrar resistência no contato entre a peça e a cola, apenas uma parcela do calor é capaz de atravessar para a peça superior.

Com esta nova suposição para o K da cola, obtém-se ao final, uma temperatura de saída em torno de 69,4°C, correspondendo à curva obtida na análise experimental

V.2 Resultados: Modelo Numérico versus Experimento

No modelo numérico não foi possível – a princípio – simular a diferença da rugosidade entre as amostras, o gráfico representando o experimento será então uma média dos valores encontrados para as três amostras.

A Figura V. 7, seguida da Tabela V. 1, apresenta a comparação entre os valores de temperatura para os métodos experimental e numérico no modelo isolado termicamente.

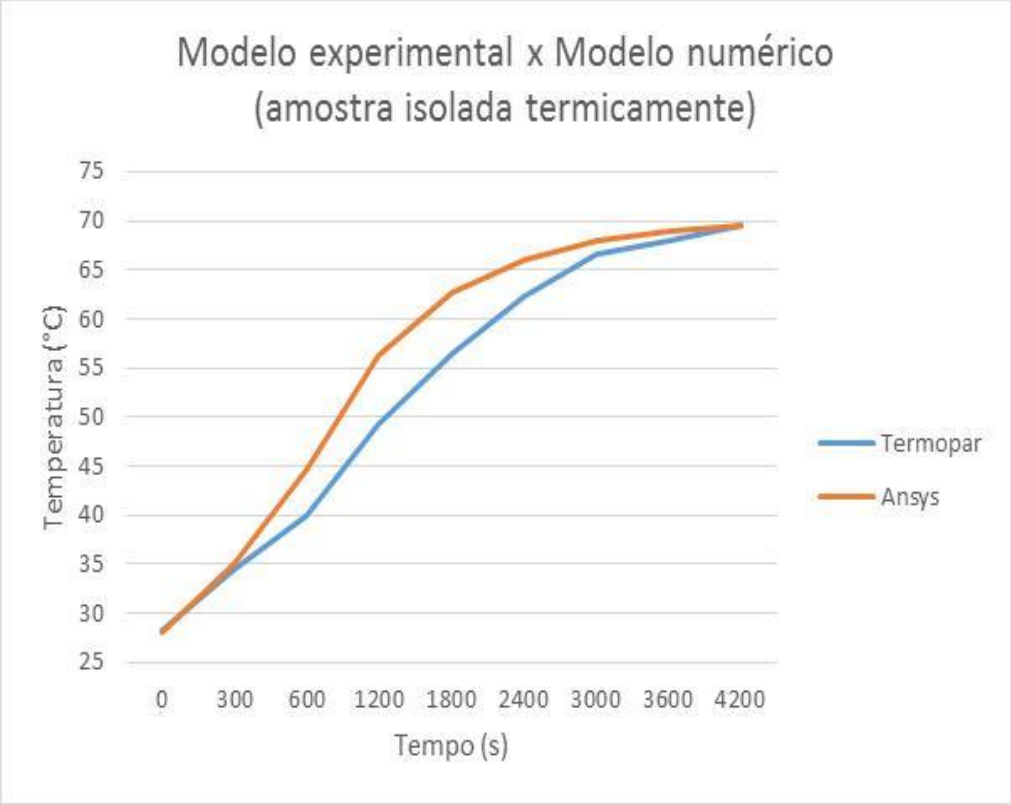


Figura V. 7 - Gráfico comparativo entre os resultados do experimento prático e numérico, para o modelo de amostra isolada termicamente.

Tabela V. 1 - Valores da temperatura obtidos com o modelo prático e numérico para os respectivos instantes, para a amostra isolada termicamente.

COM CAIXA		
Tempo	Termopar (MÉDIA)	ANSYS
0	28,1936	28
300	34,54945	35,15473
600	40,01785	44,51442
1200	49,3396	56,21286
1800	56,56705	62,63109
2400	62,2597	66,0655
3000	66,6745	67,88516
3600	68,0145	68,88003
4200	69,5445	69,4177

O modelo numérico apresentou bom resultado, visto que as curvasencontradas apresentaram comportamento semelhante e erro pequeno ao final.

Capítulo VI.Conclusões

Ao término deste trabalho, foi possível concluir que, de fato, o acabamento superficial de uma peça influencia na troca de calor entre peças unidas mecanicamente pelo processo de colagem. Foi visto que para um valor de rugosidade muito alto, a resistência térmica na junta colada é maior, diminuindo com a redução da rugosidade. Portanto, dependendo da aplicação do projeto, deve-se tomar um cuidado especial ao preparar a superfície da peça antes da aplicação do adesivo.

No caso específico de dispositivos eletrônicos, por exemplo, uma elevada RTC causa o acúmulo de calor e aumento de temperatura, o que não é benéfico para o desempenho operacional destes dispositivos. Portanto, é crucial verificar maneiras de se reduzir a RTC na interface dos materiais, sendo um acabamento superficial específico a principal delas. Assim como, para determinadas outras aplicações, o oposto se faz necessário.

Outra conclusão é que o isolamento térmico da peça de forma a impedir que ela troque calor com o meio, em nada influi no comportamento da resistência térmica da mesma, apenas faz com que se atinja a temperatura de equilíbrio mais rápido – devido ao aprisionamento do calor no interior da peça – e, com isso, a RTC tenda a zero mais rapidamente também.

Com este trabalho também foi possível concluir a validação da utilização do método de termografia infravermelha para obtenção de dados significativos para a análise.

VI. 1 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, aconselha-se o aprimoramento dos modelosanalítico e numérico. Para o modelo analítico sugere-se simular o experimento considerando a condução 2D e transiente, visto que o problema de transferência de calor é dependente do tempo. Já o refinamento proposto para o modelo numérico busca reproduzir de fato a diferença entre as três rugosidades e, ao invés de criar uma curva única, consiga-se reproduzir uma curva para cada rugosidade. Desta forma, o modelo numérico será o ideal para este tipo de análise, não necessitando passar pela realização do modelo experimental, que demanda em casos mais complexos de um tempo maior e ainda da confecção de protótipos.

Referências Bibliográficas

Agostinho, O., Rodrigues, A., & Lirani, J. (1995). *Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões.* São Paulo: Edgard Blücher.

Apostilas Engenheiro de Petróleo - Transferência de Calor. (s.d.). Fonte: Técnico de Petróleo UFPR: http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/transferencia_calor.pdf

Ascione, F. (2009). Ultimate behaviour of adhesively bonded FRP lap joints. *Compos B*, 107-115.

Barreira, E. S. (2004). *Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios.* Porto: Dissertação de Mestrado em Construção Civil - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Brewster, C. a. (2002). *Adhesively Bonding Plastic Structural Components in Automotive Applications.*SAE Technical Paper.

Cordeiro, R. (2014). *Influência da Rugosidade na Resistência Térmica de Contato de Materiais Colados.* Rio de Janeiro: CEFET-RJ.

Cotter, J. (1974). *Metal Joining with Adhesives* (Vol. 19). International Metallurgical Reviews.

Cunha, M. d. (2012). *Análise da influência da taxa de deslocamento no comportamento das juntas de cisalhamento.*Niterói: Universidade Federal Fluminense.

Da Silva, L. F. (2009). Effect of material, geometry, surface, treatment and environment on the shear strength of single lap joints. *Int. J. Adhesion & Adhesives*, pp. 621-632.

Da Silva, L. F., Ferreira, N. M., Richter-Trummer, V., & Marques, E. (2010). Effect of grooves on the strength of adhesively bonded joints. *Int. J. Adhesion & Adhesives*, pp. 226-236.

Epperly, R., Hebertein, G., & Eads, L. (1997). A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography. *IEEE IAS 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference.*

Epperly, R., Hebertein, G., & Eads, L. (1997). A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography. *IEEE IAS 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference.*

Esteves, J. L. (1990). *Estudo do comportamento de adesivos estruturais.* Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Filho, C. R. (2000). A Resistência Térmica de Contato. *CONEM.* Campina Grande - PB: Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica.

Fonseca, A. H., & da Silva, T. (2010). *CRITÉRIO DE FALHA PARA JUNTAS COLADAS SUBMETIDAS A CARREGAMENTOS COMPLEXOS.* Niterói, RJ: ESCOLA DE ENGENHARIA, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE.

Garimella, C. T. (2011). MEASUREMENT AND PREDICTION OF THERMAL CONTACT RESISTANCE ACROSS COATED JOINTS. *Experimental Heat Transfer*, pp. 179-200.

Goland, M., & Reissner, E. (1944). *J. Appl. Mechanics*.

Goyal, V., & Jhonson, E. (2008). Predictive strengh-fracture model for composite bonded joints. *Compos Struct*, 434-446.

Grant, R., Jackson, B., Kiniry, J., & Arkin, G. (1989). Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal*.

Hernandez, A. S. (10 de 2014). TRANSMISION Y PROPAGACIÓN DEL CALOR CONVECCIÓN. *Satirnet*.

Incropera et al., F. (2008). *Fundamentos da Transferência de Calor e Massa.* Rio de Janeiro: LTC.

Jiwon Kim, B.-s. Y.-m. (2011, novembro 25). The effects of functionalized graphene nanosheets on the thermal and mechanical properties of epoxy composites for anisotropic conductive adhesives (ACAs). *Microelectronics Reliability*.

Kalnins, M. S. (1997). On the importance of some surface and interface characteristics in the formation of the properties of adhesive joints. *Int. J. Adhesion & Adhesives 17*, pp. 365-372.

Kinloch, Anthony J (2012). Adhesion and adhesives: science and technology. *Springer Science & Business Media*

Lin, C. Y. (2003). Thermal Contact Resistance Correlation for Metals Across Bolted Joints. *Int. Comm. Heat Mass Transfer, vol.30, nº 7*, pp. 987-996.

Louro, A., Vicente, I., Santos, D., Máximo, L., & Amorim, J. (2011). *Adesivos Estruturais na Construção de Aviões.* Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Mello, P. V. (2014). *ELEMENTOS FINITOS – ANÁLISE DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO NAS INTERFACES DE MATERIAIS COLADOS.* Rio de Janeiro: Trabalho Realizado para Disciplina de Elementos Finitos do CEFET-RJ.

Michael A. Gaynes, R. H. (maio de 1995). Evaluation of Contact Resistance for Isotropic Electrically Conductive Adhesives. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, vol18, nº2*.

Miles, D., & Briston, J. (1975). *Tecnologia dos Polímeros.* São Paulo: Polígono, Ed. da Universidade de São Paulo.

Monteiro. (1995). *Análise do comportamento à fractura de juntas de aço efectuadas com adesivos estruturais.* Portugal: Universidade do Porto.

Neto, F., & Pardini, L. (2006). *Compósitos Estruturais - Ciência e Tecnologia* (1ª ed.). Edgard Blücher.

Neto, J. (2014). *Desenvolvimento de Metodologia Experimental para Determinação da Temperatura em Fios e Molas de SMA Usando Termografia Infravermelha.* Rio de Janeiro: Relatório Final de Iniciação Científica - Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação (DIPPG) CEFET.

Ordenes, M., Lamberts, R., & Guths, S. (2008). *Transferência de calor na envolvente da edificação.* Florianópolis: Universidade Ferderal de Santa Catarina.

Osanai, K. R. (2011).*c.*Niterói: Universidade Federal Fluminense .

Pereira, A. M. (2010). Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium adhesive single lap joints. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 610-617.

Quaresimin, M., & Ricotta, M. (2006). Fatigue behaviour and damage evolution of single lap bonded joints in composite material. *Compos Sci Technol*, 621-632.

S. G. Prolongo, R. M.-S. (27 de março de 2014). Epoxy Adhesives Modified with Graphene for Thermal Interface Materials. *The Journal of Adhesion*, pp. 835-847.

Santos, A. F. (2005). *Avaliação do comportamento mecânico de um adesivo estrutural epóxi utilizado na indústria automobilística.* São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Santos, L. d. (2006). *Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas.* Minas Gerais: Dissertação de Mestrado - UNIFEI.

Scheneber, G. (2003). *Adhesives in the Automobile Industry* (Vol. 1). Handbook of Adhesives.

Schultz, J., & Nardin, M. (1994). Theories and mecanisms of adhesion. *Handbook of Adhesive Technology*, 19-32.

Shields, J. (1971). *Adhesives Handbook.* London: Butterworths.

Silva, C. (2006). *Fenômenos do Transporte.*Univasf.

Taib, A. A. (2006). Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture. *Int. J. Adhesion & Adhesives 26*, pp. 226-236.

Teixeira, M. M. (s.d.). *Mundo Educação.* Fonte: Apostila de Física - Radiação, condução e convecção: http://www.mundoeducacao.com/fisica/radiacao-conducao-conveccao.htm

The Dow Chemical Company. (1976). *Formulation with Dow Epoxy Resins*, 1-36. Midland Michigan: Catálogo Técnico.

Tienne, D. L. (2006). *Qualidade da adesão de juntas coladas expostas a condições de serviço externo e interno.* Seropédica - RJ: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas.

Zheng, J., Yanzhong , L., Wang , L., & Tan, H. (2013). An improved thermal contact resistance model for pressed contacts and its application analysis of bonded joints. *Cryogenics*.

Apêndice I

Modelagem numérica para o grupo de amostras isoladas termicamente:

```
finish
/clear,nostart
/REP,FAST
/COLOR,PBAK,OFF
/REPLOT

/FILNAME,ColagemTemp,1

/PREP7

/TITLE,Placas Coladas - Temperatura

C*** ========== Parametros de Entrada ==========
L=100e-3
e=50e-3
a=25e-3
c=20e-3
t=75e-5
b=3e-3

Tini=28
T_Placa=70
Tfluido=Tini

K_1=60.5
Ro_1=7860
C_1=486

K_2=60.5
Ro_2=7860
```

```
C_2=486

K_3=0.409
Ro_3=6558
C_3=295

h=0
h1=0

fator=0.5

C*** ========== Propriedades dos Materiais ==========
MP,KXX,1,K_1            ! Define material properties - Material 1
MP,C,1,C_1                      ! Define material properties
MP,Dens,1,Ro_1                  ! Define material properties

MP,KXX,2,K_2            ! Define material properties - Material 2
MP,C,2,C_2                      ! Define material properties
MP,Dens,2,Ro_2                  ! Define material properties

MP,KXX,3,K_3            ! Define material properties - Material 3
MP,C,3,C_3                      ! Define material properties
MP,Dens,3,Ro_3                  ! Define material properties

C*** ========== Definicao dos Elementos ==========
ET,1,MESH200,7                  ! Elemento para malha plana
ET,2,SOLID90,           ! Analise Térmica


C*** ========== Definicao das Constantes Geometricas ==========
C*** ========== Geometria(SECAO INTERMEDIARIA) ==========
x1= 0
y1= 0
```

x2= a

y2= 0

x3= L-a

y3= 0

x4= L

y4= 0

x5= 0

y5= c

x6= a

y6= c

x7= L-a

y7= c

x8= L

y8= c

x9= 0

y9= c+t

x10= a

y10= c+t

x11= L-a

y11= c+t

x12= L

y12= c+t

x13= 0

y13= (2*c+t)-b

x14= a

y14= (2*c+t)-b

x15= L-a

y15= (2*c+t)-b

x16= L

y16= (2*c+t)-b

x17= 0

y17= 2*c+t

x18= a

y18= 2*c+t

x19= L-a

y19= 2*c+t

x20= L

y20= 2*c+t

x21= 0

y21= 0

z21= e

k,1,x1,y1

k,2,x2,y2

k,3,x3,y3

k,4,x4,y4

k,5,x5,y5

k,6,x6,y6

k,7,x7,y7

k,8,x8,y8

k,9,x9,y9

k,10,x10,y10

k,11,x11,y11

k,12,x12,y12

k,13,x13,y13

k,14,x14,y14

k,15,x15,y15

k,16,x16,y16

k,17,x17,y17

k,18,x18,y18

k,19,x19,y19

k,20,x20,y20

k,21,x21,y21,z21

A,1,2,6,5

A,2,3,7,6

```
A,3,4,8,7
A,5,6,10,9
A,6,7,11,10
A,7,8,12,11
A,9,10,14,13
A,10,11,15,14
A,11,12,16,15
A,13,14,18,17
A,14,15,19,18
A,15,16,20,19

L,1,21

TYPE,1              ! Escolhe o tipo do elemento
MAT,1               ! Escolhe o numero do material
ESIZE,4*t*fator             ! Tamanho do elemento nas áreas
AMESH,all           ! Coloca malha nas áreas

TYPE,2                      ! Escolhe o tipo do elemento
MAT,1                       ! Escolhe o numero do material
ESIZE,,4*t *fator                   ! Tamanho do elemento na área do Material 1
VDRAG,1,2,3,,,,32       ! === GERAÇÃO DOS ELEMENTOS SÓLIDOS AO LONGO DA LINHA GUIA

TYPE,2                      ! Escolhe o tipo do elemento
MAT,2                       ! Escolhe o numero do material
ESIZE,,4*t *fator                   ! Tamanho do elemento na área do Material 1
VDRAG,4,5,6,,,,32       ! === GERAÇÃO DOS ELEMENTOS SÓLIDOS AO LONGO DA LINHA GUIA

TYPE,2                              ! Escolhe o tipo do elemento
MAT,3                               ! Escolhe o numero do material
ESIZE,,4*t fator                    ! Tamanho do elemento na área do Material 1
VDRAG,7,8,9,10,11,12,32         ! === GERAÇÃO DOS ELEMENTOS SÓLIDOS AO LONGO DA LINHA GUIA
```

```
nummrg,all,1e-6

C*** Condicoes de Contorno e Carregamento
TUNIF,Tini

ASEL,S,LOC,Y,0,0                ! Aplicação da temperatura na placa
DA,ALL,TEMP,T_Placa
ALLSEL,ALL,ALL

ASEL,S,LOC,Y,(c+t+c),(c+t+c)            ! Seleção das áreas externas
SFA,ALL,,CONV,h,Tfluido,
ASEL,S,LOC,X,0,0                                ! Seleção das áreas externas
SFA,ALL,,CONV,h1,Tfluido,
ASEL,S,LOC,X,L,L                                ! Seleção das áreas externas
SFA,ALL,,CONV,h1,Tfluido,
ASEL,S,LOC,Z,0,0                                ! Seleção das áreas externas
SFA,ALL,,CONV,h1,Tfluido,
ASEL,S,LOC,Z,e,e                                ! Seleção das áreas externas
SFA,ALL,,CONV,h1,Tfluido,
ALLSEL,ALL,ALL

C*** Solução
PLOT
FINISH
/SOL
ANTYPE,TRANS
KBC,1                   ! degrau
!KBC,0                  ! rampa
TIME,4200
NSUBST,100
OUTRES,ALL,ALL
OUTPR,ALL,ALL
```

```
/STATUS,SOLU
SOLVE

/POST26
KSEL,S, , ,86676
NSLK,S
*GET,n86676,NODE,0,NUM,MAX

!KSEL,S, , ,      43
!NSLK,S
!*GET,n43,NODE,0,NUM,MAX

!KSEL,S, , ,      35
!NSLK,S
!*GET,n35,NODE,0,NUM,MAX

ALLSEL,ALL,ALL

NSOL,2,n86676,TEMP,, TEMP_2
!NSOL,3,n43,TEMP,, TEMP_3
!NSOL,4,n35,TEMP,, TEMP_4

XVAR,1
PLVAR,2
```

Apêndice II

Produções Associadas

O presente trabalho, ao longo de seu desenvolvimento, foi apresentado em dois congressos em forma de papers. Abaixo seguem os resumos enviados para publicação em cada um deles, respectivamente.

1- Congresso Luso-Brasileiro de Adesão e Adesivos (CLBA - Portugal, cidade do Porto, 2014)

Estudo da resistência térmica de contato em juntas metálicas coladas

R.A.A. Aguiar, P.M.C.L. Pacheco, P.V. Mello, S. de Barros

Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET/RJ), Rio de Janeiro/RJ – Brasil.

Quando duas superfícies condutoras de calor são colocadas em contato uma resistência térmica está presente na interface desses dois corpos sólidos. Ela é chamada resistência térmica de contato e surge quando os dois materiais não são ajustados perfeitamente, aprisionando uma camada composta. O exame de uma área da zona de contato mostra que os corpos sólidos se tocam somente no pico da superfície e que o espaço entre eles são ocupados por um fluido, um líquido ou pelo vácuo. A existência de uma resistência de contato se deve principalmente aos efeitos da rugosidade da superfície. Pontos de contato se entremeiam com falhas que são, na maioria dos casos, preenchidas com ar. A transferência de calor é, portanto, devida à condução de calor através da área de contato real e à condução e/ou radiação através dos interstícios. No caso específico de juntas coladas, o adesivo tende a preencher o espaço entres os substratos, porém não completamente. Esse processo vai depender obviamente da viscosidade do adesivo usado, mas também da rugosidade das superfícies unidas. Neste trabalho é apresentado um método experimental de avaliação da resistência térmica de contato em juntas metálicas coladas.

2- Congresso Luso-Brasileiro de Adesão e Adesivos (CLBA - Brasil, cidade do Rio de Janeiro, 2016)

The influence of the roughness in heat transfer through bonded joints.

P.V. Mello[1], J.S.S. Neto[1], P.M.C.L. Pacheco, S. de Barros[1], J.P.B. Souza[1], R.A.A. Aguiar[1]

[1]Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Rio de Janeiro/RJ – Brasil.

Thermal contact resistance (TCR) is formed by mechanical contact of rough surfaces and is highly applicable in plenty of heat transport chains, such as thermal management of electronic devices. High TCR is an important factor of causing heat accumulation and high temperature rise (especially for the cases of high heat flux) in electronic devices, which is unbeneficial to the operational performance of devices. Therefore, it is crucial to investigate approaches of reducing the TCR at interface.

In the specific case of bonded joints, the adhesive tends to fill the space between the substrates, but not completely. This process obviously depends on the viscosity of the adhesive used, also the roughness of the joined surfaces. This paper presents an experimental method for evaluating the thermal contact resistance in bonded joints. This study evaluated the TCR in joints prepared with for three different degrees of superficial treatment, producing three degrees of roughness. Each joint was heated and the temperature through the joint was measured by thermocouples and infrared thermography (IRT). An one-dimensional analytical model and finite element model (FEM) was adjusted by the experimental data that produced results to evaluate the influence of the roughness in heat transfer through bonded joints.

[1] P. Zang, Y. Xuan and Q. Li, Exp. Therm. Fluid Sci., 54, 204 (2014).
[2] T. Cui, Q. Li, P. Zang and Y. Xuan, Int. J. Therm. Sci., 83, 16 (2014).
[3] P. Zang, Y. Xuan and Q. Li, Composites: Part A., 57, 1 (2014).
[4] J.J. Salgon,F. Robbe-Valloire, J. Blouet and J. Bransier, Int. J. Heat Mass Transfer., 40, 1121 (1997).