



PUCRS

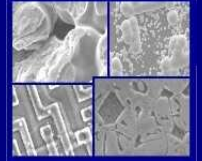
**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE
CALOR EM UM AÇO ABNT/SAE 1045 ATRAVÉS DO ENSAIO
JOMINY**

**JEFFERSON RICARDO BILHERI PETERSEN
ENGENHEIRO ELETRICISTA**

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

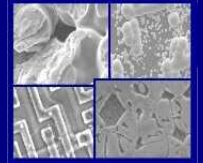
Abril, 2012.



PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE
CALOR EM UM AÇO ABNT/SAE 1045 ATRAVÉS DO ENSAIO
JOMINY**

JEFFERSON RICARDO BILHERI PETERSEN
ENGENHEIRO ELETRICISTA

ORIENTADOR: PROF. DR. Carlos Alexandre dos Santos

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Porto Alegre
Abril, 2012.

*"I can't tell you how I'll do it. But I
can tell you I will do it."*

(George Stephenson - 1830)

DEDICATÓRIA

À minha família, que me acompanha em todos os momentos da minha vida, que foram os meus primeiros mestres, que me ensinaram valores que levarei para toda vida, e que sempre me proporcionaram o melhor: amor, alegria, educação e respeito. E a minha querida namorada que conquistou seu lugar e também faz parte desta família.

Dedico a vocês:

Carlos Petersen

Vera Bilheri Petersen

Vivian Bilheri Petersen, e

Fernanda Conti.

AGRADECIMENTOS

A PUCRS que disponibilizou conhecimento a nível acadêmico através do seu corpo docente e de seus laboratórios.

Ao LABELO-PUCRS, pelo incentivo para que eu pudesse continuar a desenvolver a minha formação.

Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos, pela orientação deste trabalho, seu auxílio, dedicação e a confiança depositada em mim e pelos seus ensinamentos.

Aos Professores Dra. Eleani Maria da Costa e Dr. Vicente Mariano Canalli, pelas sugestões e correções, contribuindo para o fechamento desta dissertação.

Pelo apoio técnico recebido na realização dos ensaios através do Núcleo de Materiais Metálicos – NUCLEMAT.

Aos meus colegas e amigos da PUCRS - LABELO: Alessandro, Welinton, Marcelo, Lucas, Nelson, Márcio, Ricardo, Jonatan e Robson, pelo companheirismo e ajuda, durante esta formação.

Aos meus pais Carlos e Vera e a minha irmã Vivian, que sempre estiveram comigo me apoiando desde o início até o fim desta etapa, juntamente com minha namorada Fernanda, pelo carinho e compreensão durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

E a todos aqueles que de uma ou outra maneira ajudaram na realização deste trabalho.

Muito obrigado.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| DEDICATÓRIA | 4 |
| AGRADECIMENTOS..... | 5 |
| SUMÁRIO | 6 |
| LISTA DE FIGURAS | 9 |
| LISTA DE TABELAS..... | 12 |
| LISTA DE QUADROS | 13 |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | 14 |
| RESUMO..... | 16 |
| ABSTRACT..... | 17 |
| 1. INTRODUÇÃO | 18 |
| 2. OBJETIVOS | 20 |
| 2.1. Objetivos Específicos | 20 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 21 |
| 3.1. Tratamento Térmico - Têmpera..... | 21 |
| 3.2. Ensaio Jominy | 24 |
| 3.3. Temperabilidade do Aço Segundo a Norma ASTM A255-10 | 26 |
| 3.3.1. Confecção do Corpo de Prova..... | 28 |
| 3.3.2. Descrição do Dispositivo de Ensaio | 29 |
| 3.3.3. Normalização e Austenitização | 29 |
| 3.3.4. Preparação da Amostra para Medição de Dureza..... | 30 |
| 3.4. Microestruturas – Formação da Martensita | 31 |
| 3.4.1. Diagramas de Transformação..... | 34 |
| 3.5. Tempos de Resfriamento para Corpos de Formatos Distintos..... | 35 |
| 3.6. Transferência de Calor - Características..... | 37 |
| 3.6.1. Choque Térmico Devido ao Vapor..... | 39 |
| 3.6.1.1. Efeito Leidenfrost | 41 |
| 3.6.2. Película de vapor..... | 42 |
| 3.6.3. Ebulição Nucleada Transitória..... | 43 |
| 3.6.3.1. Dinâmica e Parâmetros de Bolha | 46 |
| 3.6.3.2. Propriedades de Superfície..... | 47 |

| | |
|--|-----------|
| 3.6.4. Densidades Críticas de Fluxo de Calor | 48 |
| 3.6.5. Transferência de Calor por Convecção | 50 |
| 3.7. Instrumentação – Medidas de Temperatura..... | 51 |
| 3.8. Método Estatístico e Interação de Tolerâncias..... | 52 |
| 3.8.1. Quantificando a Incerteza de Medição | 53 |
| 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 58 |
| 4.1. Corpo de Prova..... | 58 |
| 4.2. Ensaio Jominy | 60 |
| 4.3. Sistema de Aquisição de Armazenamento de Dados | 62 |
| 4.4. Cálculo das Taxas de Resfriamento | 63 |
| 4.4.1. Temperaturas de Resfriamento | 65 |
| 4.4.2. Etapas de Resfriamento | 65 |
| 4.5. Estimando os Modos de Transferência de Calor | 67 |
| 4.6. Cálculo das Densidades de Fluxo de Calor | 67 |
| 4.6.1. Cálculo das Densidades Críticas de Fluxo de Calor..... | 68 |
| 4.6.2. Verificação da Geração de Bolhas na Fase de Ebulição | 69 |
| 4.7. Cálculo do Coeficiente de Transferência de Calor | 69 |
| 4.8. Estimando a Incerteza de Medição | 69 |
| 4.8.1. Budget de Incertezas | 70 |
| 4.8.2. Fontes de Incerteza..... | 70 |
| 4.9. Simulação das Curvas de Resfriamento Via Aplicativo Computacional | 71 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 74 |
| 5.1. Curvas de Resfriamento obtidas a partir da temperatura de 850°C | 74 |
| 5.1.1. Erro de Aproximação da Curva de Resfriamento..... | 75 |
| 5.2. Modos de Transferência de Calor Associados..... | 76 |
| 5.3. Curva de Densidade de Fluxo de Calor x Tempo | 78 |
| 5.4. Verificação da Geração de Bolhas na Fase de Ebulição | 81 |
| 5.5. Comparação entre a Temperatura M_s e as Densidades Críticas de Calor .. | 81 |
| 5.6. Curva de ‘h x tempo’ | 82 |
| 5.7. Variação de Temperatura Encontrada na Execução do Ensaio Jominy..... | 84 |
| 5.8. Incerteza de Medição | 85 |
| 5.9. Ensaio Jominy Utilizando Outras Temperaturas de Austenitização..... | 86 |
| 5.9.1. Curva de Densidade de Fluxo de Calor x Tempo | 88 |
| 5.9.2. Etapas de Transferência de Calor Associadas | 89 |

| | |
|--|-----------|
| 5.9.3. Coeficiente de Transferência de Calor | 89 |
| 5.10. Simulação do Coeficiente de Transferência de Calor a 850°C. | 91 |
| 6. CONCLUSÕES | 93 |
| 7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS | 95 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 96 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1. Variação da curva de resfriamento em diversas partes de uma peça submetida ao tratamento de têmpera [2]. | 22 |
| Figura 3.2. Comparação entre diferentes meios de resfriamento para o tratamento de têmpera por imersão e suas taxas de transferência de calor [15]...... | 23 |
| Figura 3.3. Invenção de Walter E. Jominy para o ensaio de temperabilidade [11]. | 25 |
| Figura 3.4. Fluxograma dos passos para a execução do ensaio segundo Norma ASTM A255-10 [24]...... | 28 |
| Figura 3.5. Dimensões padronizadas para a confecção do corpo de prova a ser ensaiado [24]...... | 29 |
| Figura 3.6. Rede cristalina das fases presentes no aço durante a têmpera[7]. | 32 |
| Figura 3.7. O efeito do carbono no início e fim da fase martensita [25]. | 33 |
| Figura 3.8. Exemplo de diagrama de resfriamento contínuo [15]. | 34 |
| Figura 3.9. Curva de resfriamento contínuo para o aço ABNT 1045 [8]. | 35 |
| Figura 3.10. Etapas de transferência de calor subseqüentes ao choque térmico [13]. | 37 |
| Figura 3.11. Fluxograma com os modos de transferência de calor em um processo de têmpera [2]. | 38 |
| Figura 3.12. Duas situações dos modos de transferência de calor das curvas de resfriamento durante têmpera [2]. | 39 |
| Figura 3.13. Comparação entre modelos de Tolubinski e Kutateladze, para geração de bolhas durante o choque térmico [20]...... | 40 |
| Figura 3.14. Bolha d'água sob uma camada de vapor [45]. | 41 |
| Figura 3.15. Curva de Nukiyama para diferentes estágios de ebulição durante o tratamento de têmpera [13]. | 44 |
| Figura 3.16. Curva típica de resfriamento da superfície (T_W) e núcleo (T_{CORE}) de uma peça [14]. | 44 |
| Figura 3.17. Esquema dos modos de transferência de calor durante a têmpera [14]. | 48 |
| Figura 3.18. Tipos de distribuição da vazão do líquido em um tubo [20]. | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.19. Representação gráfica da declaração de um resultado de medição [54]..... | 53 |
| Figura 3.20. Representação dos níveis de confiança em relação aos desvios padrão utilizados [65]. | 56 |
| Figura 3.21. Representação sistemática da determinação de um resultado de medição. | 57 |
| Figura 4.1. Procedimento experimental do trabalho. | 58 |
| Figura 4.2. Esquemático da localização dos termopares para aquisição e monitoração da temperatura de resfriamento no corpo de prova utilizado para o ensaio..... | 59 |
| Figura 4.3. Dispositivo Jominy utilizado para os ensaios. | 60 |
| Figura 4.4. Esquemático do ensaio Jominy no momento do resfriamento do corpo de prova. | 61 |
| Figura 4.5. Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados utilizado [68]. | 62 |
| Figura 4.6. Arranjo experimental. | 63 |
| Figura 4.7. Curva Temperatura x Tempo referente ao ensaio Jominy..... | 64 |
| Figura 4.8. Etapas de resfriamento referentes ao ensaio Jominy..... | 65 |
| Figura 4.9. Modelo associado ao volume de água em contato com a superfície da amostra. | 66 |
| Figura 4.10. Interface água metal durante o ensaio Jominy. | 67 |
| Figura 4.11. Modelo de Planilha utilizada para o cálculo da Incerteza de Medição [60, 64]. | 70 |
| Figura 4.12. Tela de simulação do aplicativo. | 72 |
| Figura 4.13. Tela do relatório da simulação. | 73 |
| Figura 5.1. Curva de resfriamento da interface 'extremidade do corpo de prova/água' a partir de 850°C. | 74 |
| Figura 5.2. Curva de resfriamento a partir de 850°C em TP1 e TP2. | 75 |
| Figura 5.3. Comparação entre a curva real de resfriamento e a curva gerada pela Equação 4.2. | 76 |
| Figura 5.4. Gráfico dos modos de transferência de calor. | 77 |
| Figura 5.5. Diagrama dos modos de transferência de calor com seus parâmetros. | 78 |
| Figura 5.6. Curva de densidade de fluxo de calor associada ao ensaio. | 79 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.7. Curva de densidade de fluxo de calor com suas respectivas fases..... | 80 |
| Figura 5.8. Gráfico da densidade de fluxo de calor x temperatura de resfriamento..... | 82 |
| Figura 5.9. Coeficiente de transferência de calor no período de 150s..... | 83 |
| Figura 5.10. Coeficiente de transferência de calor durante o período total de ensaio. | 83 |
| Figura 5.11. Gráfico comparando o coeficiente de transferência de calor constante em relação ao variável durante o ensaio. | 84 |
| Figura 5.12. Curvas de resfriamento adquiridas referente aos ensaios realizados a 850°C de austenitização. | 84 |
| Figura 5.13. Curvas de resfriamento adquiridas referente aos ensaios realizados a 800°C de austenitização. | 87 |
| Figura 5.14. Curvas de resfriamento adquiridas referente aos ensaios realizados a 900°C de austenitização. | 87 |
| Figura 5.15. Curva de densidade de fluxo de calor associada ao ensaio de 800°C de austenitização. | 88 |
| Figura 5.16. Curva de densidade de fluxo de calor associada ao ensaio de 900°C de austenitização. | 88 |
| Figura 5.17. Coeficiente de transferência de calor durante o período total de ensaio na temperatura de 800°C de austenitização..... | 90 |
| Figura 5.18. Coeficiente de transferência de calor durante o período total de ensaio na temperatura de 900°C de austenitização..... | 90 |
| Figura 5.19. Coeficiente de transferência de calor aproximado, que será utilizado na simulação..... | 91 |
| Figura 5.20. Primeira simulação utilizando o coeficiente de transferência de calor aproximado. | 92 |
| Figura 5.21. Segunda simulação utilizando o coeficiente de transferência de calor aproximado. | 92 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1. Faixa de composição química máxima segundo a ASTM A255-10 [24]. | 26 |
| Tabela 3.2. Temperaturas de normalização e austenitização segundo a ASTM A255-10 [24]. | 27 |
| Tabela 3.3. Parâmetros de bolha para água a 100°C [14]. | 46 |
| Tabela 3.4. Efeitos da ebulição da água na superfície do material [14]. | 47 |
| Tabela 3.5. Relação entre as densidades críticas de fluxo de calor q_{cr1} e q_{cr2} . | 49 |
| Tabela 3.6. Tolerância de um termopar tipo K [58]. | 52 |
| Tabela 3.7. Graus efetivos e seu respectivo fator k [65]. | 56 |
| Tabela 4.1. Composição Química do Aço ABNT/SAE 1045 [66]. | 59 |
| Tabela 5.1. Associação de fases de acordo com a densidade de fluxo de calor. | 80 |
| Tabela 5.2. Comparação dos parâmetros de bolha entre o ensaio e os valores teóricos. | 81 |
| Tabela 5.3. Desvios de temperatura encontrados durante a repetibilidade dos ensaios. | 85 |
| Tabela 5.4. Valores de incerteza de medição para a temperatura de austenitização. | 85 |
| Tabela 5.5. Valores de incerteza de medição para a temperatura de resfriamento. | 85 |
| Tabela 5.6. Valores de incerteza de medição para a densidade de fluxo de calor. | 85 |
| Tabela 5.7. Valores de incerteza de medição para o coeficiente de transferência de calor. | 86 |
| Tabela 5.8. Associação de fases de acordo com a densidade de fluxo de calor, para o resfriamento a partir de 800°C | 89 |
| Tabela 5.9. Associação de fases de acordo com a densidade de fluxo de calor, para o resfriamento a partir de 900°C | 89 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 3.1. Designação dos tipos de termopar Segundo a NBR 12771:1999 [56]. | .52 |
| Quadro 3.2. Distribuição de probabilidade e suas características [63], [64]..... | 54 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|------------|---|----------------|
| A | Área | m^2 |
| a | Coeficiente de difusividade do material | m^2/s |
| C_p | Calor específico | $J/kg.K$ |
| d | Diâmetro | m |
| d_0 | Diâmetro de liberação da bolha | mm |
| f | Frequência de liberação da bolha | Hz |
| g | Aceleração da gravidade | m/s^2 |
| h | Coeficiente de transferência de calor | W/m^2K |
| k | fator de abrangência | |
| M | Martensita | |
| M_F | Temperatura final de formação da martensita | $^{\circ}C, K$ |
| M_S | Temperatura de início de formação da martensita | $^{\circ}C, K$ |
| q | Densidade de fluxo de calor | W/m^2 |
| q_{IN} | Densidade inicial de fluxo de calor | W/m^2 |
| q_{CR1} | Primeira densidade crítica de fluxo de calor | W/m^2 |
| q_{CR2} | Segunda densidade crítica de fluxo de calor | W/m^2 |
| R | Raio atual da bolha de água | m |
| R^* | Raio máximo da bolha de água | m |
| r^* | Calor latente da evaporação | J/kg |
| Re | Número de Reynolds | |
| S | Área da superfície do corpo de prova | m^2 |
| t | Tempo | s |
| T | Temperatura | $^{\circ}C, K$ |
| T_0 | Temperatura de austenitização | $^{\circ}C, K$ |
| T_M | Temperatura do fluido de refrigeração/arrefecimento | $^{\circ}C, K$ |
| T_{MS} | Temperatura de início de formação da martensita | $^{\circ}C, K$ |
| T_W | Temperatura da superfície do cilindro | $^{\circ}C, K$ |
| T_{CORE} | Temperatura do núcleo do cilindro | $^{\circ}C, K$ |
| $T_{MÁX}$ | Temperatura máxima | $^{\circ}C, K$ |
| $T_{MÍN}$ | Temperatura mínima | $^{\circ}C, K$ |
| T_{SF} | Temperatura de superfície da amostra | $^{\circ}C, K$ |

| | | |
|---------------------|--|--------------------|
| T_S | Temperatura de saturação/ebulição do fluido refrigerante | °C, K |
| T_{TRANS} | Temperatura de transição de filme de ebulição à ebulição nucleada | °C, K |
| T_V | Temperatura média ao longo do volume | °C, K |
| U | Incerteza expandida | |
| U_C | Incerteza combinada | |
| W'' | Velocidade da taxa de desenvolvimento da bolha | m/s |
| λ | Condutividade térmica do material | W/mK |
| ∇T | Gradiente de temperatura | K/m |
| τ_r | Tempo de relaxação | s |
| $\delta q/\delta t$ | Quantidade de calor transferida por unidade de tempo | W |
| ρ | Densidade ou massa específica do fluido | kg/m ³ |
| v | Velocidade | m/s |
| σ | Tensão de superfície do fluido | N/m |
| τ^* | Tempo da mudança de fluxo de calor na interface bolha/superfície | s |
| ΔT | Diferença de temperatura | °C, K |
| β | Parâmetro de superaquecimento da camada limite | |
| ν | Viscosidade cinemática | m ² /s |
| ρ' | Densidade ou massa específica do líquido | kg/m ³ |
| ρ'' | Densidade ou massa específica do vapor | kg/m ³ |
| λ' | Condutividade térmica do líquido | W/mK |
| α_{conv} | Coefficiente convectivo de transferência de calor | W/m ² K |
| ε_0 | Valor médio de sobreaquecimento do líquido durante o processo de ebulição nucleada | °C, K |
| α_{FB} | Coefficiente de transferência de calor na película de ebulição | W/m ² K |
| ω | Velocidade de movimento de um fluido | m/s |

RESUMO

PETERSEN, Jefferson Ricardo Bilheri. **DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UM AÇO ABNT/SAE 1045 ATRAVÉS DO ENSAIO JOMINY**. Porto Alegre, RS. 2012. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O trabalho aborda uma correlação numérico-experimental dos fatores que podem influenciar a temperabilidade de um aço SAE 1045 submetido ao Ensaio Jominy em uma temperatura de austenitização de 850°C. Tal correlação foi feita a partir do cálculo do coeficiente de transferência de calor e os modos presentes durante o resfriamento do corpo de prova. Estes cálculos foram obtidos com base na análise térmica do ensaio, através das taxas de resfriamento. Para isso, um termopar foi instalado em uma distância próxima da extremidade do corpo de prova a fim de obter as curvas de resfriamento. Com base nestes dados foi calculada a incerteza de medição de temperatura de ± 23 °C, para uma avaliação da repetibilidade do processo, chegando ao erro de $\pm 10,3$ °C. Devem ser levados em consideração durante o ensaio Jominy parâmetros significativos como: pressão hidráulica adequada, temperatura de austenitização com tolerância de até ± 6 °C, temperatura e vazão da água. Estes parâmetros alteram as condições de transferência de calor, e também a densidade de fluxo de calor e por consequência o coeficiente de transferência de calor. Foi determinada a variação do coeficiente de transferência de calor em relação ao tempo $h = f(t)$, e seu valor médio está de acordo com o valor informado na teoria, que é de aproximadamente 15,3 kW/m²K.

Palavras-Chaves: Jominy, Coeficiente de Transferência de Calor, Têmpera, Calor, Aço.

ABSTRACT

PETERSEN, Jefferson Ricardo Bilheri. **DETERMINATION OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN A STEEL ABNT / SAE 1045 BY THE TEST JOMINY.** Porto Alegre, RS. 2012. Master Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

This work presents a numerical-experimental correlation of the factors that may influence the hardenability of SAE 1045 steel subjected to the Jominy end quench test at austenitizing temperature of 850 °C. This correlation was made by calculating the heat transfer coefficient and its phase's presents during the cooling of the specimen. These calculations were obtained based on thermal analysis of the test, through the cooling rates. A thermocouple was installed near from the edge of the specimen to obtain the cooling temperature curves. Based on these informations were estimated uncertainties of measurement temperature ± 23 °C for an evaluation of the reproducibility of the process, even an error of ± 10.3 °C. During the Jominy test, should be considered parameters such as hydraulic pressure suitable austenitizing temperature with a tolerance of ± 6 °C, temperature and water flow. These parameters change the phase heat transfer, and also the flux density and therefore the heat transfer coefficient of heat. It was determined the variation of the heat transfer coefficient versus time $h=f(t)$, and the average value is close to theorycal value, which is approximately 15.3 kW/m².K.

Key-words: Jominy, heat transfer coefficient, end quench, heat, steel.

1. INTRODUÇÃO

Com a constante expansão tecnológica, cresce a exigência por maiores índices de produtividade, demandando redução do tempo dos processos de fabricação. Isso resulta na utilização de matérias-primas, devendo ser de forma eficiente, sem desperdícios, com o compromisso de não afetar negativamente o meio ambiente. No entanto, as máquinas e sistemas mecânicos, como consequência, deverão suportar aos desgastes quanto às solicitações exigidas pelos processos de fabricação.

Para satisfazer as demandas impostas pela produção [1], os aços têm papel fundamental nessa questão, pois através dos tratamentos térmicos associados a estes metais, podem-se obter melhores propriedades mecânicas, e melhor desempenho deste material durante sua utilização.

Este trabalho aborda um tratamento térmico conhecido por têmpera, ou na literatura estrangeira também chamada de “*end-quench test*”, que tem como objetivo alcançar altos níveis de dureza e tenacidade em componentes de metal, principalmente aços.

A têmpera é uma tecnologia muito antiga [2], onde ferreiros experientes obtiveram seus próprios ‘know-how’ para aços temperados. A duração do processo era avaliada simplesmente pelo ruído e vibrações minúsculas que os ferreiros sentiam em suas mãos.

Este tratamento térmico baseia-se no resfriamento rápido do metal, que fora antes aquecido à temperatura de transformação da fase austenítica, chegando ao início da temperatura de formação de martensita [3, 4], onde ocorre a mudança de volume entre as fases, levando à formação de tensões internas no material. Por isso deve-se ser capaz de prever falhas para limitar os níveis indesejáveis de distorção,

trincas, e tensões residuais [3]. Como por exemplo, através de um modelo matemático e um método de simulação computacional [5].

Os tratamentos térmicos de metais está sendo também estudado além da engenharia de materiais e metalúrgica, por outras ciências aplicadas, para a investigação da otimização de processos de têmpera [6, 7].

O método mais utilizado atualmente para avaliar a temperabilidade de um aço é o ensaio Jominy [8], o qual foi padronizado internacionalmente [9] por normas ASTM, SAE e AISI, e no Brasil pela ABNT. Este ensaio foi utilizado como base no estudo de resfriamento de aços no qual o objetivo se insere nesta dissertação. O ensaio Jominy [10] é uma ferramenta que permite entender as transformações de fase do aço, já que possibilita estudar e comparar a evolução microestrutural de diversos tipos de aços, quando submetidos, controladamente, a um rápido resfriamento [11] por extração de calor de uma das extremidades da amostra a partir da região austenítica. Isto é feito por um jato de água de refrigeração que é forçada em contato com uma das extremidades da amostra.

O estudo dos aços para avaliar a temperabilidade, geralmente é dividido em dois modelos [3]: O primeiro modelo considera a evolução da formação de microestruturas através da análise térmica, e este modelo é o mais adotado pelos pesquisadores, segundo referências bibliográficas, pois fornecem detalhes sobre a evolução das transformações de fase de acordo com a análise térmica. O segundo modelo não considera a evolução da formação de microestruturas e utiliza a análise térmica.

É abordado, neste trabalho, o segundo modelo para estudo dos aços, e através de um modelo matemático, serão descritas as curvas de resfriamento, estimando a transformação de fase martensítica, as densidades de fluxo de calor, as etapas de transferência de calor e o seu coeficiente de transferência de calor em relação ao tempo, na extremidade do corpo de prova em contato com o líquido de arrefecimento, durante a realização de um ensaio Jominy, utilizando a padronização segundo a norma ASTM A255-10.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi a análise das curvas de resfriamento adquiridas através do ensaio Jominy, para que através destes resultados em comparação com as fases características de ebulição da água utilizada como fluido de arrefecimento, determinar o comportamento do coeficiente de transferência de calor na interface metal-água e possível determinação da temperatura do início de formação da martensita.

Assim também a inserção das equações do coeficiente de transferência de calor em função do tempo adquiridas, em um modelo matemático em diferenças finitas para a temperabilidade do aço ABNT 1045 submetido ao ensaio instrumentado com termopares [8].

2.1. Objetivos Específicos

- Aquisição das curvas de resfriamento e análise de suas características frente às fases presentes na ebulição da água durante o resfriamento;
- Elaboração de gráficos a partir da curva experimental, obtendo os parâmetros de resfriamento e densidades críticas de fluxo de calor;
- Obtenção de expressões matemáticas a partir dos gráficos relacionando: fluxo de calor, coeficiente de transferência de calor, tempo de ensaio efetivo e temperatura de formação martensítica.
- Correlação dos dados obtidos experimentalmente, com os diagramas, valores empíricos apresentados na literatura e com o aplicativo computacional de simulação Jominy.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Tratamento Térmico - Têmpera

As propriedades mecânicas dos aços dependem de sua microestrutura. A velocidade de resfriamento, microestrutura e dureza estão intimamente relacionadas, e podem ser avaliadas pela temperabilidade, que é um dos critérios para seleção de aços para construção mecânica [12].

O processo de têmpera é sempre acompanhado pela evaporação do líquido de resfriamento na superfície da amostra, onde há a formação de uma interface, na qual os coeficientes de transferência de calor da superfície têm uma grande influência sobre a microestrutura e tensões residuais em amostras de aço [13]. Quando os aços austenitizados são submetidos à têmpera, ocorre a formação de uma camada de vapor no momento de contato do fluido refrigerante com a superfície aquecida [14]. Nesta camada, o líquido é aquecido até a ebulição, e ao mesmo tempo, a superfície é intensamente resfriada.

Logo após a formação da interface metal-água [14], uma determinada densidade de fluxo de calor é liberada, o que vai depender da forma e tamanho da peça a ser processada e a condutividade térmica deste material. Esta transferência de calor é proporcional à espessura do metal a ser resfriado [15], como mostra a Figura 3.1, em que o coeficiente de transferência de calor na interface entre o metal e o fluido de arrefecimento é inversamente proporcional à condutividade térmica do metal.

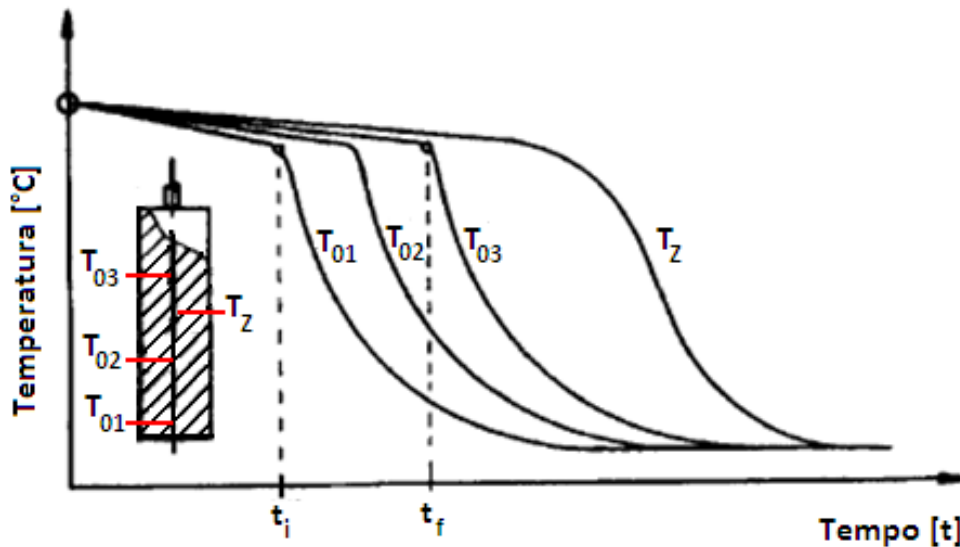


Figura 3.1. Variação da curva de resfriamento em diversas partes de uma peça submetida ao tratamento de têmpera [2].

Para simulação de um processo de têmpera via métodos computacionais [16], o pré-requisito fundamental é conhecer o valor do coeficiente de transferência de calor, calculado em função da temperatura da superfície da peça e o tempo, respectivamente, resultando na curva de resfriamento temperatura-tempo.

No processo de simulação em amostras cilíndricas, a temperatura da superfície e seu coeficiente de transferência de calor [17, 18], para diferentes diâmetros durante a têmpera incluem relações entre as propriedades e os efeitos acoplados entre transformação de fase e temperatura. A maneira de calcular o coeficiente de transferência de calor muda [16] quando ocorre o aumento do diâmetro da peça, pois poderá não ocorrer o surgimento da película/filme de ebulição.

Além disso, uma variedade de fluidos, incluindo ar, névoa, água, óleo e gases têm sido usados como meios refrigerantes. A eficácia dos diversos meios de refrigeração [15] pode ser comparada através das taxas de transferência de calor. As taxas de resfriamento alcançadas pelo metal, de acordo com a Figura 3.2, também dependem dos parâmetros operacionais do processo de têmpera.

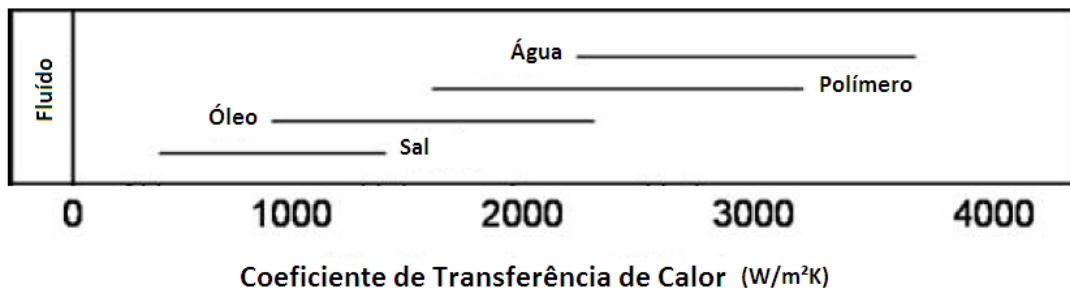


Figura 3.2. Comparação entre diferentes meios de resfriamento para o tratamento de têmpera por imersão e suas taxas de transferência de calor [15].

Embora a água, como imersão, utilizando ou não agitação, ou por jato [15] forneça as maiores taxas de resfriamento, esta não é adequada para todos os tipos de aços. Por isso em alguns tipos de aço é mais adequado o uso do óleo, onde vários autores vêm tentando caracterizar [19] e classificar o óleo adequado à têmpera. Este é um objetivo importante, especialmente porque este processo não é necessário apenas para endurecer o aço, mas também para controlar suas tensões residuais.

A refrigeração por névoa é freqüentemente utilizada em processos que envolvam a extração de calor rápida de um metal por um fluxo com movimento de gás [14], ou ar comprimido seguido de névoa que garanta uma velocidade de resfriamento muito estável, que permanece inalterado pela condição da superfície, e, portanto, garante propriedades estáveis da peça de aço.

A capacidade de refrigeração da névoa [15] é devido à absorção de calor pelo gás e o calor de vaporização da água, podendo aumentar significativamente a sua capacidade de refrigeração. Além disso, tem-se resfriamento utilizando gases inertes sob pressão, obtendo uma alta taxa de resfriamento.

Existem métodos de têmpera [20] para as peças de aço, que utilizam revestimentos de isolamento térmico na superfície, a fim de intensificar a transferência de calor na região de transformações martensíticas, na tentativa de aumentar a dureza da área tratada.

No entanto, é difícil aplicar revestimentos uniformemente sobre a superfície de peças de aço antes da têmpera. Como o processo de têmpera busca a distribuição de dureza do aço [13] através do corpo da peça, este depende de vários fatores, tais como:

- Composição da liga, tipo de aço, geometria da peça e/ou sua massa;
- Microestrutura antes do tratamento térmico;
- Tamanho de grão austenítico;
- Tipo de têmpera aplicada, o método de têmpera, e o seu processo como um todo.

A variação destas propriedades [20] com a temperatura tem sido objeto de investigação. Os resultados obtidos são muito dependentes às condições experimentais, o que pode levar a discrepâncias consideráveis nos valores obtidos.

3.2. Ensaio Jominy

A invenção de Walter E. Jominy [8, 9] refere-se a um teste de temperabilidade para determinar a capacidade de um aço endurecer a certa profundidade da superfície da amostra.

O objetivo principal [11] foi simplificar o teste de temperabilidade de forma que o tornou mais prático em relação aos outros testes até então utilizados para este fim.

Neste ensaio, o corpo-de-prova é aquecido até a temperatura de austenitização do aço do qual o mesmo é fabricado e resfriado rapidamente em condições padronizadas, através de um jato d'água [21]. A Figura 3.3 ilustra a invenção de Walter E. Jominy no ano de 1939.

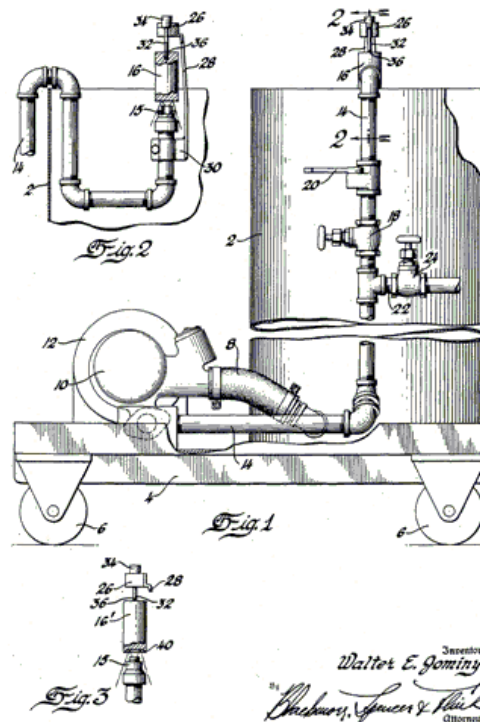


Figura 3.3. Invenção de Walter E. Jominy para o ensaio de temperabilidade [11].

O ensaio Jominy é um dos métodos mais confiáveis e comuns usados para o endurecimento de aços, sendo excelente para a caracterização da temperabilidade de aço, embora seja possível de realizá-lo com outros refrigerantes ao invés de água, isso é raramente feito [22].

Enquanto o aço é resfriado em um processo de têmpera tradicional, consideram-se quatro estágios de têmpera [2, 16, 23], na qual se observam diferentes fases [2, 14, 16], choque térmico, película de vapor, ebulição nucleada e convecção no meio em que a amostra se encontra. As características e equações que determinam estes processos serão detalhadas posteriormente.

Em resumo, o primeiro estágio [16] é onde ocorre choque térmico, e pequenas bolhas de vapor crescem em tamanho e número até que se destacam a partir da parte da superfície aquecida, formando uma camada de vapor. Após o choque térmico [12, 14], o resfriamento é muito lento devido à camada de vapor, filme de ebulição, que paira sobre a superfície: a água é impedida de entrar em contato com a superfície da peça e o calor é retirado através de pequenas “explosões” das bolhas. Na terceira etapa, [12, 14], que caracteriza maior resfriamento, o calor é retirado pelas bolhas de vapor, pois a temperatura é baixa o suficiente para permitir um contato

momentâneo entre o líquido e a peça. E por fim, a quarta etapa [12, 14], é caracterizada pela baixa taxa de resfriamento. Não há vaporização e o calor é retirado por condução e convecção do líquido.

Durante a determinação da profundidade de endurecimento [23], a sua composição, temperatura, os efeitos térmicos causados pelo ambiente na amostra, e a pressão hidráulica normalizada têm papéis muito importantes. Considerando a distância normalizada [24] entre a superfície da amostra aquecida na temperatura de austenitização e o bocal de saída do jato de água, haverá uma pressão hidráulica de aproximadamente 637,4 Pa. Se a pressão da água durante o ensaio diminuir, a dureza diminuirá gradualmente na amostra.

3.3. Temperabilidade do Aço Segundo a Norma ASTM A255-10

O procedimento para determinar a dureza do aço se dá através do ensaio Jominy. Este método descrito para cálculo da dureza pela norma é aplicável somente para a faixa de composição química descrita na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Faixa de composição química máxima segundo a ASTM A255-10 [24].

| Elemento | Faixa de composição máxima em % em peso |
|------------|---|
| Carbono | 0,10 – 0,70 |
| Manganês | 0,50 – 1,65 |
| Silício | 0,15 – 0,60 |
| Níquel | 1,50 |
| Cromo | 1,35 |
| Molibdênio | 0,55 |
| Cobre | 0,35 |
| Vanádio | 0,20 |

A dureza ou temperabilidade do aço é uma medida da profundidade na qual o aço deverá endurecer quando resfriado da sua temperatura de austenitização. A seguir, tem-se a Tabela 3.2 conforme a norma em questão, informando as temperaturas padronizadas de austenitização para diversos tipos de aços com concentrações diversas de carbono. As amostras com presença de boro deverão ser vistas de forma distinta em relação às amostras sem presença significativa de boro.

Tabela 3.2. Temperaturas de normalização e austenitização segundo a ASTM A255-10 [24].

| Série do aço | Conteúdo máximo de carbono [%] | Temperatura de Normalização [°C] | Temperatura de Austenitização [°C] |
|---|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1000, 1300, 1500, 3100, 4000, 4100, 4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 5000, 5100, 6100, 8100, 8600, 8700, 8800, 9400, 9700, 9800. | ≤ 0,25 | 925 | 925 |
| | 0,26 – 0,36 | 900 | 870 |
| | ≥ 0,37 | 870 | 845 |
| 2300, 2500, 3300, 4800, 9300 | ≤ 0,25 | 925 | 845 |
| | 0,26 – 0,36 | 900 | 815 |
| | ≥ 0,37 | 870 | 800 |
| 9200 | ≥ 0,50 | 900 | 870 |

Para a normalização e austenitização da amostra têm-se uma tolerância de $\pm 6^{\circ}\text{C}$ sob a temperatura alvo, que depende da composição química do aço.

A normalização, ou alívio de tensão, ilustrada na Tabela 3.2, consiste no aquecimento do aço a uma determinada temperatura e em mantê-lo nesta temperatura o tempo necessário até atingir sua total transformação estrutural e seguir com um resfriamento ao ar. Tem por objetivo principal, refinar a granulação e conferir ao aço, estruturas uniformes com as características normais de sua composição.

Em relação à questão de segurança nos ensaios, a norma não aborda este tipo de assunto, deixando para o executor do ensaio a responsabilidade de estabelecer práticas para análise e manuseio do material com segurança.

Quanto ao procedimento de ensaio Jominy, como mostra o fluxograma da Figura 3.4, pode-se dividi-lo em etapas: Confeção do corpo de prova (amostra), Descrição do dispositivo de ensaio; Descrição de aquecimento (austenitização) e de seu resfriamento (têmpera); Preparação da amostra para medição de dureza.

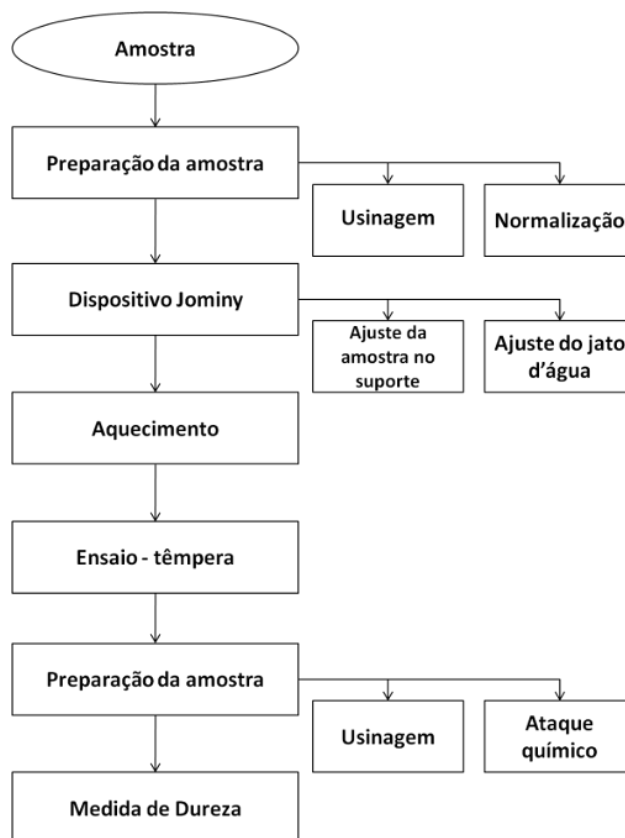


Figura 3.4. Fluxograma dos passos para a execução do ensaio segundo Norma ASTM A255-10 [24].

3.3.1. Confecção do Corpo de Prova

A amostra deverá ter 1,0 polegada (25,4 mm) de diâmetro por 4,0 polegadas (101,6 mm) de comprimento, com disponibilidade para fixá-la na posição vertical para realizar o processo de têmpera, através do jato d'água posicionado a 0,5 polegadas (12,7 mm) abaixo da amostra, como mostra a Figura 3.5.

Além disso, a amostra deverá ser proveniente de uma barra de aço anteriormente normalizada como especifica a norma, e será descrito mais adiante em procedimentos do ensaio.

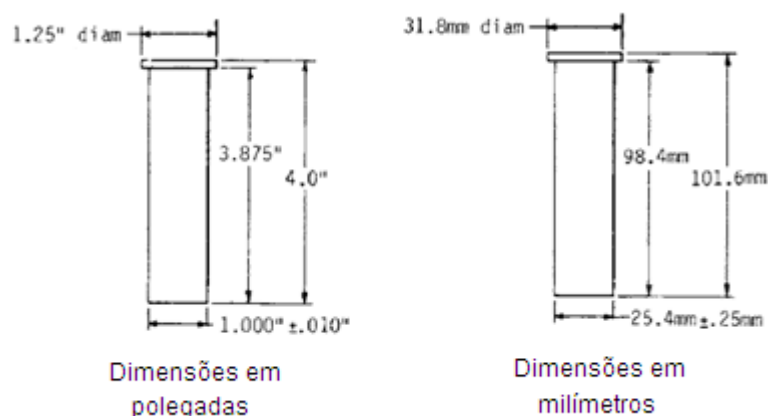


Figura 3.5. Dimensões padronizadas para a confecção do corpo de prova a ser ensaiado [24].

3.3.2. Descrição do Dispositivo de Ensaio

O dispositivo de resfriamento utilizando água deverá ter capacidade adequada para fornecer um fluxo vertical de água que possa ser controlado a uma altura de 2,5 polegadas (63,5 mm) ao passar através de um orifício de 0,5 polegadas (12,7 mm) de diâmetro. Maiores detalhes são apresentados no Capítulo 4.

Entre dispositivos e materiais solicitados, está um tanque com capacidade suficiente para manter a temperatura da água, com uma pequena bomba e válvulas de controle, e também o sistema de fornecimento de água deve ser implementado com uma válvula de abertura rápida.

3.3.3. Normalização e Austenitização

A amostra que foi usinada através de uma barra do aço do tipo desejado para estudo, deverá ser normalizada para garantir característica adequada de endurecimento. A amostra deve ser aquecida na temperatura listada na Tabela 3.2 por 1 hora e após resfriada ao ar.

Após o processo de normalização da amostra usinada, esta deverá ser colocada em um forno aquecido na temperatura especificada de austenitização (Tabela 3.2) e manter-se a esta temperatura por 30 minutos. A Norma ASTM 255-10 dá uma tolerância de um período de até 35 minutos que pode ser usado sem afetar

significativamente os resultados. Existe a possibilidade do aquecimento da amostra seja na posição vertical em um recipiente com uma tampa facilmente removível, para não haver perda de calor excessiva por efeito de convecção.

O dispositivo de ensaio deverá ser ajustado para que o fluxo de água suba a uma altura livre de 2,5 polegadas (63,5 mm) acima das 0,5 polegada (12,7 mm) de distância entre o orifício de saída de água e o corpo de prova como mostra a Figura 3.5. Mas esta altura é mensurada sem a presença do corpo de prova.

O suporte para a amostra deve estar seco no início de cada teste. Logo após a amostra ser retirada do forno, coloca-se no suporte para que a sua face inferior esteja a 0,5 polegada (12,7 mm) acima do orifício de saída de água. O tempo entre a retirada da amostra do forno e o início da têmpera não deve ser superior a 5 segundos. O fluxo de água deverá estar a uma temperatura de 5 a 30°C, para chocar-se à face inferior da amostra por um período não menor que 10 minutos.

Deve-se manter um ambiente sem circulação de ar, ao redor da amostra durante o resfriamento. Se a amostra não resfriou completamente quando removida do equipamento, imediatamente resfriar em água.

3.3.4. Preparação da Amostra para Medição de Dureza

São retificadas duas pistas laterais opostas entre si a 180° com uma profundidade de 0,015 polegada (0,38 mm) em todo o comprimento da barra para a realização das medições de dureza na escala Rockwell C.

As alterações nas profundidades de retificação podem afetar a reprodutibilidade dos resultados e correlação com as taxas de resfriamento da amostra.

A preparação dos dois planos deve ser realizada com bastante cuidado, os planos devem ser mutuamente paralelos e a retificação realizada feita de tal maneira que nenhuma mudança ocorra na estrutura da amostra ensaiada.

Cortes com refrigeração a água, e um disco de retificação grosso são recomendados para evitar o aquecimento da amostra.

A fim de detectar possíveis alterações devido à retificação, as pistas podem ser atacadas quimicamente. Primeiro lava-se a amostra com água quente e mergulha-se na solução. Utilizar 5 % de ácido nítrico diluído em 95 % de água até a amostra escurecer. Após lava-se novamente em água quente. Mergulha-se novamente por um período de 3 segundos a solução 50 % de ácido hidrocloreídrico diluído em 50 % de água, sendo finalmente lavada em água quente e seca em jato de ar. A presença de áreas mais claras ou mais escuras indica que a dureza e a estrutura foram alteradas na retificação.

Quando realizado o ensaio de dureza, o corpo de prova deverá repousar sobre um de seus planos em um anteparo firmemente ligado à máquina de dureza. É importante que nenhum movimento vertical seja permitido quando a carga maior é aplicada, também deve ser construído um dispositivo para mover o corpo de prova após o penetrador em passos precisos de 1/16 polegada (1,5 mm).

O centro da primeira impressão deve estar $0,0625 \pm 0,004$ polegada ($1,5 \pm 0,10$ mm) da parte inferior da amostra, sendo mais importante para a precisão da medida, a posição do penetrador quando forem testados aços com baixa temperabilidade do que os aços de alta temperabilidade.

3.4. Microestruturas – Formação da Martensita

O resfriamento até a temperatura ambiente de uma peça de aço aquecido à temperatura austenítica pode levar a formação de martensita [25], uma fase muito dura, em que o carbono, anteriormente em solução sólida na austenita de estrutura FCC, permanece em solução nesta nova fase que tem estrutura BCC, como mostra a Figura 3.6.

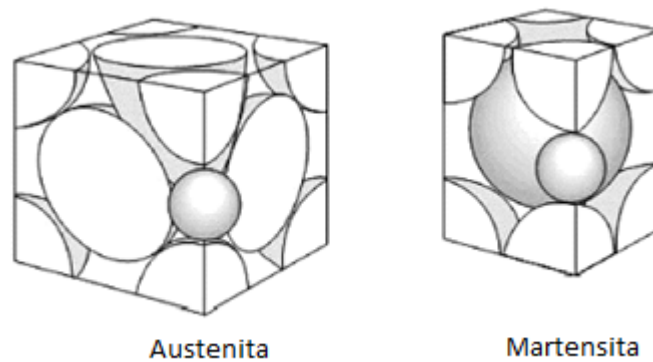


Figura 3.6. Rede cristalina das fases presentes no aço durante a têmpera[7].

A transformação martensítica [26] depende da composição química, da temperatura de ensaio, e a quantidade de tensão transmitida ao material. A formação de martensita pode ser induzida termicamente ou por tensão mecânica.

A temperatura na qual ocorre a transformação da austenita para martensita [27], durante o resfriamento de aços, é chamada como M_S , e os fatores que afetam seu valor têm sido amplamente investigados. Sabe-se que a M_S é fortemente dependente da composição química da austenita.

A temperatura de início de formação da martensita M_S [4, 28] é um dos parâmetros termodinâmicos mais importantes no tratamento térmico do aço, por causa de sua influência sobre a tendência de causar trincas e empenamento pelo processo de têmpera, como por exemplo, na soldagem de aço estrutural, pois controlam as tensões residuais em uma solda [31].

Pesquisas apontaram que o carbono é o elemento de liga com a maior influência na redução dos valores M_S [27, 29, 30].

O efeito do carbono tanto em M_S quanto em M_F [25] são mostrados na Figura 3.7. A martensita é referida como uma transformação [32, 33, 40], altamente cristalográfica, porque é gerada por uma deformação específica da austenita.

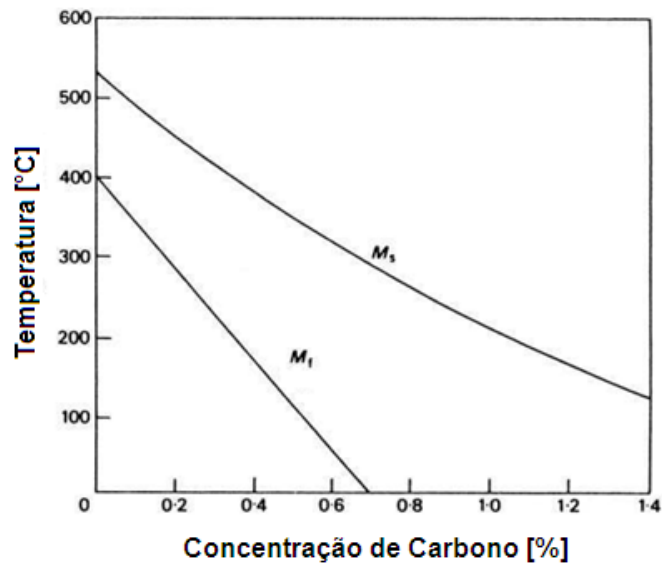


Figura 3.7. O efeito do carbono no início e fim da fase martensita [25].

Os principais métodos de previsão da temperatura de formação da martensita M_s [32] podem ser classificados como:

- Métodos estatísticos ou empíricos: São métodos que expressam a temperatura M_s em termos de equações regressivas em função da composição da liga. Apesar da sua simplicidade, os métodos empíricos têm muitas deficiências: não podem ser usados fora da faixa de composição em que tenham sido validados, não fornecem qualquer visão sobre o mecanismo da transformação martensítica, e não levam em conta fatores como a microestrutura ou a história térmica da amostra, sendo que sua exatidão é limitada.

- Métodos semi-físico: Estabelecem uma relação estatística entre as temperaturas M_s e T_0 , sendo esta última determinada a partir de bases de dados termodinâmicos. O pressuposto básico é a existência de uma correlação entre a força motriz para a formação martensítica (e, portanto, a temperatura M_s), e a temperatura T_0 . A precisão desses métodos é superior ao dos métodos empíricos.

- Métodos Redes Neurais: Artificial Neural Network (ANN): Recentemente, foi proposta uma abordagem estatística mais refinada, podendo fornecer estimativas da incerteza associada às previsões, aumentando o nível de confiança nas faixas de composição fora do intervalo de validação. No entanto, a flexibilidade oferecida por

esses métodos pode causar problemas de superestimação.

- Métodos termodinâmicos: Estas abordagens usam a estrutura termodinâmica desenvolvidas aplicando modelos para obter os termos não químicos nas Equações termodinâmicas.

3.4.1. Diagramas de Transformação

Os diagramas de Temperatura, Transformação e Tempo em condições de resfriamento contínuo, normalmente conhecidos como diagramas TTT ou CTT (*Continuous Temperature Transformation*), são muito importantes na concepção de processos termomecânicos dos aços [15, 41]. Isto pode ser ilustrado através do diagrama, para o aço eutetóide [15], conforme Figura 3.8.

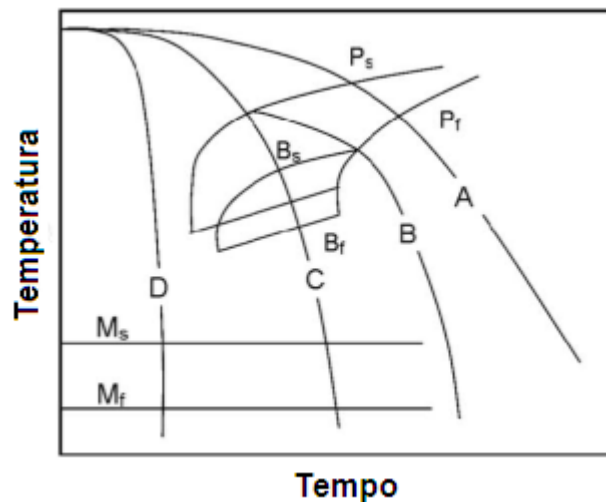


Figura 3.8. Exemplo de diagrama de resfriamento contínuo [15].

Na Figura 3.7, as microestruturas [15] perlita, bainita e martensita possuem suas temperaturas iniciais de formação (P_s , B_s , M_s) e finais (P_f , B_f , M_f) marcadas. Sobrepondo as curvas de resfriamento sobre este diagrama de transformação, as fases esperadas a partir da transformação podem ser identificadas.

Analisando os caminhos de A até D, tem-se a microestrutura desejada para a taxa de resfriamento aplicada. Se um caminho de resfriamento rápido é realizado, como os caminhos C e D, chegam-se à estrutura martensítica, sendo que no caminho D esta é mais frágil [28] devido aos estresses sofridos pelas altas taxas de

resfriamento.

A Figura 3.9 mostra a transformação em resfriamento contínuo para o aço SAE/ABNT 1045. A transformação acontece ao longo de uma queda contínua de temperatura. Estabelecendo uma condição de resfriamento contínuo [8], contudo, as estruturas resultantes serão formadas em faixas de temperaturas, e, portanto, serão misturas de tais estruturas. Observando os diferentes resfriamentos da Figura 3.9 nota-se que é possível formar frações de ferrita, perlita, bainita e martensita.

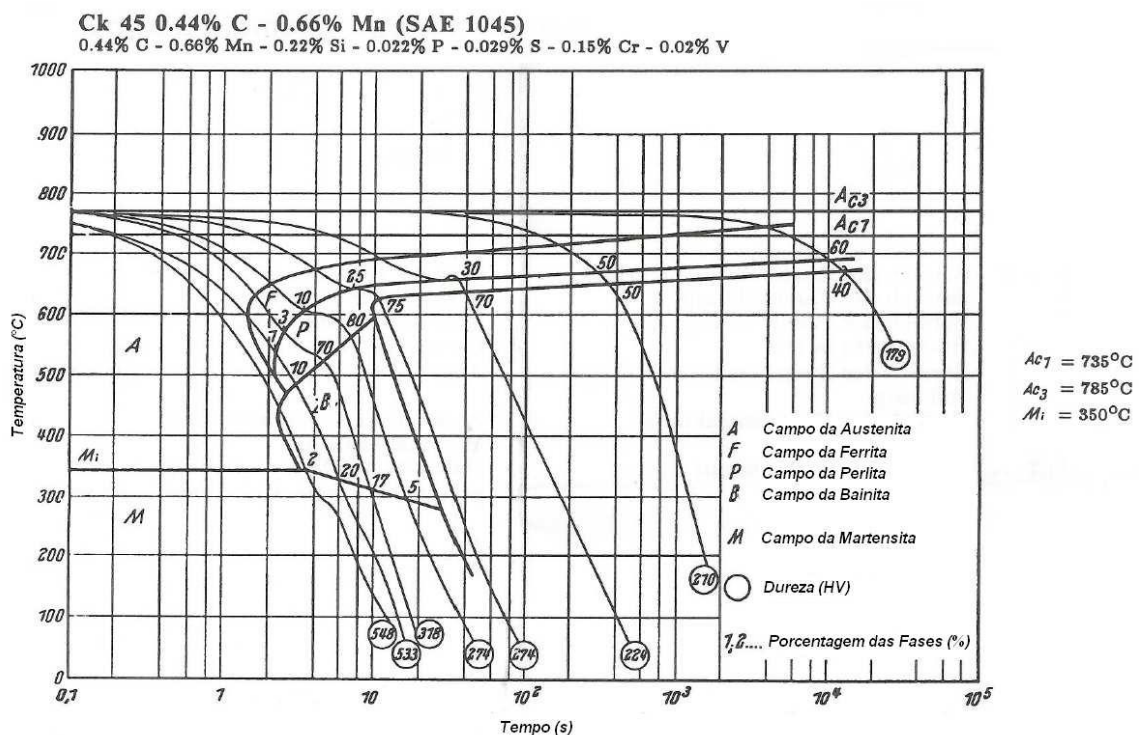


Figura 3.9. Curva de resfriamento contínuo para o aço ABNT 1045 [8].

3.5. Tempos de Resfriamento para Corpos de Formatos Distintos

O problema da determinação do tempo de resfriamento para corpos de qualquer formato durante têmpera [14, 42] é admitir para a parte de aço de um determinado formato, resfrie uniformemente da superfície para o núcleo a partir de uma temperatura inicial T_0 para dada temperatura T aproximando-se da temperatura do início da formação de martensita T_{MS} .

A temperatura T_0 refere-se à temperatura de austenitização que fica na faixa

entre 800°C e 1200°C [24], para aços médio carbono e aços alto carbono, o início da martensita está entre 100°C e 360°C [14], existindo uma relação de temperatura entre T_0 e T_{MS} de forma adimensional, como mostra a Equação 3.1.

$$\frac{T_{MS} - T_M}{T_0 - T_M} \leq 0,4 \quad (3.1)$$

Onde:

T_{MS} : temperatura do início da formação de martensita (°C, K)

T_0 : temperatura de austenitização (°C, K)

T_M : temperatura de arrefecimento (°C, K)

A temperatura T_M é a temperatura de arrefecimento. Geralmente é adotado o valor de temperatura entre 5°C e 30°C [24], para o resfriamento realizado através de jatos de água. Normalmente, um processo térmico uniforme é estabelecido quando o fator é igual a 0,8 [14].

Assim, como T_{MS} é um valor aproximado [14] durante o processo de têmpera, é observada a condição de uniformidade do processo. Com base no processo térmico uniforme é possível obter uma equação para o cálculo do tempo de resfriamento para os corpos de qualquer formato.

Supõe-se geralmente que, durante a têmpera, a ação da água no aço aquecido entre 800°C e 1000°C [14] possui três modos de transferência de calor, baseada na lei de Fourier, que prevê uma densidade de fluxo de calor extremamente alta no início do processo de têmpera. A lei de Fourier é descrita como mostra a Equação 3.2.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

Onde:

q: Densidade de fluxo de calor (W/m²)

k: Condutividade térmica do aço (W/mK)

$\frac{dT}{dx}$ Gradiente de temperatura (K/m)

3.6. Transferência de Calor - Características

A ordem de ocorrência dos modos de transferência de calor com o resfriamento do aço austenitizado está dividida em quatro etapas [13, 14]:

- Choque térmico devido ao vapor;
- Película, ou filme de vapor;
- Ebulição nucleada;
- Transferência de calor por convecção.

Na prática, a têmpera passa por um estado de resfriamento não estacionário e todos esses mecanismos de transferência de calor podem coexistir simultaneamente na superfície de arrefecimento, complicando a solução teórica do processo de têmpera real.

Após o choque térmico inicial [13], as três fases subseqüentes são caracterizadas por diferentes modos de transferência de calor, o que contribui para diferentes intensidades de resfriamento, conforme ilustra a Figura 3.10.

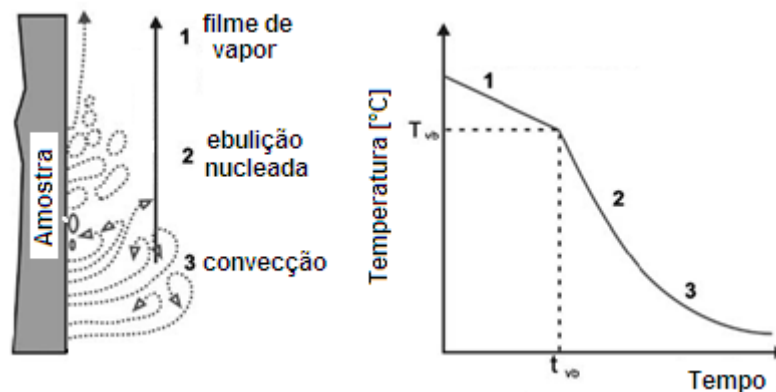


Figura 3.10. Etapas de transferência de calor subseqüentes ao choque térmico [13].

Os processos de ebulição [2] podem proceder de duas maneiras diferentes, como mostrados na Figura 3.16, pois dependem da densidade crítica de fluxo de calor. Estudos experimentais [2, 14, 20] têm mostrado que a capacidade de resfriamento de líquidos é caracterizada principalmente por duas densidades críticas de fluxo de calor.

Na Figura 3.11, T_M é a temperatura do meio, T_S é a temperatura de ebulição/saturação do líquido refrigerante, e T_{SF} é a temperatura da superfície da amostra, onde é aplicável apenas no choque térmico inicial e convecção livre durante o resfriamento. Quanto às densidades críticas de fluxo de calor, têm-se três parâmetros q_{IN} , densidade inicial de fluxo de calor e as densidades q_{cr1} e q_{cr2} , que são críticas à determinação da mudança processo.

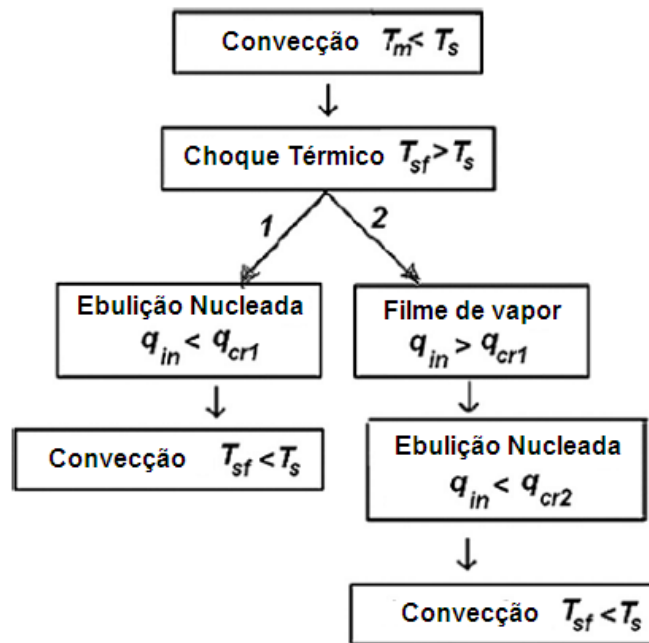


Figura 3.11. Fluxograma com os modos de transferência de calor em um processo de resfriamento [2].

Quando ocorre o processo de formação da película de vapor [2], surgem três processos de transferência de calor: a película de ebulição, ebulição nucleada e convecção. Mas se há ausência desta película, ou filme de ebulição, apenas dois processos de transferência de calor podem ser observados, ebulição nucleada e convecção.

A Figura 3.12 mostra as curvas em escala logarítmica de resfriamento, após o processo inicial de convecção ao ambiente e o choque térmico. O gráfico ilustra a linha 1 com taxas de resfriamento maiores em relação à linha 2, onde há a ausência da película de ebulição, e a linha 2 de resfriamento, onde ocorre esta película.

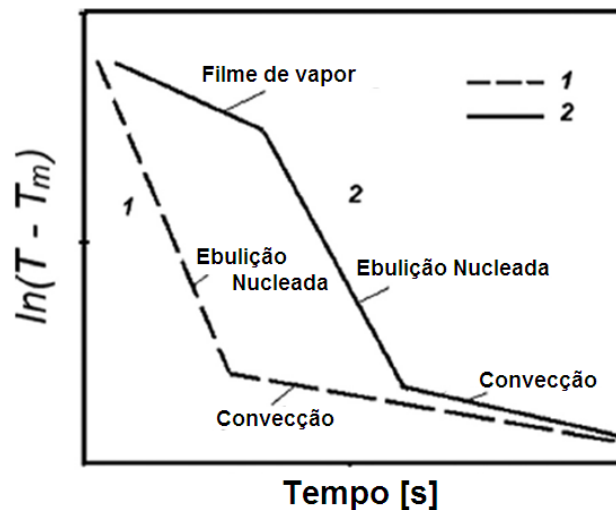


Figura 3.12. Duas situações dos modos de transferência de calor das curvas de resfriamento durante têmpera [2].

A velocidade de propagação da frente de resfriamento depende de diversas propriedades físicas da amostra e do meio de resfriamento [13], incluindo as seguintes:

- Distribuição da temperatura na amostra;
- Coeficiente transferência de calor perto da superfície da amostra;
- Condições de superfície, rugosidade, revestimentos de superfície diferentes, tais como óxidos, substâncias orgânicas, etc;
- Geometria da amostra;
- Temperatura Leidenfrost dos meios de resfriamento da têmpera, vide Capítulo 3.6.1.1;
- Viscosidade dinâmica, calor específico, e da tensão superficial;
- Temperatura durante o resfriamento por convecção.

3.6.1. Choque Térmico Devido ao Vapor

Este é o primeiro estágio de resfriamento [14], que ocorre imediatamente após o líquido entrar em contato com a superfície do aço aquecido. Esta etapa é raramente considerada na maioria das literaturas sobre processos de têmpera.

A presença de choque de ebulição, ou choque térmico, é raramente detectada

[20], maioria dos experimentos de caracterização de curvas de resfriamento e muitas vezes este efeito é considerado sem importância. A Figura 3.13 ilustra dois modelos de geração de bolhas na fase de choque térmico.

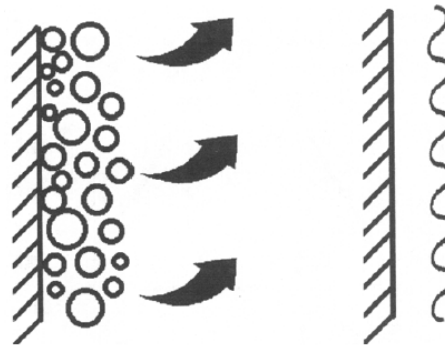


Figura 3.13. Comparação entre modelos de Tolubinski e Kutateladze, para geração de bolhas durante o choque térmico [20].

Esta fase inicial de resfriamento ocorre durante um período muito curto de tempo: o líquido relativamente frio fluindo ao longo da superfície do aço quente. A transferência de calor durante este curto período de tempo é primeiramente por convecção.

Devido à grande diferença de temperatura entre a superfície quente da peça e da temperatura de resfriamento [16], a camada de líquido em contato com a superfície quente aquece na temperatura de ebulição em média, cerca de um décimo de segundo (0,1 s). Então começa a formação de pequenas bolhas de vapor, seguido rapidamente por bolhas maiores, que crescem em tamanho e número até que se destacam da superfície da peça em torno da parte quente, formando uma manta de vapor. A formação da manta de vapor sobre a superfície é o fim do modo de choque de ebulição, e no início do segundo modo de transferência de calor, a película de vapor.

De acordo com alguns autores, [14, 16], esta fase inicial é muito importante, pois inicia a dinâmica de transferência de calor que afeta diretamente o processo de têmpera e, portanto, todas as propriedades da peça, que dependem de muitos fatores, incluindo:

1. Propriedades térmicas e físicas do líquido utilizado e o metal a passar pelo processo, por exemplo, a viscosidade a capacidade de calor específico, condutividade térmica [43], densidade e tensão superficial;
2. Temperatura do líquido de arrefecimento;
3. Temperatura da superfície em contato com o líquido de arrefecimento;
4. Rugosidade da superfície em contato com o líquido de arrefecimento;
5. Transferência de calor convectiva na interface da peça e do líquido.

3.6.1.1. Efeito Leidenfrost

É chamado de efeito Leidenfrost [44] devido ao nome do pesquisador alemão que relatou o fenômeno de gotas flutuantes sob uma superfície quente, por volta de 1750, como mostra a Figura 3.14.

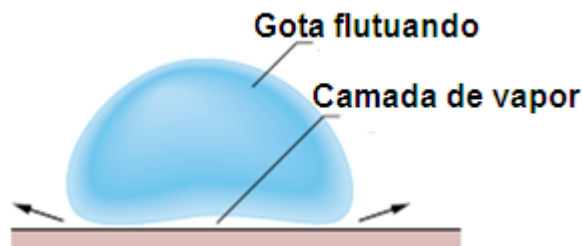


Figura 3.14. Bolha d'água sob uma camada de vapor [45].

Quando uma gota de líquido é depositada sobre um sólido quente [44], na temperatura próxima da temperatura de ebulição do líquido, a gota ferve e rapidamente desaparece. Mas se a temperatura do sólido [45] for muito maior do que o ponto de ebulição, não haverá mais contato inicial direto com a superfície do sólido, pois esta gota levitará sob sua própria camada de vapor.

Isto se deve a interface líquido/vapor próxima à superfície [46] ser empurrada pela pressão de vapor antes de entrar em contato com a superfície. Devido às propriedades isolantes deste filme [44], ou camada, a evaporação é lenta. Além disso, a ausência de contato entre o líquido e o sólido impede a nucleação de bolhas, de modo esta não entrará em ebulição.

A produção de bolhas e colunas de vapor é chamada de ebulição nucleada [69], porque a formação e crescimento das bolhas dependem de fendas que servem como locais de nucleação.

Atualmente, estudos detalhados estão sendo desenvolvidos sobre a dinâmica da rápida formação deste filme, ou película, onde a comparação do tempo de formação do filme com o tempo de ebulição do líquido fornece um critério para a determinação da temperatura Leidenfrost. A caracterização da temperatura Leidenfrost [44], depende de fatores como a rugosidade da superfície sólida [46], a pureza do líquido que pode afetar a vida útil desta gota, e até mesmo na maneira que o líquido é depositado e a sua velocidade de queda [47].

Os mecanismos básicos de resfriamento ainda não são bem compreendidos, devido às dificuldades de tecnologia em acompanhamento e execução dos testes de ebulição em altas temperaturas. Para uma melhor compreensão da transferência de calor entre uma superfície de ebulição quente e um fluido, alguns ensaios são realizados sob condições de estado estacionário [65].

Sob condições de estado estacionário [48, 49], o estudo da transferência de calor a partir de uma superfície quente com controle da temperatura permite a determinação de curvas de ebulição e a identificação de cada regime de ebulição e de convecção.

Ao projetar um processo de têmpera [15], muitas vezes é desejável maximizar o tempo em que a temperatura da superfície é maior que a temperatura Leidenfrost, minimizando a taxa de resfriamento e assim permitindo que o aço se torne suficientemente rígido para resistir à deformação plástica, que poderá levar ao aumento de distorção.

3.6.2. Película de vapor

Durante esta etapa, a superfície é totalmente cercada por uma película de vapor, no caso da água. O fluxo de calor [14], ou seja, o calor que passa através da superfície da peça, lentamente diminui à medida que a superfície da peça e seu

núcleo são resfriados, então o processo de filme de ebulição torna-se instável.

A taxa de transferência de calor ocorre logo após o choque térmico [50], definindo a primeira densidade de fluxo de calor crítica, q_{cr1} (indica a quantidade de energia transferida de uma determinada área).

A camada de vapor começa a diminuir de volume em algumas áreas da superfície da peça, até que se inicia o processo ebulição nucleada, ou seja, surgimento de bolhas. Estas condições de transferência de calor ao longo da superfície durante a transição de película de vapor para o surgimento de bolhas, juntamente com as mudanças no volume do aço (mudança de fase da austenita para martensita), são os principais contribuintes para as distorções durante a têmpera.

Além disso, com a diminuição da camada de vapor, o líquido começa entrar em contato com a superfície da peça diretamente. A temperatura da superfície da peça, neste período de tempo não deve ser associada com a temperatura Leidenfrost, pois, se deve a condições desiguais de transferência de calor.

A duração desta etapa de transferência de calor depende de muitos fatores, incluindo a forma da peça e seu tamanho, o meio e a temperatura de refrigeração se foram utilizado outros métodos como agitação ou convecção forçada e incluindo as propriedades físicas do material. O período pode durar de alguns segundos a dezenas de segundos.

3.6.3. Ebulição Nucleada Transitória

A ebulição nucleada [23] é caracterizada por uma elevada taxa de extração de calor na superfície da peça, devido à formação de bolhas sobre a superfície da peça. A ausência da camada de vapor permite que mais partes da superfície da peça sejam expostas ao líquido de arrefecimento, causando o aumento do fluxo de calor da superfície da peça.

Em ambientes [13] cujo fluido de resfriamento é sempre acompanhado pela fase de evaporação do meio em contato com a superfície da peça, esta etapa varia entre

100 e 300 °C à pressão normal.

Além de ser um modo rápido de transferência de calor, é um modo mais estável e mais uniforme de resfriamento. Comparada com o modo anterior, a película de vapor geralmente está associada às distorções na peça. No resfriamento [13], o filme de vapor gradualmente decai de forma que uma fase de ebulição nucleada ocorre em algumas partes da superfície da peça com uma temperatura inferior à temperatura Leidenfrost. Este é representado pela curva de Nukiyama (Figura 3.15).

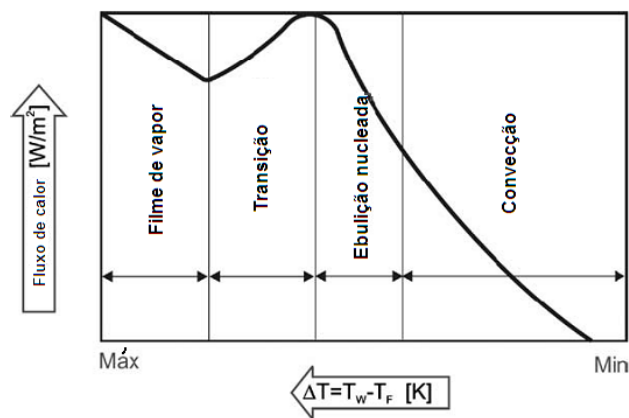


Figura 3.15. Curva de Nukiyama para diferentes estágios de ebulição durante o tratamento de têmpera.

O tempo de duração real da ebulição nucleada em torno da peça depende de muitos fatores, tais como a forma da peça, tamanho e propriedades físicas do meio da têmpera. A Figura 3.16 [14] apresenta a mudança da temperatura de superfície da peça (T_w) durante a têmpera. Durante a ebulição nucleada, a temperatura da parte da superfície cai quase à temperatura de ebulição da água.

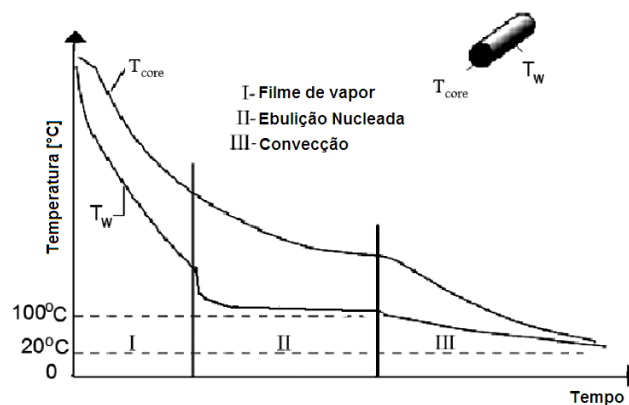


Figura 3.16. Curva típica de resfriamento da superfície (T_w) e núcleo (T_{CORE}) de uma peça [14].

Este patamar na temperatura de superfície da peça durante o modo de ebulição nucleada (ver Figura 3.16) torna esta fase de resfriamento estável [14], designado por pesquisadores como processo de auto-regulação térmica. Com isso, a ebulição nucleada continua, mas a peça está ficando cada vez mais fria, e o fluxo de calor da superfície diminui, surgindo a última fase de resfriamento, o modo de convecção (fase III na Figura 3.16).

O estudo da ebulição nucleada transitória, ou seja, o estudo das bolhas geradas pela ebulição do líquido utilizado no processo da têmpera é de grande importância, pois são usados para controlar as transformações de fase em metais [14, 51], e estão especialmente relacionadas com transformações martensíticas onde a temperatura de início da martensita T_{MS} é comparável com a temperatura da interface de ebulição da camada líquida, neste caso, a água.

Antes do aparecimento de bolhas [52], a camada de ebulição próxima ao elemento de geração de calor, consiste em líquido superaquecido.

A dinâmica que descreve a bolha de vapor altera-se durante a ebulição, e parâmetros como o raio máximo e o seu tempo de crescimento, deverão ser observados. Esta alteração do raio da bolha pode ser expressa da seguinte forma, como mostra a Equação 3.3:

$$R = R_* (1 - e^{-t/\tau_*}) \quad (3.3)$$

onde: τ_* é a constante com dimensão de tempo que representa a mudança do fluxo de energia através da interface bolha/superfície em unidade de tempo (a mudança de densidade de fluxo de calor dq);

R_* é o raio máximo da bolha;

R é o raio atual da bolha.

Enfim, as características internas, descritas acima deverão ser consideradas no estudo do tratamento térmico de têmpera, tanto por imersão da peça quanto por resfriamento à jatos [14].

Então se torna necessário o desenvolvimento de uma equação generalizada para a determinação da duração do processo de ebulição nucleada transitória [14]. É observado que a pressão pode mudar com a temperatura de ebulição, o que pode ser usado para controlar a formação de fase martensítica.

3.6.3.1. Dinâmica e Parâmetros de Bolha

Durante o processo de ebulição de água, o diâmetro de liberação da bolha, d_0 , sobre uma superfície metálica aquecida a pressão atmosférica é cerca de 2,5 mm. Quando a pressão aumenta, diminui o valor de d_0 . Alguns parâmetros, tais como, diâmetro da bolha, a frequência de liberação de bolhas, e vapor de crescimento da taxa de bolha são apresentados na Tabela 3.3. Estes parâmetros variam com o tipo de líquido.

Tabela 3.3. Parâmetros de bolha para água a 100°C [14].

| Diâmetro e frequência de bolhas de acordo com a pressão | | |
|--|---|---------------------|
| Líquido | Parâmetros de Bolha | Valor à 1atm |
| Água a 100°C | Diâmetro das bolhas d_0 (mm) | 2,3 |
| | Frequência de liberação de bolhas f (Hz) | 67 |
| | Velocidade da taxa de desenvolvimento de bolhas $d_0 f$ (m/s) | 0,154 |

Existem pesquisas envolvendo a energia sonora gerada pela formação das bolhas [13] e o seu enfraquecimento, e esta oscilação das bolhas encontra-se na faixa de audição. Pesquisas estão sendo realizadas para encontrar uma proporção do tamanho da bolha de vapor saturado [52], com os dados experimentais, que se baseiam na metodologia de obter o valor de pressão sonora de acordo com a mudança de tamanho da bolha de vapor gerado.

Pode-se confirmar a existência ou ausência de um processo de ebulição nucleada [2], pois este pode ser visto e/ou ouvido, e também pode-se sentir pequenas vibrações da peça durante a têmpera.

Em densidades de fluxo de calor constante, o efeito da temperatura sobre a interface formada pelo metal e o líquido de resfriamento, através de experimentos,

mostraram que não há superaquecimento do líquido dentro desta camada [52].

Para determinar o efeito da variação da densidade de fluxo de calor sobre as características internas de ebulição, através do produto de $d_0 f$. Esta multiplicação ($d_0 f$) é chamada de taxa de desenvolvimento de bolhas de vapor e designada por W'' , como está indicada pela Equação 3.4.

Após numerosos experimentos, foi constatado que o valor médio de W'' é um valor característico para um líquido e seu vapor.

$$W'' = d_0 \cdot f \quad (3.4)$$

3.6.3.2. Propriedades de Superfície

As propriedades da superfície do material, em alguns casos, pode afetar o valor médio de diâmetro d_0 da bolha e a frequência de liberação. Enquanto d_0 muda, as alterações em relação à frequência de liberação de bolhas correspondentes ocorrem da forma inversa. A Tabela 3.4 mostra os valores médios destes parâmetros.

Tabela 3.4. Efeitos da ebulição da água na superfície do material [14].

| Efeitos na superfície do material empregado na liberação de bolhas no caso de ebulição da água à pressão atmosférica | | | |
|---|-----------------------------|--------------|------------------------------|
| | d_0(mm) | f(Hz) | W''(m/s) |
| Média entre os materiais metálicos | 2,5 | 62 | 0,155 |

Outra propriedade a ser observada é a oscilação de temperatura na camada formada pela superfície do metal e o líquido, pois são causadas pelo desenvolvimento de bolhas, e podem ocorrer na superfície de transferência de calor e na interface do líquido em ebulição.

O diâmetro da bolha emitida [14] é um dos principais valores para a avaliação de transferência de calor durante o processo de ebulição nucleada. A densidade de fluxo de calor aumenta assim como a diferença entre a temperatura de superfície da amostra T_{SF} e a temperatura de ebulição do líquido refrigerante T_S , e novos centros

de nucleação são ativados.

3.6.4. Densidades Críticas de Fluxo de Calor

Estudos de transferência de calor [20] considerando os parâmetros termofísicos q_{cr1} e q_{cr2} são de interesse prático para aplicações industriais, tais como usinas nucleares e vários tipos de usinas de energia, onde fluídos de transferência de calor são utilizados e há riscos de sobreaquecimento das superfícies trocadoras de calor.

A Figura 3.17 representa qualitativamente a mudança do fluxo de calor da superfície de uma peça durante a têmpera [14]. Esta é basicamente uma curva de ebulição de Nukiyama, no sentido inverso, pois as curvas típicas de ebulição que são apresentadas em literaturas técnicas são obtidas para as condições de transferência de calor em caldeiras durante um ciclo de aquecimento, enquanto deve-se considerar no processo de têmpera, a transferência de calor partindo de altos valores de temperatura para valores mais baixos.

A primeira densidade crítica de fluxo de calor (q_{cr1}) [20, 53] é o fluxo de calor máximo (q), que normalmente ocorre 0,1s após o contato inicial com a peça metálica quente. O próximo passo é o filme de ebulição. A segunda densidade crítica de fluxo de calor (q_{cr2}) é o fluxo de calor mínimo em que irá ocorrer a transição de filme de ebulição para ebulição nucleada.

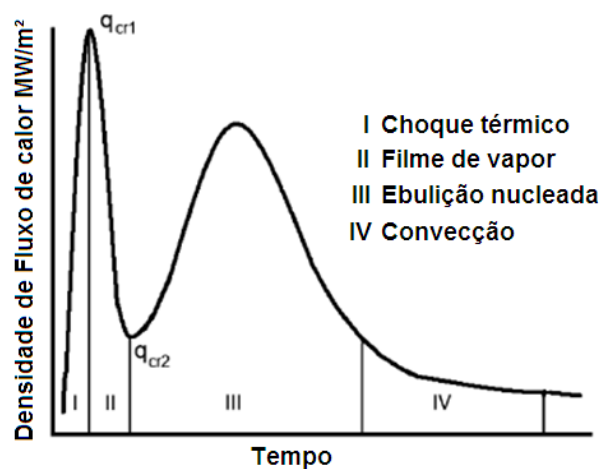


Figura 3.17. Esquema dos modos de transferência de calor durante a têmpera [14].

No modo de ebulição nucleada [2], a segunda densidade crítica de fluxo de calor, q_{cr2} , ocorre quando a película de vapor totalmente decai, e o núcleo de transferência de calor de ebulição toma o lugar daquela película.

Pesquisadores demonstraram (Tabela 3.5) que o quociente q_{cr2}/q_{cr1} é uma relação constante [20].

Tabela 3.5. Relação entre as densidades críticas de fluxo de calor q_{cr1} e q_{cr2} .

| Autor | Constante q_{cr2}/q_{cr1} |
|--|-----------------------------|
| V.I. Tolubinsky | 0,05 |
| S.S. Kutateladze | 0,2 |
| V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukornel | 0,2 |
| V.K. Koshkin, E.K. Kalinin, G.A. Dreytser, S.A. Yarkho | 0,2 |
| N.I. Kobasko, A.A. Moskalenko, G.E. Totten, G.M. Webster | 0,204 – 0,207 |

O coeficiente de transferência de calor [14] pode ser determinado a partir de:

$$\alpha = \beta q^{0,673}, \text{ onde, } \beta = 4,3 \quad (3.5)$$

O coeficiente β envolve propriedades térmicas para os aços em geral, com referência à pressão atmosférica.

Para calcular o coeficiente de transferência de calor e q_{cr2} , é necessário usar as características termofísicas do material, tais como a condutividade térmica e a difusividade. Para o ensaio Jominy, o valor teórico adotado [8] para o coeficiente de transferência de calor a uma distância de 1mm da extremidade do corpo de prova é de 15.000 W/m²K.

O coeficiente de transferência de calor na condição de filme de ebulição pode ser calculado de duas maneiras: pelo método de uniformidade das condições térmicas e pela medição da duração do filme de ebulição no estado não estacionário.

A magnitude do q_{cr2} [20] também é afetada pela condição da superfície do metal. Por exemplo, finos revestimentos metálicos podem ser aplicados ao aço para afetar o comportamento de transferência de calor durante a têmpera.

A segunda densidade crítica de fluxo de calor q_{cr2} é determinada [20] a partir da duração do estado não estacionário da ebulição nucleada e da temperatura média da superfície no ponto de transição de transferência de calor. Além disso, a q_{CR2} pode ser determinada utilizando a relação da Tabela 3.5.

O tempo de transição da ebulição nucleada pode ser determinado acusticamente. A Equação 3.6 serve para determinar q_{cr2} :

$$q_{cr2} = \alpha_{FB}(T_{TRANS} - T_s) \quad (3.6)$$

Onde:

α_{FB} : é o coeficiente de transferência de calor película de ebulição (film boiling),

T_{TRANS} : é a temperatura da superfície do corpo de prova no momento da transição de filme para ebulição nucleada

T_s : é a temperatura de saturação do líquido.

3.6.5. Transferência de Calor por Convecção

Após o término da ebulição nucleada, bem como as densidades críticas de fluxo de calor, a temperatura da superfície diminui da temperatura de ebulição até a temperatura do líquido refrigerante. Resfriamento por convecção é caracterizado por uma taxa de resfriamento mais lenta, sendo mais uniforme ao longo da superfície da peça, ocorrendo apenas o mínimo de distorção durante este processo.

Transferência de calor por convecção [14] é um processo que ocorre entre uma superfície de um corpo sólido e um líquido ou gás, onde o movimento das partículas é possível. Isto se dá, pela ação simultânea de condutividade térmica e convecção.

Existem dois tipos de transferência: natural e forçada. A convecção natural é devido a uma alteração da densidade do fluido com a temperatura sob a influência do campo gravitacional. A convecção forçada ocorre sob a ação de dispositivos externos, por exemplo, uma bomba ou hélice.

A intensidade da convecção é caracterizada pelo coeficiente de transferência de calor α_{conv} , na qual é definida pela equação de Newton-Riemann como mostra a equação 3.7 reescrita:

$$\alpha_{conv} = \frac{Q}{(T_{sf} - T_m) \cdot S} \quad (3.7)$$

onde: Q é o fluxo de calor em W/m²;

T_{sf} é a temperatura de superfície;

T_m é a temperatura de arrefecimento;

S é a área da superfície em m².

Os processos de transferência de calor [14] estão totalmente relacionados com as condições de movimento dos fluidos. Existem dois tipos básicos de fluxo, como mostra a Figura 3.18: laminar, onde o fluxo é caracterizado pelo mínimo de agitação das várias camadas do fluido e o tipo turbulento, na qual o fluido escoa em desordem.

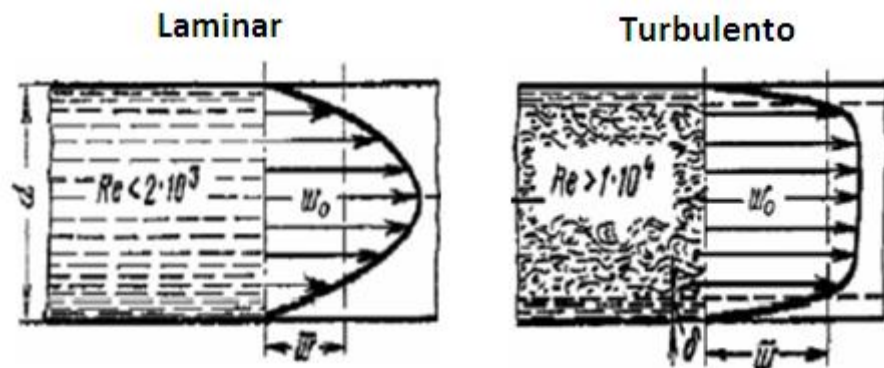


Figura 3.18. Tipos de distribuição da vazão do líquido em um tubo [20].

3.7. Instrumentação – Medidas de Temperatura

Os termopares utilizados neste trabalho [54, 55, 56] são compostos de ligas comerciais do tipo níquel-cromo e níquel-manganês-silício-alumínio, como mostra o Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Designação dos tipos de termopar Segundo a NBR 12771:1999 [56].

| Letra Código | Termoelemento | |
|--------------|----------------|--|
| | Positivo | Negativo |
| K | Níquel - Cromo | Níquel – Manganês – Silício - Alumínio |

As tabelas de referência da Norma NBR 12771:1999 para o termopar tipo K foram desenvolvidas através da aquisição de temperatura em relação à tensão elétrica medida. Isto está associado ao efeito termoelétrico da junção [54].

Função direta [55, 56], para temperaturas acima de 0°C:

$$E = \sum_{i=0}^n C_i \cdot (t_{90})^i + \alpha_0 \cdot e^{\alpha(t_{90}-126,9686)^2} \mu V \quad (3.8)$$

onde 'e' é o logaritmo natural, e 't' a temperatura calculada .

Função inversa [6] para temperaturas acima de 0°C:

$$t_{90} = C_0 + C_1 E^1 + C_2 E^2 + \dots + C_i E^i \text{ } ^\circ C \quad (3.9)$$

A tolerância de um termopar [57, 58] é especificada pelo desvio máximo em graus Celsius em relação aos valores de tensão elétrica nas tabelas de referência da Norma quando a temperatura de referência da junção está em 0°C. A Tabela 3.6 fornece as tolerâncias para termopares tipo K (junção de referencia em 0°C).

Tabela 3.6. Tolerância de um termopar tipo K [58].

| Faixa de utilização | Classe de tolerância 2 |
|---------------------|------------------------|
| -40°C à 1200°C | 2,5°C ou 0,0075x T * |

* A tolerância é expressa na temperatura atual medida.

3.8. Método Estatístico e Interação de Tolerâncias

A declaração do resultado de uma medição somente é completa se ela contiver tanto o valor atribuído ao mensurando quanto a incerteza de medição associada a este valor [60], como mostra a Figura 3.19.

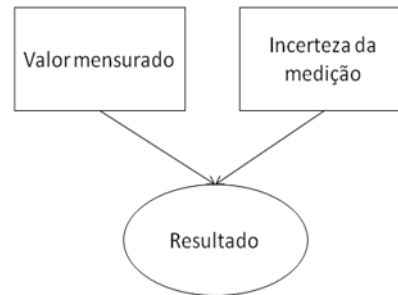


Figura 3.19. Representação gráfica da declaração de um resultado de medição [54].

Tratando o resultado da Figura 3.19 como uma grandeza, a sua incerteza de medição associada é definida como capacidade de medição. Quanto menor a incerteza de medição associada ao mensurando, melhor é a capacidade de medição [61].

O princípio da avaliação da incerteza [62] está na representação do modelo matemático da medição. Este modelo deverá identificar todas as grandezas de entrada que afetam o resultado e a sua incerteza.

Cada variável contida no modelo matemático de medição deve ter seu valor esperado e sua incerteza associada. Assim a incerteza de cada variável é combinada em uma incerteza única, conhecida como incerteza padrão combinada, ou incerteza combinada.

3.8.1. Quantificando a Incerteza de Medição

Para quantificar a incerteza de medição [62, 65], utiliza-se a sua propagação, que consiste na aplicação de uma expansão da Série de Taylor, como indica a Equação 3.10, onde U_c é a incerteza padrão combinada.

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \quad (3.10)$$

A lei de propagação de incerteza permite que a incerteza combinada de um resultado seja incorporada na incerteza de outro resultado no qual a primeira é utilizada, além de calcular intervalos que correspondam a suas probabilidades de abrangência requeridas.

Para isso define-se o modelo matemático da medição [63], ou seja, a relação entre as variáveis e o mensurando, e assim identificar as componentes de incerteza, conhecendo quais os fatores que afetam no seu resultado.

Com o modelo matemático finalizado, estimam-se as incertezas padrão [64], convertendo cada estimativa de componente de incerteza em uma medida equivalente a um desvio padrão, utilizando divisores que dependam do tipo de distribuição de probabilidade de cada componente de incerteza (Quadro 3.2).

Quadro 3.2. Distribuição de probabilidade e suas características [63], [64]

| Distribuição | Fonte de Incerteza | Divisor | Graus de liberdade |
|--------------|---|------------|--------------------|
| Retangular | - Erros máximos admissíveis | $\sqrt{3}$ | Infinitos |
| | - Efeito da resolução de equipamento | | |
| Triangular | - Erros de posicionamento (erro de paralaxe em medidores analógicos, por exemplo) | $\sqrt{6}$ | Infinitos |
| t - Student | - Incertezas herdadas | k | V_{eff} |
| | - Desvio padrão da média | \sqrt{n} | n-1 |

A incerteza de medição geralmente [63] engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A, baseada a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão.

As outras componentes, as quais podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B, podem também ser caracterizadas por desvios padrão estimadas a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.

Após transformar as incertezas estimadas em um desvio através dos divisores, calculam-se os coeficientes de sensibilidade, onde sua função é de converter unidades de medida, obtidas através do cálculo das derivadas parciais do modelo matemático da medição em função de uma das variáveis envolvida no processo.

As incertezas relacionadas a cada variável do modelo matemático da medição deverão ser propagadas de forma a gerar uma única incerteza, chamada incerteza combinada, Equação 3.11.

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (3.11)$$

A distribuição de probabilidade [64] será aproximadamente normal para um determinado grau de liberdade. Para aumentar a probabilidade de abrangência da incerteza, deve-se multiplicar a incerteza combinada por um fator k , de modo a obter uma incerteza expandida de medição.

A incerteza expandida U [60, 65], é uma grandeza que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com a qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

Geralmente é utilizada a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência “ k ”, com graus de liberdade efetivos (ν_{eff}) que correspondem a um nível de confiança de aproximadamente 95,45% (Figura 3.20).

Para a incerteza, o grau de liberdade [63, 65], quantifica a credibilidade sobre cada componente de incerteza disposto no modelo matemático de medição. Um alto grau de credibilidade implica em um alto grau de liberdade.

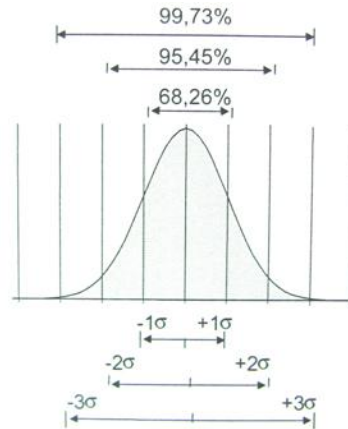


Figura 3.20. Representação dos níveis de confiança em relação aos desvios padrão utilizados [65].

A equação de Welch-Satterthwaite é utilizada para estimar o grau de liberdade efetivo, equação 3.12.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (3.12)$$

Com o valor de graus efetivos de liberdade determinado, determina-se o valor de k, com probabilidade de abrangência de 95,45% na Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Graus efetivos e seu respectivo fator k [65].

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Veff | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 |
| K 95,45% | 13,9 | 4,53 | 3,31 | 2,87 | 2,65 | 2,52 | 2,43 | 2,37 | 2,28 | 2,23 | 2,20 | 2,17 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| veff | 18 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 60 | 80 | 100 | ∞ |
| K 95,45% | 2,15 | 2,13 | 2,11 | 2,09 | 2,07 | 2,06 | 2,06 | 2,05 | 2,04 | 2,03 | 2,02 | 2,00 |

A incerteza expandida é a multiplicação entre o fator k e a incerteza combinada, equação 3.13:

$$U = k \cdot u_c \quad (3.13)$$

As etapas desse procedimento para a determinação da capacidade de medição são descritas no fluxograma da Figura 3.21.

Para relatar o resultado da medição, é recomendado [60], que o valor numérico da incerteza seja fornecido com no máximo dois algarismos significativos. O valor

numérico do resultado da medição, na declaração final, deve ser arredondado para o último algarismo significativo do valor da incerteza expandida, atribuída ao resultado da medição.

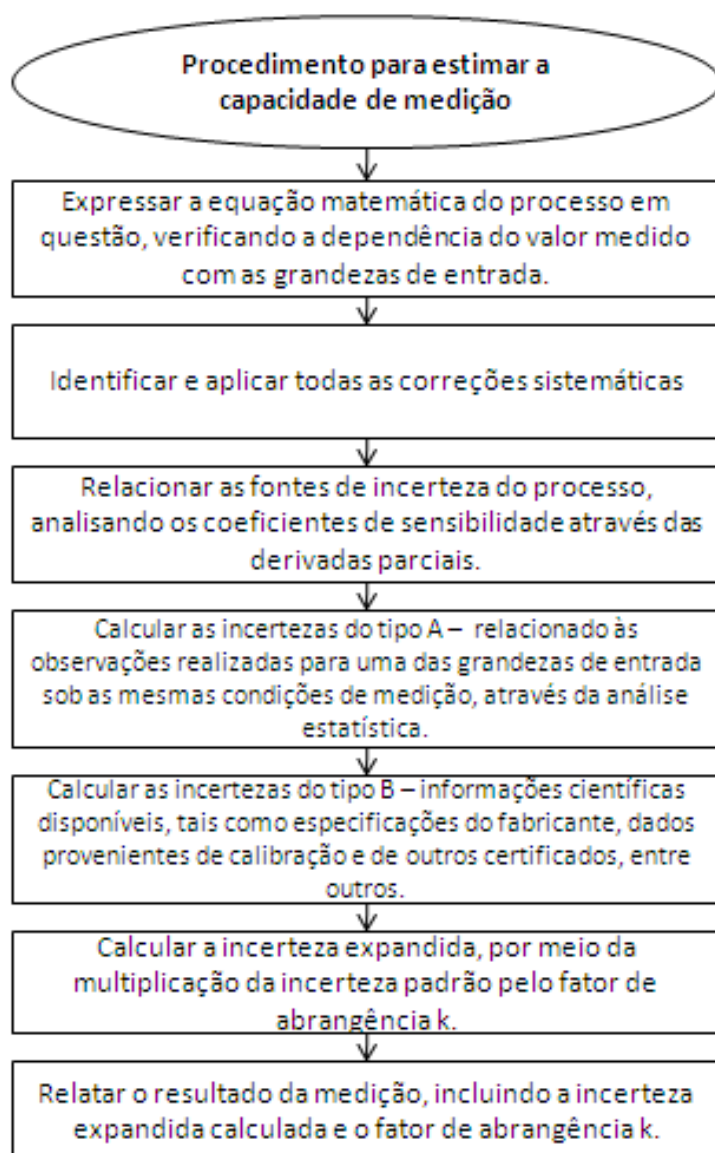


Figura 3.21. Representação sistemática da determinação de um resultado de medição.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental desse trabalho foi baseado nos ensaios realizados com amostras de aço ABNT/SAE 1045, onde foram obtidos os registros das curvas de resfriamento, para determinar e analisar os parâmetros térmicos, tais como as densidades de fluxo de calor e o coeficiente de transferência de calor. Na Figura 4.1 ilustra-se o procedimento experimental utilizado.

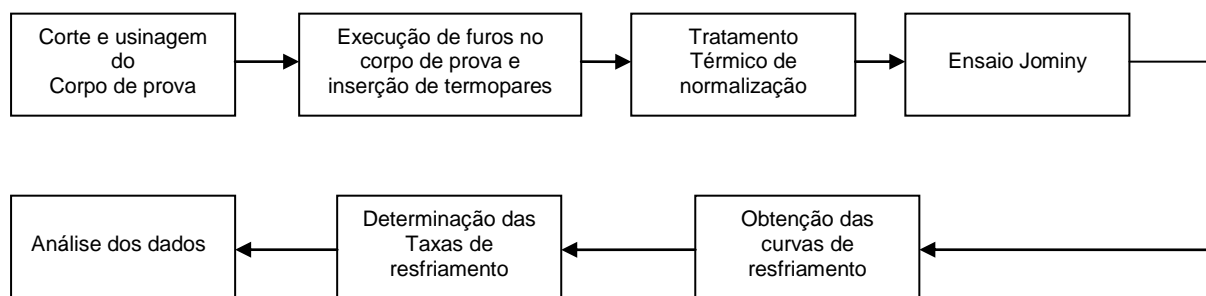


Figura 4.1. Procedimento experimental do trabalho.

Para a execução do procedimento experimental, foram utilizados diversos materiais e equipamentos, listados abaixo e que serão detalhados nas seções seguintes:

- Corpo de prova segundo a ASTM 255-10 [24] de aço ABNT/SAE 1045;
- Sistema de Aquisição de Dados Lynx Tecnologia;
- Termopares Tipo K com bainha de aço inoxidável 316;
- Dispositivo para Ensaio Jominy;
- Isolamentos refratários.

4.1. Corpo de Prova

O material de estudo foi o aço ABNT/SAE 1045, utilizado na fabricação de

componentes/peças de uso geral, cuja composição química nominal é apresentada na Tabela 4.1. Este material foi adquirido em barras cilíndricas e a preparação dos corpos de prova foi realizada no LAMETT – PUCRS.

Tabela 4.1. Composição Química do Aço ABNT/SAE 1045 [66].

| Composição Química (%) | | | | | | | |
|------------------------|-------------|------|------|----|----|----|----|
| C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo |
| 0,43 - 0,50 | 0,60 - 0,90 | 0,04 | 0,05 | - | - | - | - |

As dimensões do corpo de prova seguem as especificações da Norma ASTM 255-10 [24], descrita na Seção 3.3, de padronização do ensaio Jominy. Adotou-se um diâmetro interno de 1,6 mm na usinagem dos furos para suporte aos termopares, e a distância do furo a partir da extremidade de resfriamento é de 1,6 mm, a fim de aproximar esta distância com a distância que o aplicativo de simulação utiliza em seu cálculo. A distância entre os termopares é de 1,6 mm, e está ilustrada pela Figura 4.2.

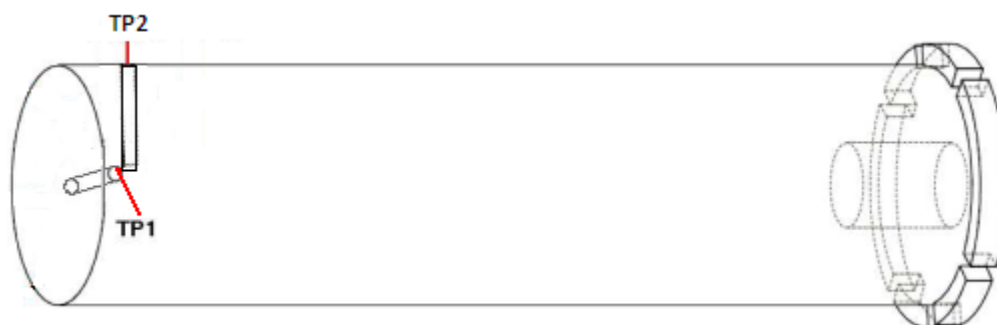


Figura 4.2. Esquemático da localização dos termopares para aquisição e monitoração da temperatura de resfriamento no corpo de prova utilizado para o ensaio.

Todos os corpos de prova foram previamente normalizados a 870 °C conforme recomenda a Norma [24]. Para a instrumentação e aquisição dos valores de temperaturas na superfície do corpo de prova, as medidas foram realizadas através de termopares tipo K, cujas características são referenciadas na Seção 3.7.

De acordo com a Figura 4.2, foi denominado de TP1, o termopar que foi utilizado para medir a temperatura a extremidade vertical do cilindro em contato com o fluido de arrefecimento e de TP2, o termopar utilizado para medir a temperatura na interface ‘metal quente/metal resfriado’.

4.2. Ensaio Jominy

Como procedimento, para realização do ensaio Jominy, utilizou-se as indicações da Norma ASTM 255-10 [24], descritas na Seção 3.3, bem como a confecção dos dispositivos pertinentes ao ensaio. O sistema de ensaio Jominy utilizado, Figura 4.3 é composto de um tanque para armazenamento de água, possuindo uma válvula de engate rápido como exige a ASTM 255-10 [24].

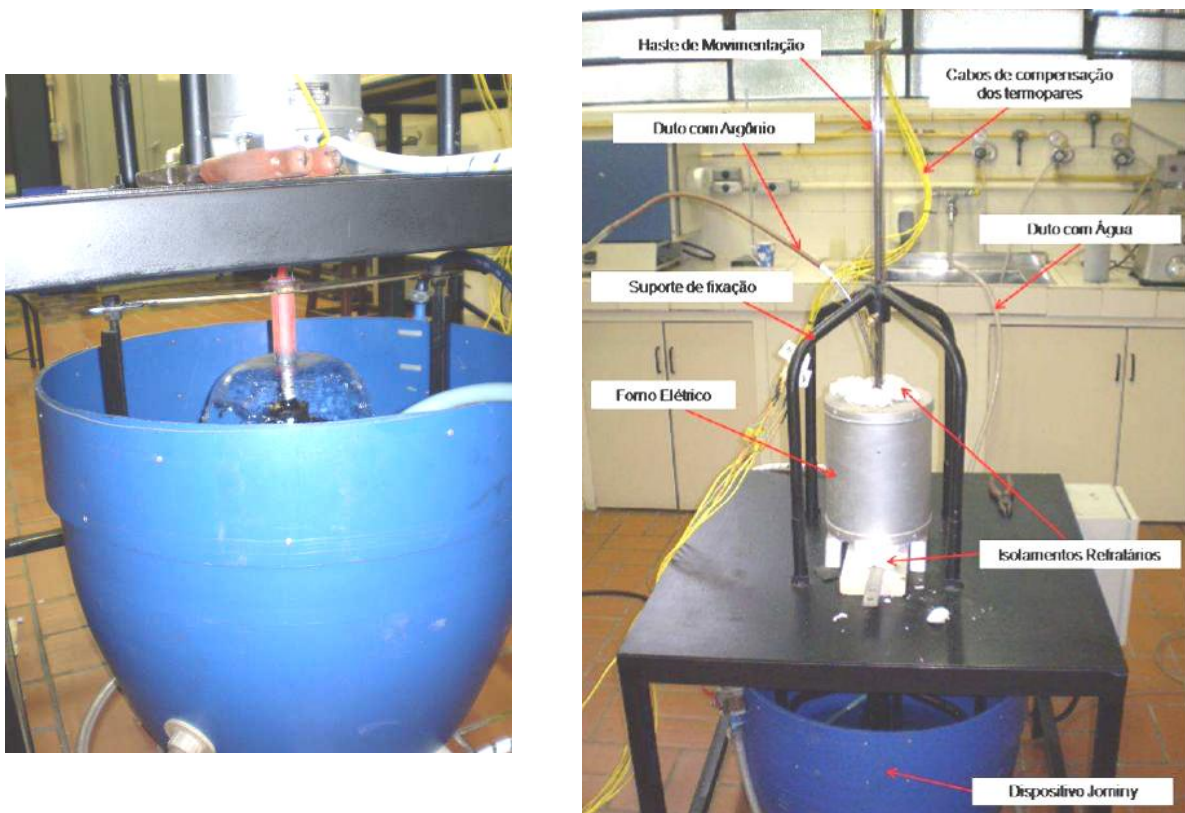


Figura 4.3. Dispositivo Jominy utilizado para os ensaios.

Acoplado a este tanque, um forno elétrico, com isolamento refratário, onde se encontram termopares para monitoração das curvas de aquecimento e resfriamento do corpo de prova a ser analisado. A Figura 4.4 mostra o esquema do sistema de ensaio Jominy ilustrando o resfriamento do corpo de prova.

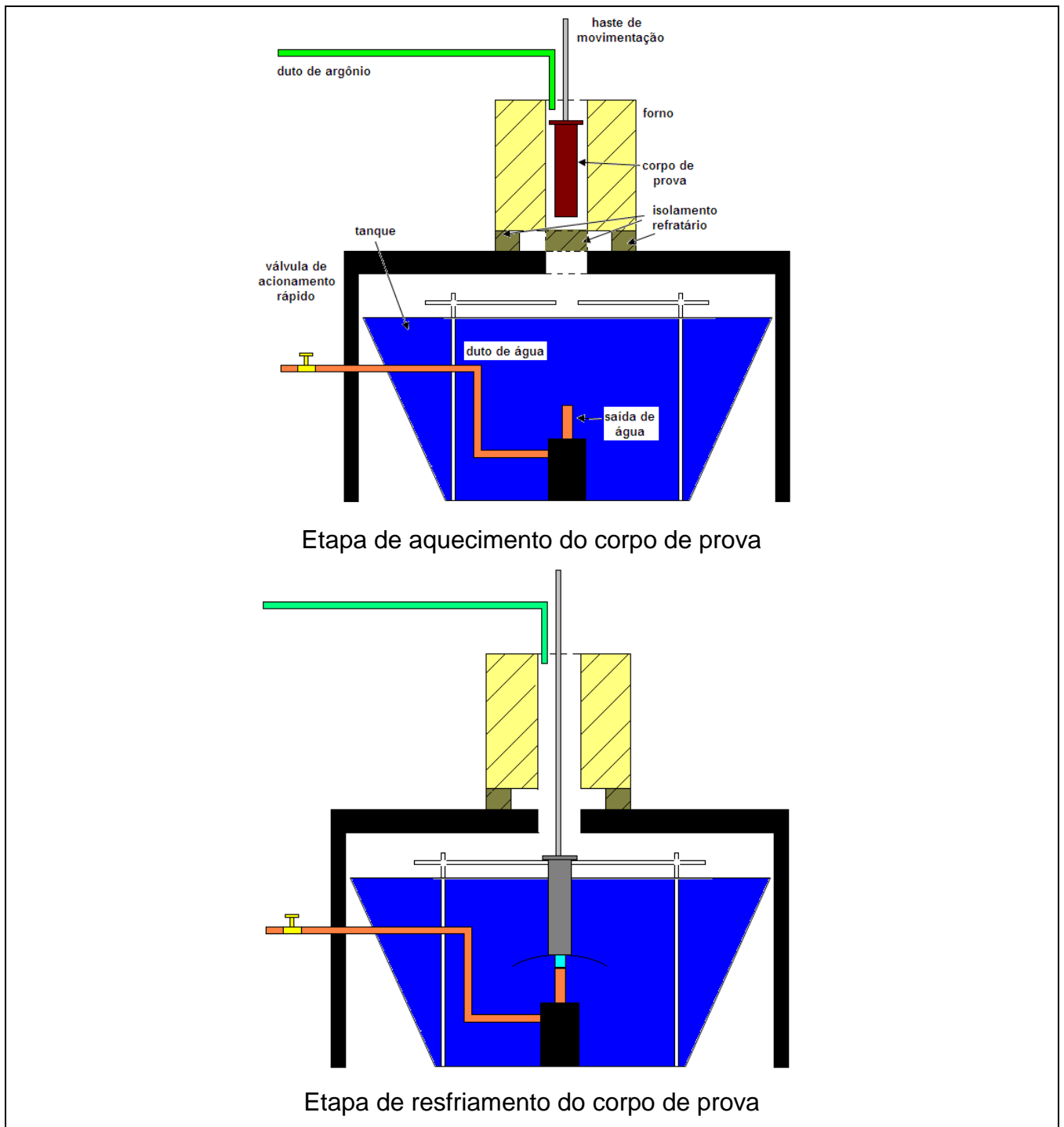


Figura 4.4. Esquemático do ensaio Jominy no momento do resfriamento do corpo de prova.

Após austenitização do corpo de prova, procede-se seu resfriamento no dispositivo Jominy, como mostram as Seções 3.2 e 3.3, considerando um intervalo de 5 segundos para a remoção do corpo de prova do forno para colocá-lo no dispositivo de resfriamento e acionar a válvula de engate rápido para a saída da água. O tempo

de resfriamento para cada ensaio foi de aproximadamente 600 s.

A temperatura da água utilizada como refrigerante foi de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, medida através de um termopar próximo à saída de água. Foi realizado o ajuste da altura do jato conforme exigência da norma ASTM A255-10 [24].

4.3. Sistema de Aquisição de Armazenamento de Dados

Na aquisição e armazenamento dos dados de temperatura foi utilizado um sistema de aquisição de dados do fabricante Lynx Tecnologia [67]. Este sistema de aquisição de dados está representado em blocos na Figura 4.5: condicionador de sinal, conversão analógico-digital e processamento (software) [68].

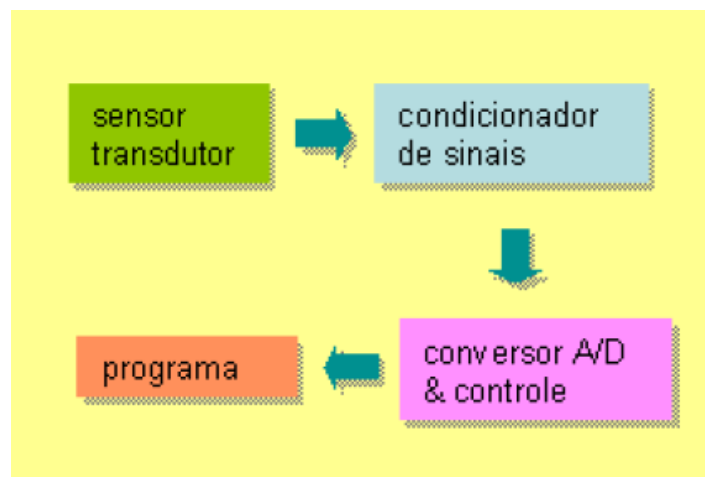


Figura 4.5. Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados utilizado [68].

O equipamento utilizado, como mostra a Figura 4.6, para as aquisições de dados é composto por um módulo condicionador de sinal analógico modelo MSC 1000 e placa de conversão analógico/digital (A/D) CAD 12/36.

O aplicativo computacional para o registro dos dados é o AqDados v.5.06, onde há possibilidade de exportar os dados adquiridos para o aplicativo Microsoft Excel. O sistema de aquisição de acordo com o fabricante possui um erro de $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

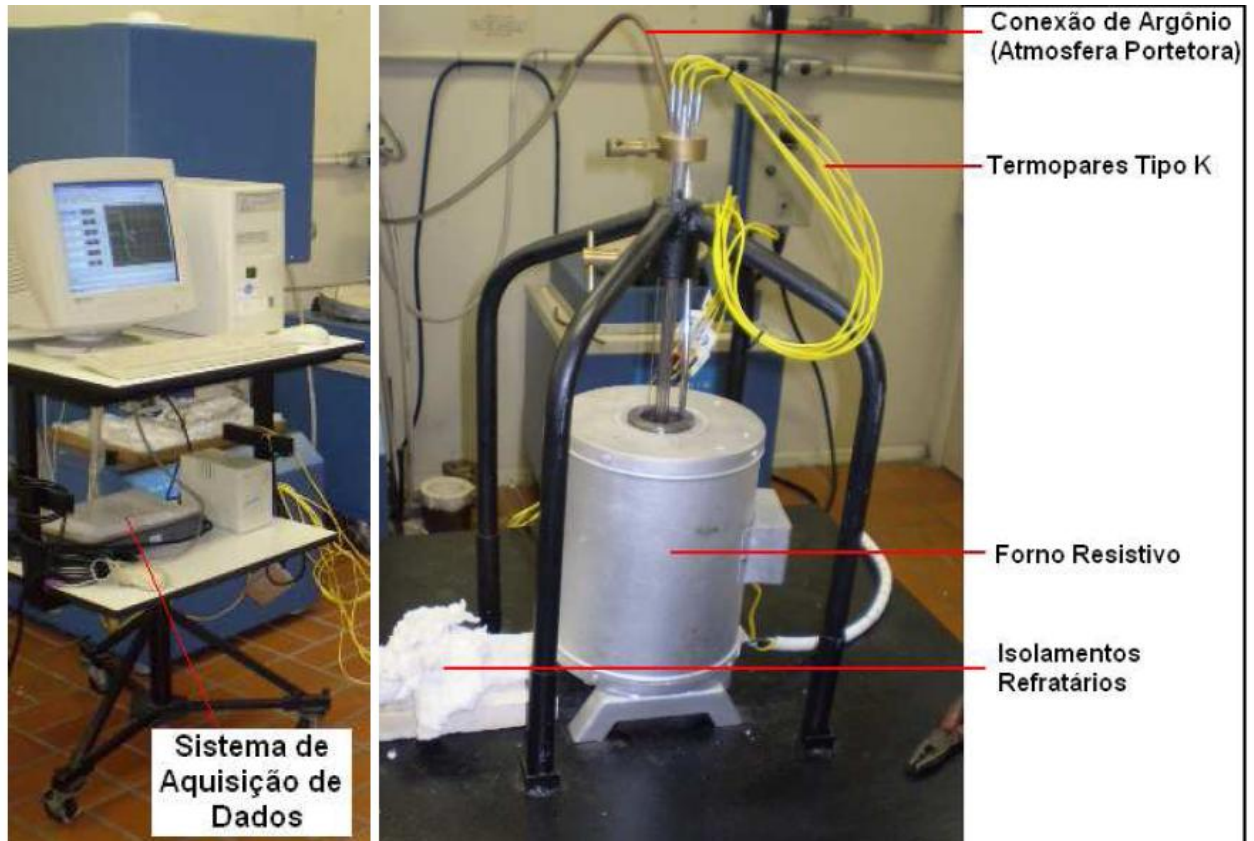


Figura 4.6. Arranjo experimental.

4.4. Cálculo das Taxas de Resfriamento

A Figura 4.7 mostra uma curva 'temperatura x tempo' obtida através do termopar TP1 como mostra a Figura 4.2, durante o resfriamento da superfície do corpo de prova submetido ao ensaio Jominy.

Para calcular a taxa de resfriamento estimou-se uma equação que descreve a curva obtida experimentalmente, através de uma aproximação polinomial. A partir desta equação determinaram-se parâmetros importantes, tais como, as densidades de fluxo de calor, os modos de transferência de calor, assim como o próprio coeficiente de transferência de calor, para este tipo de ensaio proposto.

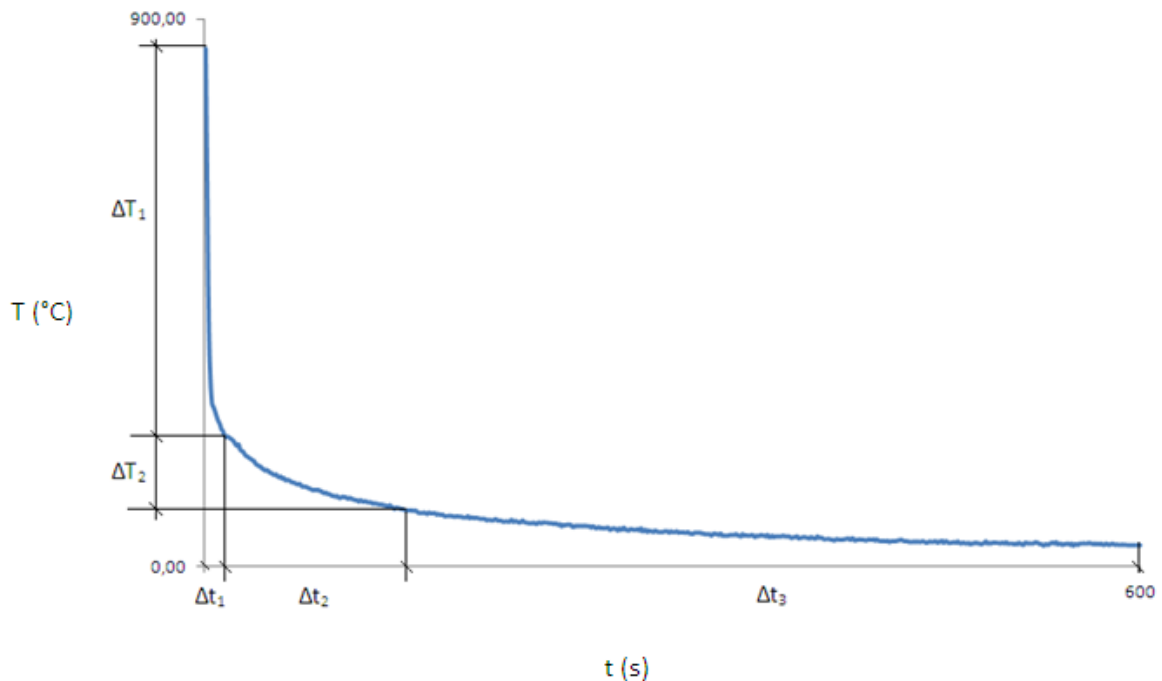


Figura 4.7. Curva Temperatura x Tempo referente ao ensaio Jominy.

De acordo com a Figura 4.7, a curva foi dividida em três intervalos, utilizando o Δt como parâmetro:

- Δt_1 : Período de tempo que representa a transferência de calor mais agressiva, e onde está situada a temperatura de início de formação da martensita, de acordo com a Seção 3.4.

- Δt_2 : Período de tempo que representa a transferência de calor mais amena, e onde está situada a temperatura final de formação da martensita, de acordo com a Seção 3.4.

- Δt_3 : Período de tempo em que não envolve transformações de fase, somente há transferência de calor por condução/convecção.

Para a análise dos períodos de resfriamento foram utilizados Δt_1 , Δt_2 , gerando uma equação cada, do tipo ilustrado pela Equação 4.1.

$$y = m_6 x^6 + m_5 x^5 + m_4 x^4 + m_3 x^3 + m_2 x^2 + m_1 x^1 + m_0 \quad (4.1)$$

4.4.1. Temperaturas de Resfriamento

Para o estudo das temperaturas de resfriamento foram realizados três ensaios a partir da temperatura de austenitização de 850°C, 800°C e 900°C, com o objetivo de verificar a repetibilidade dos ensaios.

A seguir seguem as equações para a temperatura de ensaio a 850°C, representada pela Equação 4.2, com seus coeficientes arredondados, segundo o modelo utilizado na Equação 4.1.

$$T(t) = \begin{cases} -0,035 \cdot t^6 + 1,24 \cdot t^5 - 16,88 \cdot t^4 + 108,69 \cdot t^3 - 305,37 \cdot t^2 + 120,78 \cdot t + 943,80 \cdot t^0, & 1 \leq t \leq 10 \\ -1,16 \times 10^{-11} \cdot t^8 + 7,37 \times 10^{-9} \cdot t^7 - 1,07 \times 10^{-6} \cdot t^6 - 0,10 \times 10^{-4} \cdot t^5 + 0,04 \cdot t^4 - 4,03 \cdot t^3 + 266,16 \cdot t^2, & 10 < t \leq 150 \end{cases} \quad (4.2)$$

4.4.2. Etapas de Resfriamento

As etapas de resfriamento do corpo de prova estão ilustradas na Figura 4.8, ocorrendo após o aquecimento do corpo de prova na temperatura de austenitização estimada. Através da análise destas etapas apresenta-se um modelo para o cálculo das etapas de ebulição.

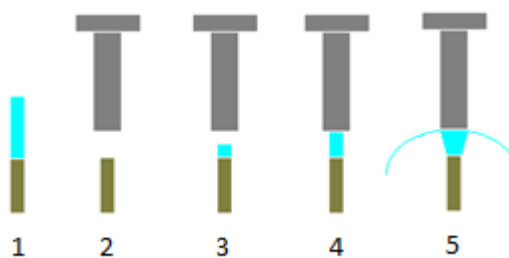


Figura 4.8. Etapas de resfriamento referentes ao ensaio Jominy.

Como apresentado na Figura 4.8, as etapas de resfriamento durante o ensaio e dividem-se em:

- 1- Ajuste da altura do jato de água ocorre antes do início do ensaio.
- 2- Caracterizado como início do ensaio, sem a presença de água.
- 3 e 4- Momento em que o volume inicial toca a amostra, início da transferência

de calor, por choque térmico.

- 5- O volume inicial de água deixa de ter contato com a amostra, sendo depositado no tanque de recolhimento de água.

De acordo com o procedimento descrito pela norma ASTM A255-10 [24], o diâmetro do dispositivo de saída de água é de 0,5 polegadas (12,7 mm), para fornecer um fluxo vertical de água controlado a uma altura de 2,5 polegadas (63,5 mm) a partir do orifício de saída.

Este jato d'água irá colidir com a superfície do corpo de prova aquecido, que por sua vez possui um diâmetro de 1,0 polegada (25,4mm), o dobro do diâmetro do orifício de saída de água.

Segue através da Figura 4.9 o modelo adotado para análise da interface corpo de prova/água, com a finalidade de cálculo da velocidade de geração de bolhas durante a fase de ebulição nucleada.

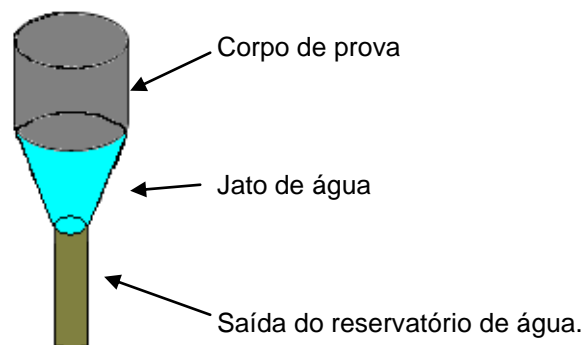


Figura 4.9. Modelo associado ao volume de água em contato com a superfície da amostra.

A vazão de água para o ensaio Jominy, de acordo com alguns estudos [1], varia de 150 mL/s a 215 mL/s. Foi adotado para este trabalho um valor de vazão de água de aproximadamente 180 mL/s.

O volume do formato do 'cone' proposto no modelo, Figura 4.10, é de 11,5 mL sendo que esse volume é substituído numa frequência de 15,6 vezes, devido a vazão do dispositivo ser de 180 mL/s, como mostra a Equação 4.3.

$$\text{frequência} = \frac{\text{volume do modelo}}{\text{vazão do dispositivo}} \quad (4.3)$$

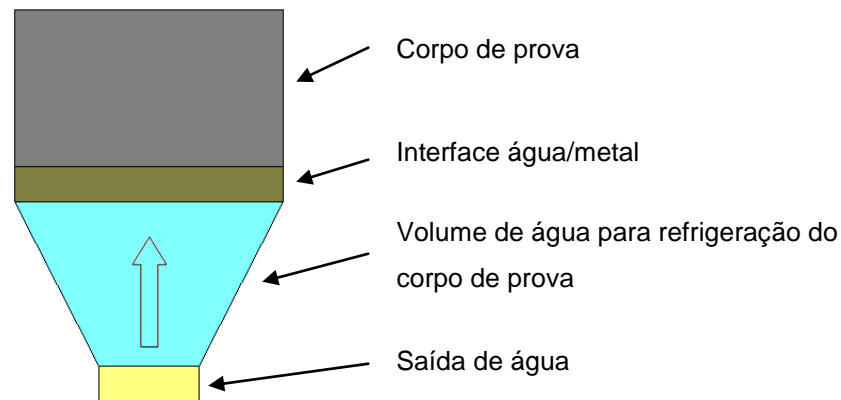


Figura 4.10. Interface água metal durante o ensaio Jominy.

4.5. Estimando os Modos de Transferência de Calor

Através da curva de resfriamento e o valor de temperatura do meio refrigerante utilizado, no caso a água a uma temperatura de 20°C, obtém-se através da Equação 4.4, uma taxa de resfriamento em relação ao tempo, em uma razão logarítmica.

$$\text{Taxa de resfriamento} = \ln(T-T_M) \quad (4.4)$$

Com isso, chega-se ao gráfico das etapas, como mostra o modelo da Figura 3.17, descrito na Seção 3.6. A Figura 3.17 representa a mudança do fluxo de calor da superfície de uma peça durante a têmpera e este modelo é baseado na curva de ebulição de Nukiyama, porém no sentido inverso, onde a transferência de calor parte de altos valores de temperatura para valores mais baixos, e que será útil para o desenvolvimento dos cálculos de densidade de fluxo de calor e o próprio coeficiente de transferência de calor.

4.6. Cálculo das Densidades de Fluxo de Calor

Utilizando o valor de temperatura do meio refrigerante, e o valor de temperatura de saturação, ambos da água, utilizados no ensaio Jominy, juntamente com o

diâmetro de espessura entre o termopar e a extremidade da peça e a condutividade térmica do aço, têm-se a densidade de fluxo de calor para um determinado intervalo de tempo, como mostra a Equação 3.2, da Seção 3.5.

Para o cálculo da densidade de fluxo de calor da fase de ebulição nucleada utiliza-se a variação de temperatura com o valor da temperatura de saturação do líquido (100°C), Equação 4.5, e para a fase de convecção utiliza-se o valor de temperatura de refrigeração do líquido (20°C), Equação 4.6.

$$\Delta T_{\text{ebulição nucleada}} = T_{\text{superfície}} - T_S \quad (4.5)$$

$$\Delta T_{\text{convecção}} = T_{\text{superfície}} - T_M \quad (4.6)$$

Pelos valores obtidos do cálculo da densidade de fluxo de calor, podem-se determinar os seus valores críticos, como conseqüência encontrar as fases de transferência de calor durante o processo do ensaio Jominy.

4.6.1. Cálculo das Densidades Críticas de Fluxo de Calor

Através do gráfico das fases de transferência de calor, como mostra a Figura 3.17, determinam-se as fases de transferência de calor do sistema. Com isso, podem-se estimar as densidades críticas de fluxo de calor pelo próprio gráfico, ou, seguindo as referências descritas na Seção 3.6.5, e através da Equação 4.7 [14], calcular o valor da primeira densidade crítica de fluxo de calor.

$$q_{cr1} = kr^* \sqrt{\rho''} \sqrt[4]{g\sigma(\rho' - \rho'')}, \quad (4.7)$$

onde: k: constante com valor aproximado de 0,14;

g: aceleração da gravidade (m/s²);

σ : tensão de superfície (N/m);

ρ' : densidade do líquido (kg/m³);

ρ'' : densidade do vapor (kg/m³);

r^* : calor latente da evaporação (J/kg).

Para o cálculo da segunda densidade crítica de calor, utiliza-se a relação do Tabela 3.5, com o valor de 0,2 a relação q_{CR1}/q_{CR2} . Com isto têm-se informações para correlacionar o ensaio Jominy ao processo de têmpera tradicional, como mostra a Figura 3.17.

4.6.2. Verificação da Geração de Bolhas na Fase de Ebulição

Isolando os termos da Equação 4.8, e de acordo com as referências nas Seções 3.6 e a densidade crítica de fluxo de calor encontrada através do cálculo realizado utilizando a Equação 4.7, tem-se a frequência de liberação das bolhas.

$$q_{crit} = 7r^* \sqrt{af\rho'\rho''} \quad (4.8)$$

onde: a : difusividade térmica do líquido (m^2/s);

f: frequência de liberação de bolhas (Hz);

ρ' : densidade do líquido (kg/m^3);

ρ'' : densidade do vapor (kg/m^3);

r^* : calor latente da evaporação (J/kg).

4.7. Cálculo do Coeficiente de Transferência de Calor

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor, foi utilizada a Equação 4.9, de acordo com o Capítulo 3:

$$h = \beta q^{0,673}, \text{ onde, } \beta = 4,3 \quad (4.9)$$

Onde:

h: coeficiente de transferência de calor (W/m^2K)

q: densidade de fluxo de calor (W/m^2)

β : constante relacionando parâmetros termofísicos.

4.8. Estimando a Incerteza de Medição

Para estimar a incerteza do processo de medição de temperatura da amostra, levaram-se em consideração as fontes de incerteza do processo, relacionadas às

informações dos equipamentos de medida, encontradas nos manuais de operação, como mostra a Seção 3.8.

Além disso, foram consideradas as propriedades térmicas do aço em estudo, e em alguns casos de cálculo da incerteza, tais como a densidade de fluxo de calor e o coeficiente de transferência de calor, foram consideradas as incertezas herdadas da medição de temperatura através dos termopares. Estas considerações serão detalhadas a seguir na Seção 4.8.2.

4.8.1. Budget de Incertezas

Através do aplicativo Microsoft Excel foi criada uma planilha 'budget' que realiza a ponderação das contribuições de incerteza do processo, como mostra a Figura 4.11.

| Grandeza | Estimativa | Distribuição de probabilidade | Incerteza Padrão | Coefficiente de sensibilidade | Contribuição para a incerteza padrão | Graus de Liberdade |
|----------|------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| X_i | x_i | | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | |
| X_1 | x_1 | | $u(x_1)$ | c_1 | $u_1(y)$ | V_1 |
| X_2 | x_2 | | $u(x_2)$ | c_2 | $u_2(y)$ | V_2 |
| - | - | | | | | - |
| - | - | | | | | - |
| X_N | x_N | | $u(x_N)$ | c_N | $u_N(y)$ | V_N |
| Y | y | $k=$ | | | $u(y)$ | V_{eff} |

Figura 4.11. Modelo de Planilha utilizada para o cálculo da Incerteza de Medição [60, 64].

4.8.2. Fontes de Incerteza

Seguem a seguir as principais fontes de incertezas, que serão analisadas através do Quadro 3.2, para as medições propostas.

Para temperatura do corpo de prova austenitização, seguindo o procedimento da Seção 3.3, foram aplicadas:

- Tolerância de temperatura de austenitização descrita na Norma ASTM A255-

10 [24] de $\pm 6^{\circ}\text{C}$, linearidade condicionador de sinais durante a medição de temperatura e especificação normativa do sensor termopar tipo K [56, 58]. Desvio do ensaio

Para temperatura do corpo de prova no resfriamento, foram aplicadas:

- Linearidade condicionador de sinais durante a medição de temperatura, especificação normativa do sensor termopar tipo K [56, 58], e o erro médio associado polinômio de aproximação da curva de resfriamento.

Para a medição do raio do corpo de prova, foram aplicadas:

- Erro medição associado à medição do raio do cilindro de aço, resolução do instrumento de medida, e a tolerância de medida da Norma associada ao raio de $\pm 25\text{mm}$.

Para a densidade de calor, consideram-se:

- Incerteza de medição associada à temperatura de resfriamento durante o ensaio, a variação média da temperatura durante o período de 15min de ensaio, a dilatação térmica do aço e a Incerteza de medição associada ao raio do cilindro do corpo de prova.

Para o coeficiente de transferência de calor, consideram-se:

- Incerteza de medição associada à densidade de fluxo de calor.

4.9. Simulação das Curvas de Resfriamento Via Aplicativo Computacional

Foi utilizado um software de simulação das curvas de resfriamento durante o ensaio Jominy, que servirá para comparação com as curvas obtidas experimentalmente.

A transferência de calor durante a simulação de tal aplicativo foi considerada unidirecional, ou seja, ao longo do comprimento do corpo de prova. Assim, o aplicativo considera os mecanismos de transferência de calor por convecção forçada na extremidade temperada e condução no interior do material.

Input Data Simula

Aço steel: SAE 1045

Temp. ambiente [C] cooling temperature: 25

Temp. de Austenitização [C] austenitizing temperature: 850

Tempo de Austenitização [h] austenitizing time: 1

Comprimento do CP [m] sample length: 0,1

Número de divisões no metal number of divisions in CP: 100

Elemento Dy [m]: 0,01

Elemento Dz [m]: 0,01

Tempo máximo de processo [s] maximum simulation time: 600

$h_a = cte \cdot \exp(10000 \cdot t)$

Dx metal [m]: 0,001

Area total [m2] area: 0,0001

Volume [m3] volume: 1E-7

Incremento tempo dt [s] time increment: 76465625

Posição Termopares [i] da extremidade (mm)

| |
|------|
| 1,59 |
| 3,18 |
| 4,76 |
| 6,35 |
| 9,53 |
| 12,7 |
| |
| |
| |
| |
| |
| |

thermocouple positions [i]

SIMULAÇÃO

Figura 4.12. Tela de simulação do aplicativo.

O coeficiente de transferência de calor 'h' foi considerado de acordo com uma aproximação da curva calculada pelo procedimento da Seção 4.7. As trocas térmicas por radiação nas laterais serão desconsideradas.

Para a equação de aproximação, foram levadas em consideração a etapa de transferências de calor por convecção, já que o aplicativo computacional simula somente esta etapa e, além disso, possui somente aproximação por equações do tipo potenciação (t^N).

A Equação 4.10 é a aproximação da curva experimental considerando as quatro etapas de transferência de calor citadas nas referências [14, 20].

$$h = [60500 \times (t^{-0,745})] + 20500 \quad (4.10)$$

A Equação 4.11 é a aproximação da curva experimental, utilizada no aplicativo, considerando o valor médio do coeficiente 'h' calculado para o período de transferência de calor por convecção.

$$h = [12500 \times (t^{-0.575})] + 10000 \quad (4.11)$$

O aplicativo gera um relatório da simulação conforme visto na Figura 4.13. Os dados da simulação foram transferidos para um assistente de gráficos que possibilita a plotagem das curvas térmicas.

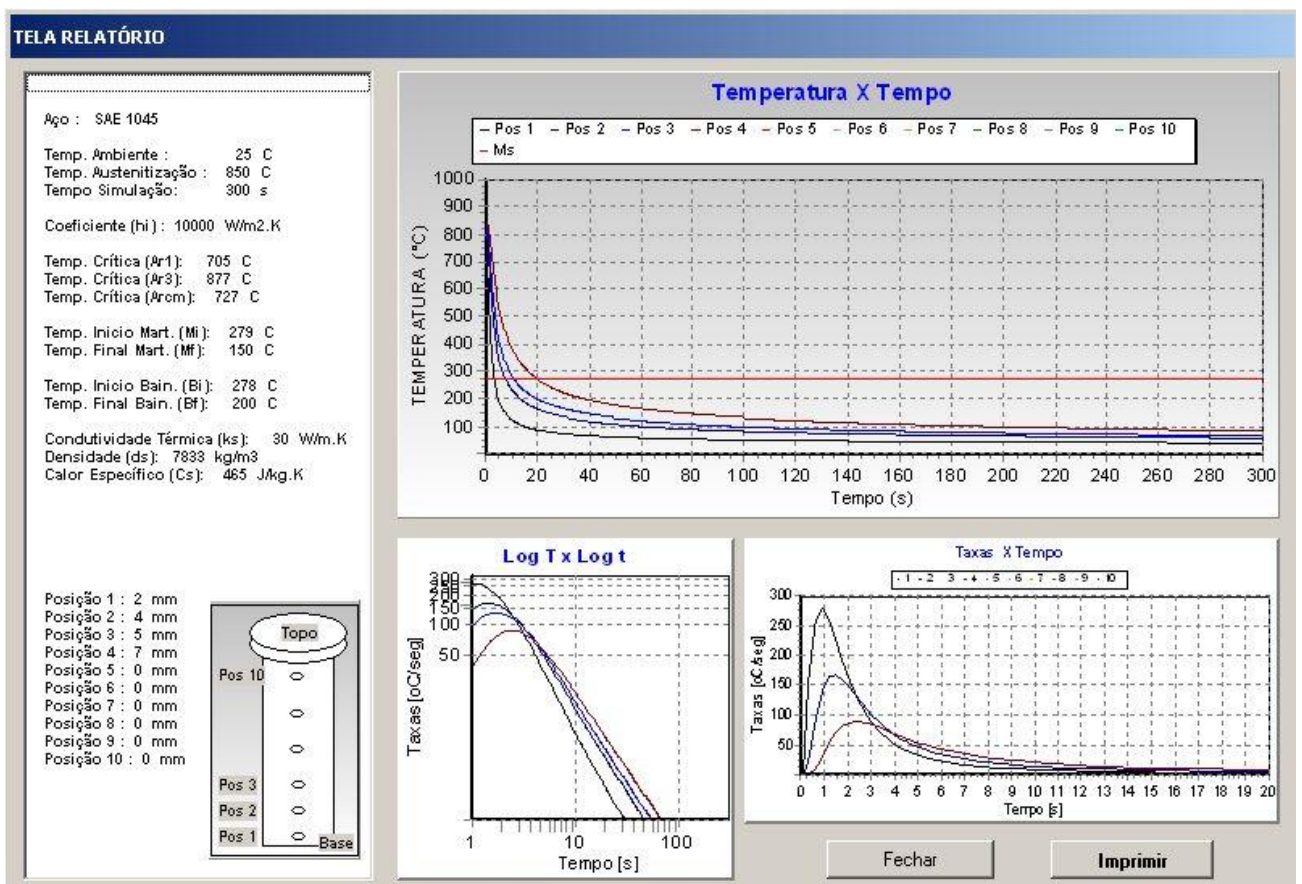


Figura 4.13. Tela do relatório da simulação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Curvas de Resfriamento obtidas a partir da temperatura de 850°C

A aquisição das temperaturas de resfriamento da interface 'extremidade do corpo de prova/líquido de arrefecimento', adquiridas pelo termopar TP1 a partir da temperatura de austenitização em 850°C, durante o período de 600 s está representada pela Figura 5.1.

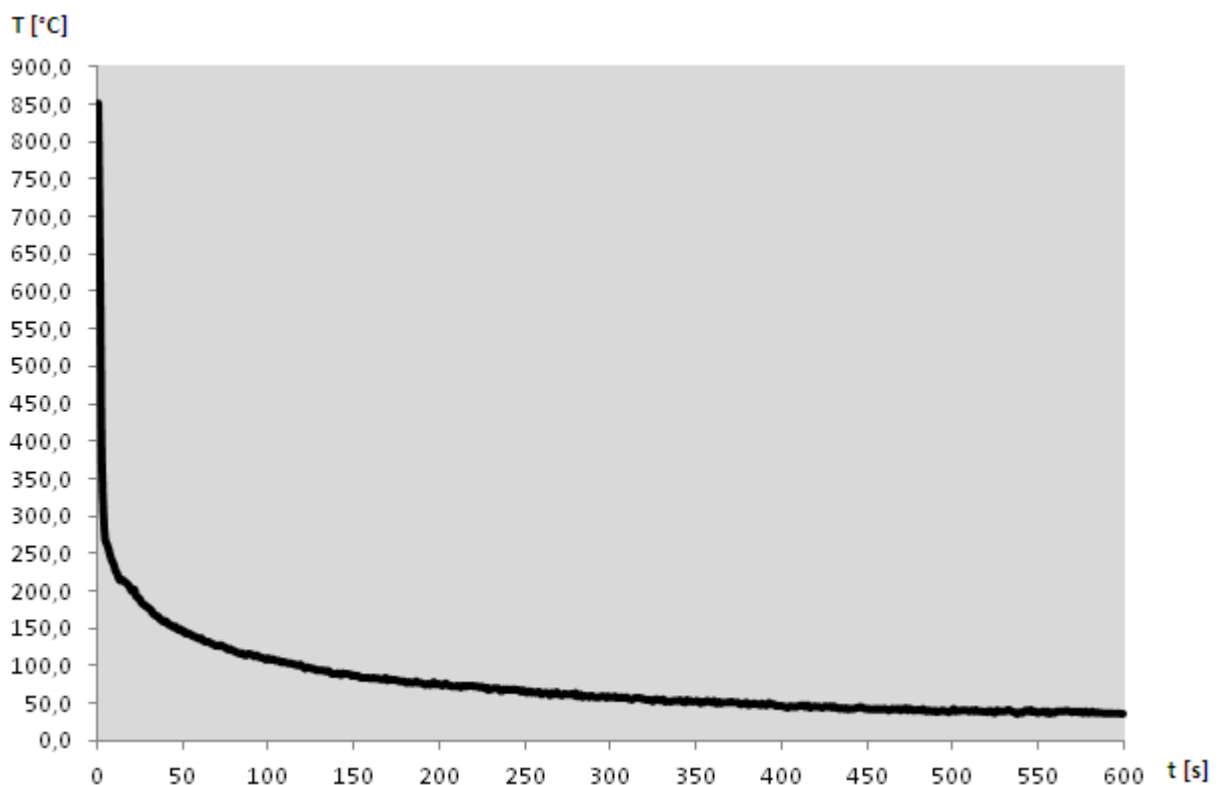


Figura 5.1. Curva de resfriamento da interface 'extremidade do corpo de prova/água' a partir de 850°C.

A aquisição de temperatura pelo termopar TP2 refere-se ao resfriamento realizado a partir da temperatura de austenitização em 850°C, entre a extremidade a

ser resfriada e a parte metálica quente do corpo de prova, 1,6mm acima da localização de TP1, durante o período de 600 s [8, 14, 24].

A Figura 5.2 ilustra as temperaturas das curvas adquiridas pelos termopares TP1 e TP2. Devido à extração de calor ser de forma unidirecional e a posição dos termopares estarem dispostos na posição vertical e separados a uma distância de 1,6 mm, a extração de calor avança lentamente de modo a ter um gradiente de temperatura no corpo de prova na interface metal quente/resfriado.

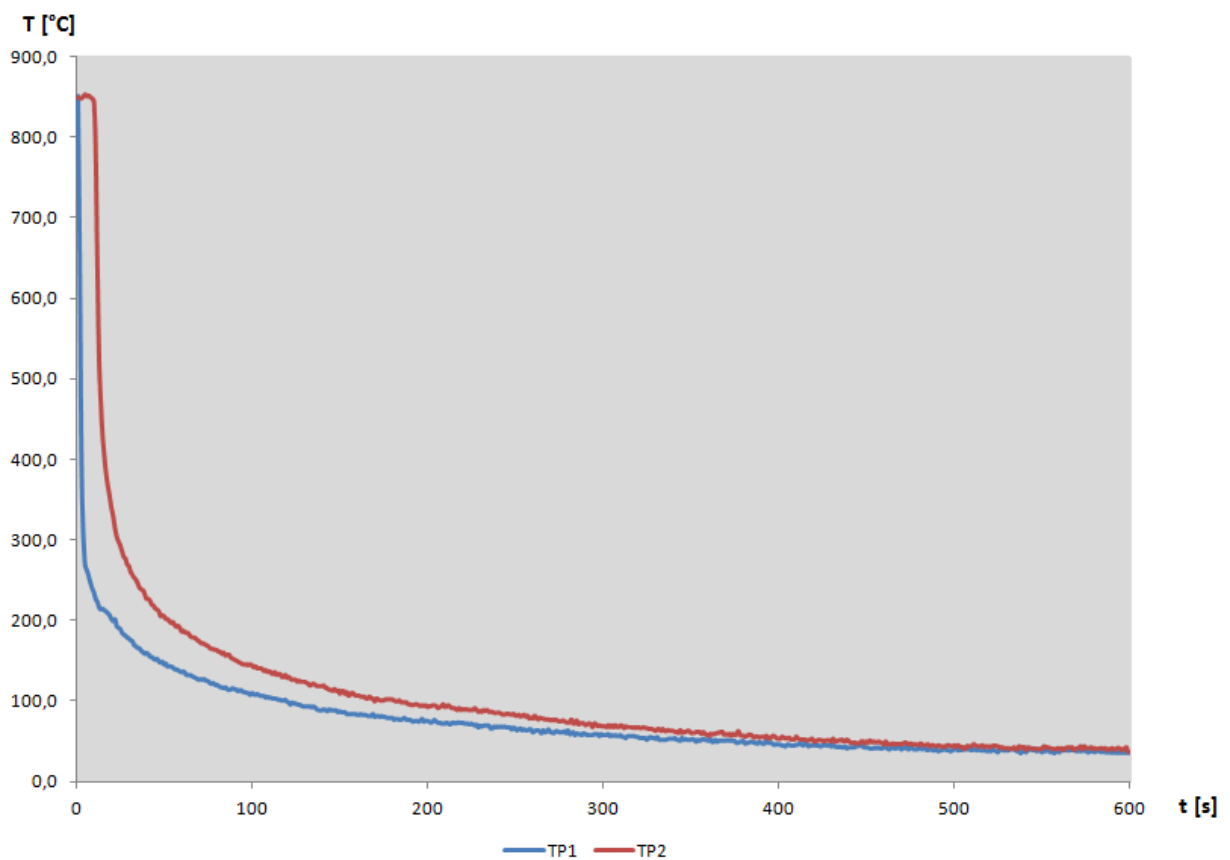


Figura 5.2. Curva de resfriamento a partir de 850°C em TP1 e TP2.

5.1.1. Erro de Aproximação da Curva de Resfriamento

Através da Equação 4.2, que está composta de duas funções para intervalos distintos de tempo, e descreve a aproximação da curva de resfriamento experimental, usada posteriormente para os cálculos das propriedades térmicas, tais como,

densidade de fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor.

Foi calculado o erro médio da curva de resfriamento experimental, apresentando para a primeira função o erro de $\pm 3,8$ °C, e para a segunda função de $\pm 0,5$ °C.

A Figura 5.3 mostra a sobreposição da curva de resfriamento que utiliza as duas funções calculadas que compõe a Equação 4.2, chamada de 'Tpolinômio', em relação à curva experimental.

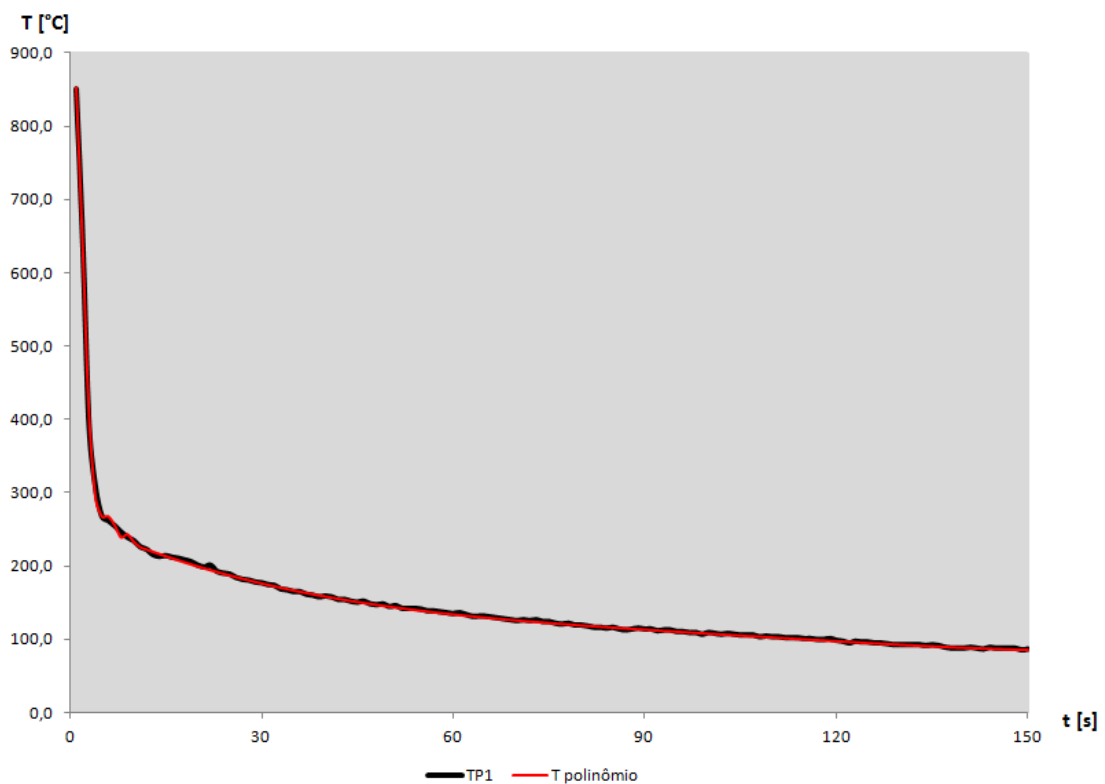


Figura 5.3. Comparação entre a curva real de resfriamento e a curva gerada pela Equação 4.2.

A primeira função possui um erro maior devido à rápida taxa de resfriamento nos primeiros segundos do ensaio, causando um desvio maior na aproximação do polinômio para a curva 'temperatura x tempo'.

5.2. Modos de Transferência de Calor Associados

As taxas de resfriamento foram calculadas através da variação da temperatura

da superfície do corpo de prova em contato com o líquido de arrefecimento, com o procedimento informado anteriormente na Seção 4.5, onde se obteve as etapas de transferência de calor no corpo de prova através de análise gráfica [14].

Observaram-se três períodos distintos das etapas, ou modos, de transferência de calor apresentados pela extremidade do corpo de prova durante o ensaio, e que foram representados através de retas sobrepostas à curva gerada pela Equação 4.5, como mostra a Figura 5.4.

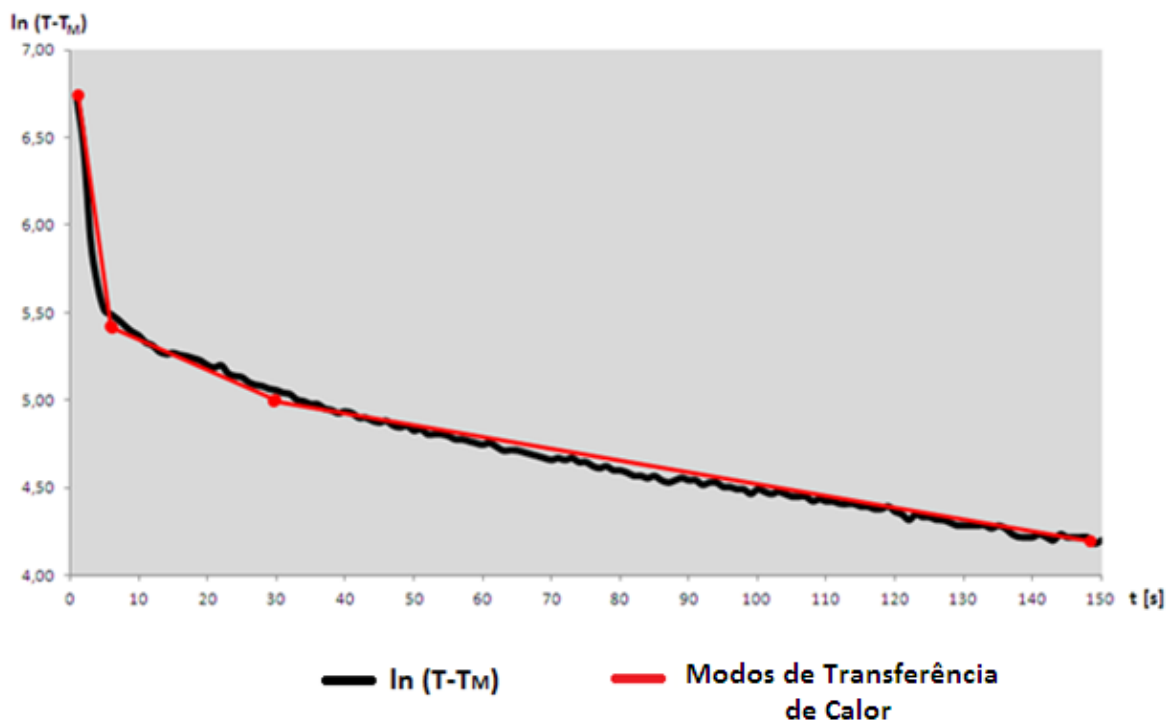


Figura 5.4. Gráfico dos modos de transferência de calor.

De modo a simplificar a visualização das etapas de transferência de calor, a Figura 5.5 mostra os períodos estimados sem a presença da curva calculada pelo método descrito anteriormente.

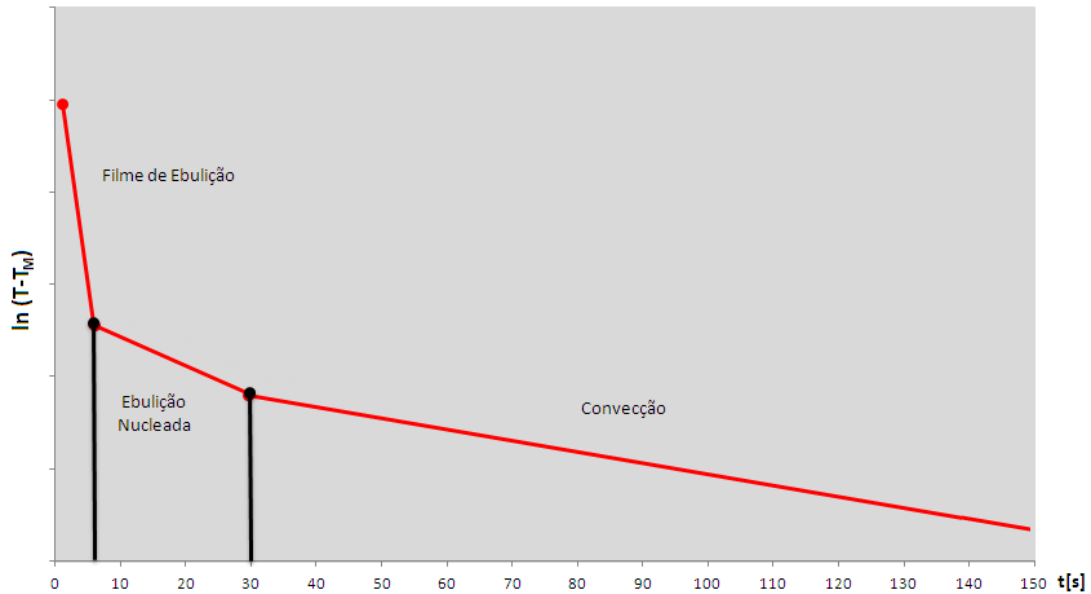


Figura 5.5. Diagrama dos modos de transferência de calor com seus parâmetros.

Após o choque térmico inicial na superfície do corpo de prova, aproximadamente 6,0% do tempo de execução do ensaio estão relacionados às etapas de formação do filme de vapor e a formação de bolhas.

Isto se deve pela rápida troca de calor da superfície do corpo de prova, fazendo com que o líquido em contato com a superfície do corpo de prova deixe de formar bolhas e passe para a etapa de convecção a partir dos 30 s iniciais do ensaio.

5.3. Curva de Densidade de Fluxo de Calor x Tempo

Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.6, foram calculados os valores de densidade de fluxo de calor em relação ao tempo, e gerado um gráfico como mostra a Figura 5.6.

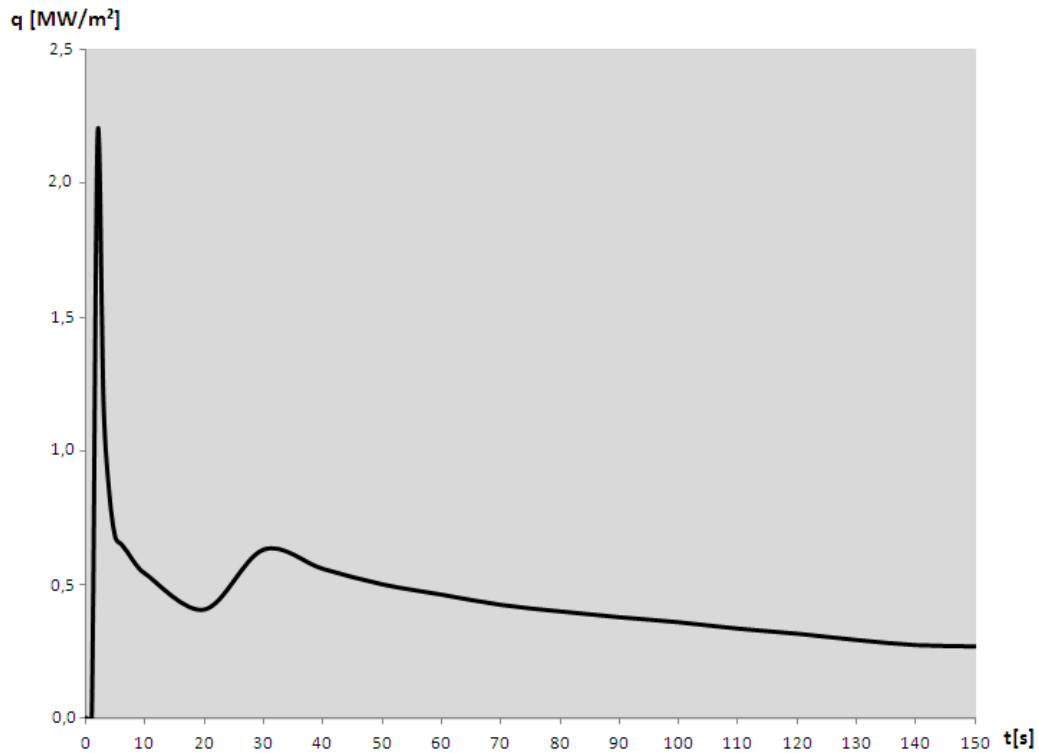


Figura 5.6. Curva de densidade de fluxo de calor associada ao ensaio.

Nota-se nos segundos iniciais do ensaio, uma grande elevação na densidade de fluxo de calor devido ao choque térmico da superfície do corpo de prova.

Após o choque térmico, tem-se uma queda no valor de 'q' devido ao filme de vapor, que cria uma camada isolante entre a superfície do corpo de prova e a água que tocará esta superfície [14, 20].

Quando esta camada isolante começa a se dissipar, tem-se a formação de bolhas, onde a densidade de fluxo de calor aumenta devido a uma elevação na extração de calor, mas esta não tão elevada quanto ao choque térmico.

De acordo com os resultados obtidos, outro gráfico foi gerado, por um período de 40 s, Figura 5.7, pois se obtêm a representação das quatro etapas de transferência de calor [14, 20].

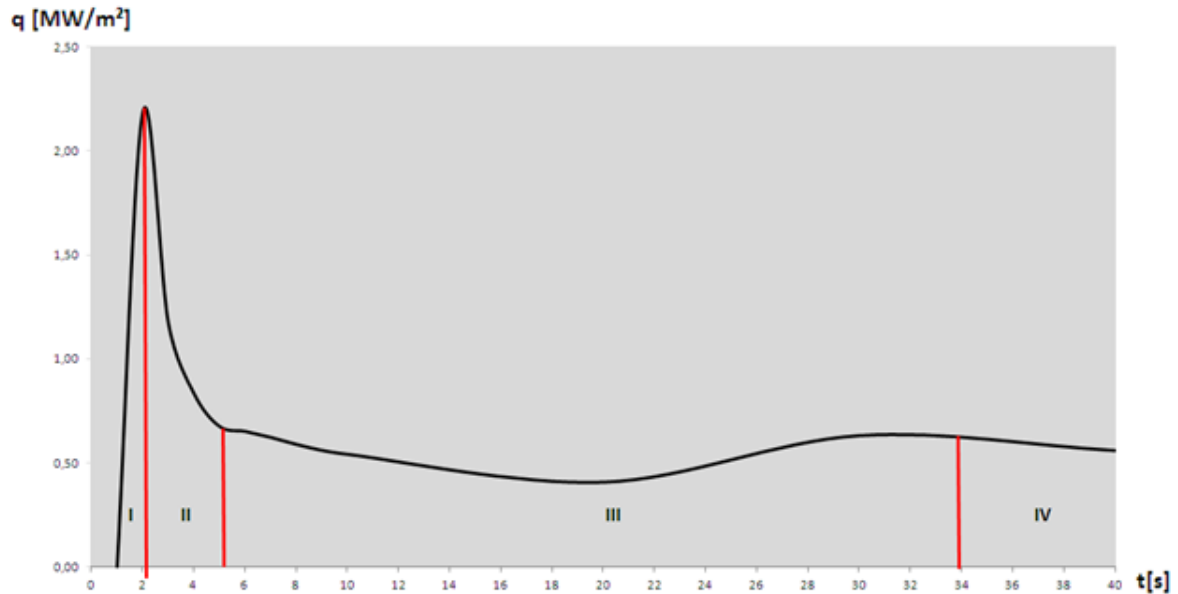


Figura 5.7. Curva de densidade de fluxo de calor com suas respectivas fases.

A Tabela 5.1 faz uma descrição dos períodos de duração de cada etapa de transferência de calor [14, 18, 20], associando estes valores às densidades de fluxo de calor calculadas. O período de duração das fases foi obtido com base na curva 'densidade de fluxo x tempo' da Figura 5.7 em comparação com a referência teórica da Figura 3.17.

Tabela 5.1. Associação de fases de acordo com a densidade de fluxo de calor.

| Fase térmica | Descrição | Período de duração (s) | Faixa de densidade de fluxo de calor (MW/m^2) |
|--------------|-------------------|------------------------|--|
| I | Choque térmico | 2,1 | 0 - 2,2 |
| II | Filme | 3,2 | 2,2 - 0,7 |
| III | Ebulição Nucleada | 30,7 | 0,7 - 0,7 |
| IV | Convecção | 564,0 | 0,7 - 0,1 |

Para obter-se dos valores críticos de densidade de fluxo de calor, podem-se utilizar dois métodos: através da análise gráfica de ' $q \times t$ ', ou utilizando a Equação 4.7 para determinar q_{CR1} e a relação q_{CR2}/q_{CR1} para encontrar o valor de q_{CR2} .

De acordo com a Equação 4.7, considerando os parâmetros térmicos da equação à temperatura de saturação da água (temperatura de 100°C) [20], tem-se o

valor da primeira densidade crítica de fluxo de calor, q_{CR1} , que é de aproximadamente 2,2 MW/m². Em comparação com a análise gráfica, Figura 5.7, chega-se a este mesmo valor.

Para encontrar o valor da segunda densidade crítica de fluxo de calor, q_{CR2} , utilizou-se a razão q_{CR2}/q_{CR1} [20], vide seção 4.6.1, chegando ao valor de 0,44 MW/m². Este valor não coincide com o valor da análise gráfica, chegando a uma diferença de 0,23 MW/m². Isto se deve ao valor da razão entre as densidades críticas referirem-se a um processo de têmpera por imersão e não estar adequado ao ensaio Jominy.

5.4. Verificação da Geração de Bolhas na Fase de Ebulição

Seguindo as metodologias descritas nas seções 4.4.2 e 4.6 foram calculados os valores das densidades críticas de fluxo de calor, e com estes valores pode-se estimar a frequência e a velocidade de liberação das bolhas, através das Equações 3.6 e 3.7 da Seção 3.6.

De acordo com o volume de água que se choca com a superfície do corpo de prova, e a vazão expelida pelo tubo do dispositivo de ensaio, tem-se um acréscimo na frequência de liberação das bolhas, como mostra a Tabela 5.2. Foi considerado o diâmetro de bolha igual a 2,5 mm devido a ser um valor padrão aos aços em geral e pelo ensaio ter sido realizado à pressão atmosférica.

Tabela 5.2. Comparação dos parâmetros de bolha entre o ensaio e os valores teóricos.

| Valores | d0 (mm) | F (Hz) | W' (m/s) |
|--|---------|--------|----------|
| Ensaio Jominy | 2,5 | 168 | 0,420 |
| Referência teórica, têmpera por imersão [14] | 2,5 | 62 | 0,155 |

5.5. Comparação entre a Temperatura M_s e as Densidades Críticas de Calor

De acordo com a Figura 3.7 para a concentração de carbono presente no aço em estudo, tem-se um valor de temperatura aproximado de início da formação de martensita, em torno de 365°C [15, 25].

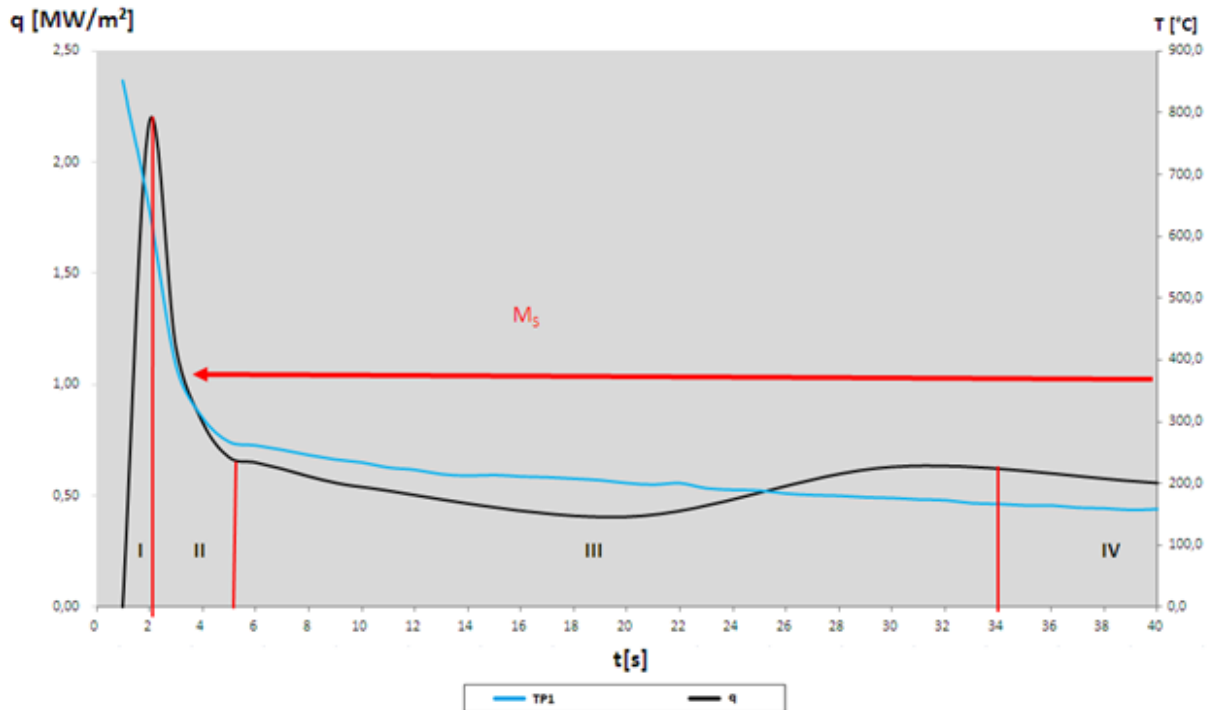


Figura 5.8. Gráfico da densidade de fluxo de calor x temperatura de resfriamento.

Então, associando os valores de densidade de fluxo de calor e os valores da curva de temperatura de resfriamento adquirida pelo termopar TP1, ilustrada pela Figura 5.8, pode-se dizer que, a temperatura de início de formação martensítica ocorre durante película de ebulição, após o choque térmico.

Observaram-se dois pontos em que a curva da temperatura de resfriamento cruza com a curva de densidade de fluxo de calor, o primeiro no valor de 280 °C, e o segundo ponto em torno de 175 °C, que podem representar as temperaturas de início e término de formação da martensita para o corpo de prova submetido ao ensaio Jominy.

5.6. Curva de 'h x tempo'

Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.7 e pela Equação 4.9, foram calculados o coeficiente de transferência de calor médio e também o coeficiente de transferência de calor em relação ao tempo, utilizando a função de aproximação da curva real de resfriamento, pelo período de 150 s como mostra a Figura 5.9.

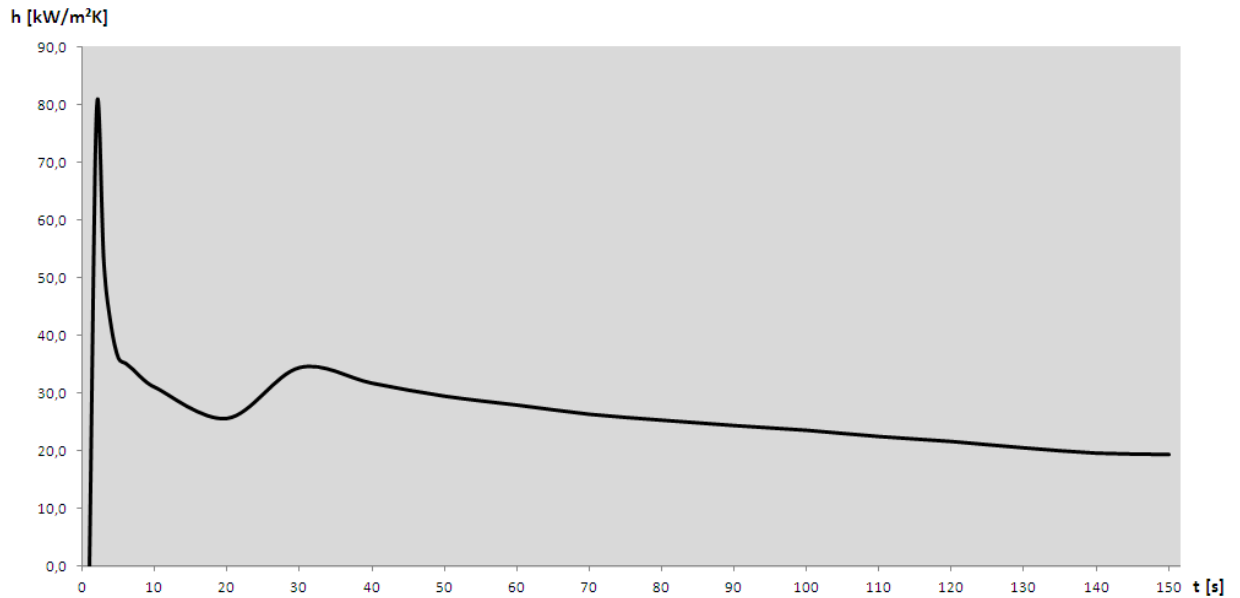


Figura 5.9. Coeficiente de transferência de calor no período de 150s.

A Figura 5.10 mostra o desenvolvimento do coeficiente de transferência de calor ao longo do período total de ensaio.

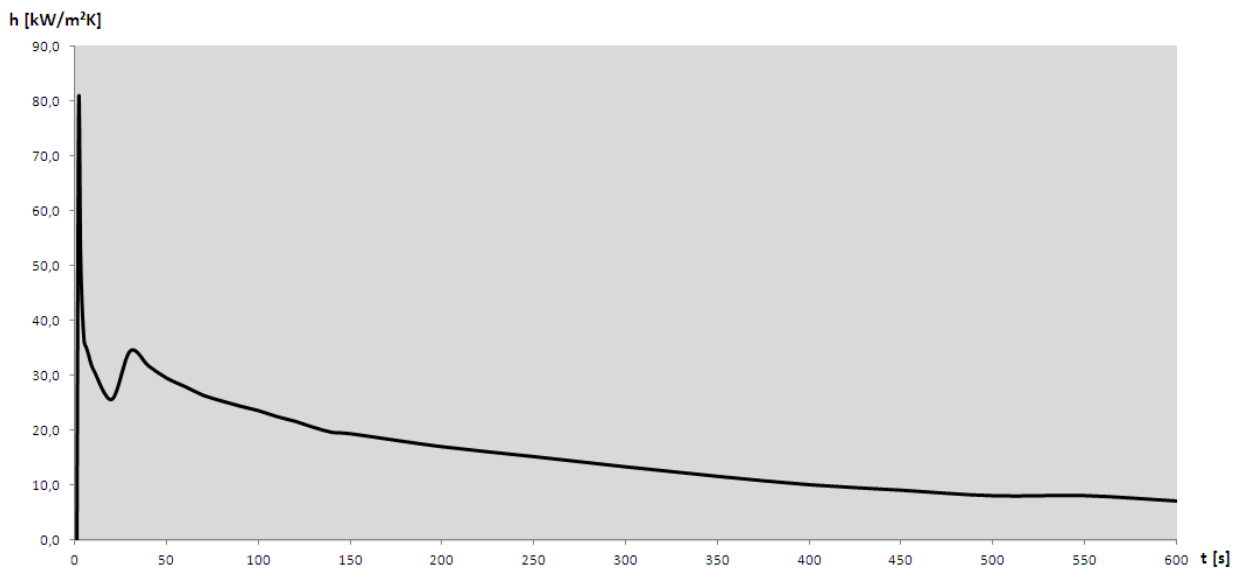


Figura 5.10. Coeficiente de transferência de calor durante o período total de ensaio.

O valor médio calculado para o coeficiente de transferência de calor durante os 600s de ensaio é de aproximadamente 15,4 kW/m²K (15.382,2 W/m²K). Este valor pode ser comparado com a curva do ensaio, na qual se tem um valor máximo de aproximadamente 81,0 kW/m²K e um valor no final do ensaio de aproximadamente 7,0 kW/m²K , como mostra a Figura 5.11.

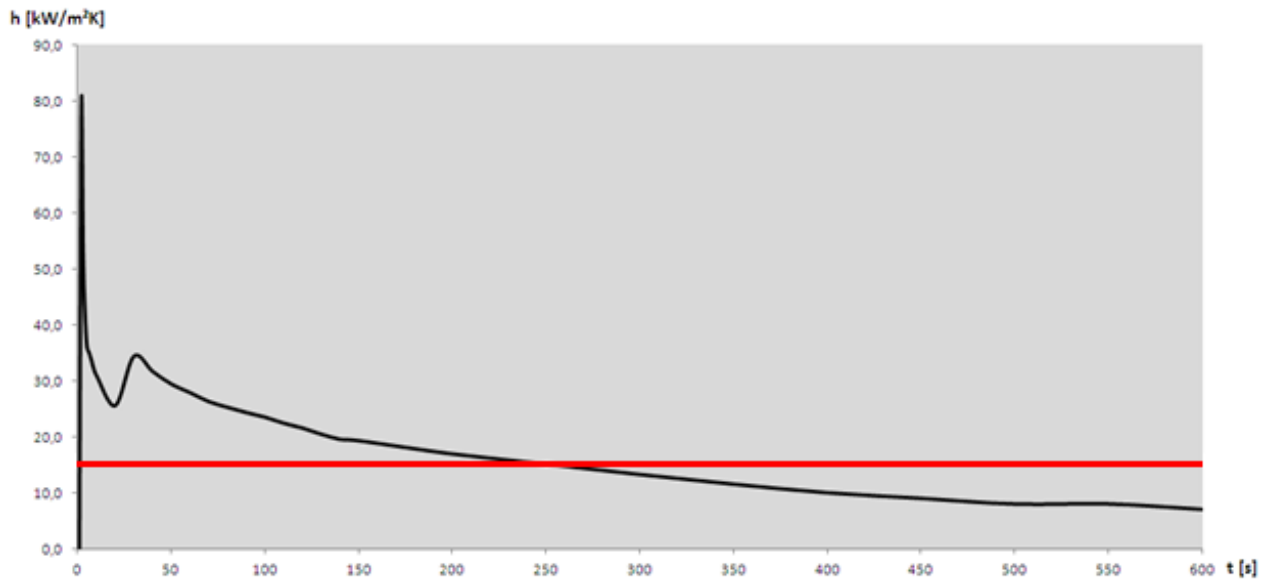


Figura 5.11. Gráfico comparando o coeficiente de transferência de calor constante em relação ao variável durante o ensaio.

5.7. Variação de Temperatura Encontrada na Execução do Ensaio Jominy

Foram realizados três ensaios de acordo com o procedimento descrito na Seção 4.4, mantendo a mesma temperatura de austenização de 850°C . As curvas de resfriamento dos três ensaios estão representadas pela Figura 5.12.

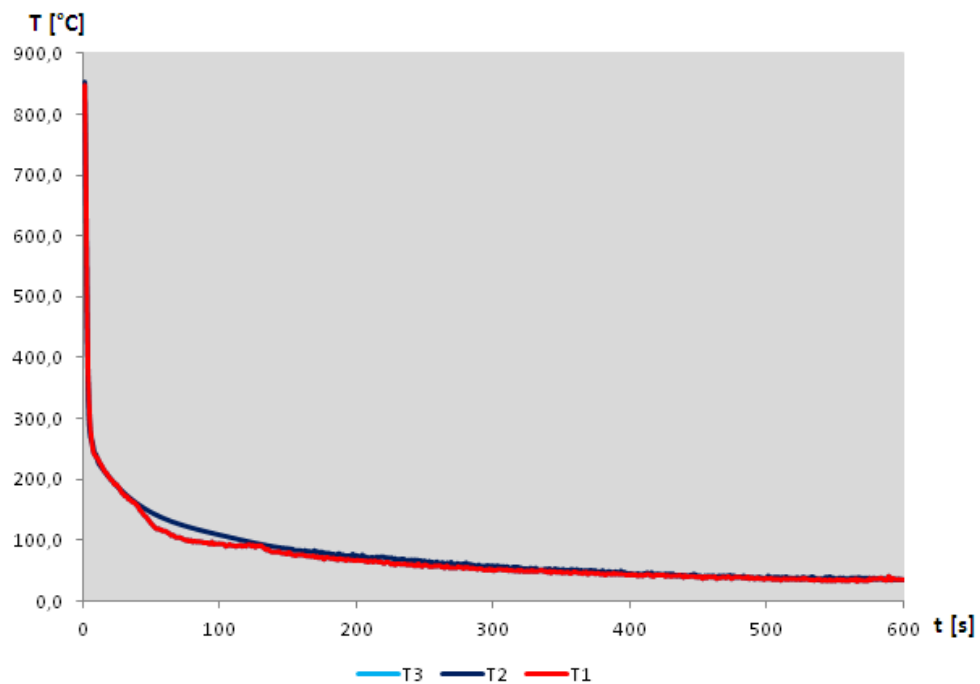


Figura 5.12. Curvas de resfriamento adquiridas referente aos ensaios realizados a 850°C de austenização.

Nota-se que com as três curvas de ensaio, a curva adquirida no terceiro ensaio, T3, coincidiu sobre a curva do segundo ensaio T2 e ficou sobreposta. A Tabela 5.3 descreve os desvios encontrados para as faixas de temperatura determinadas.

Tabela 5.3. Desvios de temperatura encontrados durante a repetibilidade dos ensaios.

| Faixa de temperatura (°C) | Desvio de temperatura (°C) | Frequência relativa (%) |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 600 - 850 | ±13,4 | 0,33% |
| 400 - 600 | ±14,0 | 0,33% |
| 200 - 400 | ±8,7 | 2,83% |
| 25 - 200 | ±10,3 | 96,5% |

Ponderando os valores encontrados têm-se um desvio na faixa de temperatura de 25°C a 850°C entre os 3 ensaios de ±10,3°C.

5.8. Incerteza de Medição

Foram calculadas as incertezas de medição para os valores de temperatura registrados, e também para os valores de densidade de fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor calculado, como mostram as Tabelas abaixo (Tabela 5.4 até a Tabela 5.7).

Tabela 5.4. Valores de incerteza de medição para a temperatura de austenitização.

| Faixa de Temperatura (°C) | Incerteza de Medição (°C) | Fator de abrangência (k) | Graus de liberdade (Veff) |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 350°C – 850°C | ± 17 | 2,0 | ∞ |
| 25°C – 350°C | ± 14 | 2,0 | ∞ |

Tabela 5.5. Valores de incerteza de medição para a temperatura de resfriamento.

| Faixa de Temperatura (°C) | Incerteza de Medição (°C) | Fator de abrangência (k) | Graus de liberdade (Veff) |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 15°C – 30°C | ± 2,9 | 2,0 | ∞ |
| 30°C – 350°C | ± 8,4 | 2,0 | ∞ |
| 350°C – 850°C | ±12 | 2,0 | ∞ |

Tabela 5.6. Valores de incerteza de medição para a densidade de fluxo de calor.

| Faixa de (MW/m) | Incerteza de Medição (MW/m ²) | Fator de abrangência (k) | Graus de liberdade (Veff) |
|-----------------|---|--------------------------|---------------------------|
| 0,25 - 0,87 | ± 0,02 | 2,0 | ∞ |
| 0,87 - 2,20 | ± 0,07 | 2,0 | ∞ |

Tabela 5.7. Valores de incerteza de medição para o coeficiente de transferência de calor.

| Faixa de Temperatura (kW/m ² K) | Incerteza de Medição (kW/m ² K) | Fator de abrangência (k) | Graus de liberdade (Veff) |
|--|--|--------------------------|---------------------------|
| 0 - 40 | ± 0,13 | 2,0 | ∞ |
| 40 - 82 | ± 0,32 | 2,0 | ∞ |

Uma vez que os ensaios de temperabilidade apresentaram características de repetibilidade, foi acrescentada às fontes de incertezas para o cálculo do coeficiente de transferência de calor, a contribuição do desvio padrão (análise tipo A) em relação ao número de ensaios realizados, com isso aumenta-se a confiabilidade do resultado, [60, 61, 62].

De acordo com o valor de coeficiente de calor médio encontrado, 15,4 kW/m²K, temos uma incerteza de medição representando 2,2% deste valor total, que pode variar entre 15,1 kW/m²K e 15,7 kW/m²K, de modo a não influenciar significativamente o resultado.

5.9. Ensaios Jominy Utilizando Outras Temperaturas de Austenitização

Foram realizados três ensaios para as temperaturas de austenitização de 800°C e 900°C, obedecendo à metodologia adotada pela Seção 4.4, ilustradas pelas Figuras 5.13 e 5.14.

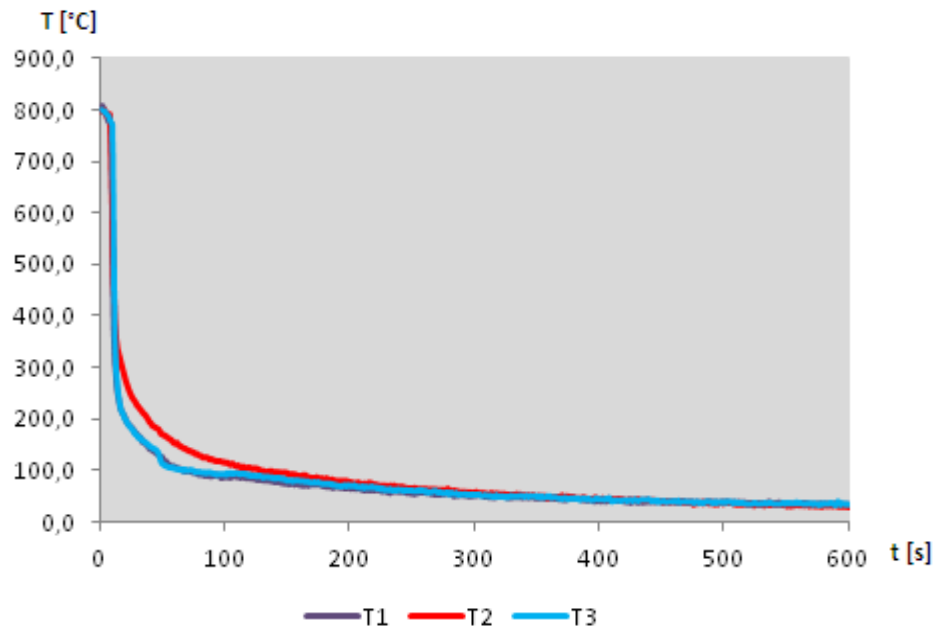


Figura 5.13. Curvas de resfriamento adquiridas referente aos ensaios realizados a 800°C de austenitização.

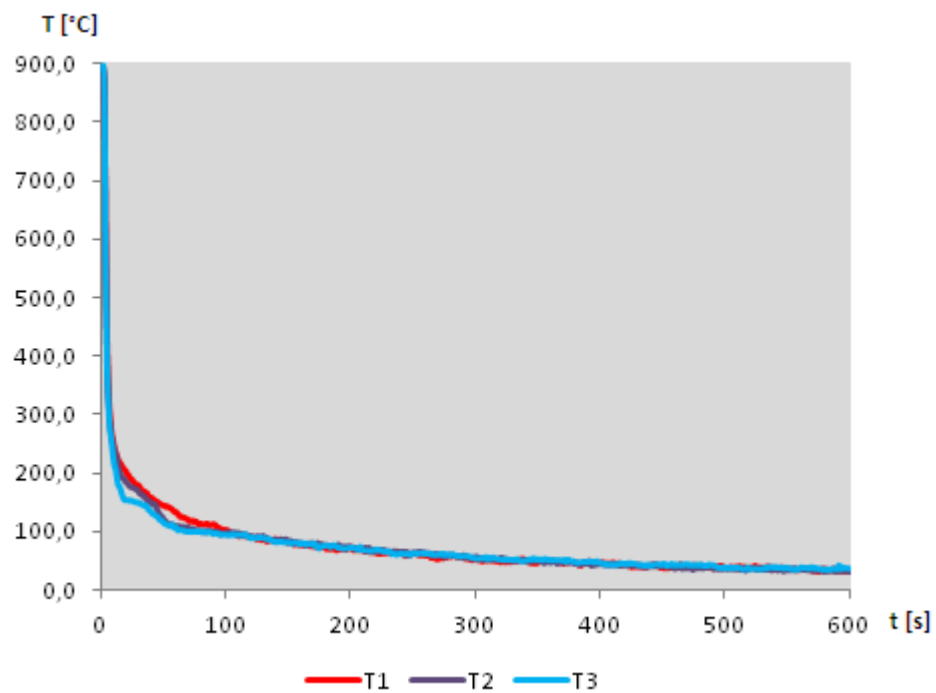


Figura 5.14. Curvas de resfriamento adquiridas referente aos ensaios realizados a 900°C de austenitização.

Ponderando os valores encontrados para as curvas de temperaturas têm-se um desvio na faixa de temperatura de 25 °C a 850 °C entre os três ensaios à 800 °C de $\pm 10,8$ °C e para os três ensaios à 900 °C, um desvio de $\pm 10,4$ °C.

5.9.1. Curva de Densidade de Fluxo de Calor x Tempo

Foram calculados os valores de densidade de fluxo de calor em relação ao tempo para cada temperatura de austenitização mencionadas na Seção 5.9, e gerado gráficos como mostram as Figuras 5.15 e 5.16.

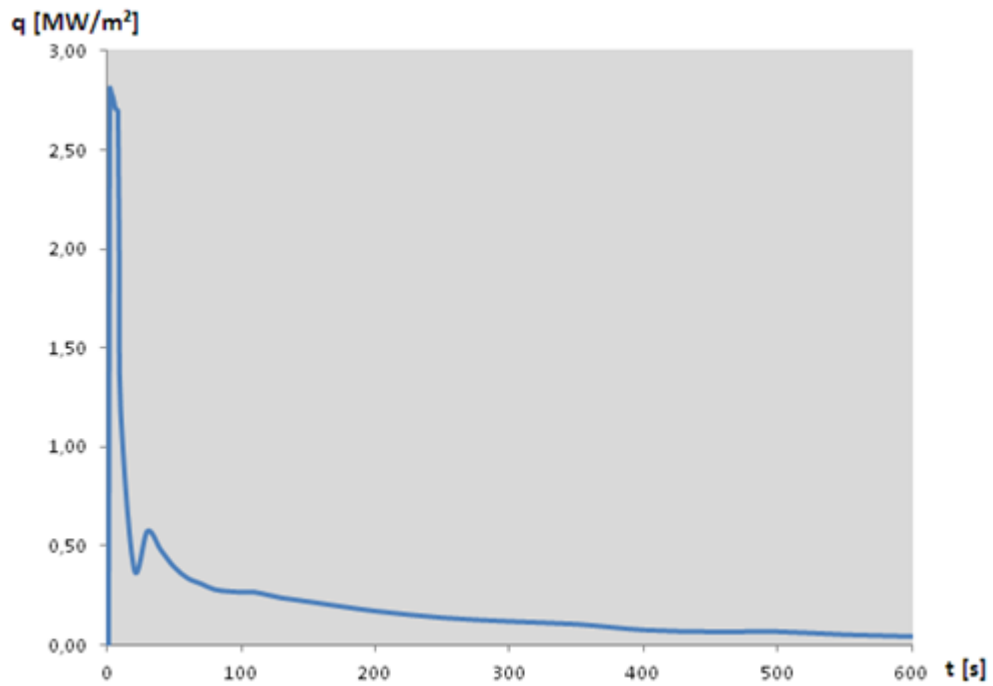


Figura 5.15. Curva de densidade de fluxo de calor associada ao ensaio de 800°C de austenitização.

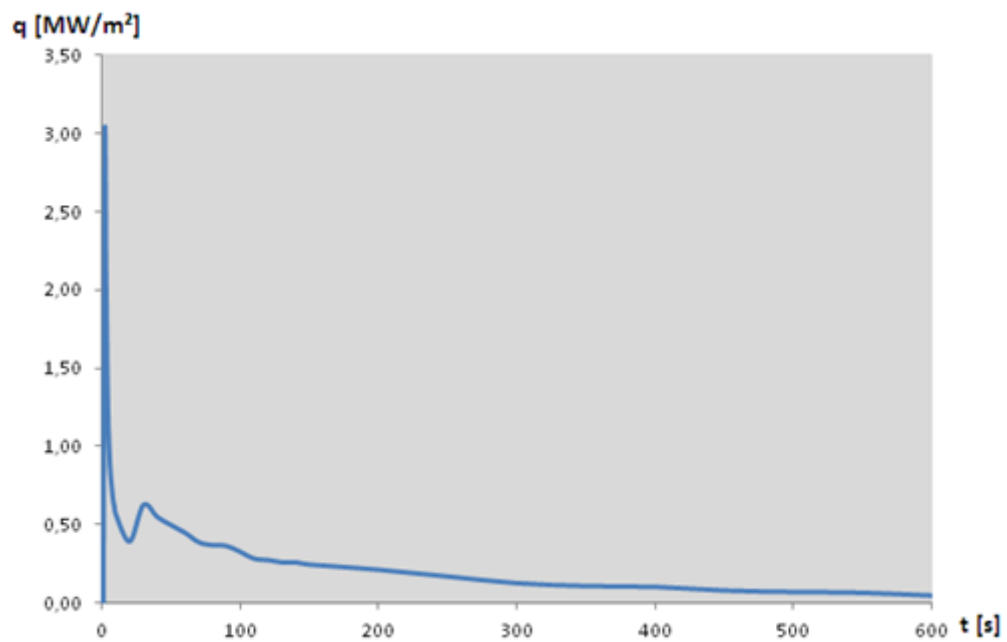


Figura 5.16. Curva de densidade de fluxo de calor associada ao ensaio de 900°C de austenitização.

5.9.2. Etapas de Transferência de Calor Associadas

As Tabelas 5.8 e 5.9 descrevem os períodos relacionados à densidade de fluxo de calor com o tempo, com as temperaturas de austenitização diferentes da utilizada na Seção 4.5.

Tabela 5.8. Associação de fases de acordo com a densidade de fluxo de calor, para o resfriamento a partir de 800°C

| Fase térmica | Descrição | Período de duração (s) | Faixa de densidade de fluxo de calor (MW/m ²) |
|--------------|-------------------|------------------------|---|
| I | Choque térmico | 2,5 | 0 – 2,8 |
| II | Filme | 7,0 | 2,8 – 1,4 |
| III | Ebulição Nucleada | 29,5 | 1,4 – 0,4 |
| IV | Convecção | 561 | 0,7 - 0,1 |

Tabela 5.9. Associação de fases de acordo com a densidade de fluxo de calor, para o resfriamento a partir de 900°C

| Fase térmica | Descrição | Período de duração (s) | Faixa de densidade de fluxo de calor (MW/m ²) |
|--------------|-------------------|------------------------|---|
| I | Choque térmico | 2,3 | 0 – 3,0 |
| II | Filme | 5,1 | 3,0 - 0,7 |
| III | Ebulição Nucleada | 32,7 | 0,7 - 0,5 |
| IV | Convecção | 559,9 | 0,5 - 0,1 |

5.9.3. Coeficiente de Transferência de Calor

Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.7 e pela Equação 4.9, foi calculado o coeficiente de transferência de calor médio para as temperaturas em análise e também o coeficiente de transferência de calor em relação ao tempo, como mostram as Figuras 5.17 e 5.18.

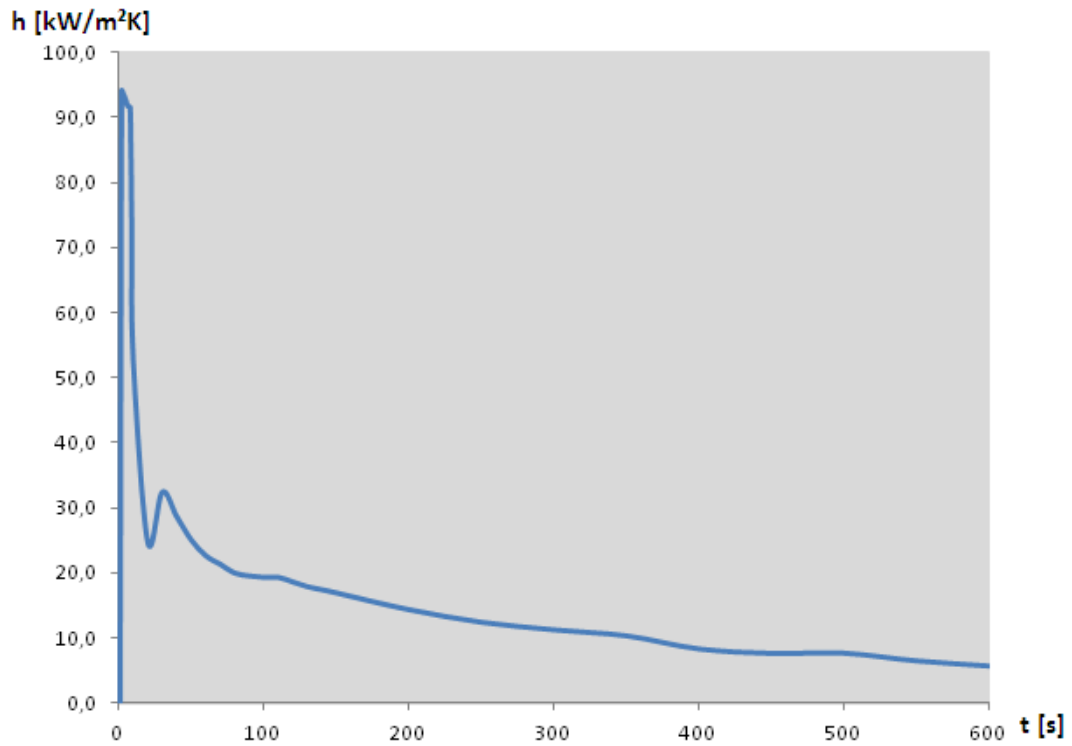


Figura 5.17. Coeficiente de transferência de calor durante o período total de ensaio na temperatura de 800°C de austenitização.

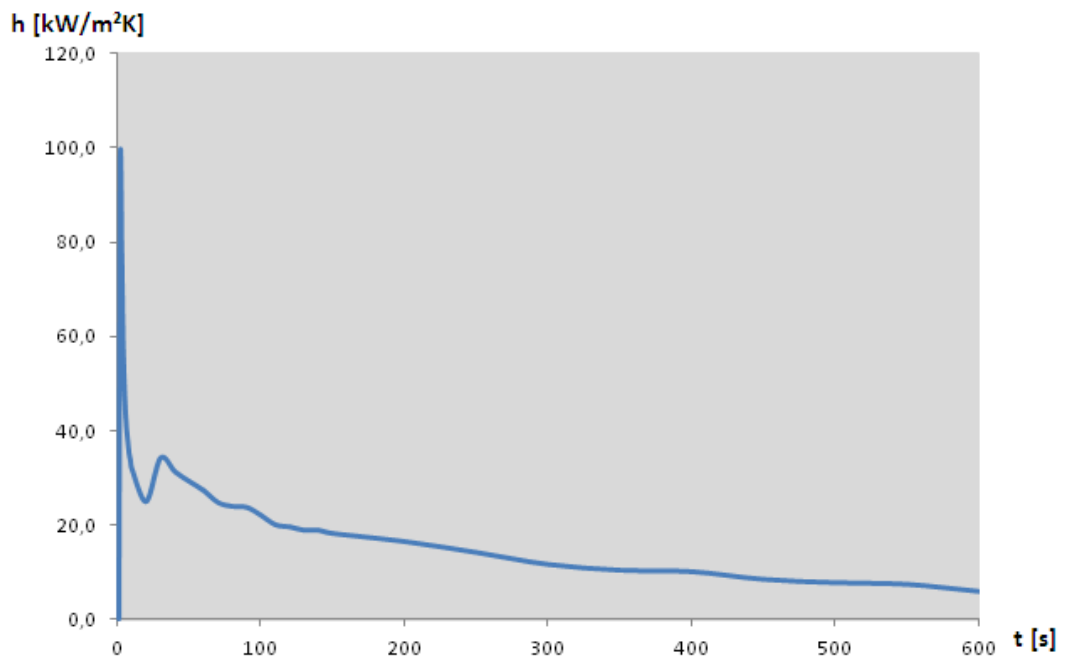


Figura 5.18. Coeficiente de transferência de calor durante o período total de ensaio na temperatura de 900°C de austenitização.

O valor médio calculado para o coeficiente de transferência de calor durante os 600s de ensaio para a temperatura de austenitização a 800°C é de 14,1kW/m²K (14.093,6 W/m²K) e para 900°C é de 14,6kW/m²K (14.612,8 W/m²K).

5.10. Simulação do Coeficiente de Transferência de Calor a 850°C.

O procedimento utilizado na Seção 4.7 para obter o coeficiente de transferência de calor a partir das curvas experimentais, de acordo com as Equações 4.10 e 4.11, foi utilizado para comparação das curvas simuladas pelo aplicativo computacional.

As curvas de resfriamento experimentais utilizando a curva do coeficiente de transferência de calor calculado foram comparadas com as curvas obtidas via simulação utilizando a equação retirada do coeficiente calculado, conforme são mostrados nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21. Pode-se observar uma aproximação das curvas simuladas em relação às curvas experimentais.

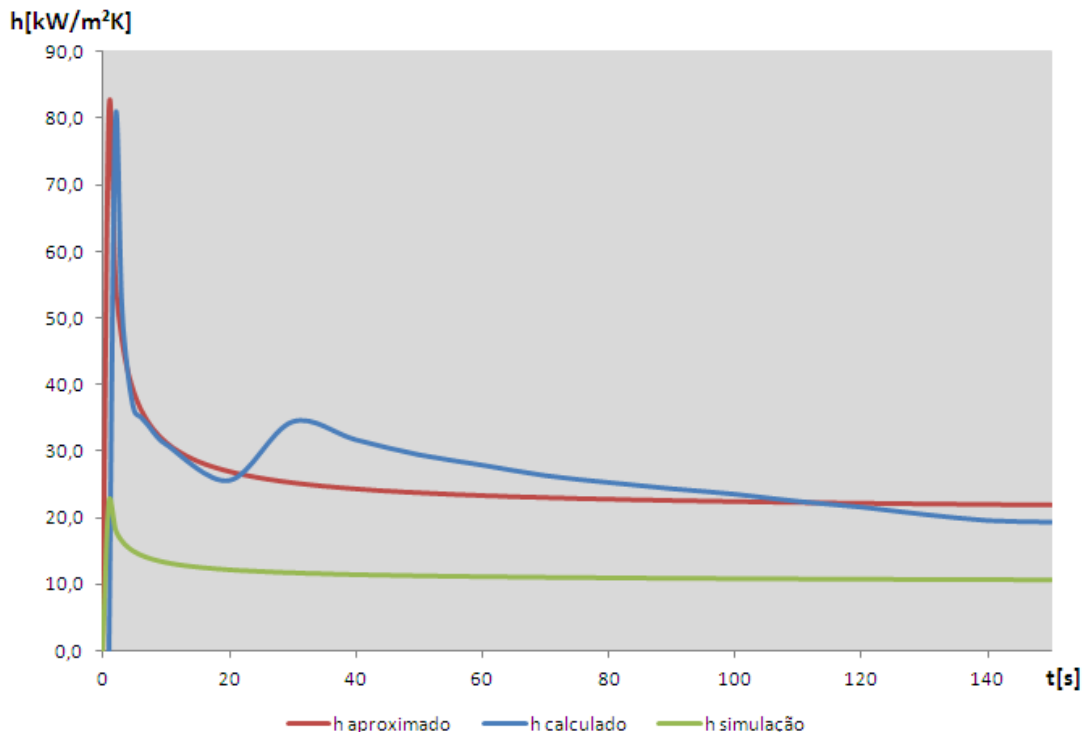


Figura 5.19. Coeficiente de transferência de calor aproximado, que será utilizado na simulação.

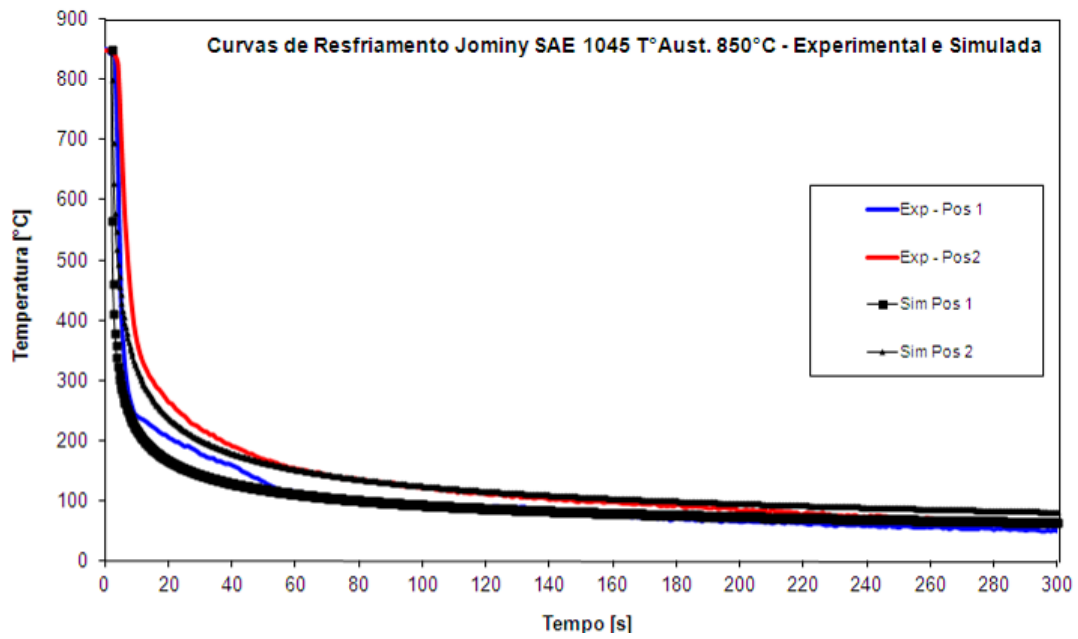


Figura 5.20. Primeira simulação utilizando o coeficiente de transferência de calor aproximado.

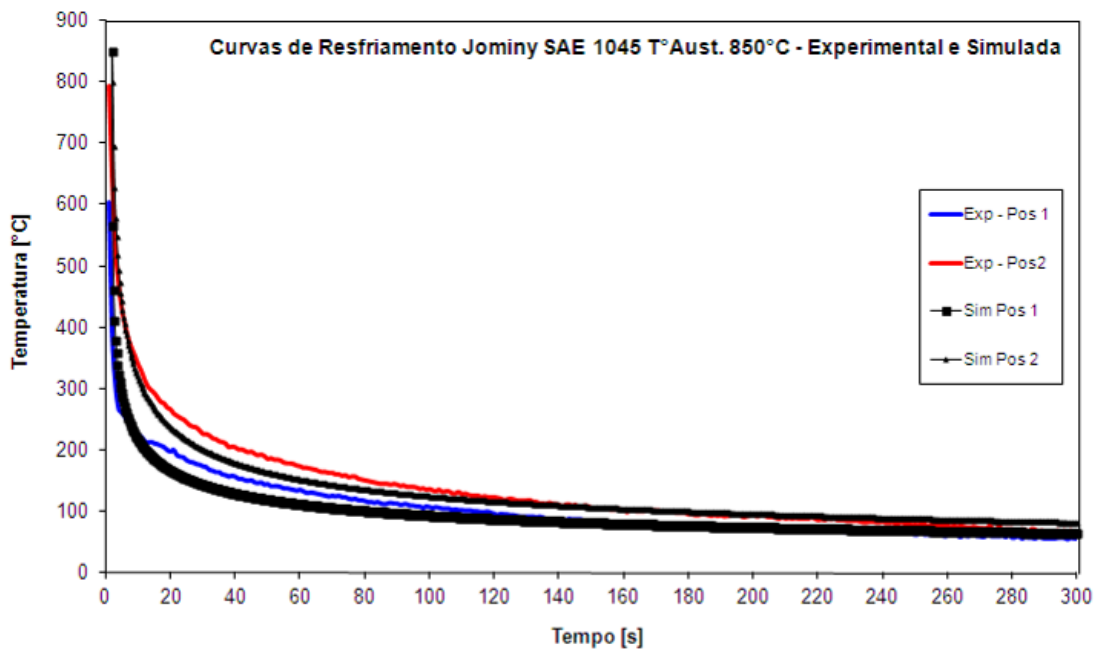


Figura 5.21. Segunda simulação utilizando o coeficiente de transferência de calor aproximado.

6. CONCLUSÕES

Sobre os resultados obtidos a partir dos ensaios Jominy para o aço ABNT/SAE 1045 pode-se concluir que:

- Devido à rápida troca de água durante o ensaio Jominy, tem-se uma rápida formação de núcleos de ebulição, influenciando na frequência de geração das bolhas na interface metal/água;
- Para verificação das fases de transferência de calor e cálculo das densidades de fluxo de calor, há uma diferença entre estimar estes valores através de retas tangentes à curva gerada pelas fases no gráfico $\ln(T-T_M)$, e o cálculo de q_{CR2} através de q_{CR1} . Esta diferença de valores chega a $0,23 \text{ MW/m}^2$;
- Quanto às etapas de transferência de calor, estas se alteram em função da temperatura de austenitização. Na temperatura de $850 \text{ }^\circ\text{C}$, o choque térmico é mais brando em relação às outras temperaturas de austenitização avaliadas. Nota-se que a fase de filme de ebulição tem duração menor e uma ebulição nucleada maior, ocorrendo maior estabilidade na extração de calor;
- Notou-se também que além da temperatura de austenitização de $850 \text{ }^\circ\text{C}$, as outras temperaturas de austenitização ensaiadas, a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ e $900 \text{ }^\circ\text{C}$, não afetam a repetibilidade do ensaio Jominy.
- Na formação da fase martensita, associando os valores de densidade de fluxo de calor e os valores da curva de resfriamento a partir de 850°C , pode-se dizer que:
 - esta fase ocorre durante a transição do filme de ebulição e a ebulição nucleada;
 - após o início do ensaio, leva aproximadamente 3 s para ocorrer a sua formação, considerando como referência as curvas de temperatura de início e término da

formação martensítica e isto se for mantido os valores de temperatura de arrefecimento, e temperatura de austenitização;

- Quanto ao término da formação martensítica se dá no período de convecção.

- Para as temperaturas de austenitização de 800 °C e 900 °C notou-se uma variação no tempo de formação da martensita, de acordo com a variação dos valores de temperatura e as fases de transferência de calor;

- As curvas do coeficiente de transferência de calor adquiridas apresentaram concordância no que se referem aos valores teóricos. Os valores apresentados na teoria, geralmente são informados como uma constante, e o que este trabalho mostra é a variação do coeficiente de calor pelo tempo.

- Têm-se uma incerteza de medição baixa em relação ao coeficiente de calor medido, através da temperatura de austenitização de 850 °C, de aproximadamente 320 W/m²K, em torno de 2,2% do valor teórico. Isso mostra que a instrumentação adotada está condicionada ao ensaio realizado;

- Quanto à repetibilidade do ensaio, para a temperatura de austenitização de 850 °C tem-se um erro de aproximadamente $\pm 10,3$ °C, um valor baixo em relação à faixa de temperatura utilizada para medição;

- As expressões numéricas obtidas através da aproximação polinomial permitem observar o comportamento das etapas de transferência de calor à medida que a taxa de resfriamento varia durante o ensaio;

- Em relação à simulação computacional, com a equação que descreve o valor transitório de 'h(t)', pode-se observar uma aproximação das curvas simuladas em relação às curvas experimentais;

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de temperabilidade Jominy instrumentados com termopares aplicados em aços de outras séries seguindo a mesma metodologia proposta para o aço ABNT 1045, para correlacionar os valores das fases de transferência de calor obtidas neste trabalho.

- Verificar a influência da temperatura do refrigerante na estrutura do aço, e as mudanças de fase do aço em relação às mudanças de fase de transferência de calor, com possível determinação do tempo de formação destas fases.

- Desenvolver uma metodologia para obter o valor de pressão sonora de acordo com a mudança de tamanho da bolha de vapor gerado durante a fase de ebulição nucleada.

- Implementar as expressões numéricas obtidas experimentalmente, no modelo matemático para o cálculo de porcentagem de fases e previsão de dureza a partir das taxas de resfriamento simuladas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BORTOLETO, Eleir Mundim. Modelamento Numérico-Computacional das Transformações de Fase nos Tratamentos Térmicos de Aços. São Paulo, SP, Brasil. Ano 2010. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) USP – Universidade de São Paulo.
- [2] KOBASKO N. I. Duration of the Transient Nucleate Boiling Process and Its Use for the Development of New Technologies. Journal of ASTM International, Vol. 8, No. 7. Julho 2011.17p.
- [3] S. K. ALI, M. S. HAMED, and M. F. LIGHTSTONE. An Efficient Numerical Algorithm for the Prediction of Thermal and Microstructure Fields during Quenching of Steel Rods. Journal of ASTM International. Pennsylvania, Estados Unidos, 10 de Setembro de 2008. Vol. 5, No. 10. 18p.
- [4] LUO X., TOTTEN G. E. Analysis and Prevention of Quenching Failures and Proper Selection of Quenching Media: An Overview. Journal of ASTM International, Vol. 8, No. 4 Paper. April 2011. 29p
- [5] SMOLJAN Božo, ILJKIĆ Dario, TRAVEN Furio, and MRŠA Josipa. Mathematical Modeling and Computer Simulation of Fatigue Properties of Quenched and Tempered Steel. Journal of ASTM International, Vol. 8, No. 1 November 2010. 8 p.
- [6] SOURMAIL T., GARCIA-MATEO C. A Model for Predicting the Ms Temperatures of Steels. Science Direct – Elsevier. Computational Materials Science. Ano 2005. p213-218.

- [7] BESKOW, Arthur Bortolin. Estudo da Solidificação Unidirecional Ascendente para obtenção de Estruturas Colunares Grosseiras. Porto Alegre, RS, Brasil. Ano 2008. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- [8] NUNURA, César Rolando Nunura. Correlação Numérico-Experimental da microestrutura, taxa de resfriamento e características mecânicas do aço ABNT– 1045. Porto Alegre, RS, Brasil. Ano 2009. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [9] XAVIER, Carlos Roberto. Projeto e Construção do Aparato Jominy: Uma Contribuição para a Pesquisa no UniFOA. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, RJ, Brasil. Edição nº 10, agosto/2009. p15-18.
- [10] SOUZA, Douglas Antunes de. Análise da Dureza e Microestrutura Formada Após Ensaio de Temperabilidade “Jominy”. Anuário de Produção de Iniciação Científica Discente. Valinhos, SP, Brasil. Anhanguera Educacional S.A. Volume XI nº 12. Março de 2009. p 735-752.
- [11] WALTER E. JOMINY, Detroit. Hardenability Test. United States Patent Office. Número serial 291,149. Data de aplicação: 21 de agosto de 1939. Número de Patente 2,266,322. Data de publicação 16 de dezembro de 1941.3p.
- [12] CRUZ, Luiz Carlos da. Avaliação da Capacidade do Processo de Fabricação em Atender Especificação de Temperabilidade para o Aço SAE 1548M. Belo Horizonte, MG, Brasil. Ano 2005. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais.
- [13] RAVNIK Franc and GRUM Janez. Heat Transfer Stages Recognition by Boiling Acoustic During Quenching. Journal of ASTM International, Vol. 8, No. 1 December 2010. 13p.

- [14] KOBASKO N.I., ARONOV M.A., POWELL J.A. and TOTTEN G.E. Intensive Quenching Systems: Engineering and Design. 1^aed. Newburyport, MA. November, 2010. 234p.
- [15] SAHAY Satyam S., MOHAPATRA Goutam, and TOTTEN George E. Overview of Pearlitic Rail Steel: Accelerated Cooling, Quenching, Microstructure, and Mechanical Properties. Journal of ASTM International, Vol. 6, No. 7 June 2009. 26p.
- [16] LISCIC Bozidar, SINGER Sasa, and BEITZ Hartmut. Dependence of the Heat Transfer Coefficient at Quenching on Diameter of Cylindrical Workpieces. Journal of ASTM International, Vol. 8, No. 7 July 2011. 9p.
- [17] CHENG H., HUANG, X., and XIE J. Comparison of Surface Heat Transfer Coefficients Between Various Diameter Cylinders During Rapid Cooling. J. Mater. Process. Technol, Elsevier. Vol. 138. Ano 2003, p. 399–402.
- [18] KOBASKO Nikolai I. Correlation Between Chemical Composition of Steel, Optimal Hardened Layer, and Optimal Residual Stress Distribution. Journal of ASTM International, Vol. 8, No. 3 March 2011. 16p.
- [19] PENHA Renata N., CANALE Lauralice C. F., TOTTEN George E., SARMIENTO Gustavo S., and VENTURA Jaime M. Simulation of Heat Transfer and Residual Stresses from Cooling Curves Obtained in Quenching Studies. Journal of ASTM International, Vol. 3, No. 5 March 2006. 14p.
- [20] KOBASKO N. I., MOSKALENKO A. A, TOTTEN G. E., and WEBSTER, G. M. Experimental Determination of the First and Second Critical Heat Flux Densities and Quench Process Characterization. ASM Int., Vol. 6, Ano 1997, p. 93–101.
- [21] FARENZENA, Bruno Avila, HAUSER, Eliete Biasotto. Resolução de um Modelo Matemático das Condições de Resfriamento de um Corpo de Prova Submetido ao Ensaio Jominy por Elementos Finitos e Separação de Variáveis. In: XXXIII Congresso Nacional de Matemática aplicada e Computacional, CNMAC 2010. PUCRS, Abril de 2010, p1140-1141.

[22] ZENG Guang-yi. Cooling Characteristic Test of Quenching Media. Journal of ASTM International, Vol. 5, No. 8 August 2008. 10p.

[23] CAKIRA Mehmet, OZSOY Abdullah. Investigation of the Correlation Between Thermal Properties and Hardenability of Jominy Bars Quenched with Air–Water Mixture for AISI 1050 Steel. Science Direct, Elsevier. Vol. 32. December 2010. Pages 3099-3105

[24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test Methods for Determining Hardenability of Steel, A255-10, Pennsylvania, United States, JUNE 2010. 26p.

[25] BHADSHIA, Harry and HONEYCOMBE, Robert. Steels Microstructure and Properties. Third edition. Published by Elsevier Ltd. Ano 2006. 360p.

[26] DINIY G., NAJAZADEH A., MONIR-VAGHE S.M. and UEJI R. Grain Size Effect on the Martensite Formation in a High-Manganese TWIP Steel by the Rietveld Method. Science Direct, Elsevier. Vol. 26. July 6, 2009. p181-186.

[27] JUNCEDA A. García, CAPDEVILA C., CABALLERO F.G., ANDRÉS C. García de. Dependence of Martensite Start Temperature on Fine Austenite Grain Size. Materialia Research Group. Ano 2011. 7p.

[28] GARCIA-MATEO C., SOURMAIL T., CABALLERO F. G., CAPDEVILA C. and ANDRÉS C. García de. New Approach for the Bainite Start Temperature Calculation in Steels. Institute of Materials, Minerals and Mining. Vol. 21 No 8. July 2004. p934-940.

[29] INCROPERA, DEWITT, BERGMAN, LAVINE. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Sexta edição. Editora Wiley. Ano 2006. 997p.

[30] GHOSH G. and OLSON G.B. Computational Thermodynamics and the Kinetics of Martensitic Transformation. Journal of Phase Equilibria Vol. 22 No. 3 2001. p199-207.

- [31] ASPRINO M. C. PAYARES, KATSUMOTO H., and LIU S. Effect of Martensite Start and Finish Temperature on Residual Stress Development in Structural Steel Welds. WELDING JOURNAL. Vol. 87. September 16, 2008. p279-289.
- [32] PALUMBO M. Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. ScienceDirect, Elsevier. Vol. 32, August 2008. p693-708.
- [33] DOS SANTOS, Rezende Gomes. Transformações de Fases em Materiais Metálicos. Editora UNICAMP. Ano 2006. 423p.
- [34] LEVITAS¹ V.I., IDESMAN A.V. and OLSON G.B., Continuum Modeling of Strain-Induced Martensitic Transformation at Shear-Band Intersections. Acta mater. Elsevier Science Ltda. Great Britain. Vol. 47, No. 1. Ano 1999. p. 219-233.
- [35] BHADSHIA H. K. D. H. Geometry of Crystals. Second Edition, The Institute of Metals. Published 2001, updated 2006. 109p.
- [36] KAUFMANN S, NIEMANN R, THERSLEFF T, RÖßLER UK, HECZKO O, BUSCHBECK J, HOLZAPFEL B, SCHULTZ L and FÄHLER S. Modulated Martensite: Why it Forms and Why it Deforms Easily. New Journal of Physics. Vol.13. May 201. 24p.
- [37] GUIMARÃES J. R. C. RIOS P. R. Martensite Start Temperature and the Austenite Grain-Size. Springer Science Business Media. Vol. 45, December 2009. p1074-1077.
- [38] ZHAO Lie, TEGUS Ojiyed, BRÜCK Ekkes, VAN DIJK Niels H., KRUIJVER Suzelotte O., SIETSMA Jilt and VAN DER ZWAAG Sybrand. Magnetic Determination of the Thermal Stability of Retained Austenite in TRIP Steel. Disponível em: http://www.tudelft.nl/live/binaries/87371058-b41c-4341-8537-d33124083271/doc/TRIP_Conf_Zhao.pdf> Acesso em: 15 de junho de 2011. P71-74.

- [39] MAALEKIAN M., KOZESCHNIK E., CHATTERJEE S. and BHADSHIA H. K. D. H. Mechanical Stabilisation of Eutectoid Steel. *Materials Science and Technology* Vol.23 No. 5. Ano 2007.p610-612.
- [40] JONAS John J., QUELENNEC Xavier, JIANG Lan, MARTIN Etienne. The Avrami Kinetics of Dynamic Recrystallization. Elsevier Ltd. Vol. 57. Available online 26 March 2009. p2748-2756.
- [41] SAUNDERS N., GUO Z., LI X., MIODOWNIK A.P. and SCHILLÉ J.-P. The Calculation of TTT and CCT Diagrams for General Steel. Disponível em: <http://www.sentesoftware.co.uk/media/2540/ttt_cct_steels.pdf> Acesso em: 14 de julho de 2011.
- [42] XIAO Bowang, WANG Gang, SISSON Richard D., Jr., and RONG Yiming. Influencing Factors of Heat Transfer Coefficient in Air and Gas Quenching. *Journal of ASTM International*, Vol. 8, No. 4 April 2011. 9p.
- [43] YANG Hong-Seok and BHADSHIA H. K. D. H. Uncertainties in Dilatometric Determination of Martensite Start Temperature. *Institute of Materials, Minerals and Mining*. Vol 23, No 5. November 2006. p556-560.
- [43] KITTEL, Charles. *Introdução à Física do Estado Sólido 6ª ed.* Brasil. Editora LTC Edição. 2006. 598p.
- [44] BIANCE Anne-Laure, CLANET Christophe and QUERE David. Leidenfrost Drops. *Physics of Fluids*. Vol.15, No 6. Junho 2003. p1632-1637.
- [45] WALKER Jearl. Boiling and the Leidenfrost Effect. Cleveland State University Disponível: http://darkwing.uoregon.edu/~linke/papers/Walker_leidenfrost_essay.pdf Acesso em: 09 de agosto de 2011.
- [46] NAGAI Niroh, NISHIO Shigefumi. Leidenfrost Temperature on an Extremely Smooth Surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier. Ano 1996. Vol 12. p373-379.

- [47] SOZBIR N. , CHANG Y. W., YAO S. C. Heat Transfer of Impacting Water Mist on High Temperature Metal Surfaces. ASME. Vol. 125, Fevereiro 2003. p70-74.
- [48] ROBIDOU Herveline , AURACHER Hein , GARDIN Pascal , LEBOUCH Michel. Controlled Cooling of a Hot Plate with a Water Jet Experimental Thermal and Fluid. Science Direct, Elsevier. Vol. 26, Ano 2002. p123–129 .
- [49] KARL A. and FROHN A. Experimental Investigation of Interaction Processes Between Droplets and Hot Walls. Physics of Fluids. Vol 12, No 4. Abril 2000. p785-795.
- [50] CANALE Lauralice C. F., LUO Xinmin, YAO Xin, and TOTTEN G. E. Quenchant Characterization by Cooling Curve Analysis. Journal of ASTM International, Vol. 6, No. 2. January 2009.29p.
- [51] ŞİMŞİR Caner , GÜR C. Hakan. A Review on Modeling and Simulation of Quenching. Journal of ASTM International, Vol. 6, No. 2 Janeiro 2009. 29p.
- [52] DOROFEEV B.M., VOLKOVA V.I. The effect of Evaporation and Condensation Processes in Vapor Bubbles upon Hydrodynamic Sound-Forming at Boiling in Different Conditions. XVI Session of the Russian Acoustical Society Moscow, November 14-18, 2005. p101-105.
- [53] KOBASKO, Nikolai. An Explanation of Possible Damascus Steel Manufacturing Based on Duration of Transient Nucleate Boiling Process. Disponível em: <www.naun.org/journals/mechanics/20-642.pdf> Acesso em: 19 de julho de 2011. p81-86.
- [54] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, STP470. Philadelphia, United States. AUGUST 1970. 249p.
- [55] INTERNATIONAL STANDARD CEI IEC. Thermocouples - Part 1 : Reference tables. IEC 584-1. Second edition. Genebra, Suíça.1995. 160p.

- [56] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Termopares – Tabelas de Referência, ABNT NBR 12771, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. JULHO 1999. 64p.
- [57] POLLOCK, Daniel D. Thermoelectricity – Theory Thermometry Tool, STP 852 (ASTM). Philadelphia, United States. JANUARY 1985. 295p.
- [58] INTERNATIONAL STANDARD CEI IEC. Thermocouples - Part 2: Tolerances IEC 584-2. Genebra, Suíça. 1982. 18p.
- [59] IOPE Instrumentos de Precisão Ltda. Considerações Gerais sobre os Termopares e Cabos Compensados. Disponível em: <http://www.iope.com.br/3if3_consid_gerais.htm>. Acesso em: 30 de junho de 2011.
- [60] BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Metrologia, INMETRO. Expressão da incerteza de medição. Norma NIT-DICLA-021. Revisão 04 de fevereiro de 2010. 30p. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/DICLA/NIT/NIT-DICLA-21_04.pdf>. Acesso em: 24 de junho de 2011.
- [61] BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Metrologia, INMETRO. Orientação para a expressão da melhor capacidade de medição nos escopos de acreditação de laboratórios de calibração - DOQ-CGCRE-011. Revisão 04 de fevereiro de 2010. 6p. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-11_01.pdf>. Acesso em: 24 de junho de 2011.
- [62] BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Metrologia, INMETRO. Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. Terceira Edição Brasileira. Edição revisada (agosto de 2003). ABNT, INMETRO.
- [63] BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Metrologia, INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008). 1ª Edição Brasileira. Rio de Janeiro, 2009. 78 p. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/VIM_2310.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2011.

[64] REDE METROLÓGICA RS. Incerteza de Medição: Guia Prático do Avaliador de Laboratórios. Procedimento do Sistema de Gestão da Qualidade. Revisão 03. Fevereiro de 2009. Disponível em: <www.redemetrologica.com.br/ftp/dados/avaliacao/RM68rev03.pdf.> Acesso em: 11 de agosto de 2011.

[65] REDE METROLÓGICA RS. RM 68 Incerteza de Medição: Guia Prático do Avaliador. Ano 2008. 32p. Disponível em: http://www.redemetrologica.com.br/ftp/dados/rec/DOC_53.pdf. Acesso em: 11 de agosto de 2011.

[66] Aços ITAPEMA. Especificação Técnica para Aços Carbonos. Disponível em: http://www.acositapema.com.br/esp_tecnica.asp. Acesso em 13 de agosto de 2011.

[67] Lynx Tecnologia Eletrônica. Catálogo de Aquisição de Dados Lynx. Data de emissão Março/2011. Disponível em: <http://www.lynxtec.com.br/eq_dados.htm.> Acesso em: 12 de abril de 2011.

[68] Lynx Tecnologia Eletrônica. Tutorial de Aquisição de Dados. Disponível em: <http://www.lynxtec.com.br/tutor_aqd1.htm> Acesso em: 04 de julho de 2011.