

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA**  
**CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**A Influência da rugosidade na resistência térmica de  
contato de materiais colados.**

Renata Padua Cordeiro

Prof. Orientador: Juliana Basílio

Prof. Coorientador: Silvio de Barros

**Rio de Janeiro**

**Mai de 2014**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**A Influência da rugosidade na resistência térmica de  
contato de materiais colados.**

Renata Padua Cordeiro

Projeto de Graduação apresentado ao curso  
de Engenharia Mecânica do CEFET/RJ, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção  
do título de Engenheiro.

Prof. Orientador: Juliana Basílio

Prof. Coorientador: Silvio de Barros

**Rio de Janeiro**

**Mai de 2014**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C794 Cordeiro, Renata Padua  
A influência da rugosidade na resistência térmica de contato de  
materiais colados / Renata Padua Cordeiro.—2014.  
ix, 51f. : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2014.

Bibliografia : f. 50-51

Orientadora : Juliana Basílio

Coorientador : Silvio de Barros

1. Calor – Transmissão. 2. Colagem. 3. Aspereza de superfície.  
4. Meios de transferência de calor. I. Basílio, Juliana (Orient.). II.  
Barros, Silvio de (Coorient.). III. Título.

CDD 660.28427

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu gostaria de agradecer a DEUS por me dar força e confiança para correr atrás do meus objetivos.

Toda a minha gratidão aos meus maiores admiradores e melhores pais desse mundo: Lucia Maria Padua Cordeiro e Newton Neto Cordeiro. Os que me apoiaram em qualquer que fosse a minha decisão e que estiveram por perto, mesmo quando estávamos longe, quando este projeto, no caso, foi escrito. A vontade para escrever era retomada sempre que as mensagens de carinho e incentivo chegavam.

A minha amiga Paula, que foi quem me deu a idéia inicial de trabalhar com esse tema e dividiu suas experiências e momentos de parceria durante o desenvolvimento do mesmo.

Ao amigo Jorge, que veio apenas para me auxiliar no laboratório e acabou virando um grande parceiro.

A minha orientadora Juliana Basilio, que teve um papel fundamental no desenvolvimento do projeto e ao coorientador Silvio de Barros que me sugeriu o tema e me ajudou diversas vezes durante a caminhada.

De maneiras diferentes, cada um de vocês contribuiu para que eu chegasse aqui! Obrigada!

## RESUMO

Em sistemas compostos, a queda de temperatura através da interface entre os materiais pode ser considerável, sendo conhecido por resistência térmica de contato ( $R_{tc}$ ). A transferência de calor é devida à condução através da área de contato real e à condução e/ou radiação através dos espaçamentos. A partir deste conceito, o projeto se propõe a avaliar o comportamento da resistência térmica de contato em materiais colados com duas diferentes rugosidades superficiais: Sendo a primeira polida na superfície de aplicação da cola e a segunda rugosa nessa mesma superfície. Foi observada uma maior resistência térmica de contato para a superfície de maior rugosidade, conforme previsto nas fontes de literatura consultadas.

Palavras chaves: Resistência térmica de contato, colagem, rugosidade.

## **ABSTRACT**

In composite systems, the temperature drop across the interface between the materials can be considerable. This concept is nominated as thermal contact resistance (RTC). The heat transfer happens due to conduction through the real contact area and to conduction and / or radiation through the gaps. From this concept, the project aims to assess the behavior of the thermal contact resistance in bonded materials with two different surface roughnesses: The first had polished surface treatment before the glue application and the second with a rough surface. A greater thermal contact resistance was observed for roughness surface, as can be found in the literature sources consulted.

Key words: thermal contact resistance, bonding, roughness.

# SUMÁRIO

Introdução .....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivo.....	1
1.3 Justificativa .....	2
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado .....	2
1.5 Organização.....	2
Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Adesivos Epoxídicos.....	4
2.1.1 Definição.....	4
2.1.2 Propriedades.....	5
2.2 Jateamento e Rugosidade .....	6
2.2.1 Rugosidade.....	6
2.2.2 Jateamento.....	7
2.3 Colagem .....	8
2.3.1 Juntas de topo.....	9
2.3.2 Efeitos térmicos.....	10
2.4 Transferência de Calor .....	10
2.4.1 Condução.....	10
2.4.1.1 Resistência térmica de contato (RTC).....	11
2.4.2 Convecção.....	14
2.4.2.1 Convecção natural.....	15
Materiais e Métodos.....	18
3.1 Materiais.....	18
3.1.1 Preparação da superfície.....	18
3.1.2 Medição da rugosidade superficial encontrada nas amostras.....	19
3.1.3 Aplicação da massa epóxi nas amostras de aço polido e jateado e tempo de cura.....	21
3.1.4 Utilização da fonte térmica como fonte de calor para medição da RTC através dos termopares.....	23
3.2 Modelagem do problema.....	25
3.2.1 Caso 1- Aço polido - Equipamento .....	26
3.2.2 Caso 2- Aço jateado - Equipamento.....	27
3.2.3 Caso 3- Equipamento – Aço polido – Adesivo – Aço polido .....	28

3.2.4 Caso 4- Equipamento – Aço jateado – Adesivo – Aço polido .....	30
4 Resultados e discussão .....	33
4.1 Gráficos Temperatura (°C) x Tempo (s) .....	33
4.1.1 Gráfico do sistema Placa aquecedora - Aço polido.....	33
4.1.2 Gráfico do sistema Placa aquecedora - Aço polido – Adesivo – Aço polido.....	34
4.1.3 Gráfico do sistema Placa aquecedora - Aço jateado .....	34
4.1.4 Gráfico do sistema Placa aquecedora - Aço jateado – Adesivo – Aço polido .....	35
4.2 Valores de temperatura obtidos.....	36
4.3 Resistências térmicas de contato por unidade de área encontradas.....	37
4.3.1Caso 1- Aço polido - Equipamento .....	37
4.3.2 Caso 2- Aço jateado - Equipamento.....	40
4.3.3 Caso 3- Equipamento – Aço polido – Adesivo – Aço polido .....	42
4.3.4 Caso 4- Equipamento – Aço jateado – Adesivo – Aço polido .....	45
5.1 Conclusão e Trabalhos futuros.....	48
5.2 Trabalhos futuros .....	48
6 Referências Bibliográficas .....	50

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática dos principais fatores que afetam a resistência da ligação adesiva [2].	9
Figura 2 - Curva de variação da resistência ao corte versus espessura da camada adesiva [2].	10
Figura 3 - Transferência de calor por condução unidimensional [8].	11
Figura 4 - Queda de temperatura devido a resistência térmica de contato [11]	12
Figura 5 - Condutância entre as faces [11]	12
Figura 6 - Transferência de calor por convecção [7].	14
Figura 7 - Polimento da placa de aço 1020	19
Figura 8 - Amostra jateada – Jato ao metal branco Sa 3	19
Figura 9 - Rugosímetro portátil – Superfície polida.	20
Figura 10 - Rugosímetro portátil – Superfície rugosa	21
Figura 11 - Massa epóxi PoliMetalico 2040 HTS	22
Figura 12 - Placa de aço 1020 unida por massa epóxi no forno a 100°C	23
Figura 13 - Placa Térmica a 55°C	24
Figura 14 - Termopares ECIL [16].	25
Figura 15 - Caso 1 – Equipamento- Aço polido – Ar.	26
Figura 16 - Analogia elétrica Caso 1 – Equipamento- Aço polido – Ar	27
Figura 17 - Caso 2 – Equipamento- Aço jateado – Ar	27
Figura 18 - Analogia elétrica Caso 2 –Equipamento- Aço jateado – Ar	28
Figura 19 - Caso 3 - Equipamento – Aço polido – Adesivo – Aço polido- Ar	29
Figura 20 - Analogia elétrica Caso 3 – Aço polido – Adesivo – Aço polido- Ar	30
Figura 21 - Caso 4 - Equipamento – Aço jateado – Adesivo – Aço polido- Ar.	31
Figura 22 –Analogia elétrica Caso 4 – Aço jateado – Adesivo – Aço polido- Ar	32
Figura 23 - Gráfico Aço polido	33
Figura 24 - Gráfico Aço polido – Adesivo – Aço polido	34
Figura 25 - Gráfico Aço jateado	35
Figura 26 - Gráfico Aço jateado – Adesivo – Aço polido.	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da rugosidade superfície polida .....	20
Tabela 2 - Resultados da rugosidade superfície jateada .....	21
Tabela 3 - Características do revestimento [13]. .....	22
Tabela 4 – Tempo de cura do produto [13]. .....	23
Tabela 5 – Dados técnicos da placa aquecedora [14] .....	24
Tabela 6 - Calibração dos Termopares [16] .....	25
Tabela 7 - Temperaturas de saída para as amostras no instante T=200s e T=400s .....	37
Tabela 8 - Resultados encontrados para a Resistência térmica de contato .....	47

# CAPÍTULO 1

## Introdução

A rugosidade é o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície, normalmente representado em escalas, para ampliação e redução, distintas para direção vertical e horizontal. Muitos perfis de rugosidade analisados em operações de engenharia são obtidos por contato direto, através de um apalpador de um perfilômetro ou de um rugosímetro. 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. No que também tange a rugosidade, este parâmetro geométrico tem relação direta com a resistência térmica de contato entre o substrato e o adesivo formadores da junta colada. Dessa forma, este projeto visa identificar para dois diferentes valores de rugosidade superficial, os valores de resistência térmica de contato em duas amostras de aço A36, colados com adesivo epoxídico POLIMETALICO 2040 HTS.

### 1.1 Motivação

O trabalho desenvolvido tem como objetivo, dar seguimento a pesquisas previamente iniciadas por alunos do CEFET RJ. O trabalho “Estudo de resistência térmica de contato nas interfaces de materiais colados”, utilizou o procedimento de análise de resistência de contato, mas devido a falta de equipamentos no laboratório para o desenvolvimento da parte experimental, não se pode contar com alguns passos que serão utilizados neste projeto. O projeto segue o estudo iniciado, que contou com a análise da resistência térmica de contato nas interfaces de materiais colados e segue com a adição de duas diferentes superfícies de análise, com diferentes rugosidades e a utilização de um adesivo diferente do aplicado no primeiro estudo.

### 1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo fazer a análise da influência de um acabamento superficial no resultado obtido experimentalmente para a resistência térmica de contato entre materiais colados. A partir desta análise, será verificado se o

resultado obtido através de dados medidos experimentalmente confirmam o esperado através das pesquisas que seguem presentes no trabalho.

### **1.3 Justificativa**

O trabalho realizado segue uma linha de pesquisa desenvolvida pelo professor Silvio de Barros, que exerce diversos trabalhos ligados à colagem de materiais metálicos.

Como forma de seguimento dos estudos nessa linha de pesquisa, o projeto se propõe a analisar se um acabamento superficial tem de fato uma influência significativa nos resultados obtidos, experimentalmente, da resistência térmica de contato de materiais colados. Sendo uma fonte de informação sobre a importância e relevância do acabamento superficial, relacionando-o com a transferência de calor em estruturas coladas.

### **1.4 Metodologia e Trabalho Realizado**

A metodologia usada nesse trabalho segue basicamente cinco etapas: revisão bibliográfica, definição do método experimental, levantamento de dados sobre o caso proposto, resolução dos modelos propostos para o cálculo da Resistência térmica de contato para ambas situações e por fim suas conclusões.

### **1.5 Organização**

O capítulo 1 – “Introdução” – prevê as considerações iniciais deste trabalho, além das razões pelas quais o presente tema foi selecionado e a metodologia de trabalho utilizada a fim de concluí-lo.

O capítulo 2 – “Revisão Bibliográfica” – Contempla os conceitos básicos de estudo para a elaboração do experimento proposto.

O capítulo 3 – “Materiais e Métodos”- Expõe os materiais utilizados no experimento, além de abordar as condições e como foram realizadas as etapas do processo.

O capítulo 4 – Resultados e Discussão – Apresenta os resultados encontrados para as resistências térmicas de contato estudadas.

O Capítulo 5 - “Conclusão e Trabalhos futuros”- Oferece as considerações finais do projeto e sugere trabalhos futuros acerca do tema.

## **CAPÍTULO 2**

### **Revisão Bibliográfica**

#### **2.1 Adesivos Epoxídicos**

O campo de aplicação da colagem é amplo e vem se desenvolvendo e se diversificando com o tempo. Hoje encontra-se desde processos industriais até as juntas de menores proporções, consumindo adesivos. O adesivo utilizado na colagem de metais normalmente deve possuir uma excelente resistência ao corte, baixa resistência ao arrancamento e boa resistência a tração. A superfície a ser colada deve passar por uma preparação mais cuidadosa que os outros processos, assim como deve ocorrer uma escolha adequada do material aderente de acordo com o substrato utilizado e condições de trabalho da junta.

Na base da tecnologia contemporânea dos adesivos está o aparecimento do epóxi, que pode ser formulado em uma grande variedade de formas com o intuito de fornecer um amplo espectro de características e propriedades mecânicas. Além disso, adesivos de base epoxídica possuem alta resistência mecânica, apresentam excelente aderência a diversos tipos de fibra e substratos, são resistentes às ações químicas e apresentam baixa retração durante o processo de cura [1].

##### **2.1.1 Definição**

Adesivos do tipo epóxi são adesivos classificados como termorrígidos e mais utilizados na colagem de metal sobre metal, devido a sua alta resistência mecânica e fácil aplicação. Podem ser utilizados na indústria mecânica, ligando quase todos os materiais.

Os adesivos de epóxi são comercializados na forma de um só componente ou de vários componentes (dois geralmente). Nos adesivos de epóxi com um só componente, o seu processo de cura é efetuado normalmente a quente utilizando temperaturas acima de 120°C, enquanto que para os adesivos de dois componentes a sua cura pode ser processada a partir de temperaturas de 5°C. O processo de cura dos adesivos epóxi

precisa apenas de um simples posicionamento das peças a serem coladas, não havendo necessidade de aplicar pressão [2].

No entanto, os adesivos de um componente apresentam uma boa resistência mecânica e uma duração superior, quando comparados com adesivos epóxi de bi componentes, e nestes, as propriedades mecânicas dependem do tipo de endurecedor utilizado (anídrico ácido, poliamida, amina alifática, amina aromática, entre outros). A resistência mecânica destes adesivos, geralmente, não é afetada por temperaturas inferiores a 80°C, sendo algumas resinas comercializadas para serem usadas em aplicações a temperaturas que rondam os 150°C [2].

## **2.1.2 Propriedades**

O grande sucesso dos adesivos de epóxi se dá devido às excelentes propriedades do mesmo, tais como:

- Boa resistência mecânica
- Boas propriedades elétricas e de resistência térmica
- Excelente dureza e resistência química
- Ótima adesão a metais
- Possibilidade de cura rápida e lenta numa grande gama de temperaturas
- Ausência de água de outros produtos voláteis durante a reação de cura
- Baixo grau de encolhimento durante a cura e boas propriedades de molhabilidade sobre o aderente (Grau de espalhamento do adesivo)

Sendo assim, é importante mencionar que estas propriedades são importantes porque, pela primeira vez, foi possível obter juntas adesivas com um baixo nível de tensões residuais, coesão excelente, integridade estrutural e ótima adesão [2].

Existe uma grande diversidade de propriedades que se pode obter dependendo da formulação do sistema, o que justifica o largo espectro de aplicações industriais da resina de epóxi. Enquanto que, por exemplo, o sistema nylon-epóxi, produz juntas

muito resistentes a solicitações mecânicas de corte e tração, as resinas epóxi fenólico modificadas produzem adesivos bastante resistentes à temperatura.

## **2.2 Jateamento e Rugosidade**

### **2.2.1 Rugosidade**

A rugosidade é o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície. A mesma desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos [3]. Ela influi nos seguintes tópicos abaixo:

- Qualidade de deslizamento;
- Resistência ao desgaste;
- Possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- Resistência à corrosão e à fadiga;
- Vedação;
- Aparência.

O instrumento utilizado para a medição da rugosidade de uma superfície é chamado de rugosímetro e desempenha o papel de verificar a superfície de peças e ferramentas, como forma de criar uma avaliação da rugosidade. Assegura um alto padrão de qualidade nas medições e também destina-se à análise dos problemas relacionados à rugosidade de superfícies.

Inicialmente, o rugosímetro destinava-se somente à avaliação da rugosidade ou textura primária. Com o tempo, apareceram os critérios para avaliação da textura secundária, ou seja, a ondulação, e muitos aparelhos evoluíram para essa nova tecnologia. Mesmo assim, por comodidade, conservou-se o nome genérico de

rugosímetro também para esses aparelhos que, além de rugosidade, medem a ondulação [4].

Os rugosímetros podem ser classificados em dois grandes grupos:

- Aparelhos que fornecem somente a leitura dos parâmetros de rugosidade (que pode ser tanto analógica quanto digital).
- Aparelhos que, além da leitura, permitem o registro, em papel, do perfil efetivo da superfície.

Os primeiros são mais empregados em linhas de produção, enquanto os segundos têm mais uso nos laboratórios, pois também apresentam um gráfico que é importante para uma análise mais profunda da textura superficial [4].

## 2.2.2 Jateamento

Sendo a rugosidade um aspecto de relevância quando fala-se em acabamento superficial. Uma das formas de deixar uma superfície com um aspecto rugoso, é através da utilização da técnica de jateamento. Esta técnica é baseada no ato de propulsionar partículas abrasivas em alta velocidade impulsionadas por ar, água ou força centrífuga contra variados tipos de superfícies. Além de ser amplamente utilizado para limpar, rebarbar e gravar [5].

Ao jatear uma superfície, cria-se pontos de ancoragem no qual a pintura ou revestimento tende a preencher aumentando consideravelmente a aderência na superfície [5].

Na esfera do jateamento abrasivo, que é o método mais eficiente para a remoção da camada de óxidos e outras substâncias depositadas sobre a superfície, empregando abrasivos projetados a altas pressões, estão padronizados quatro diferentes graus [6]. Conforme acompanha-se a seguir:

- **Sa 1- Jato leveiro (Brush Off)**

Limpeza leveira e precária, pouco empregada para pintura, exceto em alguns casos de repintura. A retirada do produto de corrosão neste caso é em torno de 5%.

- **Sa 2- Jato comercial ou limpeza ao metal cinza**

Limpeza com retirada de óxidos, carepa de laminação, etc., com eficiência em torno de 50%.

- **Sa 2 ½- Jato ao metal quase branco**

Limpeza com a retirada quase que total dos óxidos, carepas de laminação e outras impurezas, de modo que possam aparecer apenas leves manchas na superfície na forma de pontos ou listras. Admitindo-se cerca de 5% da área limpa com manchas ou raias de óxidos encrustados.

- **Sa 3- Jato ao metal branco**

Limpeza com a retirada total dos óxidos, carepas de laminação, etc., deixando a superfície do metal limpa completamente.

Para a utilização de qualquer método mencionado acima, deve-se remover toda sujeira, óleo ou graxa, utilizando-se de soluções aquosas de tenso ativos ou detergentes biodegradáveis ou panos limpos embebidos em solventes apropriados [6].

## 2.3 Colagem

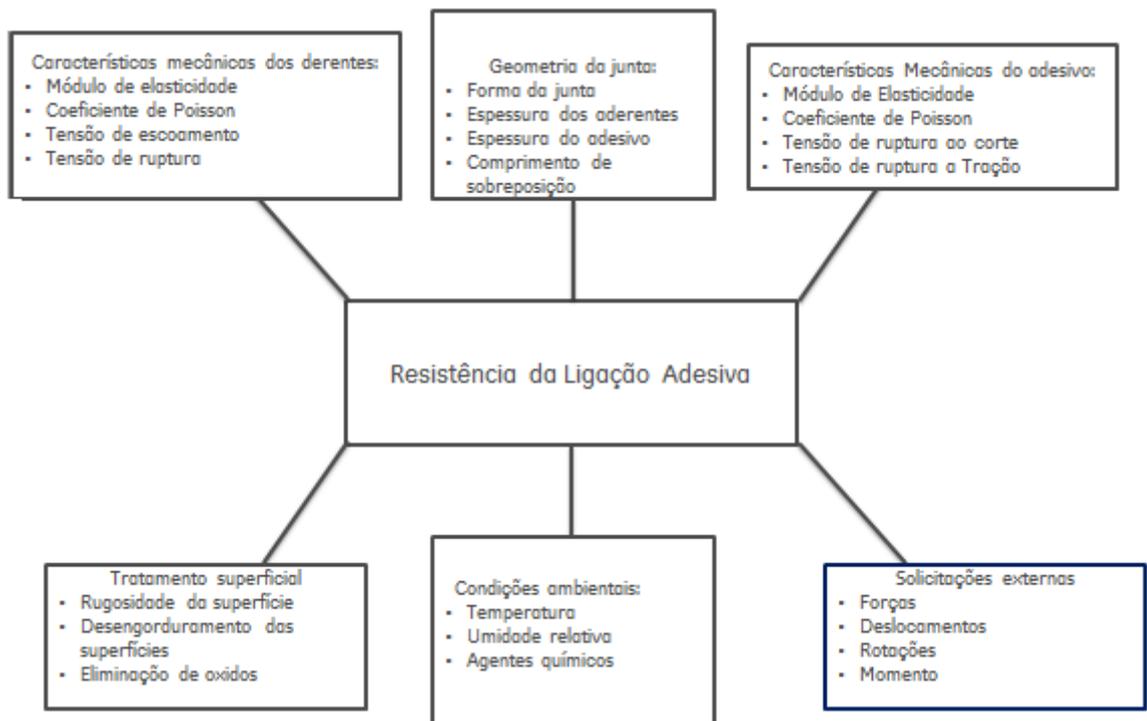
A técnica da colagem se apresenta com contribuições significativas no campo da indústria aeronáutica e aeroespacial. As ligações através da colagem são especialmente importantes nesses segmentos, por causa da relação resistência/peso, sendo amplamente utilizadas em estruturas de aviões comerciais, naves espaciais, mísseis e foguetes. Hoje em dia, nota-se ainda a expansão da técnica para a indústria automobilística [2].

A colagem é um método que baseia-se na união de dois sólidos através de uma camada de uma substância que durante o contato solidifique de modo gradual. Essa união citada é realizada através de um adesivo, que pode ser entendido como uma substância com capacidade de aderir dois substratos e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas, diminuindo portanto, a distância entre elas e gerando interações entre o adesivo e o substrato. Muitos adesivos são polímeros reativos,

mudando do estado líquido para o sólido por meio de várias reações de polimerização, e essas mudanças de estado físico recebem o nome de cura [1].

### 2.3.1 Juntas de topo

Uma junta colada é formada pelo aderente e pelos adesivos, unidos através de uma ligação adesiva, ligação essa consagrada por diversos fatores que afetam a sua resistência, conforme pode-se observar na figura 1 a relação entre alguns fatores e a resistência das juntas [2].

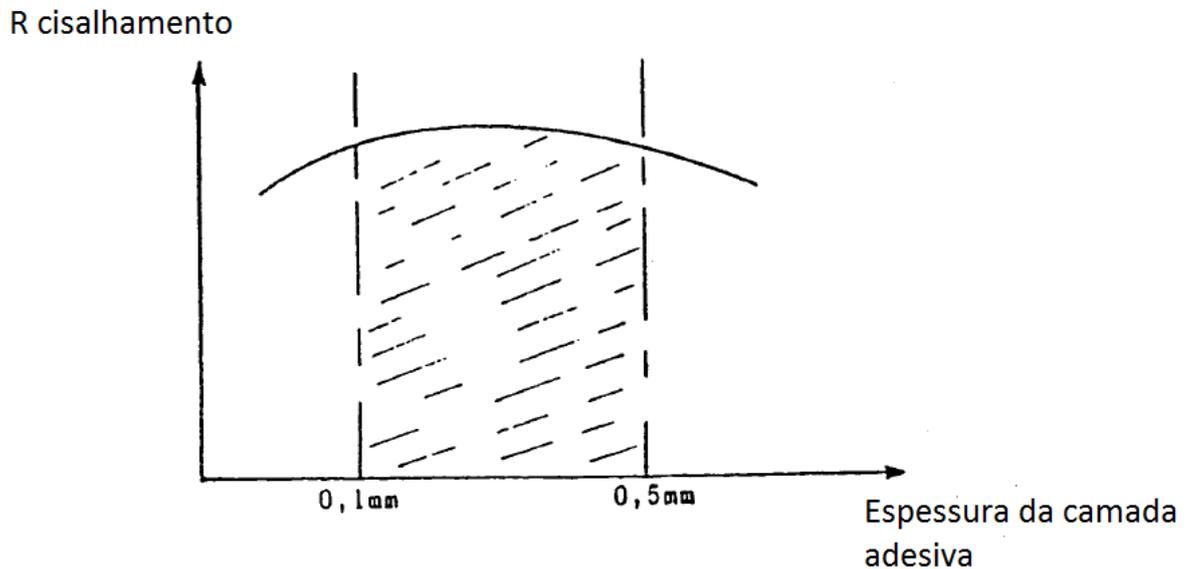


**Figura 1** - Representação esquemática dos principais fatores que afetam a resistência da ligação adesiva [2].

O desenvolvimento das juntas adesivas depende de como são dominados e controlados os fatores envolvidos na resistência de cada junta.

Deve-se ter muita atenção para não executar juntas de espessura de camada adesiva muito fraca porque a sua resistência decresce rapidamente. Mas é necessário, também, não aumentar demasiadamente a espessura da cola para não correr o risco de introduzir defeitos de difícil ou impossível remediação, normalmente o caso das

bolhas de ar. A figura 2 pode esquematizar o comportamento da resistência ao cisalhamento versus a espessura da camada adesiva [2].



**Figura 2** - Curva de variação da resistência ao corte versus espessura da camada adesiva [2].

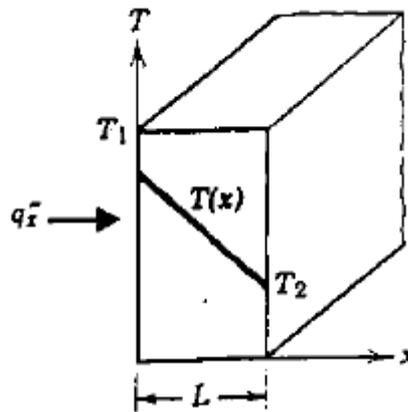
### 2.3.2 Efeitos térmicos

A temperatura da colagem é um ponto fundamental para a qualidade da mesma, pois é a temperatura que controlará o tempo de cura e a viscosidade, que afetam diretamente a capacidade do adesivo de se espalhar e ser absorvido [1].

## 2.4 Transferência de Calor

### 2.4.1 Condução

A transmissão de calor se dá de 3 formas diferentes: condução, radiação e convecção. A condução está relacionada com o transporte de energia térmica em um meio sólido devido ao gradiente de temperatura, conforme a figura 3. Quando a condução é unidimensional, em regime permanente, em uma parede plana para qual a temperatura é linear, conhecendo a distribuição das temperaturas no meio, a transferência de calor ocorre conforme a Lei de Fourier, indicado na equação 1 [7].



**Figura 3** - Transferência de calor por condução unidimensional [8]

$$q''(x) = -\frac{k(T^2 - T^1)}{L} \quad (1)$$

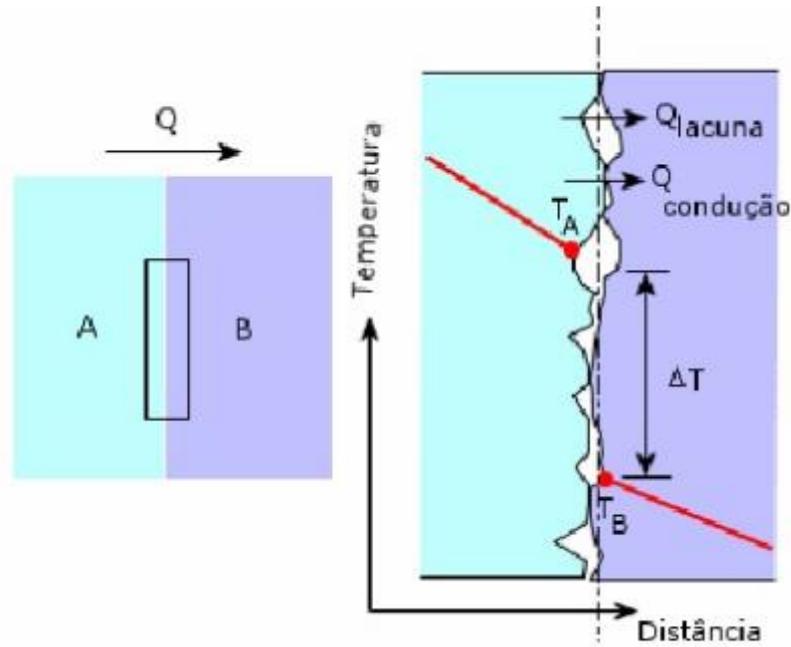
Sendo:

$q''$ : Fluxo de Calor ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$k$ : Constante de condutividade térmica ( $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ )

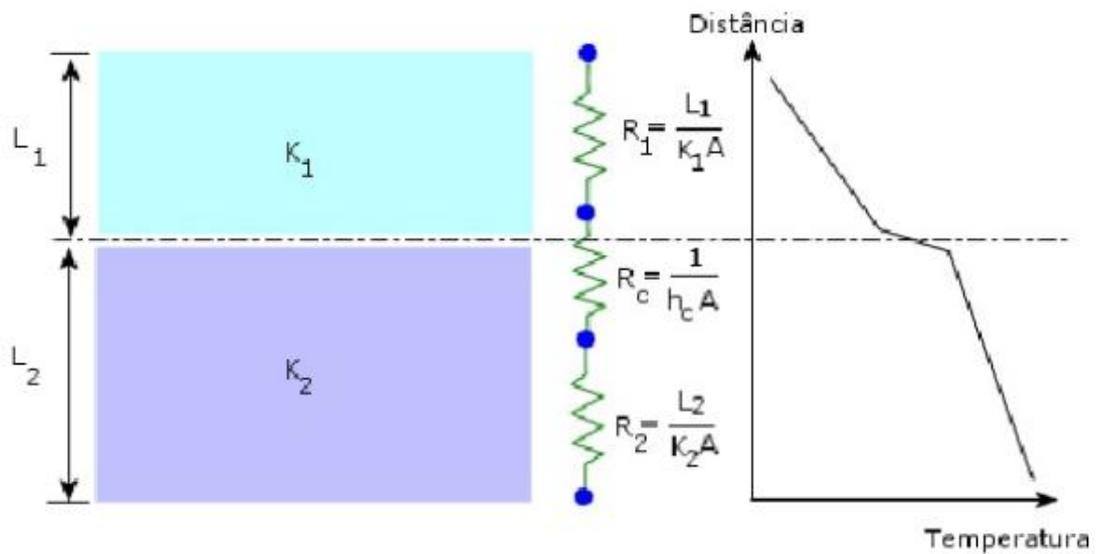
### 2.4.1.1 Resistência térmica de contato (RTC)

Quando duas superfícies condutoras 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 [9]. A existência de uma resistência de contato se deve principalmente aos efeitos da rugosidade da superfície, conforme se observa na figura 4. 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 [10].



**Figura 4** - Queda de temperatura devido a resistência térmica de contato [11]

Para lidar com a resistência térmica de contato, uma condutância entre as faces  $h_c$  é colocada em série com o meio condutor em ambos os lados, como mostra a figura 5, que demonstra a variação da temperatura ao longo da superfície entre dois materiais e ainda faz uma analogia a resistência elétrica relativa ao problema.



**Figura 5** - Condutância entre as faces [11]

Há algumas formas de se reduzir a resistência de contato, conforme segue abaixo [12]:

- Aumento da área dos pontos de contato entre as paredes (redução da rugosidade, aumento na pressão de junção)
- Uso de fluido com elevada condutividade térmica para preencher o espaço entre as falhas
- Uso de materiais intersticiais (metais macios e graxas térmicas) ou de juntas (resinas epóxi, soldas ricas em chumbo, ligas de ouro e estanho, etc.) entre as paredes

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

$$R_{tc} = \frac{T_1 - T_2}{q''} \quad (2)$$

Sendo:

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

$T_1$ : Temperatura no meio 1 (°C)

$T_2$ : Temperatura no meio 2 (°C)

$q''$ : Fluxo de calor ( $W/m^2$ )

Existem três classes mais comuns para a determinação da resistência térmica de contato [9]:

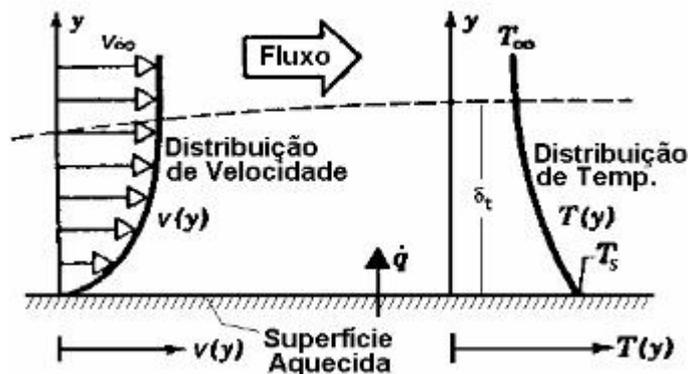
- Métodos experimentais
- Método misto ( Experimental + simulação numérica)
- Métodos teóricos

A análise de métodos experimentais para o valor da RTC, mostra que a essência deles é a determinação das temperaturas na interface. Entre outros, existe o método de determinação experimental de resistência térmica de contato, baseado na

medição direta de temperaturas superficiais. Já a essência do método misto para determinar a RTC consiste na comparação das curvas experimentais de resfriamento da amostra com as curvas teóricas de resfriamento da mesma, calculadas para valores arbitrários da RTC. Quanto ao valor procurado, ele corresponde a uma das curvas teóricas, obtidas na simulação do resfriamento da amostra, que mais se aproxima da curva experimental.

## 2.4.2 Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície quando os dois se encontram a diferentes temperaturas, conforme indicado na figura 6. A transferência acontece tanto pelo movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido. Ela pode ser natural (ou livre), ou forçada, dependendo das condições de escoamento do fluido [7].



**Figura 6** - Transferência de calor por convecção [7]

Considerando que a temperatura da superfície é maior que a do fluido, o fluxo de calor pode ser definida pela lei de Newton que segue representada na equação 3.

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Sendo:

$q''$ : Fluxo de calor convectivo ( $W/m^2$ )

$T_s$ : Temperatura da superfície ( $^\circ C$ )

$T_\infty$ : Temperatura do fluido ( $^\circ C$ )

$h$ : Coeficiente de transferência convectiva de calor ( $\frac{W}{m^2 K}$ )

### 2.4.2.1 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, como 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 [7].

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, que representa a relação entre a força de empuxo e as forças viscosas no fluido [7], conforme equação 4.

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

Sendo

$g$ : Aceleração da gravidade ( $\frac{m}{s^2}$ )

$\beta$ : Coeficiente de expansão térmica do fluido ( $K^{-1}$ )

$T_s$ : Temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ )

$T_\infty$ : Temperatura do ambiente ( $^{\circ}C$ )

$L$ : Espessura (m)

$v$ : Velocidade mássica média ( $m^2 /s$ )

É usual correlacionar sua ocorrência em termos de número de Rayleigh, que é o produto dos números de Grashof e Prandtl [10]. Para placas planas o número de Rayleigh crítico é expresso pela equação 5

$$Ra = \frac{(g\beta(T_2 - T_\infty)L^3)}{v\alpha} \quad (5)$$

Sendo

$g$ : Aceleração da gravidade ( $\frac{m}{s^2}$ )

$\beta$ : Coeficiente de expansão térmica do fluido ( $K^{-1}$ )

$T_s$ : Temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ )

$T_{\infty}$ : Temperatura do ambiente ( $^{\circ}C$ )

$L$  : Espessura (m)

$v$ : Velocidade mássica média ( $m^2 /s$ )

$\alpha$ : Difusividade térmica ( $m^2 /s$ )

O comprimento característico é definido pela equação 6.

$$L = A/P \quad (6)$$

Sendo

$A$ : Área superficial ( $m^3$ )

$P$  : Perímetro da placa (m)

Para o escoamento laminar usa-se a equação 7 como forma de encontrar o número de Nusselt, que proporciona uma medida da transferência convectiva de calor na superfície:

$$\overline{Nu} = \frac{0.68 + 0.670 Ra^{\frac{1}{4}}}{(1 + (\frac{0.492}{Pr})^{\frac{9}{16}})^{4/9}} \quad (7)$$

Sendo:

$Pr$ : Número de Prandtl

$Ra$ : Número de Rayleigh

O cálculo do coeficiente convectivo para a convecção natural é dependente do coeficiente de expansão térmica do fluido,  $\beta$ , que a partir de uma aproximação para os gases perfeitos, pode ser calculado pela equação 8.

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (8)$$

Sendo:

$T_f$ : Temperatura de filme (K)

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

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} k}{L} \quad (9)$$

Sendo:

$Nu$ : Número de Nusselt

$L$ : Espessura (m)

$k$ : Coeficiente de condutividade térmica (W/m)K

## **CAPÍTULO 3**

### **Materiais e Métodos**

#### **3.1 Materiais**

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

- 1- Seis amostras de aço 1020 de espessura 0.02m.
- 2- Rugosímetro - Modelo rugosurf 10 – Fabricante TESA.
- 3- Massa epóxi bi componente – Marca Polinova- Polimetalico 2040 HTS.
- 4- Placa aquecedora - Modelo C-MAG HP 7 – Fabricante IKA.
- 5- Dois termopares do tipo K.

##### **3.1.1 Preparação da superfície**

Todas as amostras de aço 1020 com espessura de 0.02m, sofreram um polimento superficial, através do método manual com a utilização de uma lixa 80, como forma de encontrar uma mesma superfície entre as amostras polidas, conforme a figura 7, e ainda, como forma de minimizar os espaços entre as falhas e aumentando assim a área dos pontos de contato entre as paredes e proporcionando um sistema em que a resistência térmica de contato deve ser pequena, considerando que a existência de uma resistência de contato se deve principalmente aos efeitos da rugosidade da superfície.



**Figura 7** - Polimento da placa de aço 1020

Entretanto, como o objetivo era proporcionar duas superfícies de análise distintas, duas amostras sofreram um jateamento, como forma de proporcionar uma superfície rugosa para a análise e comparação com a superfície polida na posterior observação do comportamento da resistência térmica de contato para os diferentes acabamentos.

Foi realizado um jateamento Sa 3- Jato ao metal branco, que resulta numa amostra limpa, com a retirada total dos óxidos e carepas de laminação, deixando a superfície do metal limpa completamente, conforme a figura 8.



**Figura 8** - Amostra jateada – Jato ao metal branco Sa 3

### **3.1.2 Medição da rugosidade superficial encontrada nas amostras**

Após a preparação das superfícies dos substratos metálicos, realizou-se uma medição da rugosidade superficial das amostras que receberam a aplicação da massa

epóxi, superfície polida e superfície rugosa, para a posterior colagem em outra superfície polida.

No projeto, foi utilizado para a medição da rugosidade, um rugosímetro portátil da marca TESA, modelo rugosurf 10. Os resultados obtidos podem ser observados nas tabelas 1 e 2 abaixo.

Superfície polida - Figura 9:

- Comprimento de ensaio utilizado: 2.5mm
- Número de Cut-off: 5

**Tabela 1 - Resultados da rugosidade superfície polida**

Superfície polida	
Parâmetros de medição	Resultados
Ra	0.70 $\mu$ m
Rq	0.91 $\mu$ m
Rt	6.51 $\mu$ m
Rz	5.62 $\mu$ m



**Figura 9 - Rugosímetro portátil – Superfície polida**

Superfície rugosa - Figura 10:

- Comprimento de ensaio: 0.25mm
- Número de Cut-off: 5

**Tabela 2 - Resultados da rugosidade superfície jateada**

Superfície jateada	
Parâmetros de medição	Resultados
Ra	3.2 $\mu$ m
Rq	4.04 $\mu$ m
Rt	24.52 $\mu$ m
Rz	17.34 $\mu$ m

**Figura 10 - Rugosímetro portátil – Superfície rugosa**

Após a medição realizada para ambos os acabamentos superficiais, chega-se a conclusão de que as superfícies apresentaram rugosidades notavelmente diferentes e, portanto são ideais para o segmento do projeto e a futuras análises da resistência térmica de contato para estas diferentes superfícies.

### **3.1.3 Aplicação da massa epóxi nas amostras de aço polido e jateado e tempo de cura**

Foram aplicadas as superfícies polidas e jateadas a massa epóxi PoliMetalico 2040 HTS, da marca Polinova, conforme figura 11.



**Figura 11 - Massa epóxi PoliMetalico 2040 HTS**

Entres as suas principais características da massa epóxi utilizada está a possibilidade de ser aplicada em superfícies quentes, possuir alta dureza, e ser usinável como aço [13]. Além disso, segue na tabela 3 as características do revestimento.

**Tabela 3 - Características do revestimento [13].**

Características do revestimento	
Aparência	Massa pastosa
Razão de mistura - Volume	1A ; 1B
Razão de mistura - Peso	1.2A ; 1B
Dureza ASTM D2240 Shore D (24h de cura)	85
Dureza ASTM D2240 Shore D (72h de cura)	87
Resistência a abrasão - DIN 53516 (% de perda de massa)	3.98

Após a mistura dos componentes, respeitando a indicação do fabricante de razão volumétrica, houve a aplicação de uma camada de 0.001m de massa epóxi nas placas de aço e as amostras seguiram para o forno a 100°C, conforme figura 12, durante 24h, respeitando o tempo de cura do adesivo, conforme a tabela 4, indicada pelo fabricante.

Tabela 4 – Tempo de cura do produto [13].

Características	100°C
Manuseio	25 min.
Cura inicial	30 min.
Cura Funcional	24 horas

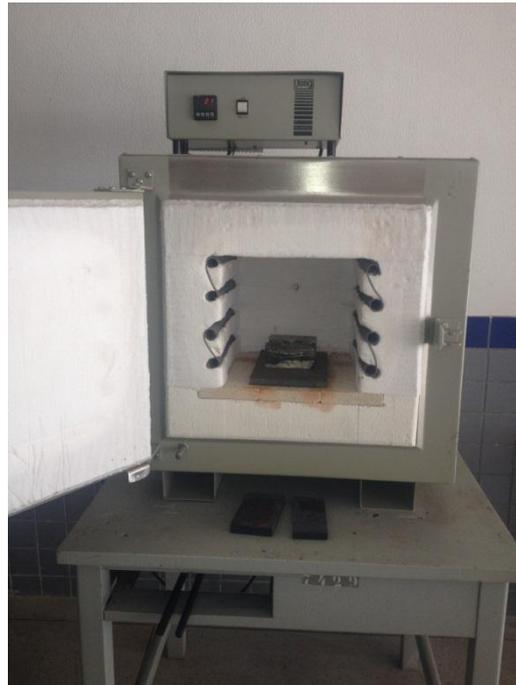


Figura 12 - Placa de aço 1020 unida por massa epóxi no forno a 100°C

### 3.1.4 Utilização da fonte térmica como fonte de calor para medição da RTC através dos termopares.

A realização da medição da resistência térmica de contato através do método experimental, conforme previamente citado, diz que a essência dele é a determinação das temperaturas na interface, sendo baseado na medição direta de temperaturas superficiais.

Sendo assim, foi necessário saber a temperatura de entrada e saída em cada uma das amostras. Portanto, foi utilizada uma fonte térmica, conforme segue na figura 13, do modelo C-MAG HP 7, da marca IKA e possui as propriedades encontradas na tabela 5, com temperatura de entrada a 55°C. Conectados as amostras, foram colocados dois termopares, que informam a temperatura de saída e os gráficos do

comportamento da temperatura durante oito minutos de observação, conforme figura 13 abaixo.



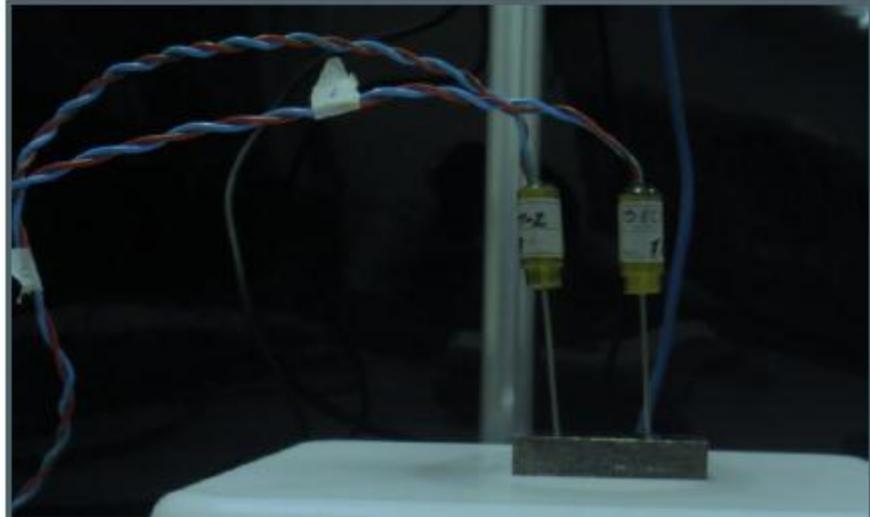
**Figura 13 - Placa Térmica a 55°C**

**Tabela 5 – Dados técnicos da placa aquecedora [14]**

Número de pontos de aquecimento	1
Saída de calor	1000 W
ViewReplace 15	Replaced
Controle de calor	LED
Conexão para sensor de temperatura ext.	ETS-D5
Taxa de aquecimento (1 l H <sub>2</sub> O em H15)	5 K/min
Material da placa configurada	cerâmica
Dimensões da placa configurada	180 x 180 mm
ViewReplace 50001	Replaced
Peso	5 kg
ViewReplace 50005	Replaced
Umidade relativa permissível	80 %
Classe de proteção de acordo com a DIN EN 60529	IP 21
Tensão	230 / 120 / 100 V
Frequência	50/60 Hz
Entrada de alimentação	1005 W

Os termopares utilizados são do tipo K, conforme figura 14, que é um termopar de uso geral, sendo mais resistente à oxidação em temperaturas altas do que os tipos E, J e T. Tem um baixo custo e, devido à sua popularidade estão disponíveis em diversos tipos de montagens. A longa exposição em alta temperatura pode

provocar o aparecimento de não homogeneidades nos fios. Tem uma sensibilidade de aproximadamente  $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  [15]. Sendo ECIL a marca utilizada, este possui uma faixa de leitura variando de  $-100^\circ\text{C}$  a  $300^\circ\text{C}$ , e tem um erro de aproximadamente  $2^\circ\text{C}$  [16].



**Figura 14** - Termopares ECIL [16]

Previamente, em outro experimento, houve a calibração do termopar para que fosse possível saber para experimentos futuros, o valor do erro dos mesmos. Para essa calibração foi utilizada uma fonte térmica com temperatura inicial de  $59^\circ\text{C}$ . Com isso pode-se comparar os resultados dos termopares, para verificar a imprecisão dos sensores [16], conforme a tabela 6.

**Tabela 6** - Calibração dos Termopares [16]

Temperatura do termopar	Temperatura da fonte térmica	Erro de temperatura
56,94	54,8	2.14
54,44	54	0.44

### 3.2 Modelagem do problema

Para a realização dos cálculos que indicam a diferença da resistência térmica de contato para as duas superfícies analisadas, fez-se uma analogia a um circuito elétrico para ambas as situações, como forma de facilitar, melhor visualizar o problema e montar as equações necessárias. Sendo assim, as situações foram

analisadas e desenvolvidas caso a caso, conforme se pode observar na modelagem a frente.

### 3.2.1 Caso 1- Aço polido - Equipamento

O caso 1, representado na figura 15 indica a esquematização do problema placa aquecedora - aço polido. Com a analogia à resistência elétrica, figura 16, pode-se melhor entender as variáveis presentes.



**Figura 15** - Caso 1 – Equipamento- Aço polido – Ar

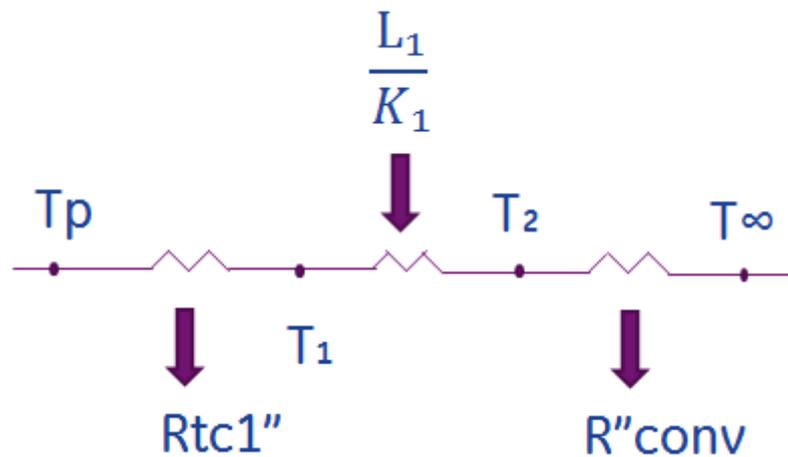
Sendo:

$T_p$ : Temperatura da Placa

$T_1$ : Temperatura na amostra de aço polido base inferior

$T_2$ : Temperatura na amostra de aço polida base superior – medida pelo termopar

$T_{\infty}$ : Temperatura no local do experimento



**Figura 16** - Analogia elétrica Caso 1 – Equipamento- Aço polido – Ar

Sendo:

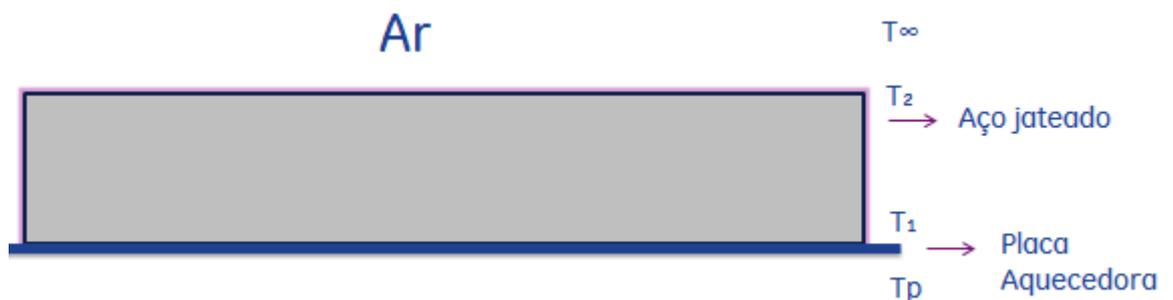
$R_{tc1''}$ : Resistência térmica de contato entre a placa aquecedora e a amostra de aço polido por unidade de área de transferência de calor. ( $\frac{m^2K}{W}$ ).

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

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

### 3.2.2 Caso 2- Aço jateado - Equipamento

O caso 2, representado na figura 17 indica a esquematização do problema placa aquecedora - aço jateado. Com a analogia à resistência elétrica, figura 18 pode-se melhor entender as variáveis presentes.



**Figura 17** - Caso 2 – Equipamento- Aço jateado – Ar

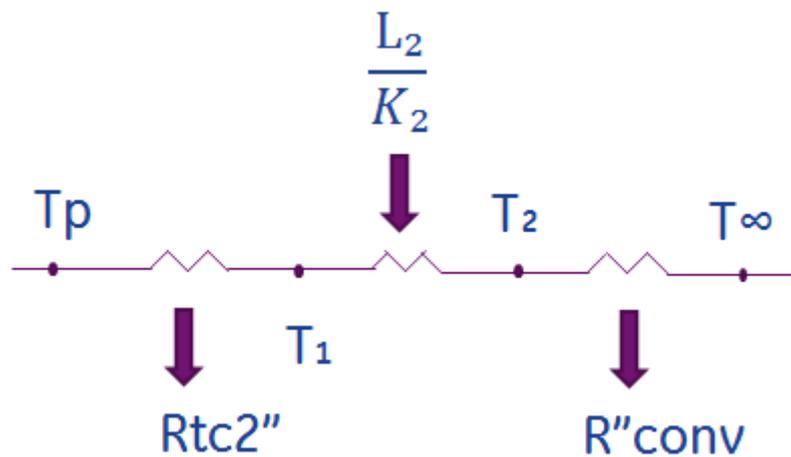
Sendo:

$T_p$ : Temperatura da Placa

$T_1$ : Temperatura na amostra de aço jateado base inferior

$T_2$ : Temperatura na amostra de aço jateado base superior – Medida pelo termopar

$T_\infty$ : Temperatura no local do experimento



**Figura 18** - Analogia elétrica Caso 2 –Equipamento- Aço jateado – Ar

Sendo:

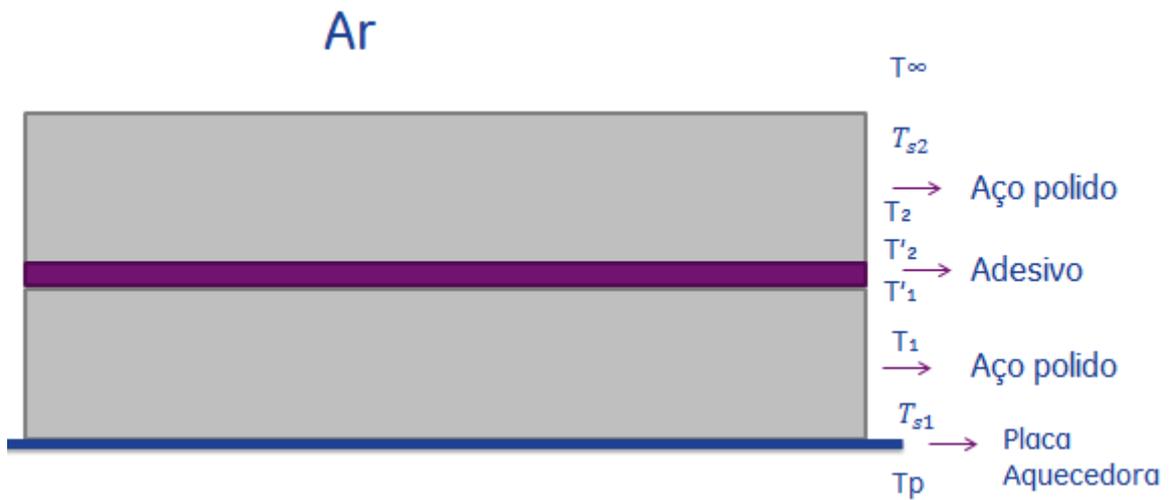
$R_{tc2''}$ : Resistência térmica de contato entre a placa aquecedora e a amostra de aço jateado por unidade de área de transferência de calor ( $\frac{m^2K}{W}$ ).

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

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

### 3.2.3 Caso 3- Equipamento – Aço polido – Adesivo – Aço polido

O caso 3, representado na figura 19 indica a esquematização do problema placa aquecedora- aço polido- adesivo- aço polido. Com a analogia à resistência elétrica, figura 20, pode-se melhor entender as variáveis presentes.



**Figura 19** - Caso 3 - Equipamento – Aço polido – Adesivo – Aço polido- Ar

Sendo:

$T_p$ : Temperatura da Placa

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

$T_1$ : Temperatura na primeira placa de aço polido base superior

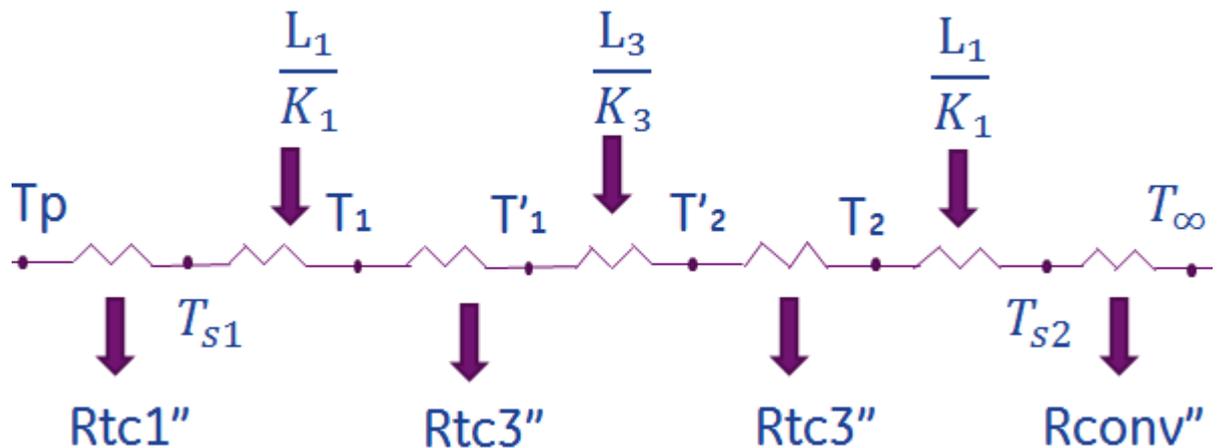
$T'_1$ : Temperatura no adesivo base inferior

$T'_2$ : Temperatura no adesivo base superior

$T_2$ : Temperatura na segunda placa de aço polido base inferior

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

$T_{\infty}$ : Temperatura no local do experimento



**Figura 20** - Analogia elétrica Caso 3 – Aço polido – Adesivo – Aço polido- Ar

Sendo:

$R_{tc1''}$ : Resistência térmica de contato entre a placa aquecedora e a amostra de aço polido por unidade de área de transferência de calor ( $\frac{m^2K}{W}$ ).

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

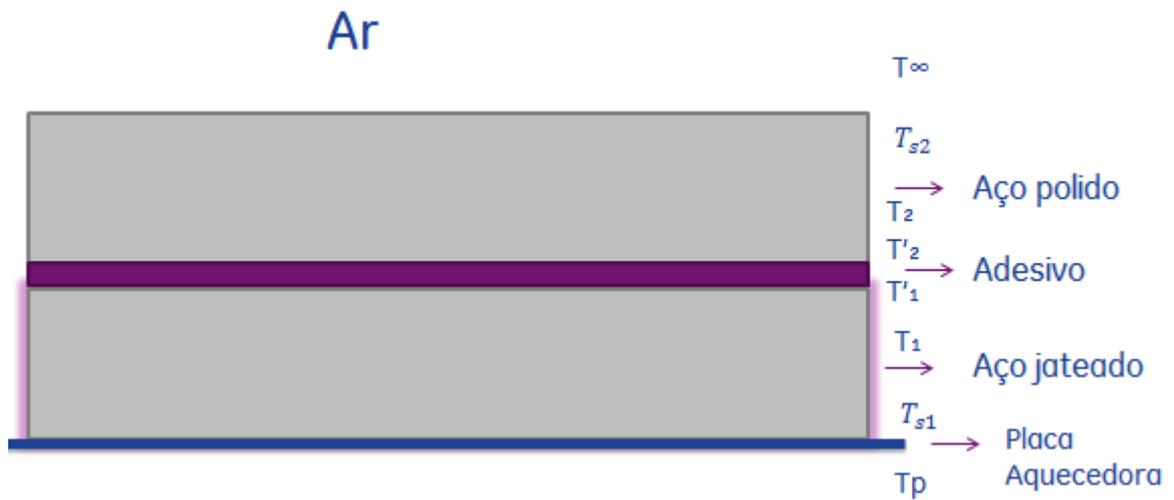
$R_{tc3''}$ : Resistência térmica de contato entre a amostra de aço polido e o adesivo por unidade de área de transferência de calor ( $\frac{m^2K}{W}$ ).

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

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

### 3.2.4 Caso 4- Equipamento – Aço jateado – Adesivo – Aço polido

O caso 4, representado na figura 21 indica a esquematização do problema placa aquecedora – aço jateado- adesivo- aço polido. Com a analogia à resistência elétrica, figura 22, pode-se melhor entender as variáveis presentes.



**Figura 21** - Caso 4 - Equipamento – Aço jateado – Adesivo – Aço polido- Ar

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

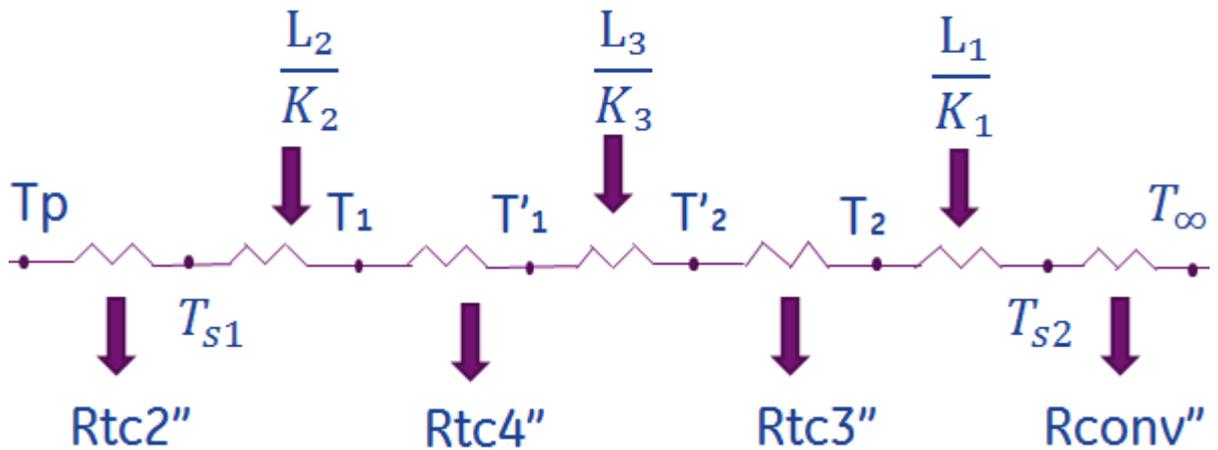
$T'_1$ : Temperatura no adesivo base inferior

$T'_2$ : Temperatura no adesivo base superior

$T_2$ : Temperatura na segunda placa de aço polido base inferior

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

$T_{\infty}$ : Temperatura no local do experimento



**Figura 22** –Analogia elétrica Caso 4 – Aço jateado – Adesivo – Aço polido- Ar

Sendo:

$R_{tc2''}$ : Resistência térmica de contato entre a placa aquecedora e a amostra de aço jateado por unidade de área de transferência de calor ( $\frac{m^2K}{W}$ ).

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

$R_{tc4''}$ : resistência térmica de contato entre a amostra de aço jateado e o adesivo por unidade de área de transferência de calor ( $\frac{m^2K}{W}$ ).

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

$R_{tc3''}$ : Resistência térmica de contato entre a amostra de aço polido e o adesivo por unidade de área de transferência de calor ( $\frac{m^2K}{W}$ ).

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

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

## 4 Resultados e discussão

### 4.1 Gráficos Temperatura (°C) x Tempo (s)

Com a utilização do programa CATMAN, software da HBM para configuração, visualização e análise de medição, foi possível gerar gráficos Temperatura (°C) X Tempo (s) a partir da utilização do termopar como fonte de dados. O comportamento das temperaturas foi acompanhado durante oito minutos, tendo como temperatura inicial 55°C, em uma sala com temperatura ambiente de 27°C, onde foram realizados todos os experimentos, como forma de minimizar os erros.

#### 4.1.1 Gráfico do sistema Placa aquecedora - Aço polido

No gráfico abaixo, figura 23, pode ser verificado o comportamento da temperatura da amostra aço polido com espessura de 0.02m durante oito minutos de observação, sendo a temperatura inicial da placa térmica igual a 55°C.

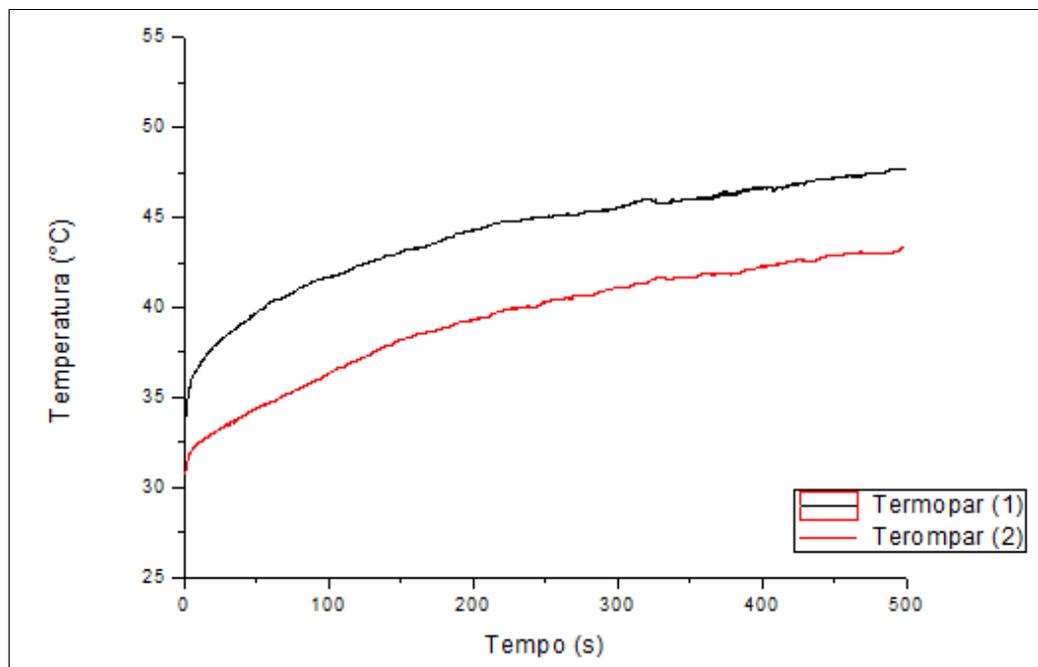


Figura 23 - Gráfico Aço polido

### 4.1.2 Gráfico do sistema Placa aquecedora - Aço polido – Adesivo – Aço polido

No gráfico abaixo, figura 24, pode ser verificado o comportamento da temperatura da amostra aço polido-adesivo- aço polido com espessura de 0.041m durante oito minutos de observação, sendo a temperatura inicial da placa térmica igual a 55°C.

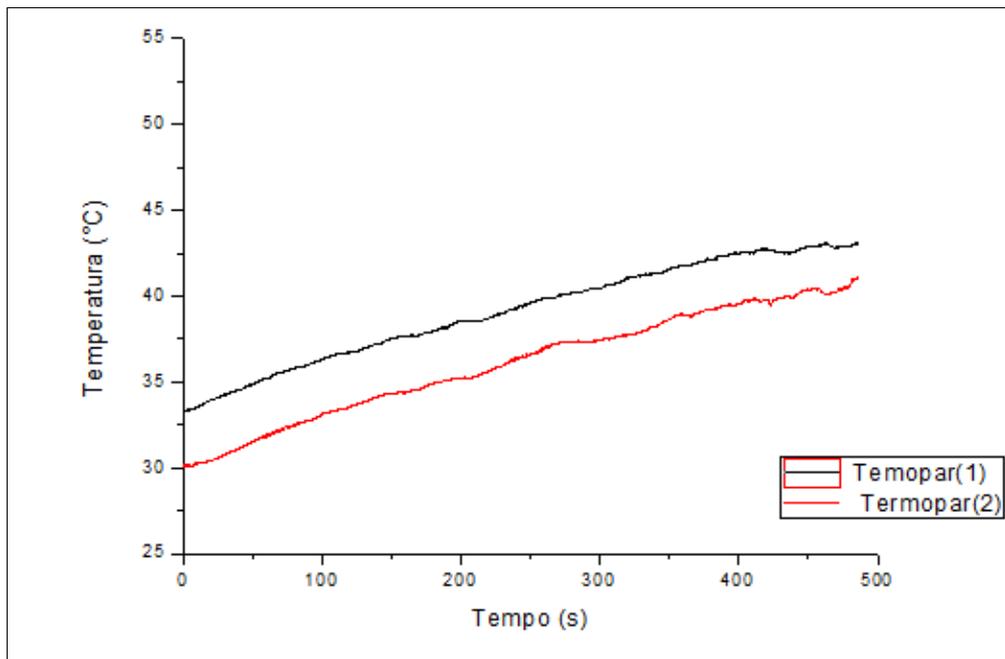


Figura 24 - Gráfico Aço polido – Adesivo – Aço polido

### 4.1.3 Gráfico do sistema Placa aquecedora - Aço jateado

No gráfico abaixo, figura 25, pode ser verificado o comportamento da temperatura da amostra aço jateado com espessura de 0.02m durante oito minutos de observação, sendo a temperatura inicial da placa térmica igual a 55°C.

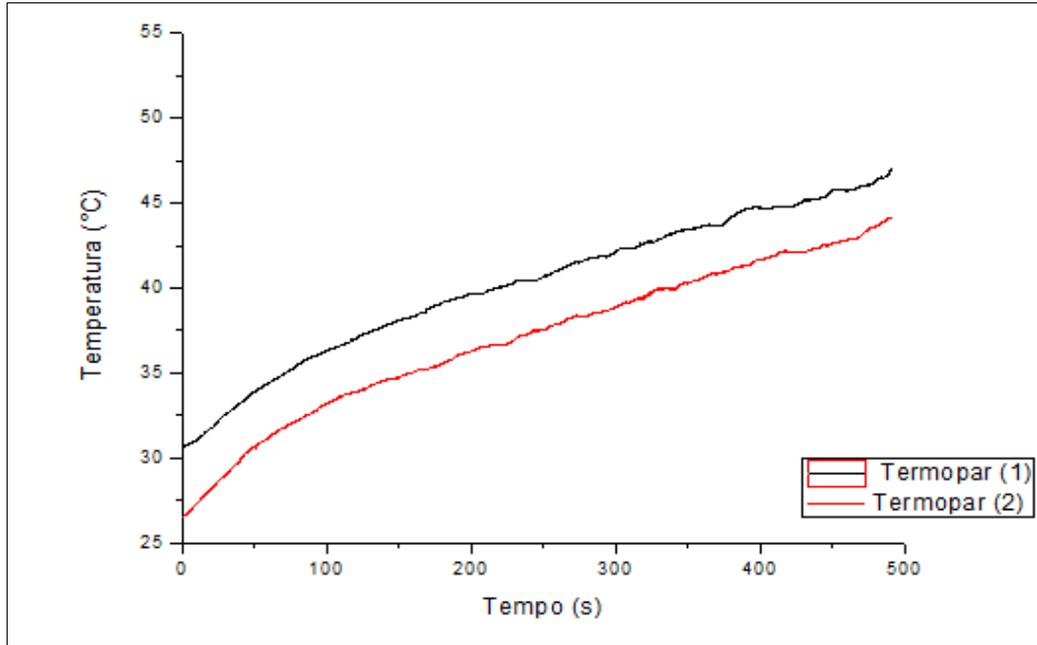
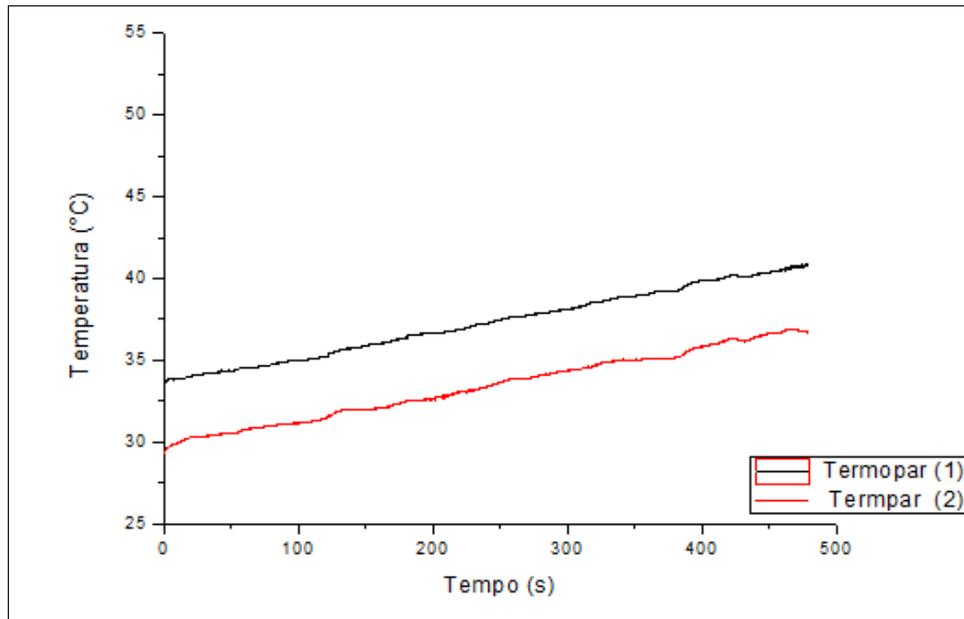


Figura 25 - Gráfico Aço jateado

#### 4.1.4 Gráfico do sistema Placa aquecedora - Aço jateado – Adesivo – Aço polido

No gráfico abaixo, figura 26, pode ser verificado o comportamento da temperatura da amostra aço jateado – adesivo – aço polido com espessura de 0.041m durante oito minutos de observação, sendo a temperatura inicial da placa térmica igual a 55°C.



**Figura 26** - Gráfico Aço jateado – Adesivo – Aço polido

## 4.2 Valores de temperatura obtidos

O experimento se iniciou com a medição das temperaturas nas placas de espessura 0.02m com superfície polida e jateada e por fim a medição do conjunto colado de espessura 0.041m, conforme pode ser acompanhado na tabela 7 abaixo.

**Tabela 7 - Temperaturas de saída para as amostras no instante T=200s e T=400s**

Temperatura da Placa Aquecedora = 55°C								
Amostras	Instante de tempo: 200 segundos				Instante de tempo: 400 segundos			
	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Média (°C)	Dif de temp (°C)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Média (°C)	Dif de temp (°C)
Aco polido	44	39	41.86	13.14	47	42	44.5	10.5
Aco jateado	40	36	37.98	17.02	45	42	43.19	11.81
Aco polido - Adesivo - Aco polido	39	35	36.89	18.11	42	40	41.02	13.98
Aco jateado - Adesivo - Aco polido	37	33	34.64	20.36	40	36	37.79	17.21

### **4.3 Resistências térmicas de contato por unidade de área encontradas**

#### **4.3.1 Caso 1- Aço polido - Equipamento**

Tendo como base para os cálculos os valores encontrados experimentalmente na situação em que a placa estava aquecida a 55°C no instante t=200s.

Foi 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 parede ( $T_2$ ) e a temperatura de corrente livre ( $T_\infty$ ). Sendo a ultima medida e conservada a 27°C durante todos os experimentos, como forma de minimizar os erros e manter o ambiente experimental igual para todas os casos estudos e a primeira medida pelo termopar colocado na base superior da

amostra. A temperatura de filme pode ser encontrada utilizando a equação 10 que segue:

$$T_f = \frac{(T_z + T_\infty)}{2} \quad (10)$$

Sendo:

$$T_z = 41.86^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 27^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{41.86 + 27}{2} = 34.43^\circ\text{C} = 307\text{K}$$

As propriedades da Temperatura de filme ( $T_f = 307\text{K}$ ) foram encontradas através da interpolação dos valores encontrados na tabela de propriedades termofísicas de gases na pressão atmosférica para o ar atmosférico [10].

- $\rho = 1.1381\text{Kg}/\text{m}^3$
- $C_p = 1.007 \frac{\text{KJ}}{\text{KG}} \cdot \text{K}$
- $\mu = 1.9 \times 10^{-5} \text{N s}/\text{m}^2$
- $\nu = 1.66 \times 10^{-5} \text{m}^2 / \text{s}$
- $k = 2.61 \times 10^{-2} (\text{W}/\text{m})\text{K}$
- $\alpha = 2.35 \times 10^{-5} \text{m}^2 / \text{s}$
- $\text{Pr} = 0.706$

O cálculo do coeficiente convectivo para a convecção natural é dependente do coeficiente de expansão térmica do fluido,  $\beta$ , que, utilizando uma aproximação para os gases perfeitos, é calculado através da equação 11:

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{307} = 3.26 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

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 planas o número de Rayleigh crítico é expresso pela equação 12:

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

O comprimento característico é definido por:

$$L = A/P$$

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

Sendo:

$$A = 0.005 \text{ m}^2$$

$$P = 0.3 \text{ m}$$

$$L = 0.005/0.3 = 0.017 \text{ m}$$

Pode-se, portanto, encontrar o valor de Ra:

$$Ra = \frac{(9.81 \times 3.26 \times 10^{-3} \times (41.86 - 27) \times 0.017^3)}{1.66 \times 10^{-5} \times 2.35 \times 10^{-5}} = 5.62 \times 10^3$$

Para o escoamento laminar usa-se a equação 13 como forma de encontrar o número de Nusselt:

$$\overline{Nu} = \frac{0.68 + 0.670 Ra^{\frac{1}{4}}}{(1 + (\frac{0.492}{Pr})^{\frac{9}{16}})^{4/9}} \quad (13)$$

Portanto:

$$\overline{Nu} = \frac{0.68 + 0.670(5.62 \times 10^3)^{\frac{1}{4}}}{(1 + (\frac{0.492}{0.706})^{\frac{9}{16}})^{4/9}} = 3.03$$

Sendo o coeficiente de convecção associado as faces igual:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} k}{L} = \frac{3.03 \times 2.61 \times 10^{-2}}{0.02} = 3.95 \frac{W}{m^2} \cdot k$$

E por fim pode-se encontrar o fluxo através da equação 14:

$$q'' = \bar{h} (T_2 - T_\infty) \quad (14)$$

$$q'' = 3.95 (41.86 - 27) = 58.76 \text{ W/m}^2$$

Com base na analogia elétrica apresentada na figura 8, agora pode-se encontrar o valor da temperatura  $T_1$ , através da equação 15, que é a temperatura da base inferior da amostra de aço e consequentemente a  $R_{tc1}$ , que corresponde ao valor da resistência térmica de contato entre a placa e a amostra de aço polido.

$$q'' = \frac{(T_1 - T_\infty)}{R''_{cond}} \quad (15)$$

Sendo portanto a Temperatura na base da amostra de aço polido igual a:

$$58.76 = \frac{(T_1 - 27)}{0.02/52.9}$$

$$T_1 = 41.88^\circ\text{C}$$

E a  $R_{tc1}$ , correspondente a:

$$R_{tc1} = \frac{T_p - T_1}{q''} = \frac{55 - 41.88}{58.76} = 0.22 \frac{m^2 K}{W}$$

### 4.3.2 Caso 2- Aço jateado - Equipamento

Seguindo a mesma linha de desenvolvimento que foi previamente realizada para o caso 1- Aço polido – Equipamento, o caso 2 será baseado na mesmas expressões matemáticas. Sendo assim:

$$T_f = \frac{37.98+27}{2} = 32.49^\circ\text{C} = 305\text{K}$$

As propriedades da Temperatura de filme ( $T_f = 305\text{K}$ ) foram encontradas através da interpolação dos valores encontrados na tabela de propriedades termofísicas de gases na pressão atmosférica para o ar atmosférico [10].

- $\rho = 1.0998\text{Kg}/\text{m}^3$
- $C_p = 1.007 \frac{\text{KJ}}{\text{KG}} \cdot \text{K}$
- $\mu = 1.9 \times 10^{-5} \text{ N s}/\text{m}^2$
- $\nu = 1.64 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$
- $k = 2.67 \times 10^{-2} (\text{W}/\text{m})\text{K}$
- $\alpha = 2.32 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$
- $\text{Pr} = 0.706$

Sendo, portanto, o valor do coeficiente de expansão térmica

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{305} = 3.28 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

O comprimento característico é definido por:

$$L = A/P$$

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

Sendo:

$$A=0.005 \text{ m}^2$$

$$P= 0.3\text{m}$$

$$L=0.005/03 = 0.017 \text{ m}^2$$

Pode-se, portanto, encontrar o valor de Ra:

$$Ra = \frac{(9.81 \times 3.28 \times 10^{-3} \times (37.98 - 27)0.017^3)}{1.64 \times 10^{-5} \times 2.32 \times 10^{-5}} = 4.29 \times 10^3$$

Sendo o número de Nusselt:

$$\overline{Nu} = \frac{0.68 + 0.670(4.29 \times 10^3)^{\frac{1}{4}}}{(1 + (\frac{0.492}{0.706})^{\frac{9}{16}})^{4/9}} = 2.83$$

Sendo o coeficiente de convecção associado as faces igual:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} k}{L} = \frac{2.83 \times 2.67 \times 10^{-2}}{0.02} = 3.77 \frac{W}{m^2} \cdot k$$

E por fim pode-se encontrar o fluxo:

$$q'' = 3.77 (37.98 - 27) = 41.44 W/m^2$$

Sendo portanto a Temperatura na base da amostra de aço jateado igual a:

$$41.44 = \frac{(T_1 - 27)}{0.02/52.9}$$

$$T_1 = 38^\circ C$$

E a  $Rtc_2$ , correspondente a:

$$Rtc_2 = \frac{T_p - T_1}{q''} = \frac{55 - 38}{41.44} = 0.41 \frac{m^2 K}{W}$$

### 4.3.3 Caso 3- Equipamento – Aço polido – Adesivo – Aço polido

Mais uma vez, seguindo a mesma linha de desenvolvimento que foi previamente realizada para o caso 1 e o caso 2, o caso 3 será baseado na mesmas expressões matemáticas. Sendo assim:

$$T_f = \frac{36.89 + 27}{2} = 31.94^\circ C = 305K$$

As propriedades da Temperatura de filme ( $T_f = 305K$ ) foram encontradas através da interpolação dos valores encontrados na tabela de propriedades termofísicas de gases na pressão atmosférica para o ar atmosférico[10].

- $\rho = 1.0998Kg/m^3$
- $Cp = 1.007 \frac{KJ}{KG} \cdot K$
- $\mu = 1.9 \times 10^{-5} N s/m^2$
- $\nu = 1.64 \times 10^{-5} m^2 /s$
- $k = 2.67 \times 10^{-2} (W/m)K$
- $\alpha = 2.32 \times 10^{-5} m^2 /s$
- $Pr = 0.706$

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

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{305} = 3.28 \times 10^{-3} K^{-1}$$

O comprimento característico é definido por:

$$L = A/P$$

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

Sendo:

$$A=0.005 m^2$$

$$P= 0.3m$$

$$L=0.005/03 = 0.017 m^2$$

Pode-se, portanto, encontrar o valor de Ra:

$$Ra = \frac{(9.81 \times 3.28 \times 10^{-3} \times (36.89 - 27)0.017^3)}{1.64 \times 10^{-5} \times 2.32 \times 10^{-5}} = 3.87 \times 10^3$$

Sendo o número de Nusselt:

$$\overline{Nu} = \frac{0.68 + 0.670(3.87 \times 10^3)^{\frac{1}{4}}}{(1 + (\frac{0.492}{0.706})^{\frac{9}{16}})^{4/9}} = 2.76$$

Sendo o coeficiente de convecção associado as faces igual:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} k}{L} = \frac{2.76 \times 2.67 \times 10^{-2}}{0.041} = 1.8 \frac{W}{m^2} \cdot k$$

E por fim pode-se encontrar o fluxo:

$$q'' = 1.8 (36.89 - 27) = 17.78 W/m^2$$

Sendo portanto a Temperatura  $T_2$  na base inferior da segunda amostra de aço polido igual a:

$$17.78 = \frac{(T_2 - 27)}{0.02/52.9}$$

$$T_2 = 36.89^\circ C$$

$$T_p - T_1 = q'' (R_{tc1}'' + \frac{L_1}{K_1})$$

$$55 - T_1 = 17.78 \left( 0.22 + \frac{0.02}{52.9} \right)$$

$$T_1 = 51.08^\circ C$$

Sendo o somatório das resistências o resultado da divisão entre a diferença de temperatura e o fluxo, segue a equação 16:

$$\sum R'' = \frac{\Delta T}{q''} \quad (16)$$

Tem-se, portanto:

$$2R_{tc3}'' + \frac{L_3}{K_3} = \frac{(T_1 - T_2)}{q''}$$

$$2Rtc3'' + \frac{0.001}{0.5} = \frac{(51.08 - 36.89)}{17.78}$$

$$Rtc3'' = 0.39 \frac{m^2 K}{W}$$

### 4.3.4 Caso 4- Equipamento – Aço jateado – Adesivo – Aço polido

Mais uma vez, seguindo a mesma linha de desenvolvimento que foi previamente realizada para o caso 1, o caso 2 e o caso 3, o caso 4 será baseado na mesmas expressões matemáticas. Sendo assim:

$$T_f = \frac{34.64 + 27}{2} = 30.28^\circ C = 304K$$

As propriedades da Temperatura de filme ( $T_f = 305K$ ) foram encontradas através da interpolação dos valores encontrados na tabela de propriedades termofísicas de gases na pressão atmosférica para o ar atmosférico [10].

- $\rho = 1.148 Kg/m^3$
- $Cp = 1.007 \frac{KJ}{KG} \cdot K$
- $\mu = 1.86 \times 10^{-5} N s/m^2$
- $\nu = 1.63 \times 10^{-5} m^2 /s$
- $k = 2.66 \times 10^{-2} (W/m)K$
- $\alpha = 2.31 \times 10^{-5} m^2 /s$
- $Pr = 0.706$

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

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{304} = 3.29 \times 10^{-3} K^{-1}$$

O comprimento característico é definido por:

$$L = A/P$$

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

Sendo:

$$A=0.005 \text{ m}^3$$

$$P= 0.3\text{m}$$

$$L=0.005/03 = 0.017 \text{ m}^2$$

Pode-se, portanto, encontrar o valor de Ra:

$$Ra = \frac{(9.81 \times 3.29 \times 10^{-3} \times (34.64 - 27)0.017^3)}{1.63 \times 10^{-5} \times 2.31 \times 10^{-5}} = 3.03 \times 10^3$$

Sendo o número de Nusselt:

$$\overline{Nu} = \frac{0.68 + 0.670(3.03 \times 10^3)^{\frac{1}{4}}}{(1 + (\frac{0.492}{0.706})^{\frac{9}{16}})^{4/9}} = 2.6$$

Sendo o coeficiente de convecção associado as faces igual:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} k}{L} = \frac{2.6 \times 2.66 \times 10^{-2}}{0.041} = 1.69 \frac{W}{m^2} \cdot k$$

E por fim pode-se encontrar o fluxo:

$$q'' = 1.69 (34.64 - 27) = 12.9 \text{ W/m}^2$$

Sendo o somatório das resistências o resultado da divisão entre a diferença de temperatura e o fluxo. Tem-se, portanto:

$$T'_2 - T_{S2} = q'' \left( \frac{L_1}{K_1} + Rtc3 \right)$$

$$T'_2 - 34.64 = 12.9 \left( \frac{0.02}{52.9} + 0.4 \right)$$

$$T'_2 = 39.8^\circ\text{C}$$

$$T_P - T_1 = q'' \left( \frac{L_2}{K_2} + Rtc2 \right)$$

$$55 - T_1 = 12.9 \left( \frac{0.02}{52.9} + 0.41 \right)$$

$$T_1 = 49.71^\circ\text{C}$$

Sendo possível, por fim, encontrar o valor da resistência térmica de contato entre a amostra de aço jateado e a camada de adesivo:

$$R_{tc4''} + \frac{L_3}{K_3} = \frac{(T_1 - T_2)}{q''}$$

$$R_{tc4''} + \frac{0.001}{0.5} = \frac{(49.71 - 39.8)}{12.9}$$

$$R_{tc4''} = 0.77 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Sendo assim, verifica-se através da tabela 8 os resultados obtidos para a Rtc3 – Resistência de contato entre a amostra de aço polido e a camada de adesivo e a Rtc4 – Resistência térmica de contato entre a amostra de aço jateado e a camada de adesivo nos intervalos de tempo de 200s e 400s com a placa aquecedora a temperatura de 55°C.

**Tabela 8 - Resultados encontrados para a Resistência térmica de contato**

Placa aquecedora a 55°C		
	T=200s	T = 400s
Rtc3``	$0.4 \frac{\text{WK}}{\text{m}^2}$	$0.0572 \frac{\text{WK}}{\text{m}^2}$
Rtc4``	$0.77 \frac{\text{WK}}{\text{m}^2}$	$0.305 \frac{\text{WK}}{\text{m}^2}$

## CAPÍTULO 5

### 5.1 Conclusão e Trabalhos futuros

Os cálculos demonstrados ao longo do capítulo 4 são capazes de confirmar o que era esperado após um estudo relativo a influência do acabamento superficial na resistência térmica de contato. Conforme previamente citado, a utilização de duas superfícies diferentes visava confirmar através do experimento que o conjunto analisado no caso 4: Placa aquecedora – Aço jateado – Adesivo – Aço polido – Arteria teria uma resistência térmica de contato maior entre a superfície de aço jateado e o adesivo ( $R_{tc4}''$ ) quando comparada com o caso 3: Placa aquecedora – Aço polido – Adesivo – Aço polido – Ar, entre a superfície de aço polido e o adesivo ( $R_{tc3}''$ ). O resultado obtido para  $R_{tc3}''$  foi de  $0.4\frac{m^2K}{W}$ , já o resultado da  $R_{tc4}''$  foi equivalente a  $0.77\frac{m^2K}{W}$ , chegando portanto a uma diferença de  $0.37\frac{m^2K}{W}$ . Sendo assim, pode-se confirmar a importância do acabamento superficial como forma de minimizar a resistência térmica de contato. Por outro lado, há a necessidade de manter uma rugosidade mínima para que haja uma boa ancoragem mecânica do adesivo e consequentemente um melhor desempenho mecânico da junta.

### 5.2 Trabalhos futuros

Foi observada uma considerável resistência de contato entre o substrato metálico e a placa aquecedora. Para experimentos futuros, como forma de minimizar essa resistência, seria indicado:

1. Utilização de uma pasta térmica ou uma folha de papel alumínio envolvendo a amostra metálica.
2. Refinar o aparato experimental de forma que a transferência de calor fosse realmente unidimensional e com fluxo de calor constante.
3. Isolar o experimento de forma que a perda por convecção e radiação para o ambiente fossem mínimas e o desenvolvimento analítico pudesse contar somente com a resistência por condução.

Além disso, o experimento afirma que a amostra com superfície jateada teve um valor de resistência térmica de contato maior, entretanto este jateamento que a mesma sofreu, lhe garantiu uma adesão melhor do adesivo. Portanto, seria ideal ainda, contar com um experimento que avaliasse qual o valor de rugosidade ótimo em que pode-se encontrar um equilíbrio para as duas variáveis em questão.

4. Encontrar um valor de rugosidade em que o adesivo tenha boa aderência a amostra metálica e a ao mesmo tempo não aumente de forma significativa o valor da resistência térmica de contato.

## 6 Referências Bibliográficas

- [1] CARNEIRO, Ruth Pereira. Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi. Universidade Federal do Pará. Belém, 2010.
- [2] MONTEIRO, Delfim Ferreira. Análise do comportamento a fratura de juntas de aço efetuadas com adesivos estruturais. Universidade do Porto. Porto. 1995.
- [3] AGOSTINHO, O.L., Rodrigues, A.C.L. e Lirani, J. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões. Ed. EdgardBlucher, São Paulo, 1995. 295 p.
- [4] Mecânica – Metrologia- Telecurso 2000- Fundação Roberto Marinho/ FIESP / SENAI– Editora Globo.
- [5] Definição de jateamento (<http://www.novasaltense.com.br/jateamento.php>).
- [6] WEG Tintas - Manual de preparação de superfícies.  
(<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-preparacao-de-superficie-manual-portugues-br.pdf>).
- [7] ORDENES, Martin; LAMBERTS, Roberto; GUTHS, Saulo. Transferência de calor na envolvente da edificação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.
- [8] Transferência de calor – Série de concursos públicos - UFPR  
([http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro\\_do\\_petroleo/transferencia\\_calor.pdf](http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/transferencia_calor.pdf)).
- [9] POLOZINE, Alexandre; Desenvolvimento da Técnica Analítica para determinar a resistência térmica de contato no processo de forjamento; UFRGS, Rio Grande do Sul, 2009.

[10] INCROPERA, Frank P. et al. “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, 6° ed. LTC, Rio de Janeiro, RJ, 643p. 2008.

[11] Resistência térmica de contato – Solid Works

([http://help.solidworks.com/2014/portuguesebrazilian/SolidWorks/cworks/c\\_Thermal\\_Contact\\_Resistance.htm?format=P](http://help.solidworks.com/2014/portuguesebrazilian/SolidWorks/cworks/c_Thermal_Contact_Resistance.htm?format=P))

[12] GOUVÊA, Miriam T; Estudo dos processos de transferência de calor na interface entre dois sólidos; Mackenzie.

[13] Polinova Desenvolvimento e Produção de Materiais Poliméricos S.A – Ficha técnica do produto.

[14] Fonte de consulta da placa aquecedora. Site do fabricante:

([http://www.ika.com/owa/ika/catalog.technical\\_data?iProduct=3581800&iProductgroup=&iSubgroup=&iCS=1](http://www.ika.com/owa/ika/catalog.technical_data?iProduct=3581800&iProductgroup=&iSubgroup=&iCS=1)).

[15] Fonte de consulta do termopar. Site do fabricante:

(<http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/pirometria/termopares/termopar-tipo-k/>).

[16] NETO, Jorge de Souza. Desenvolvimento de Aparato Experimental para Determinação da Temperatura em Fios e Molas de SMA Usando Termografia Infravermelha. CEFET RJ. Rio de Janeiro, 2013.